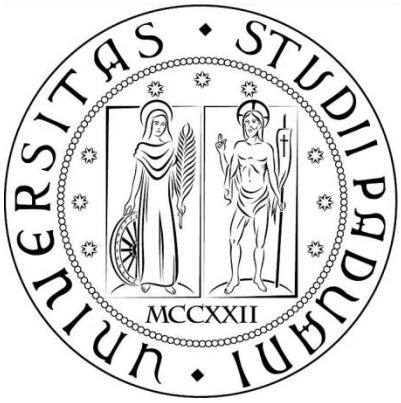
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

SCUOLA DI INGEGNERIA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE



TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA MECCANICA

ANALISI DEL DANNEGGIAMENTO E STIMA DELLA VITA A FATICA DI GIUNZIONI STAMPATE IN MATERIALE COMPOSITO

Relatore : Dott. Ing. Mauro Ricotta

Laureando : Alessandro Vescovo

ANNO ACCADEMICO 2014-2015

Indice

Sommario ..... **I**

Introduzione ..... **III**

Capitolo 1: GIUNZIONI STEPPED-LAP **1**

1.1 Giunti meccanici e giunti incollati 2

1.2 Giunti *co-cured* 6

1.3 Tessuti pre-impregnati in fibra di carbonio 8

1.4Descrizione dei provini utilizzati 9

1.5 Attrezzatura e metodologia di prova 11

Capitolo 2: CRITERIO ENERGETICO E DEFINIZIONE DI G **15**

2.1 Definizione di G 16

2.2 Il criterio energetico di Griffith 17

2.3 Equazione di Griffith modificata 20

2.4 Strain Energy Release Rate G 21

2.5 Relazione tra K_{IC} e G_{IC} 25

2.6 Il metodo VCCT per il calcolo di G 26

Capitolo 3: COSTRUZIONE DEL MODELLO AD ELEMENTI FINITI **29**

3.1 Costruzione del modello FEM 30

3.2 Analisi geometricamente non lineari 38

3.3 Confronto tra *lay-up* $[0]_8$ e $[0_2/45_2]_s$ 50

3.4 Confronto tra *lay-up* $[0_2/45_5/0]$ e $[0_2/45_2]_s$ 58

Capitolo 4: PROVE SPERIMENTALI E ANALISI DEL DANNEGGIAMENTO **63**

4.1 Esecuzione delle prove sperimentali 64

4.2 Provini testati 66

4.3 Giunti stepped con lay-up $[0]_8$ soggetti ad alto carico 70

4.3.1 Provino S08_14 71

4.3.2 Provino S08_15 79

4.4 Giunti stepped con lay-up [0]8 soggetti a medio carico 84
4.4.1 Provino S08_12 84
4.4.2 Provino S08_13 90
4.5 Giunti stepped con lay-up $[0]_8$ soggetti a basso carico 96
4.5.1 Provino S08_17 96
4.5.2 Provino S08_16 103
4.6 Giunti stepped con lay-up $[0_2/45_5/0]$ 109
4.7 Giunti stepped con lay-up $[0_2/45_5/0]$ soggetti ad alto carico 111
4.7.1 Provino SQI5_01 111
4.7.2 Provino SQI5_02 118
4.8 Giunti stepped con lay-up $[0_2/45_5/0]$ soggetti a medio carico 120
4.8.1 Provino SQI5_03 123
4.8.2 Provino SQI5_04 129
4.9 Giunti stepped con lay-up $[0_2/45_5/0]$ soggetti a basso carico 135
4.9.1 Provino SQI5_05 135
4.9.2 Provino SQI5_06 143
4.10 Curve di Woheler riassuntive dei provini testati 150

Capitolo 5: COSTRUZIONE DELLE CURVE DI PARIS 151
5.1 Interpretazione della propagazione a fatica della delaminazione 152
5.2 Classificazione dei metodi per predire la propagazione della delaminazione . 153
5.2.1 Metodi basati sulla tensione/deformazione 153
5.2.2 Metodi basati sulla meccanica della frattura 155
5.3 Ulteriori sviluppi teorici relazione di Paris 155
5.4 Propagazione a Modo Misto 158
5.5 Normalizzazione del SERR 161
5.6 Effetto delle condizioni ambientali sulla prova 162
5.7 Costruzione sperimentale delle curve di Paris 163
5.7.1 Provino S08_14 164
5.7.2 Provino S08_15 168
5.7.3 Provino S08_12 170

5.7.4 Provino S08_13 173
5.7.5 Provino S08_17 175
5.7.6 Provino S08_16 180
5.7.7 Provino SQI5_01 190
5.7.8 Provino SQI5_02 194
5.7.9 Provino SQI5_03 196
5.7.10 Provino SQI5_04 201
5.7.11 Provino SQI5_05 203
5.7.12 Provino SQI5_06 207
5.8 Integrazione della curva di Paris 214

Capitolo 6: ANALISI DELLA RIGIDEZZA DEI PROVINI E METODO FEM 219
6.1 Definizione di rigidezza 220
6.2 Rigidezza sperimentale provini con lay-up $[0]_8$ 222
6.3 Rigidezza sperimentale provini con lay-up $[0_2/45_5/0]$ 227
6.4 Riepilogo rigidezze ricavate sperimentalmente 231
6.5 Rigidezza sperimentale al variare della lunghezza di delaminazione 234
6.6 Calcolo della rigidezza con analisi FEM 236
6.7 Rigidezza FEM provini con lay-up $[0]_8$ 237
6.8 Rigidezza FEM provini con lay-up $[0_2/45_5/0]$ 240
6.9 Il metodo "FEM" 243
6.10 Esecuzione del metodo "FEM" 243
6.10.1 Provini SQI5 243
6.10.2 Provini S08 249
Capitolo 7: CONCLUSIONI 255

Appendice A: APDL per la costruzione dei giunti stepped con lay-up $[0_2/45_2]_s$ **259**
Appendice B: APDL per la costruzione dei giunti stepped con lay-up $[0_2/45_5/0]$ **293**
Appendice C: studio delle prove di Modo II (ENF) e Modo Misto (MMB) **333**

BIBLIOGRAFIA 355
Ringraziamenti 361

Sommario

La finalità del presente lavoro consiste nello studio dell'evoluzione del danneggiamento a fatica in giunzioni composite stampate *stepped-lap* realizzate con resina epossidica rinforzata con un tessuto di fibre di carbonio. Sono stati analizzati giunti con *lay-up* $[0]_8$ e lunghezza di sovrapposizione pari a 8mm e giunti con *lay-up* $[0_2/45_5/0]$ e *overlap* 5 mm. Per entrambi i *lay-up* è stato creato un file APDL grazie al quale sono state condotte delle analisi agli elementi finiti geometricamente non lineari tramite l'utilizzo del pacchetto ANSYS 15.0.7 da cui sono stati ottenuti gli andamenti delle componenti dello Strain Energy Release Rate al variare della lunghezza di delaminazione, utilizzando la tecnica della Virtual Crack Closure Technique. Le componenti del SERR, così ricavate, e il parametro media delle delaminazioni medie, calcolato a partire dall'osservazione microscopica del danneggiamento, hanno permesso di costruire le curve di tipo Paris per ciascun provino testato. Essendo la propagazione a modo misto è stato necessario l'utilizzo di una formulazione di ΔG equivalente al fine di sintetizzare i contributi ΔG_I e ΔG_{II}.

Si è valutata la possibilità di utilizzare un metodo alternativo per il monitoraggio del danneggiamento denominato metodo "FEM", grazie al quale è possibile definire la lunghezza di una cricca virtuale denominata a_{FEM}, da inserire nelle simulazioni ad elementi finiti, che approssima lo stato di danneggiamento complessivo del provino ad un determinato numero di cicli, senza necessità di dover ricorrere alla misurazione microscopica della delaminazione.

Tale metodo ha richiesto un'analisi della variazione di rigidezza dei provini durante l'esecuzione delle prove a fatica.

Introduzione

I composti polimerici a fibra rinforzata sono sempre più studiati per le loro notevoli prestazioni meccaniche, fatto che ne sta determinando un utilizzo sempre più allargato in applicazioni che vanno dal campo aerospaziale fino a quello automobilistico, passando per quello navale e robotico.

Le strutture realizzate in materiale composito possono avere forme complesse e talvolta essere anche di grandi dimensioni, si pensi per esempio alle diverse parti realizzate nel settore aeronautico come le ali o le fusoliere dei più moderni aerei, da qui nasce la necessità di unire più elementi realizzando dei sottoassiemi più grandi che andranno a formare poi il prodotto finito. Le tecniche per unire tali parti sono molteplici.

Le motivazioni che generalmente portano a fabbricare un oggetto in diverse parti per poi legarle assieme sono sostanzialmente due: il primo consiste nel fatto che si riducono i costi di fabbricazione e il secondo consiste nel fatto che si semplifica il processo produttivo secondo una logica che mira sempre più a standardizzare sia il processo produttivo che il prodotto finito.

La resistenza statica o a fatica di un componente che presenta una giunzione dipende quindi dalle caratteristiche meccaniche della giunzione stessa, risulta perciò di fondamentale importanza studiare approfonditamente le varie tecniche di giunzione.

Nel campo dei materiali compositi le tecniche più utilizzate sono il legame meccanico, lo stampaggio e l'unione mediante incollaggio.

Le giunzioni rappresentano una zona critica della struttura in quanto introducono delle interruzioni geometriche e delle discontinuità nel materiale che possono portare nel caso di collegamenti meccanici, ad aree ad alta concentrazione di tensione. Tale concentrazione può essere particolarmente pericolosa soprattutto perché il trasferimento di carico tra i due elementi della giunzione può aver luogo in una frazione della sezione disponibile. Contrariamente a quanto si osserva per i collegamenti in strutture metalliche dove è possibile sfruttare il comportamento plastico del materiale in modo tale che lo snervamento locale raggiunto abbassi i picchi di carico, per i materiali compositi questa riduzione di tensione non può essere realizzata e i picchi di carico devono essere necessariamente previsti ed evitati.

Pertanto, la ricerca odierna si sta muovendo verso la definizione di metodologie di calcolo per la progettazione sia a fatica che statica, che consentano di trasferire i dati ricavati da

prove in laboratorio su provini semplici e di ridotte dimensioni ad una caratterizzazione del componente reale quanto più semplice ed immediata compatibilmente con il particolare comportamento dei materiali compositi. La raccolta di un sempre più elevato numero di dati sperimentali, ha lo scopo sia di agevolare il lavoro del progettista nel dimensionamento di strutture e componenti, sia nell'incentivare un sempre maggior utilizzo dei materiali compositi, i quali hanno il vantaggio di abbinare l'elevata rigidezza ad un'elevata leggerezza.

In questo lavoro sono state analizzate giunzioni stampate a gradino in materiale composito caratterizzate da due differenti *lay-up* $[0_2/45_2]_s$ e $[0_2/45_5/0]$ e diverse lunghezze di sovrapposizione.

Capitolo 1

GIUNZIONI STEPPED LAP

1.1 Giunti meccanici e giunti incollati

Le giunzioni presenti nelle strutture meccaniche costituiscono una delle maggiori sfide progettuali nella realizzazione di una struttura, indipendentemente dal tipo di materiale utilizzato. Tenendo conto che le giunzioni costituiscono quasi sempre l'elemento più debole di un sistema e sovente anche quello più costoso, nella progettazione è buona norma minimizzare il numero di giunti al fine di aumentare la resistenza e/o affidabilità e di ridurre i costi. Dal momento che i materiali compositi ben si prestano a realizzare componenti relativamente complessi e di grandi dimensioni, l'uso delle giunzioni appare quindi necessario a causa di varie limitazioni che si hanno nella pratica come limiti dimensionali dovuti alla natura del materiale, ragioni di costo, di produzione e trasporto oppure la necessità di poter smontare il componente per riparazioni ed ispezioni. Nel caso specifico dei materiali compositi inoltre si verifica frequentemente la necessità di collegare elementi in materiale composito con elementi di altro materiale, aumentando ancor di più l'importanza dell'aspetto giunzione.

Esistono tre tipologie di giunzione che permettono di realizzare un collegamento tra due diversi pezzi in composito oppure tra un elemento in composito e un altro in materiale metallico. I giunti meccanici costituiscono la prima tipologia di collegamento attraverso la quale il carico viene trasmesso attraverso elementi metallici (bulloni, rivetti) con sforzi prevalentemente di compressione sugli elementi collegati; come già accennato nel paragrafo introduttivo, la bullonatura, prevedendo la presenza di un foro negli elementi che devono essere collegati, causa delle concentrazioni di tensioni nell'intorno della giunzione, ragion per cui è necessario dimensionare accuratamente tale area.

Giunti meccanici	
Vantaggi	**Svantaggi**
-Nessuna limitazione degli spessori	-Concentrazione delle tensioni
-Semplicità costruttiva	-Scarsa resistenza a fatica
-Non si hanno tensioni residue	-Soggetti a corrosione
-Smontabilità	-Rigidezza limitata
-Facile ispezione	-Presenza di fori nelle parti da unire

Fig. 1.1 vantaggi e svantaggi dei giunti meccanici

Questa tecnica tuttavia presenta il vantaggio non indifferente di poter smontare e rimontare i pezzi collegati con notevole semplicità e rapidità.

Un'altra tecnica per realizzare una giunzione tra due elementi in materiale composito è l'incollaggio nei quali il carico viene trasmesso attraverso le superfici incollate degli elementi con sforzi prevalentemente di taglio sull'adesivo. Questi collegamenti consistono nell'interporre fra le due parti da assemblare un sottilissimo strato di materiale adesivo che, sotto particolari condizioni, indurisce creando un collegamento permanente. La scelta di questa tecnologia è giustificata da vari fattori positivi fra i quali la riduzione del peso, la riduzione del costo dei materiali e della manodopera e la compattezza della struttura risultante. Tuttavia gli incollaggi sono dei collegamenti critici perché basta un piccolo difetto per provocare un crollo drastico delle prestazioni meccaniche. L'affidabilità di questa tipologia di giunto è strettamente legata all'accuratezza con la quale si seguono le varie fasi del processo di incollaggio. Un ulteriore svantaggio di questa tipologia di giunzioni risiede nel fatto che la quasi totalità degli adesivi non si presta ad essere utilizzata in condizioni di elevata temperatura. È necessario inoltre scegliere un adesivo che sia compatibile con il materiale di cui sono fatti gli aderendi ed è fondamentale curare la preparazione superficiale della zona di sovrapposizione delle parti da incollare.

Giunti incollati	
Vantaggi	**Svantaggi**
-Assenza di concentrazione delle tensioni	-Spessori limitati dei componenti da unire
-Elevata rigidezza	-Facile decadimento per fattori ambientali
-Buona resistenza a fatica	-Non smontabili
-Peso contenuto	-Difficile ispezione di particolari interni alla struttura
-Superfici continue	-tensioni residue, specie con materiali diversi
-Non ci sono problemi di corrosione	

Fig. 1.2 vantaggi e svantaggi dei giunti incollati

Infine vi è l'ultima categoria di giunzioni le cosiddette giunzioni ibride dove il carico è trasferito simultaneamente in entrambi i modi precedentemente citati.

Si può trovare in letteratura, un'ampia gamma di configurazioni di giunzioni incollate composito-composito o composito-metallo. Tali configurazioni sono illustrate nella figura seguente.

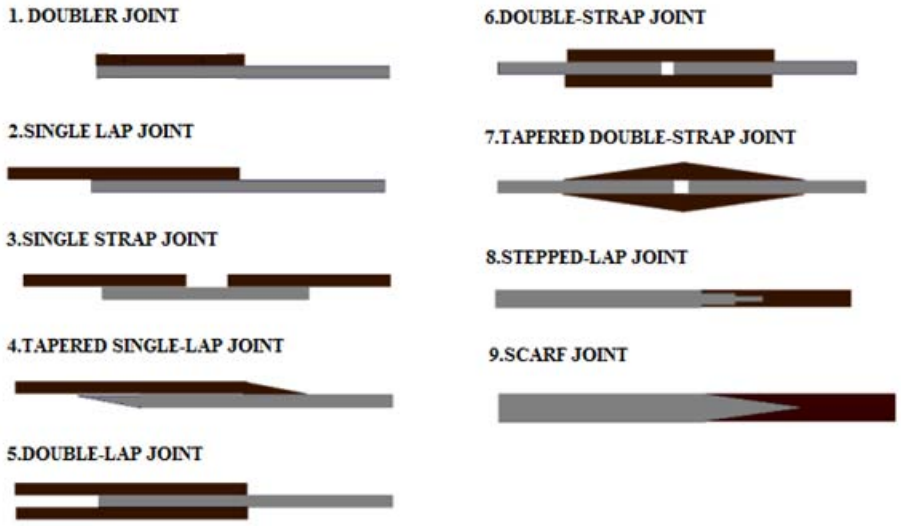


Fig. 1.3 Rappresentazione delle principali configurazioni di giunti incollati

I *single-lap joints* sono stati approfonditamente studiati e vengono comunemente utilizzati nelle applicazioni a basso carico. Si tratta di giunti con la minore efficienza, infatti sottoporre un giunto a semplice sovrapposizione ad una tensione di trazione comporta una distribuzione non uniforme delle tensioni nella zona incollata, il che indica la presenza di picchi di tensione di flessione su entrambi i lati della zona di giunzione che tendono ad aprire la zona incollata. Per ovviare a queste problematiche si sono ideate altre tipologie di giunzione come la giunzione a doppia sovrapposizione, *double lap joints*, la giunzione a semplice coprigiunto, *single strap joints*, la giunzione ad ammorsatura *"scarf joints",* oppure la giunzione a sovrapposizione rastremata *"tapered single lap joints",* che consentono di attenuare gli effetti di un carico eccentrico.

Le giunzioni a gradino, *stepped lap joints*, oggetto di questa tesi costituiscono una soluzione pratica al problema di unire i pezzi di grande spessore in quanto tali giunti permettono di trasferire elevati carichi tra gli aderendi, alleggerendo le concentrazioni di tensione alle estremità del giunto e permettendo inoltre di non avere variazioni di spessore dell'aderendo come richiesto nelle strisce di giunzione.

Passando dal giunto a semplice sovrapposizione a quello a sovrapposizione a gradini aumenta non solo la resistenza del giunto ma anche il costo di realizzazione dello stesso. Spetterà dunque al progettista, per una certa resistenza del giunto, scegliere la configurazione della giunzione più semplice nonché la più economica. Nella figura seguente si evidenzia come all'aumentare della complessità del giunto e dello spessore degli aderendi aumentino anche le prestazioni meccaniche.

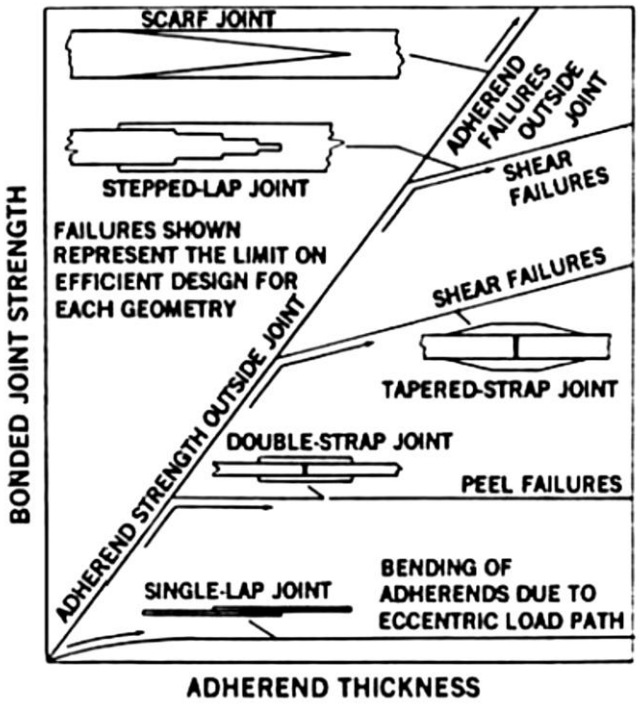


Fig. 1.4 Prestazioni meccaniche delle diverse tipologie di giunti

Lo spessore dell'aderendo può essere incrementato per raggiungere capacità di carico più elevate in ciascun tipo di giunzione. Quando gli aderendi sono relativamente sottili, i risultati delle analisi delle tensioni mostrano, che le tensioni nella giunzione saranno piccole abbastanza per garantire che gli aderendi raggiungano la loro capacità di carico prima che possa verificarsi il cedimento nel legante. All'aumentare dello spessore degli aderendi le tensioni nel legante diventano più grandi fino a portarlo a rottura prima del raggiungimento, da parte degli aderendi, della loro capacità di carico. Ciò porta al principio generale che per una data configurazione del giunto, lo spessore dell'aderendo dovrebbe essere ristretto ad un appropriato range relativo allo spessore del legante. A causa delle considerazioni di processo e della sensibilità ai difetti dei materiali leganti, lo spessore dell'adesivo è generalmente ridotto ad un range di 0,125-0,4mm. Si può dunque

affermare che ad ogni tipologia di giunto corrisponde uno specifico range di spessori per l'aderendo e quindi di capacità di carico, e che a fronte della necessità di una maggiore capacità di carico è preferibile cambiare la configurazione del giunto anzichè incrementare indefinitamente lo spessore dell'aderendo stesso.

1.2 Giunti *co-cured*

Alla categoria dei giunti incollati appartengo anche i cosiddetti giunti *co-cured*, nei quali non è presente un vero e proprio adesivo e l'incollaggio degli elementi è ottenuto sfruttando le proprietà di adesivo della matrice del composito (solitamente resina epossidica).

Nei giunti *co-cured* è infatti la resina del composito non ancora curato che funge essa stessa da adesivo. Con questa tecnica, la cura del composito e della giunzione non avvengono più in due fasi separate bensì simultaneamente (*co-cured*).

La tecnica del *co-curing* ha il vantaggio di non richiedere il trattamento superficiale del composito in quanto di fatto non esiste più un'interfaccia netta adesivo/composito. Lo strato di resina rilasciato durante la cura ha uno spessore dell'ordine di 10μm cioè un ordine di grandezza più piccolo dello spessore minimo ottenibile con la tecnica dell'incollaggio tradizionale con adesivo.

La nuova tecnica è nata e si è sviluppata in campo aeronautico dove le giunzioni ibride metallo/composito sono sempre più frequenti.

Nonostante i numerosi vantaggi offerti dal metodo di unione *co-curing*, sono disponibili solo pochi studi riguardanti tale processo.

Uno studio sistematico su giunti *co-cured* composito-composito è stato condotto nel 1995 da

Kim H.S. et al. [1] che hanno realizzato e testato a trazione giunti *co-cured* a semplice sovrapposizione a gradino analizzando l'influenza della lunghezza di sovrapposizione del gradino sulla resistenza statica e a fatica di tali giunti; è mostrato come la resistenza di tali giunti aumenta all'aumentare della lunghezza di sovrapposizione *w*.

Vari lavori su giunzioni *co-cured* ibride, formate da un aderendo composito e un aderendo metallico, sono state condotte recentemente da vari ricercatori. Nell'accoppiamento metallo/composito, particolare importanza deve essere prestata alla preparazione

superficiale dell'aderendo metallico. Lawcock G. et al. (1997) [2] hanno investigato sull'influenza del trattamento superficiale dell'alluminio in laminati metallo-CFRP.

Altri studi riguardanti la capacità portante di giunti metallo-composito a singola e doppia sovrapposizione sottoposti a carico di trazione sono stati compiuti da Shin et al nel 2000 [3] che hanno testato sperimentalmente la resistenza a taglio di giunti co-cured acciaio-composito a singola sovrapposizione sottoposti a carico di trazione. Shin e Lee J.J. (2000) facendo uso del metodo degli elementi finiti, hanno inoltre eseguito un'analisi dello stato tensionale che si ha all'interfaccia tra gli aderendi di un giunto *co-cured* a singola sovrapposizione ed a doppia sovrapposizione soggetti a carico di trazione.

L'analisi dello stato tensionale ha permesso in questo caso di stabilire che per i giunti a semplice sovrapposizione le tensioni normali (*peeling stresses*) e di taglio all'interfaccia tra gli aderendi sono la principale causa di rotture all'interfaccia. Per quanto riguarda i giunti a doppia sovrapposizione, invece, è stato mostrato come il meccanismo di rottura tipico sia quello coesivo per rottura e delaminazione della prima lamina dell'aderendo composito. Inoltre l'analisi dello stato tensionale ha permesso di evidenziare che nei giunti a doppia sovrapposizione è la tensione di taglio a giocare un ruolo primario nella rottura di tipo coesivo di giunti *co-cured* acciaio-composito.

Il processo di polimerizzazione può essere accelerato mediante l'utilizzo di un forno o di un'autoclave.

Nell'accoppiamento fibre-resina è sempre presente un eccesso di resina; è proprio questa quantità in esubero che viene utilizzata per creare l'unione tra i due elementi mentre la restante parte deve essere tolta per migliorare il comportamento del laminato.

Sebbene gli stampi possano essere realizzati in metallo, solitamente alluminio, molto spesso sono ottenuti dalla stessa resina rinforzata, che viene reticolata nel processo.

Poiché l'unione della giunzione *co-cured* è formata dallo stesso materiale della resina dell'aderendo, le caratteristiche meccaniche sono uguali e non vi è il problema di avere discontinuità di tali caratteristiche lungo la giunzione, problema che invece viene riscontrato nelle giunzioni classiche realizzate con adesivi. Atri ulteriori vantaggi derivanti dall'utilizzo di questo tipo di collegamenti sono i minori costi di fabbricazione dato che è richiesto minor adesivo e la semplificazione dei processi produttivi.

1.3 Tessuti pre-impregnati in fibra di carbonio

I materiali *pre-preg* sono tessuti di fibre adeguatamente trattate, pre-impregnati essenzialmente con resina epossidica diluita con un solvente al fine di ottenere il migliore accoppiamento; il solvente sarà poi eliminato aumentando la temperatura. La resina inizia il processo di reticolazione fino a raggiungere lo stadio B-STAGED; in queste condizioni la resina si trova in uno stato plastico, facilmente deformabile. Tale tessuto pre-impregnato viene racchiuso tra due superfici ed avvolto su una bobina a sua volta chiusa in una sacca e conservata a basse temperature, tra –18 e –22 °C, per impedire che si concluda la reticolazione ed il materiale solidifichi; il tempo di conservazione può arrivare anche ad 1, 2 anni. Per poter utilizzare poi il materiale *pre-preg* è necessario farlo tornare a temperatura ambiente e bisogna poi rimuovere i film protettivi.

Solitamente la realizzazione di materiali pre-impregnati avviene con il processo di stratificazione a sacco sottovuoto.

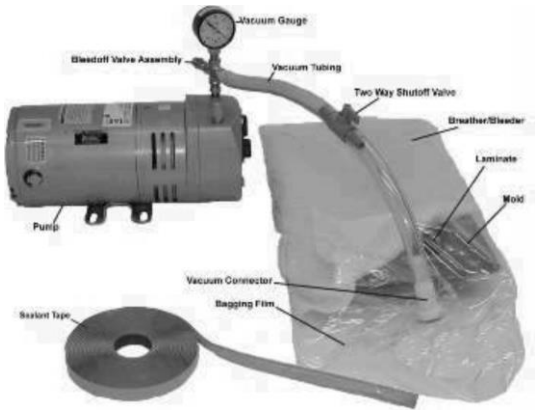


Fig. 1.5 Strumentazione necessaria per lo stampaggio in sacco

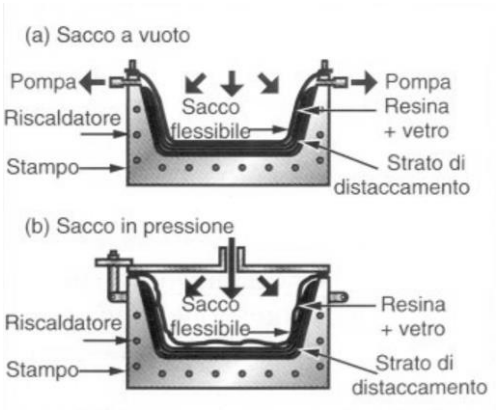


Fig. 1.6 Schema di esecuzione dello stampaggio in sacco

Sullo stampo, in questo caso piano, si deposita un foglio di distaccante sul quale posare poi i diversi strati di *pre-preg* necessari che si attaccano l'uno sull'altro; l'accoppiamento fibre-resina è perfetto anche se in realtà è sempre presente un eccesso di resina che deve essere tolta per migliorare il comportamento del laminato. Sopra i fogli di pre-impregnato è steso un foglio di distaccante microforato (fori pari a circa il 2% della superficie totale) in grado di far uscire la resina in eccesso che sarà assorbita da un tessuto di fibre sintetiche posto sull'agglomerato. Nello stampo sono presenti opportune prese d'aria attraverso le quali, tramite una pompa, si realizza il vuoto. Il sacco tende a comprimersi sul composito; per evitare che quest'ultimo non faccia tenuta sul composito e ci siano quindi zone d'aria

in cui non si riesca a fare il vuoto, si ricorre ad un distributore di vuoto ossia ad un tessuto a maglie larghe in grado di isolare il composito dal sacco e di far passare l'aria. Creando il vuoto elimino eventuali bolle d'aria, tracce di solvente ed applico sul materiale composito una pressione uniforme che porta alla compattazione degli strati.

Per migliorare ulteriormente le prestazioni del materiale composito si ricorre ad un trattamento termico, ciclo di pressione e temperatura, in autoclave. Un ciclo di cura potrebbe essere ad esempio quello di applicare inizialmente all'interno dell'autoclave il vuoto ed alzare la temperatura fino a 100 °C in un tempo tra i 45-75 minuti; si procede poi alla pressurizzazione dell'autoclave a circa 6 kg/cm^2 mantenendo queste condizioni per 60-70 minuti.

Si aumenta la temperatura fino a 177°C in ulteriori 45-75 minuti e si mantengono tali condizioni per circa un'ora oltre la quale si passa all'estrazione ed alla seguente fase di postcura a 188 °C per 3 ore (ciò per incrementare ulteriormente la T_g e conseguentemente le caratteristiche meccaniche, chimiche e di assorbimento dell'acqua). In realtà il processo di cura non è così semplice come può sembrare; si conosce perfettamente la temperatura dell'autoclave ma non quella del materiale infatti il sacco è un buon isolante termico e nel materiale pertanto la temperatura è sempre in ritardo. La viscosità (su scala logaritmica) cala, raggiungendo un minimo prima dell'inizio della reticolazione. La pressione nell'autoclave deve essere applicata prima che la viscosità abbia raggiunto il suo minimo oltre il quale la resina solidifica in poco tempo e la pressione esaurirebbe la sua funzione. Purtroppo vi è anche un effetto opposto dovuto all'applicazione anticipata della pressione che rischierebbe di far uscire una quantità eccessiva di resina con conseguente formazione di vuoti all'interno del laminato. In alcuni casi, per evitare queste problematiche, si arriva a non applicare pressione all'interno dell'autoclave ricorrendo solamente ad un vuoto parziale dando luogo alle cosiddette produzioni a doppio vuoto.

1.4 Descrizione dei provini utilizzati

Le prove di questa tesi sono state svolte con provini in tessuto di *pre-preg* di fibra di carbonio TEXIPREG® CC206-ET442, tessuto T300 twill 2x2, in matrice di resina epossidica CIBA 5021 tenacizzata con additivi termoplastici, con percentuale di fibra in volume del 60% ed uno spessore di 0,25 mm. I pannelli sono stati prodotti con due differenti *lay-up* $[0]_8$ e $[0_2/45_5/0]$, con la tecnica del sacco a vuoto con un ciclo di 60

minuti a 120°C e una pressione di 0,6 MPa. Le proprietà meccaniche delle lamine che formano i laminati sono riportate in *Tab. 1* :

Proprietà lamine a 0°	
E_L [MPa]	58050
E_T [MPa]	58650
G_{LT} [MPa]	3000
ν_{LT}	0.06

Proprietà lamine a 45°	
E_L [MPa]	11930
E_T [MPa]	11930
G_{LT} [MPa]	27516
ν_{LT}	0.81

Tab. 1 proprietà delle lamine utilizzate

I provini sono stati ricavati da pannelli tagliati mediante una sega da tavolo a base fissa con lama mobile diamantata. La mola diamantata permette di ottenere un taglio netto e preciso, assicurando una considerevole durata del disco rispetto alle lame standard ed infine contiene i costi rispetto alle costose lame in carburo di tungsteno. Per ciascun *lay-up* si hanno a disposizione tre diverse lunghezze di sovrapposizione rispettivamente 3,5,8 mm (vedi figura seguente). Nello specifico in questo lavoro di tesi si sono testati provini con *lay-up* $[0]_8$ e *w*=8 mm e *lay-up* $[0_2/45_5/0]$ e *overlap w*=5 mm.

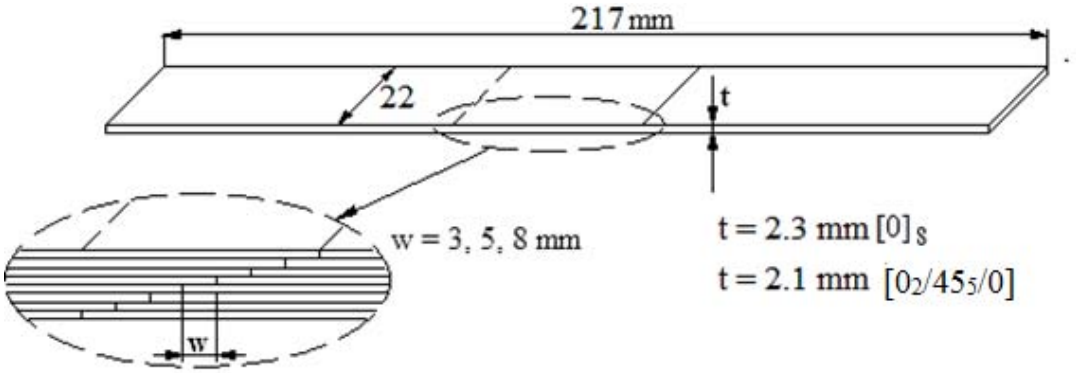


Fig. 1.8 Geometria delle giunzioni e schema di sovrapposizione

1.5 Attrezzatura e metodologia di prova

Le prove sono state eseguite utilizzando una macchina servoidraulica monossiale MTS 858 Mini Bionix II in *Fig. 1.9*, caratterizzata da un carico limite statico di +31kN, da un carico limite dinamico di +25kN, da una pressione massima di afferraggio +21MPa e da un *range* di temperature entro cui la macchina può operare di -40°C, +177°C. Il provino viene afferrato alle due estremità, dopo che queste sono state carteggiate per facilitare e rendere più sicuro l'afferraggio, con una pressione di chiusura delle ganasce di 12,5 MPa e viene fatto ciclare in controllo di forza con un rapporto di ciclo R = 0,05.

Fig. 1.9 MTS 858 Mini Bionix II

L'obiettivo delle prove sperimentali di questa tesi è quello di monitorare l'evoluzione del danneggiamento a fatica mediante osservazione al microscopio ottico. Il microscopio a disposizione è un microscopio metallografico LEITZ® Metallux 3.

Fig. 1.10 Microscopio LEITZ Metallux 3

Fig. 1.11 particolare telecamera LEICA DC 100

Al microscopio è collegata una videocamera LEICA® DC 100 che permette di acquisire le foto. Tale videocamera è a sua volta collegata al PC, nel quale è installato il software LEICA® IM 50 che permette di acquisire e rielaborare le immagini dei diversi provini.

Le prove a fatica sono state realizzate a blocchi di carico successivi fino a rottura, ad ampiezza di sollecitazione costante. Alla fine di ciascun blocco di carico, il provino è stato tolto dalla macchina MTS, per poter monitorare al microscopio lo stato di avanzamento del danneggiamento lungo i bordi del campione, questi ultimi accuratamente lucidati prima di eseguire le prove . I blocchi di carico sono stati scelti in base alla tensione applicata e alla relativa vita a fatica prevista: si è sempre cercato di eseguire blocchi di carico con un ridotto numero di cicli all'inizio e alla fine della prova a fatica, mentre si è optato per blocchi con un maggior numero di cicli nel mezzo della vita a fatica prevista del provino. Questa decisione è dovuta al fatto che la velocità di propagazione della delaminazione è maggiore nelle fasi iniziali e finali della prova, mentre quando la percentuale di vita a fatica è compresa quantitativamente tra il 30% e il 70% si osserva un rallentamento della velocità di propagazione.

Per valutare l'effetto del livello di tensione applicato, sono state eseguite prove di fatica a basso ed alto carico. La vita prevista per le prove a basso carico è di $2 \cdot 10^6$ di cicli mentre per l'alto carico la vita a fatica prevista è di $2 \cdot 10^5$ cicli.

Le prove sono state realizzate in controllo di forza, scegliendo una forma d'onda sinusoidale ed una frequenza variabile da 5 a 10 Hz in funzione del numero di cicli di ciascun blocco di carico.

Capitolo 2

CRITERIO ENERGETICO E DEFINIZIONE DI G

2.1 Definizione di G

Griffith [8] ingegnere aeronautico impegnato nello studio dei materiali vetrosi, è stato il primo a proporre un criterio energetico per analizzare la frattura dei materiali, distaccandosi così dagli approcci tensionali esclusivamente utilizzati sino ad allora.

L'osservazione da cui parte è quasi ovvia: perché una cricca si propaghi, questo fenomeno deve essere energeticamente favorevole. Inoltre l'energia elastica accumulata nel materiale deve essere sufficiente alla formazione delle due nuove superfici libere che si formano all'avanzare della cricca.
Irwin [9] riprese successivamente lo studio di Griffith approfondendolo e introducendo la nozione di *forza generalizzata G di propagazione della frattura* anche conosciuta come *strain energy release rate* (SERR). Tale grandezza rappresenta una conveniente quantificazione dell'energia resa disponibile dal materiale per ogni incremento *da* della lunghezza della fessura. Nel momento in cui avviene il cedimento si ha $G = G_c$ che rappresenta una misura della tenacità a frattura del materiale.
Per una cricca di lunghezza *2a* in una piastra infinita il valore dello *strain energy release rate* risulta essere:

$$G = \frac{\pi \sigma^2 a}{2} \tag{2.1}$$

dove σ è la tensione applicata mentre *a* la semi lunghezza della cricca. Il cedimento avviene quando

$$G_c = \frac{\pi \sigma_f{}^2 a_f}{2} \tag{2.2}$$

σ_f e a_f indicano rispettivamente i valori di tensione e semi-lunghezza di cricca quando si manifesta il cedimento della piastra.
È opportuno definire inoltre un ulteriore parametro *R* a cui si attribuisce il significato di *resistenza alla frattura* o in inglese *crank resistance*. Esso viene definito nel seguente modo:

$$R = \frac{dW_s}{da} \tag{2.3}$$

questa grandezza misura il lavoro che è necessario spendere per ogni incremento *da* della lunghezza della fessura e per una larghezza unitaria del fronte di frattura. W_s indica l'energia di superficie.

La grandezza *R* varia da materiale a materiale: la sua definizione, infatti, lo lega al lavoro che bisogna fare sul sistema per rompere una data sequenza di legami chimici attraverso il fronte di frattura affinché sia assicurato l'avanzamento del suo fronte. Questo lavoro dipende sia dalla densità spaziale di legami (cioè dall'orientazione della cricca rispetto alla cristallografia del mezzo), sia dalla loro natura e forza (cioè dalla chimica delle interazioni atomo-atomo, specifica di ciascun materiale considerato).

2.2 Il criterio energetico di Griffith

Quando un sistema passa da uno stato di non equilibrio ad uno stato di equilibrio si assiste ad un decremento di energia, in accordo con il primo principio della termodinamica. Nel 1920 Griffith applicò questa idea alla formazione di una cricca.

Una cricca si può formare (o si può espandere se già presente) solo se si ha un decremento dell'energia totale del sistema oppure se tale energia rimane costante. Si considera una piastra soggetta ad una tensione σ, contenente una cricca di lunghezza 2*a* (*Fig 2.1*). Si assume che la larghezza della piastra sia >> 2*a* e che e che prevalga la condizione di tensione piana. Si indica con *b* lo spessore della piastra

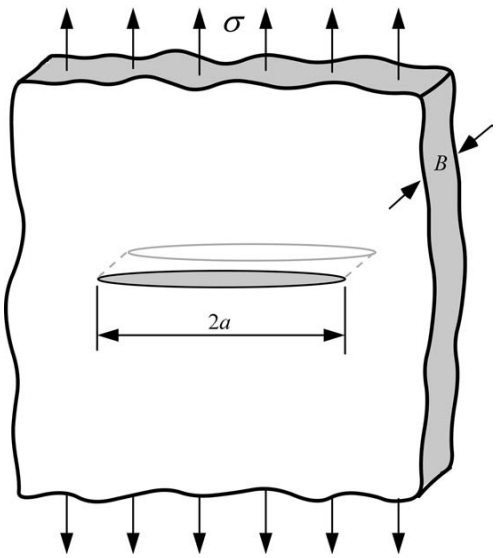


Fig. 2.1 piastra infinita con cricca di lunghezza 2a, soggetta ad una tensione di trazione

Affinché la cricca possa propagare è sufficiente che l'energia potenziale disponibile nella piastra superi l'energia superficiale del materiale. Il bilancio energetico di Griffith per un incremento dell'area della cricca *d*A, in condizioni di equilibrio, può essere espresso nel seguente modo:

$$\frac{dE}{dA} = \frac{d\Pi}{dA} + \frac{dW_s}{dA} = 0 \tag{2.4}$$

oppure

$$-\frac{d\Pi}{dA} = \frac{dW_s}{dA} \tag{2.5}$$

dove
E= energia totale
Π=energia potenziale data dall'energia di deformazione interna e dalle forze esterne
W_s = lavoro richiesto per creare una nuova superficie di frattura

Per la piastra criccata illustrata in *Fig.2.1*, Griffith utilizzò la teoria di Inglis [10] per dimostrare che

$$\Pi = \Pi_0 - \frac{\pi\sigma^2 a^2 b}{E} \tag{2.6}$$

dove Π_0 è l'energia potenziale di una piastra non criccata e b lo spessore della stessa. Dal momento che la formazione di una cricca richiede la creazione di due superfici W_s è dato dalla seguente relazione:

$$W_s = 4ab\gamma_s \tag{2.7}$$

dove γ_s è l'energia superficiale del materiale o meglio l'energia per larghezza unitaria del fronte di frattura spesa per generare un incremento unitario della lunghezza di fessura. Si ottiene così

$$-\frac{d\Pi}{dA} = \frac{\pi\sigma^2 a}{E} \tag{2.8}$$

e

$$-\frac{dW_s}{dA} = 2\gamma_s \tag{2.9}$$

Comparando le due equazioni (2.8) e (2.9) e risolvendo rispetto la tensione di rottura (*fracture stress*) si ottiene:

$$\sigma_f = \left(\frac{2E\gamma_s}{\pi a}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{2.10}$$

È importante notare la differenza tra area proiettata della cricca e superficie della cricca. L'area proiettata della cricca risulta essere pari a *2aB* in questo caso, mentre la superficie è pari a *2A* poiché include le due superfici di accoppiamento.

Il criterio di Griffith può essere applicato anche a cricche di forma diversa. Se si prende ad esempio una cricca di forma circolare (vedi *Fig. 2.2*) tale criterio assume la seguente formulazione:

$$\sigma_f = \left(\frac{\pi E\gamma_s}{2(1-\nu^2)a}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{2.11}$$

dove *a* è il raggio della cricca e *v* il coefficiente di Poisson.

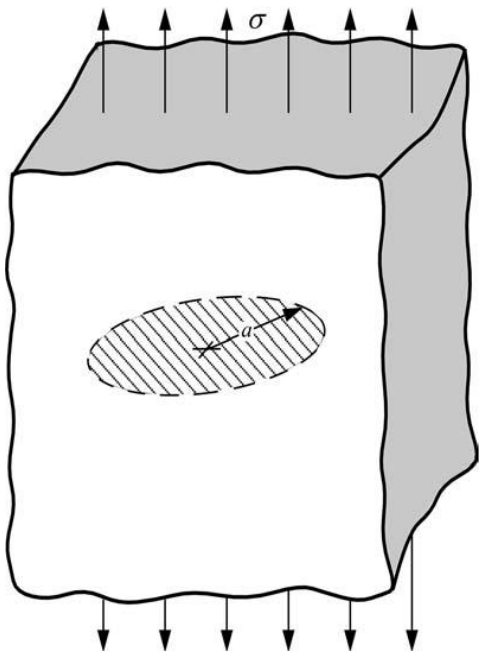


Fig. 2.2 piastra infinita con al centro una cricca di forma circolare soggetta a trazione

2.3 Equazione di Griffith modificata

L'equazione (2.10) è valida solo per solidi fragili ideali; Griffith ottenne un buon accordo tra l'equazione (2.10) e i risultati sperimentali, tuttavia tale equazione sottostima fortemente la resistenza a rottura dei metalli.

Irwin [11] and Orowan [12] modificarono l'equazione di Griffith in modo da tener conto del comportamento plastico dei materiali ottenendo:

$$\sigma_f = \left(\frac{2E(\gamma_s + \gamma_p}{\pi a} \right)^{\frac{1}{2}} \tag{2.12}$$

γ_p rappresenta il lavoro di deformazione plastica per unità di superficie creata e tipicamente è molto più elevato di γ_s.

In un solido fragile ideale, una cricca può formarsi semplicemente rompendo i legami atomici; γ_s rappresenta l'energia totale per rompere questi legami per unità di area. Quando invece una cricca propaga in un metallo bisogna tener conto anche del movimento delle dislocazioni in prossimità dell'apice della cricca, che ostacolano la formazione della stessa. Irwin e Orowan originariamente definirono l'equazione (2.12) per i metalli, tuttavia è possibile generalizzarla tenendo conto delle diverse cause di dissipazione dell'energia:

$$\sigma_f = \left(\frac{2Ew_f}{\pi a} \right)^{\frac{1}{2}} \tag{2.13}$$

dove w_f rappresenta l'energia di frattura, la quale ingloba gli effetti dovuti alla plasticità, alla viscoelasticità o alla viscoplasticità del materiale. Deve essere fatta particolare attenzione quando si applica l'equazione (2.13) ai materiali che mostrano un comportamento non lineare. Bisogna inoltre dire che l'equazione (2.13) considera w_f costante, invece se si considerano i materiali duttili w_f aumenta all'aumentare delle dimensioni della cricca.

2.4 Strain Energy Release Rate G

Nel 1956 Irwin [13] propose un approccio energetico per lo studio della frattura che è essenzialmente equivalente al modello di Griffith ma è più conveniente qualora si devono risolvere problemi di tipo ingegneristico. Irwin definì lo *Strain Energy Release Rate, G,* che rappresenta la misura dell'energia disponibile per la propagazione della cricca.

$$G = -\frac{d\Pi}{dA} \tag{2.14}$$

G quindi non è altro che il tasso di variazione dell'energia potenziale rispetto all'area della cricca.

G è ottenuta dalla derivata del potenziale, ed è anche definita come *crack extension force* o *crack driving force.* In accordo con l'equazione (2.8), lo *Strain Energy Release Rate* per una piastra infinita in uno stato di tensione piana con una cricca di lunghezza 2*a* è dato da

$$G = -\frac{\pi\sigma^2 a}{E} \tag{2.15}$$

si avrà un estensione della cricca quando *G* raggiunge il suo valore critico G_C

$$G_c = -\frac{dW_s}{dA} = 2w_f \tag{2.16}$$

dove G_C rappresenta la *tenacità a frattura* del materiale.

L'energia potenziale di un corpo elastico, *Π,* è definita come

$$\Pi = U - F \tag{2.17}$$

dove *F* è il lavoro fornito dal movimento delle forze esterne e *U* è l'energia di deformazione elastica immagazzinata nel corpo.

Si consideri ora una piastra criccata, caricata come in *Fig 2.3*. Poiché il carico è fissato e risulta essere pari a *P*, il sistema si dice essere in *controllo di carico*. Per questo caso si ha:

$$F = P\Delta \tag{2.18}$$

e

$$U = \int_0^{\Delta} P d\Delta = \frac{P\Delta}{2} \tag{2.19}$$

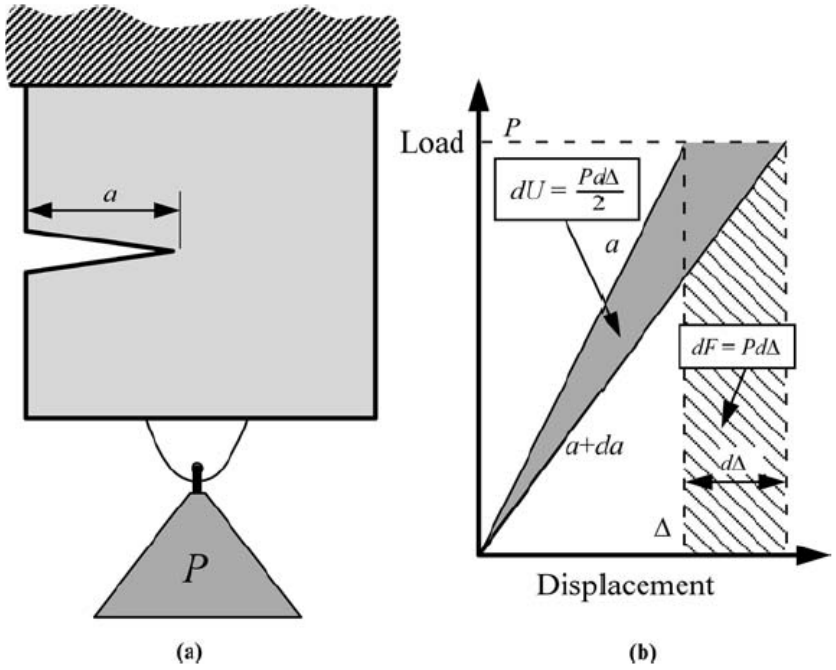


Fig. 2.3 piastra criccata soggetta a carico costante P

Perciò

$$\Pi = -U \tag{2.20}$$

e

$$G = \frac{1}{b}\left(\frac{dU}{da}\right)_P = \frac{P}{2b}\left(\frac{d\Delta}{da}\right)_P \tag{2.21}$$

quando invece è lo spostamento ad essere fissato (*Fig. 1.4*), la piastra è in *controllo di spostamento*; F=0 e $\Pi = U$

Si ottiene quindi

$$G = -\frac{1}{b}\left(\frac{dU}{da}\right)_{\Delta} = -\frac{P}{2b}\left(\frac{d\Delta}{da}\right)_{\Delta} \tag{2.22}$$

A questo punto risulta conveniente introdurre la cedevolezza, che è l'inverso della rigidezza:

$$C = -\frac{\Delta}{P} \tag{2.23}$$

sostituendo l'espressione della cedevolezza nelle equazioni (2.21) e (2.22) si trova

$$G = \frac{P^2}{2b}\frac{dC}{dA} \tag{2.24}$$

per entrambi i casi di controllo di spostamento e di forza. Si può anche scrivere

$$\left(\frac{dU}{da}\right)_{p} = \left(\frac{dU}{da}\right)_{\Delta} \tag{2.25}$$

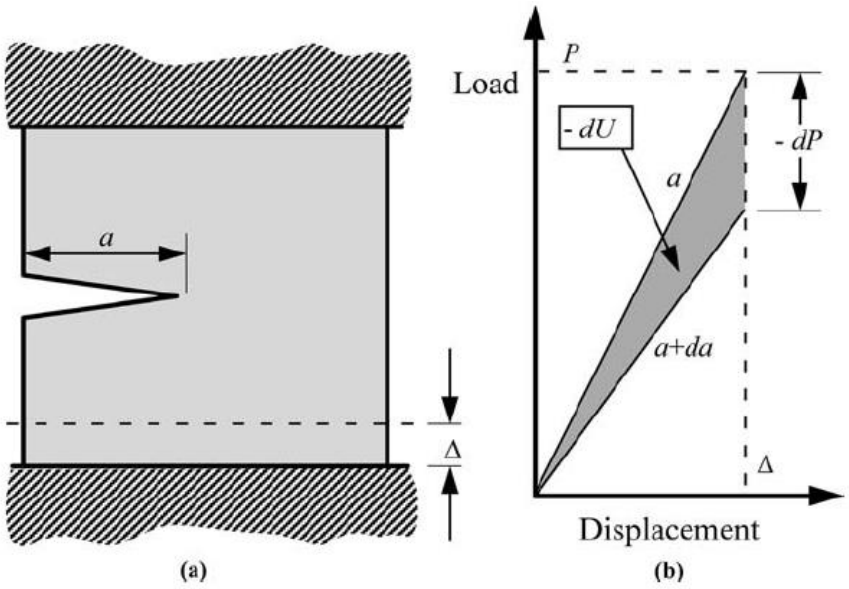


Fig. 2.4 piastra criccata soggetta a spostamento imposto Δ

L'equazione (2.25) è dimostrata graficamente nelle *Fig. 2.3b* e *2.4b*. In *controllo di carico*, l'estensione di una cricca *da*, si traduce in un netto aumento dell'energia di deformazione a causa della forza esterna *P*.

$$(dU)_p = Pd\Delta - \frac{Pd\Delta}{2} = \frac{Pd\Delta}{2} \tag{2.26}$$

mentre nel caso di *controllo dello spostamento, dF* =0 e l'energia di deformazione diminuisce:

$$(dU)_\Delta = \frac{\Delta dP}{2} \tag{2.27}$$

dP è negativo come si può vedere nelle *Fig. 2.3b* e *2.4b*, il valore assoluto delle energie si differenzia per il termine $\frac{d\Delta dP}{2}$, che è trascurabile. Perciò, per un certo incremento di lunghezza della cricca, noti *P* e *Δ* si ottiene:

$$(dU)_P = -(dU)_\Delta \tag{2.28}$$

Secondo la teoria della meccanica della frattura, la crescita e la propagazione di una cricca interlaminare, può avvenire secondo tre tipi di sollecitazione elementare (*Fig. 2.5*), Modo I (trazione), Modo II (taglio nel piano), Modo III (lacerazione, ovvero taglio al di fuori del piano), modi che possono anche essere combinati fra di loro.
Ogni modo è caratterizzato da un valore della tenacità di frattura e da una R-curve che sono caratteristiche intrinseche di un materiale. Nel caso dei materiali isotropi la tenacità a frattura è più bassa secondo il Modo I, rispetto agli altri modi.

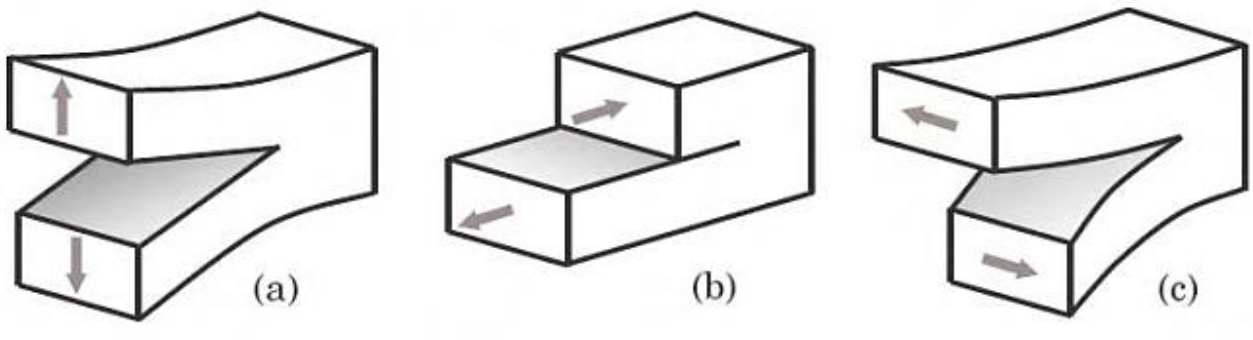


Fig. 2.5 Modi di propagazione elementari: (a) modo I, (b) modo II e (c) modo III

Irwin mostrò che le tensioni all'apice della cricca possono essere espresse mediante un insieme di tre equazioni parametriche. Questi parametri, K_I , K_{II} , K_{III} , chiamati fattori di intensificazione delle tensioni di Modo I, di Modo II e di Modo III, sono funzione delle dimensioni della cricca e del carico applicato ed il loro valore critico, K_{IC} , K_{IIC} ,

K_{IIIC} , governa il fenomeno della crescita instabile della cricca. E' stato visto che il concetto di cedimento basato sul valore critico di un fattore di intensificazione delle tensioni risulta essere equivalente a quello proposto da Griffith in termini di quota critica di rilascio dell'energia di deformazione, G_{IC}, G_{IIC} , G_{IIIC} .

L'utilizzo della meccanica della frattura è stata ampiamente accettata per predire il cedimento nelle strutture metalliche, [11] e [13], e vari metodi di prova sono stati sviluppati per determinare K_{IC}, K_{IIC} e G_{IC}, G_{IIC} come pure le *R-curves* (curve di resistenza alla propagazione della cricca) quando è possibile una crescita stabile della cricca.

2.5 Relazione tra K_{IC} e G_{IC}

Per trovare una relazione tra K_{IC} e G_{IC} si consideri una piastra di dimensioni infinite, caricata da uno stato tensionale uniforme. Secondo la teoria di Griffith si ha instabilità non appena

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{G_{IC}E}{\pi a}} \tag{2.29}$$

mentre secondo la teoria di Irwin questa si avrà quando:

$$\sigma_f = \frac{K_{IC}}{\sqrt{\pi a}} \tag{2.30}$$

poiché le due condizioni rappresentano lo stesso problema fisico alla fine si ottiene

$$K_{IC} = \sqrt{G_{IC}E} \tag{2.31}$$

si vede dunque che le due grandezze sono correlate mediante il modulo elastico E del materiale.

Irwin estese la relazione alle grandezze K_I e G_I generiche trovando:

$$G_I = \frac{K_I^{\,2}}{E} \tag{2.32}$$

$$G_I = \frac{K_I^{\,2}}{E}(1-\nu^2) \tag{2.33}$$

la prima equazione è valida per uno stato tensionale piano, la seconda per uno stato di deformazione piana. Queste ultime due relazioni sono valide tuttavia solamente nel caso di materiali omogenei.
Nel caso di materiali compositi per descrivere i fenomeni di rottura si usa *G* invece di *K*.

2.6 Il metodo VCCT per il calcolo di G

Il metodo che consente di calcolare G tramite FEM, chiamato VCCT (Virtual Crack Clausure Technique) [14,15], ha le sue origini nella trattazione di Irwin, secondo il quale se una cricca propaga di una certa quantità infinitesima Δa, l'energia assorbita nel processo di estensione è uguale al lavoro fatto per riportarla alla lunghezza originale.

Questa tecnica necessita di una mesh con elementi regolari e con le stesse dimensioni all'apice di cricca. Tali dimensioni sono da determinare tramite un preventivo studio di convergenza in modo da scegliere la dimensione della mesh migliore. Le formule per il calcolo necessitano delle forze e degli spostamenti nell'intorno dell'apice della cricca nel sistema di riferimento locale. Si considera che il sistema locale *x',u',X'-y',v',Y'* sia inclinato quanto il primo elemento dopo l'apice.

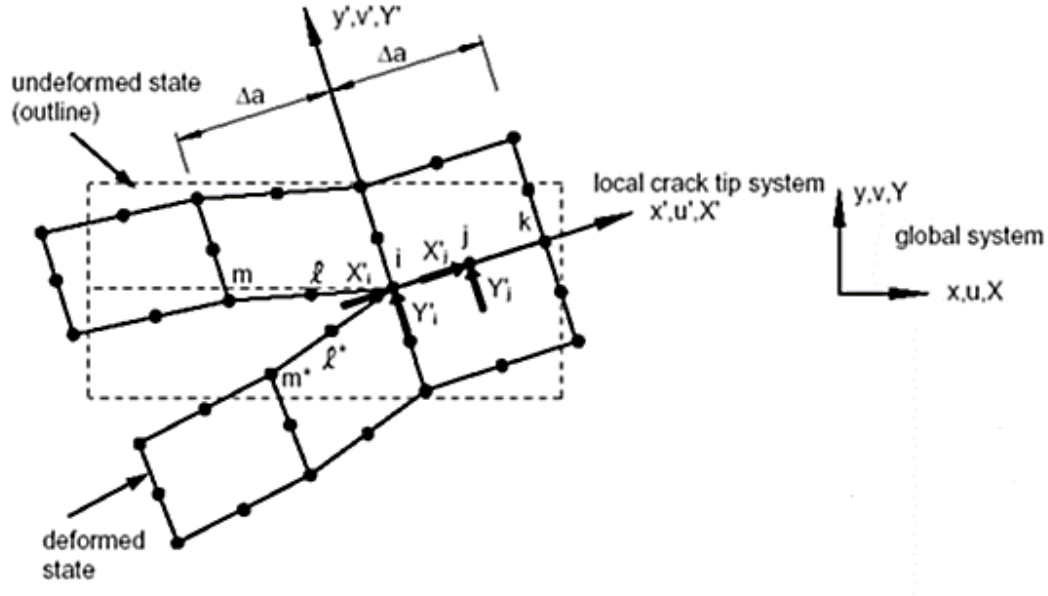


Fig. 2.6 forze e spostamenti nodali per il calcolo di G col VCCT

$$G_I = -\frac{1}{2\Delta a} \cdot \left[Y_i'(v_m' - v_{m^*}') + Y_j'(v_l' - v_{l^*}') \right] \tag{2.34}$$

$$G_{II} = -\frac{1}{2\Delta a} \cdot \left[X_i'(u_m' - u_{m^*}') + X_j'(u_l' - u_{l^*}') \right] \tag{2.35}$$

Nelle equazioni (2.34) e (2.35) Y_i' e X_i' sono le forze nel nodo i all'apice della cricca, mentre v_m', v_{m^*}' e u_m' , u_{m^*}' sono gli spostamenti nei corrispondenti nodi m ed m^* situati prima dell'apice della cricca, tutti calcolati rispetto al sistema di riferimento locale ruotato a causa del carico; allo stesso modo vale per i nodi j ed l rispettivamente.

E' chiaro come questo metodo sia da catalogare come metodo locale e non globale, in quanto considera solo forze e spostamenti all'apice.

Capitolo 3

COSTRUZIONE DEL MODELLO AD ELEMENTI FINITI

3.1 Costruzione del modello FEM

In questo capitolo viene descritta la realizzazione del modello FEM tramite software ANSYS 15.0.7. Questo lavoro prosegue lo studio della vita a fatica di giunzioni-stepped lap , intrapreso da Michele Ferrari [6]. Tuttavia mentre il suo lavoro si concentra su modelli con *lay-up* $[0]_8$, in questa tesi sono stati sviluppati altri due codici che permettono di studiare il comportamento di elementi con *lay-up* $[0_2/45_2]_s$ e con *lay-up* $[0_2/45_5/0]$. Per quanto riguarda il primo *lay-up* sono state analizzate tre differenti lunghezze di sovrapposizione: 3,5 e 8 mm, mentre per il secondo si è analizzato solamente l'overlap 5 mm per poter costruire le curve di Paris dei provini testati sperimentalmente.

Nelle figure riportate in seguito è raffigurata la geometria del provino caratterizzata da una lunghezza *L*, una larghezza *b* e da uno spessore *t*; è inoltre raffigurato un focus della zona di giunzione a gradino in cui si evidenziano le differenti disposizioni delle lamine a seconda del *lay-up* considerato. In *Fig. 3.1* è rappresentata la disposizione delle lamine del *lay-up* $[0_2/45_2]_s$

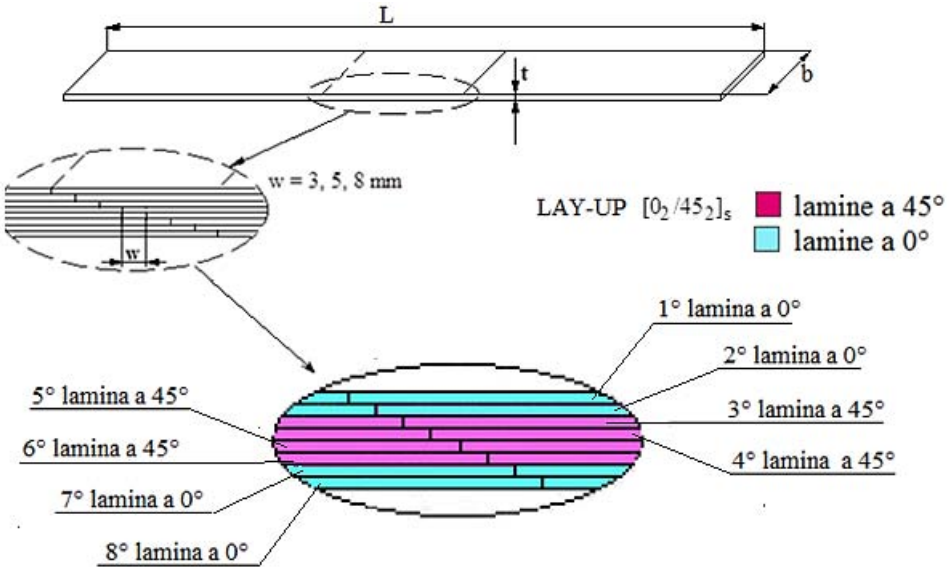


Fig.3.1 geometria giunti stepped con lay-up $[0_2/45_2]_s$

Se si considera il lay-up $[0_2/45_5/0]$, si può vedere come la geometria sia analoga al caso precedente, mentre è differente la disposizione delle lamine come mostra la *Fig 3.2*.

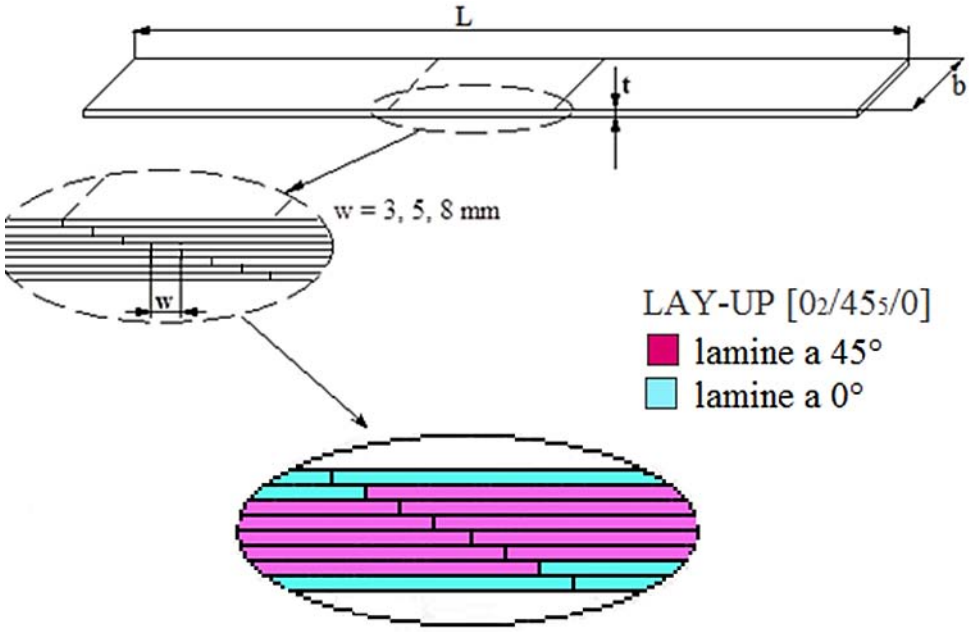


Fig. 3.2 geometria giunti stepped con lay-up $[0_2/45_5/0]$

Per la modellazione del giunto sono stati utilizzati elementi tipo PLANE 183 isoparametrici ad 8 nodi, nelle condizioni di deformazione piana (*plane strain*).

Le proprietà del materiale sono differenti a seconda che si considerino le lamine orientate a 0° oppure quelle orientate a 45°.

Le proprietà delle lamine a 0° sono riportate in seguito:

MODULO ELASTICO LONGITUDINALE [MPa]	MODULO ELASTICO TANGENZIALE [MPa]	COEFFICIENTE DI POISSON
E_{XX}=58050	G_{XY}=500	υ_{XY}=0.3
E_{YY}=6000	G_{YZ}=500	υ_{YZ}=0.3
E_{ZZ}=58650	G_{XZ}=3300	υ_{XZ}=0.06

Tab.1 proprietà materiale lamine a 0°

Mentre le proprietà delle lamine a 45° sono le seguenti:

MODULO ELASTICO LONGITUDINALE [MPa]	MODULO ELASTICO TANGENZIALE [MPa]	COEFFICIENTE DI POISSON
E_{XX}=11930	G_{XY}=500	υ_{XY}=0.3
E_{YY}=6000	G_{YZ}=500	υ_{YZ}=0.3
E_{ZZ}=11930	G_{XZ}=27516	υ_{XZ}=0.81

Tab.2 proprietà materiale lamine a 45°

Nella figura seguente è rappresentata una porzione del modello FEM utile per mettere in evidenza il *lay-up* del provino e la dimensione della mesh in prossimità delle estremità, lontano dalla zona di giunzione. Anche in questa rappresentazione, le lamine a 0 gradi che costituiscono gli strati più esterni del laminato sono di colore azzurro, quelle a 45 gradi, situate all'interno, sono di colore viola.

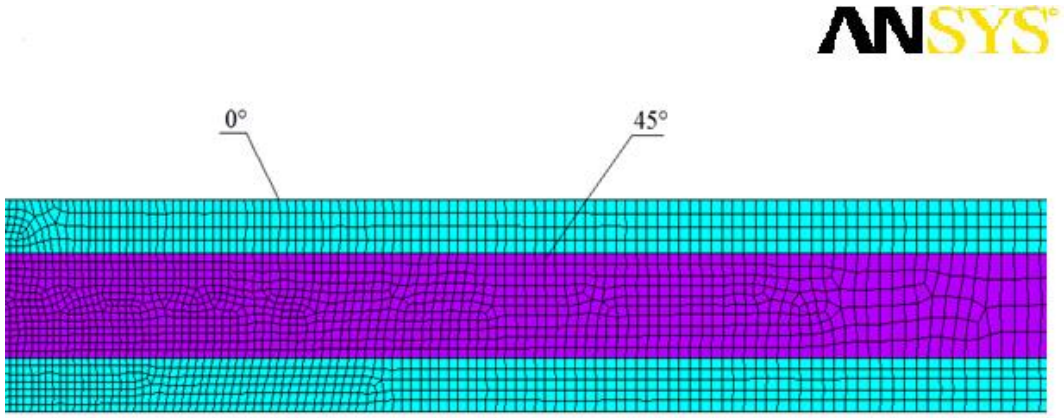


Fig. 3.3 mesh e lay-up $[0_2/45_2]_s$ modello Ansys

Il giunto è vincolato all'estremo sinistro bloccando tutti i gradi di libertà lungo le direzioni x e y, mentre all'estremo destro solo lungo la direzione y, nel quale inoltre è stata applicata una distribuzione σ uniforme per simulare il carico.

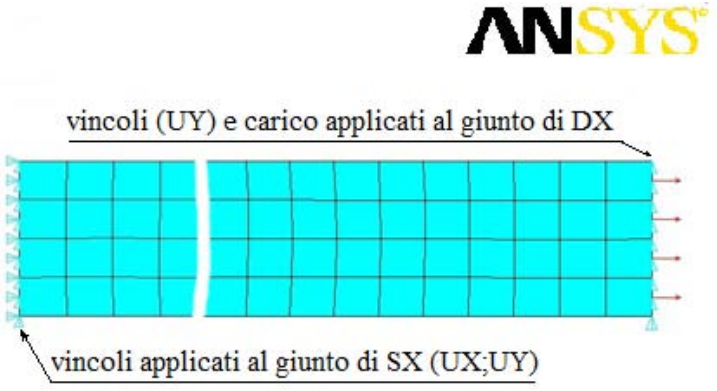


Fig. 3.4 rappresentazione dei vincoli e dei carichi applicati

Per ciascuna lunghezza di sovrapposizione sono stati analizzati due diversi livelli di carico, basso carico ed alto carico: con alto carico si indica una sollecitazione per cui la vita a fatica aspettata si aggira attorno ai $1 \cdot 10^5 \div 2 \cdot 10^5$ cicli, mentre con basso carico si indica una sollecitazione per cui la vita a fatica aspettata si aggira attorno ai $2 \cdot 10^6$ cicli.

LAY-UP	OVERLAP W [mm]	BASSO CARICO [MPa]	ALTO CARICO [MPa]
$[0_2/45_2]_s$	3	77.30	105.04
	5	103.58	137.55
	8	109.04	153.14

Tab.3 livelli di carico analizzati, lay-up $[0_2/45_2]$

LAY-UP	OVERLAP W [mm]	BASSO CARICO [MPa]	ALTO CARICO [MPa]
$[0_2/45_5/0]_s$	5	103.58	137.55

Tab.4 livelli di carico analizzati, lay-up $[0_2/45_5/0]$

È stato creato un modello parametrico in linguaggio APDL (Ansys Parametric Design Language), grazie al quale è stato possibile lanciare diverse analisi variando di volta in volta la lunghezza di sovrapposizione *w* e la lunghezza della delaminazione *a*.

Il file APDL del modello con *lay-up* $[0_2/45_2]_s$ è riportato in appendice A mentre quello per la realizzazione del *lay-up* $[0_2/45_5/0]$ è riportato in appendice B.

Una volta lanciato l'APDL, il programma "chiede" di inserire i dati di input relativi alla lunghezza di sovrapposizione *w*, alle lunghezze di cricca a_1, a_2 e a_3 e all'ampiezza di carico $\Delta\sigma$. Le lunghezze vanno espresse in millimetri mentre il carico in MPa. Qualora si voglia lanciare un'analisi simulando una delaminazione propagante all'interfaccia tra la prima e la seconda lamina, si deve dare ad a_1 un valore diverso da 0 mentre le lunghezze a_2 e a_3 devono essere nulle. Nel caso in cui si voglia invece creare una cricca di dimensioni superiori, propagante, per esempio, all'interfaccia tra la seconda e la terza lamina, è necessario porre diverse da 0 sia a_1 che a_2. Un discorso analogo deve essere fatto se la delaminazione propaga all'interfaccia tra il terzo e il quarto strato, in questo caso anche a_3 deve essere posta diverso da 0.

Una volta che sono stati dati in input al programma i diversi parametri, viene costruito dapprima il modello geometrico; vengono creati in sequenza i keypoint, le linee e le aree, successivamente viene stesa la mesh. Nel lavoro di tesi di Michele Ferrari [6] sono state eseguite delle analisi di verifica per accertare il miglior compromesso tra le dimensioni dell'elemento della mesh all'apice della cricca e la precisione dell'analisi. Si è visto che per avere un numero ragionevole di elementi della mesh senza appesantire in maniera

eccessiva il modello FEM, con relativi aumenti di tempi di calcolo, è opportuno scegliere 0.01 mm come valore minimo di *element size* all'apice della cricca.

Una volta che la mesh è stata creata, le istruzioni contenute nell'APDL consentono di applicare al modello geometrico creato vincoli e carichi.

Per tradurre il modello reale in un modello ad elementi finiti si è pensato di realizzare le due parti del giunto separatamente e di tenerle unite tramite l'impiego di set di *coupling DOF* lungo il profilo del gradino.

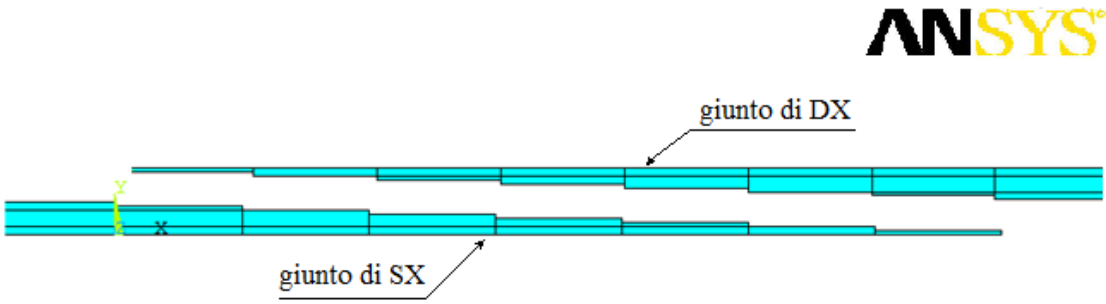


Fig. 3.5 giunto di SX e giunto di DX modellati separatamente in Ansys

Con questa operazione ad ogni nodo appartenete al giunto SX ed al suo corrispettivo, appartenente al giunto DX, sono associati gli stessi spostamenti lungo l'asse x e y, essendo in *plane strain*, realizzando di fatto la continuità strutturale. In questo modo è stato semplice riprodurre di volta in volta l'avanzamento della cricca, eliminando progressivamente tali set.

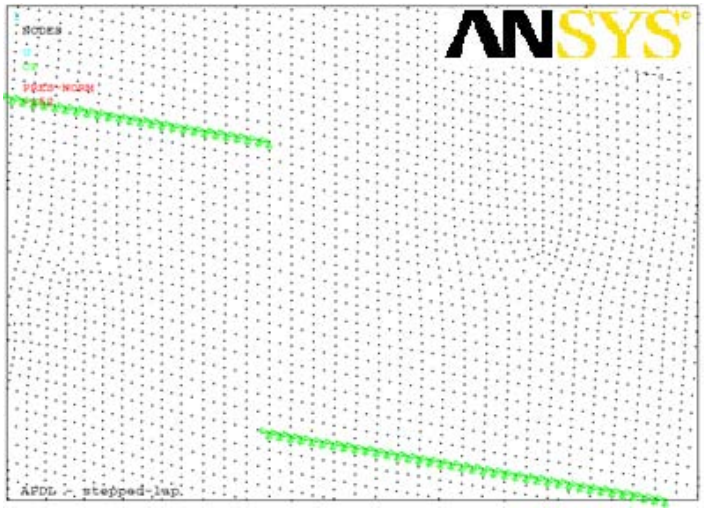


Fig.3.6 coupling DOF in corrispondenza di uno degli otto gradini della giunzione

Il cordone di giunzione costituito dai set di coupling DOF, come si può facilmente vedere, presenta delle discontinuità in corrispondenza di ciascun gradino, per meglio simulare la dinamica di propagazione delle delaminazioni come si vedrà in seguito.

Le giunzioni *stepped-lap* soggette a fatica presentano fin dai primissimi cicli la formazione di una cricca trasversale in corrispondenza delle zone di giunzione dei diversi strati, questo aspetto è stato ampiamente trattato nel lavoro Cristanini Simone [5] ed è stato personalmente riscontrato nelle prove svolte in laboratorio.

Le cricche trasversali sono le prime ad innescarsi e la loro propagazione risulta pressochè istantanea. Una volta che tali cricche trasversali si sono propagate, all'aumentare dei cicli a fatica, inizia la propagazione delle delaminazioni, a partire dalle interfacce più esterne.

Per la costruzione del modello ad elementi finiti si è dunque scelto di costruire una zona di giunzione non integra, per simulare il danneggiamento che si ha nelle fasi iniziali della prova a fatica, inoltre si è optato per una propagazione simmetrica della delaminazione lungo le diverse interfacce.

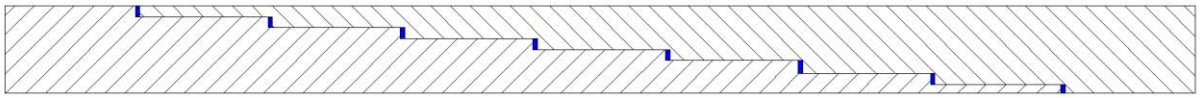


Fig.3.7 schematizzazione zona di giunzione con cricche trasversali

La propagazione della delaminazione lungo le diverse interfacce è schematizzabile nel seguente modo:

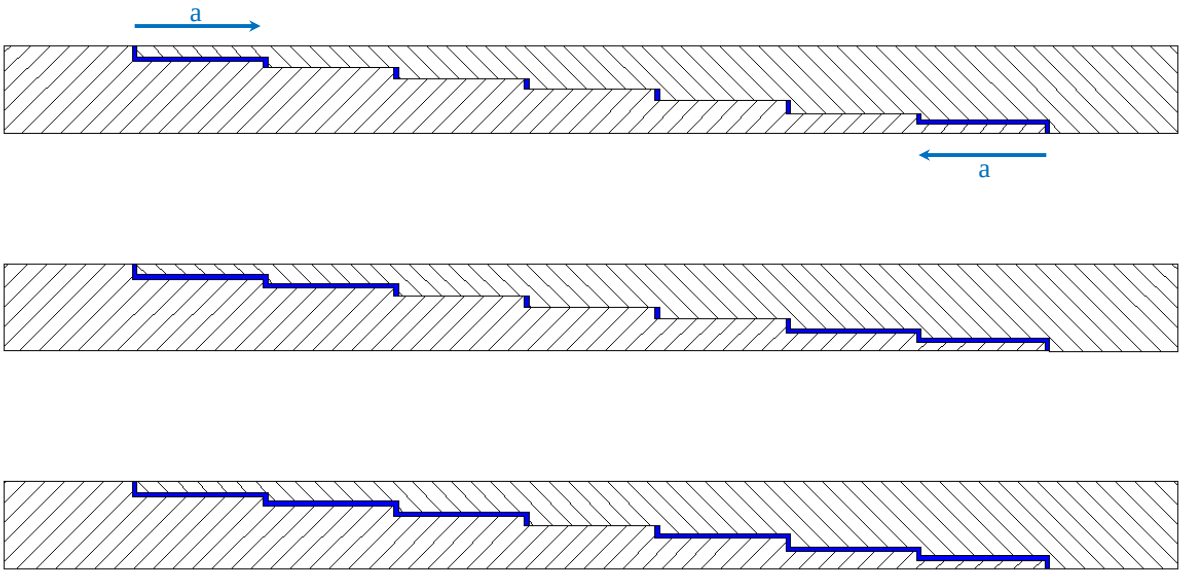


Fig. 3.8 schematizzazione dell'evoluzione del danneggiamento

Si è inoltre assunto che il passaggio da un'interfaccia all'altra avvenga con la completa separazione della precedente rispetto alla successiva. Si deve tener conto che, per necessità di modellazione legate al tipo di approccio utilizzato nel calcolo, la cricca può assumere la dimensione minima di 0.055 mm e massima pari alla lunghezza di sovrapposizione meno 0.255 mm. Una volta completata la fase di pre-processor, viene lanciata la soluzione non lineare del modello: il tempo per completare la soluzione di un'analisi di un giunto con *overlap* w=3 mm difficilmente supera i 20 minuti mentre i tempi di attesa per risolvere non linearmente i giunti con w=5 mm e w=8 mm sono notevolmente superiori arrivando in alcuni casi anche a 4 ore di elaborazione prima di arrivare a convergenza.

Nelle *Fig. 3.9* e *3.10* sono raffigurati due esempi di deformata che si ottengono in ambiente *post-processor* una volta che la soluzione è arrivata a convergenza.

La prima deformata fa riferimento ad una delaminazione propagante lungo l'interfaccia tra primo e secondo strato, ottenuta ponendo $a1$= 2.4 mm e w = 8 mm, mentre la seconda si riferisce ad una delaminazione propagante all'interfaccia tra la terza e la quarta lamina di un giunto con *overlap* w=3 mm.

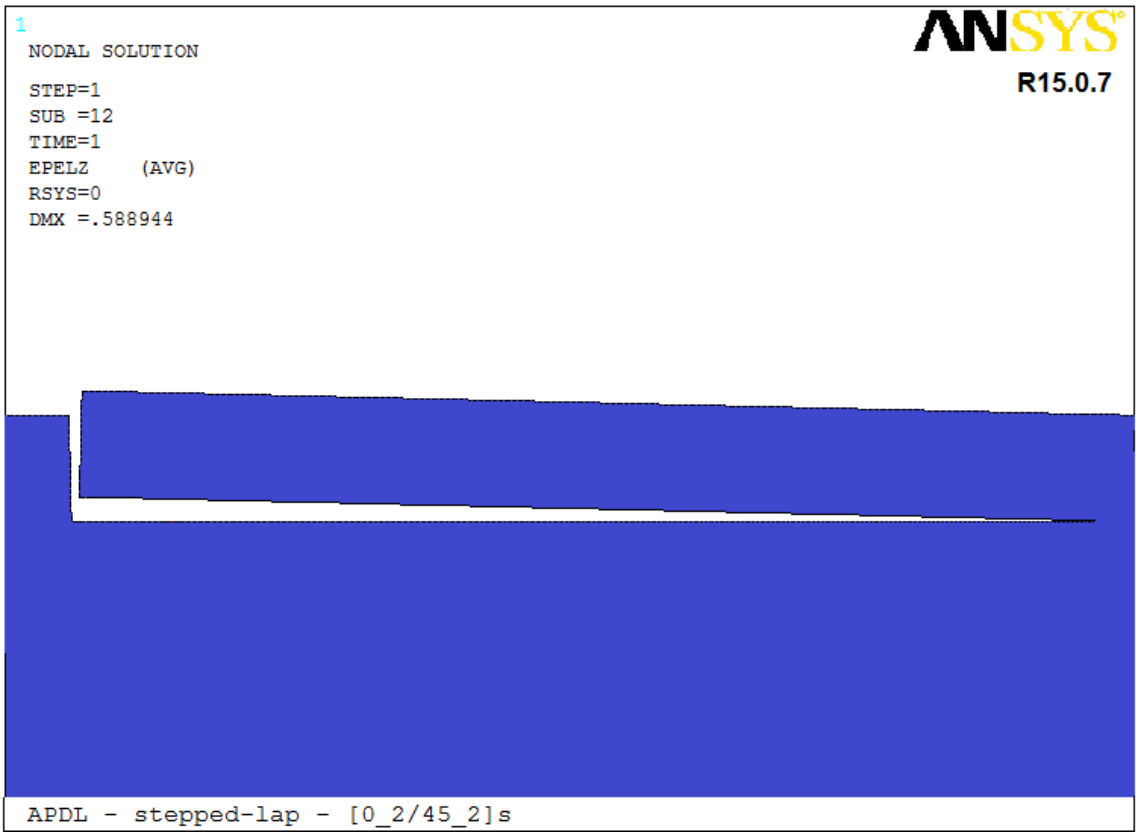


Fig. 3.9 amplificazione della deformata. Delaminazione propagante lungo la prima interfaccia

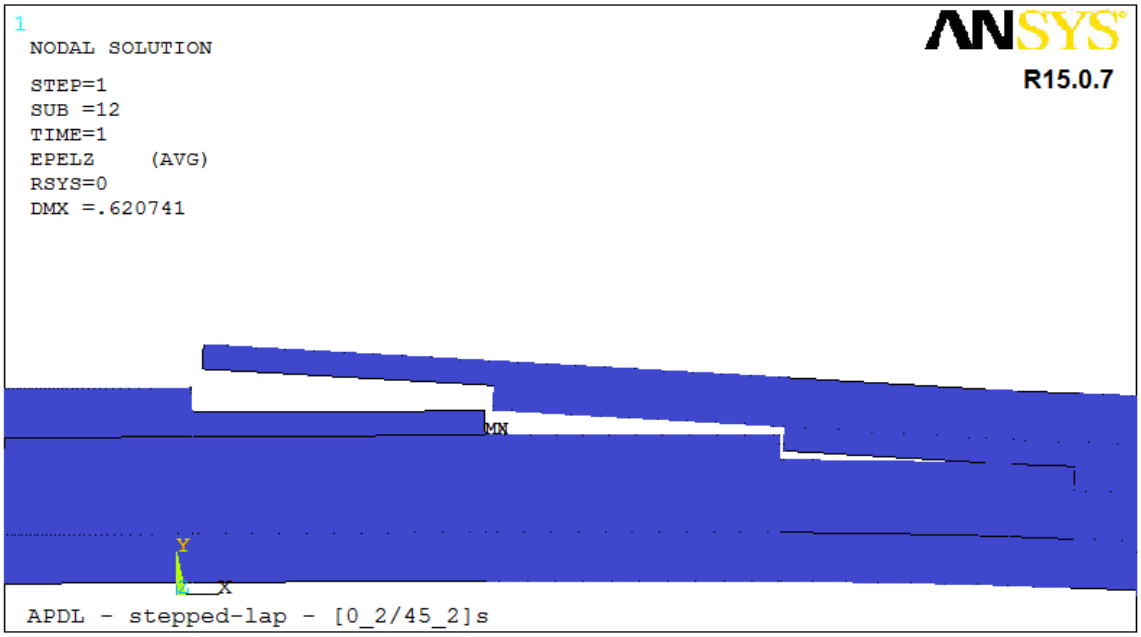


Fig. 3.10 amplificazione della deformata. Delaminazione propagante lungo la terza interfaccia

Per calcolare G si è sfruttata la tecnica del VCCT, grazie alla quale è stato possibile calcolare simultaneamente G_I e G_{II} per le diverse lunghezze di cricca.

Al termine di ogni analisi viene generato dal codice Ansys un file di testo contenente i valori delle forze e degli spostamenti nodali necessari per l'applicazione del VCCT. Oltre a tali valori, i diversi file *.txt* restituiscono in output anche i valori degli spostamenti nodali dell'estremo di applicazione del carico, permettendo così il calcolo di $G_{TOT,ext}$ tramite la seguente relazione:

$$G_{TOT,ext} = \frac{P^2}{2b}\frac{\partial c}{\partial a} \tag{3.1}$$

dove P è il carico applicato, b lo spessore del giunto (nel nostro caso unitario, essendo in *plane strain*), e $\frac{\partial c}{\partial a}$ è la variazione di cedevolezza del giunto al propagare della cricca lungo l'interfaccia di giunzione. Questa relazione è utile per verificare se i risultati ottenuti tramite analisi locale con VCCT sono compatibili con quelli derivanti da un'analisi globale in quanto non vengono contemplati spostamenti e forze nell'intorno dell'apice della cricca, bensì il carico applicato e la variazione di cedevolezza globale del pezzo.

3.2 Analisi geometricamente non lineari

Le giunzioni *stepped-lap* soggette ad alto e basso carico esibiscono spostamenti elevati, da qui la decisione di condurre esclusivamente analisi geometricamente non lineari. Nel lavoro di Michele Ferrari [6] invece sono state eseguite sia analisi lineari sia analisi non lineari e al termine sono stati confrontati i risultati ottenuti. Si è osservato come la scelta delle analisi geometricamente non lineari sia la scelta migliore, aspetto confermato anche da alcuni lavori presenti in letteratura ([16] H. Onses, 2003). Queste infatti descrivono in modo più adeguato gli spostamenti elevati e al di fuori dal piano a cui è sottoposto il giunto criccato; in un componente criccato infatti questi spostamenti aumentano considerevolmente.

È opportuno far presente che nell'ipotesi di *large displacement* alcuni elementi della mesh, soprattutto per carichi e per lunghezze di cricca elevati, subiscono delle distorsioni troppo elevate che portano in alcuni rari casi, alla non convergenza dell'analisi. In questo lavoro di tesi solamente 2 su circa 300 analisi lanciate, non sono arrivate a convergenza.

Una volta terminate le analisi in Ansys, sono stati presi i file di testo generati nel post-processore, e sono stati importati i dati in essi contenuti in una tabella Excel. In questo foglio di calcolo viene implementata la VCCT e vengono restituiti in output i valori di ΔG_I e ΔG_{II} per ciascuna lunghezza di cricca. È possibile a questo punto diagrammare e confrontare tra di loro in un unico grafico gli andamenti di ΔG_I, ΔG_{II} e ΔG_{TOT}. In particolare ΔG_{TOT} è definito come:

$$\Delta G_{TOT} = \Delta G_I + \Delta G_{II} \tag{3.2}$$

I grafici successivi riportano gli andamenti di ΔG_I, ΔG_{II} e ΔG_{TOT} e del rapporto $\Delta G_{II}/\Delta G_I$ al variare della lunghezza di cricca ottenuti dalle analisi FEM su provini $[0_2/45_2]_s$, sottoposti a basso carico:

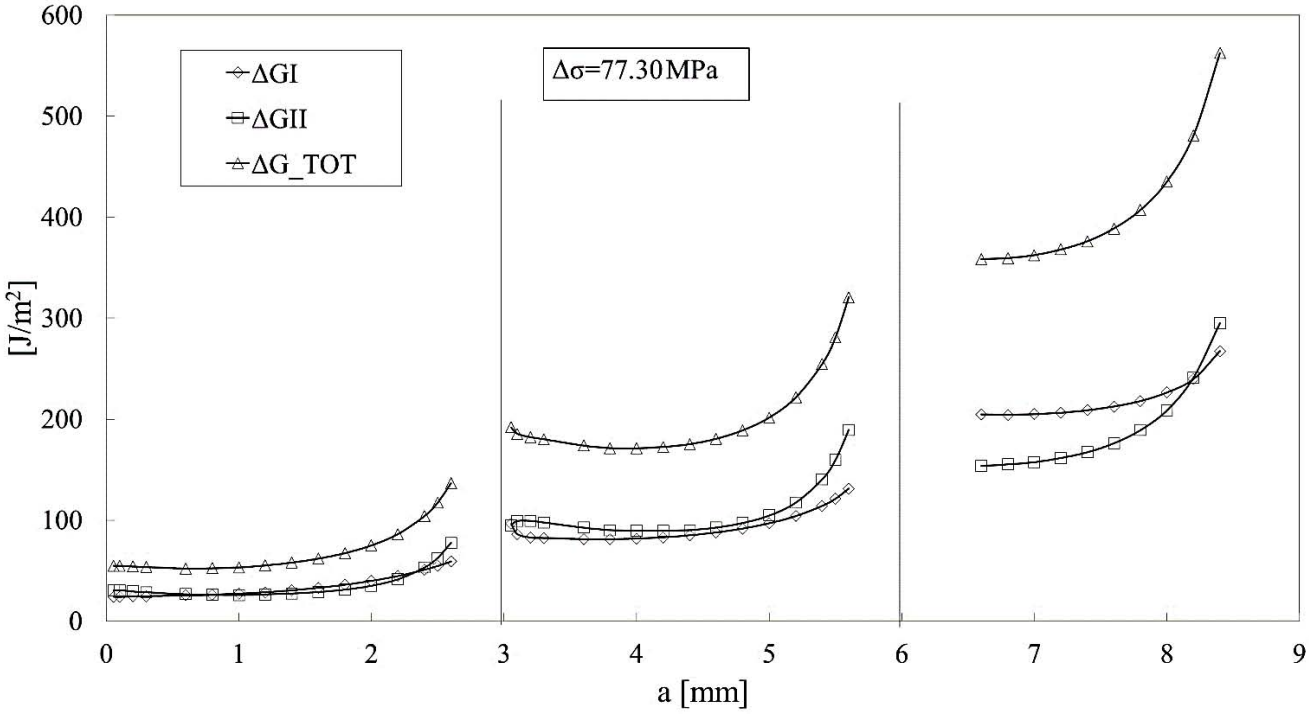


Fig. 3.11 Andamento delle componenti del SERR al propagare della delaminazione per zona di giunzione danneggiata, lunghezza di sovrapposizione w=3, Δσ=77.3 MPa (basso carico)

Si può facilmente vedere come l'andamento dei diversi ΔG cresca all'aumentare della lunghezza di cricca. Nel passaggio tra un'interfaccia e la successiva si nota una discontinuità dovuta al applicazione del metodo VCCT. Si può inoltre osservare che, per lunghezze di cricca comprese tra 0 e 3 mm, i valori di ΔG_I e ΔG_{II} sono pressoché coincidenti, mentre per cricche comprese tra 3 e 6 mm ΔG_{II} è superiore rispetto a ΔG_I, ciò significa che la propagazione avviene prevalentemente per Modo II. Infine se si considera la terza interfaccia, si vede che accade l'opposto ovvero ΔG_I per gran parte della propagazione è nettamente superiore a ΔG_{II} vale a dire la propagazione avviene prevalentemente per Modo I. Questi concetti appaiono più immediati se si analizza l'andamento di $\Delta G_{II}/\Delta G_I$ al variare di a. Tutte le volte in cui tale rapporto è superiore a 1 prevale il Modo II, se invece risulta inferiore prevale il Modo I.

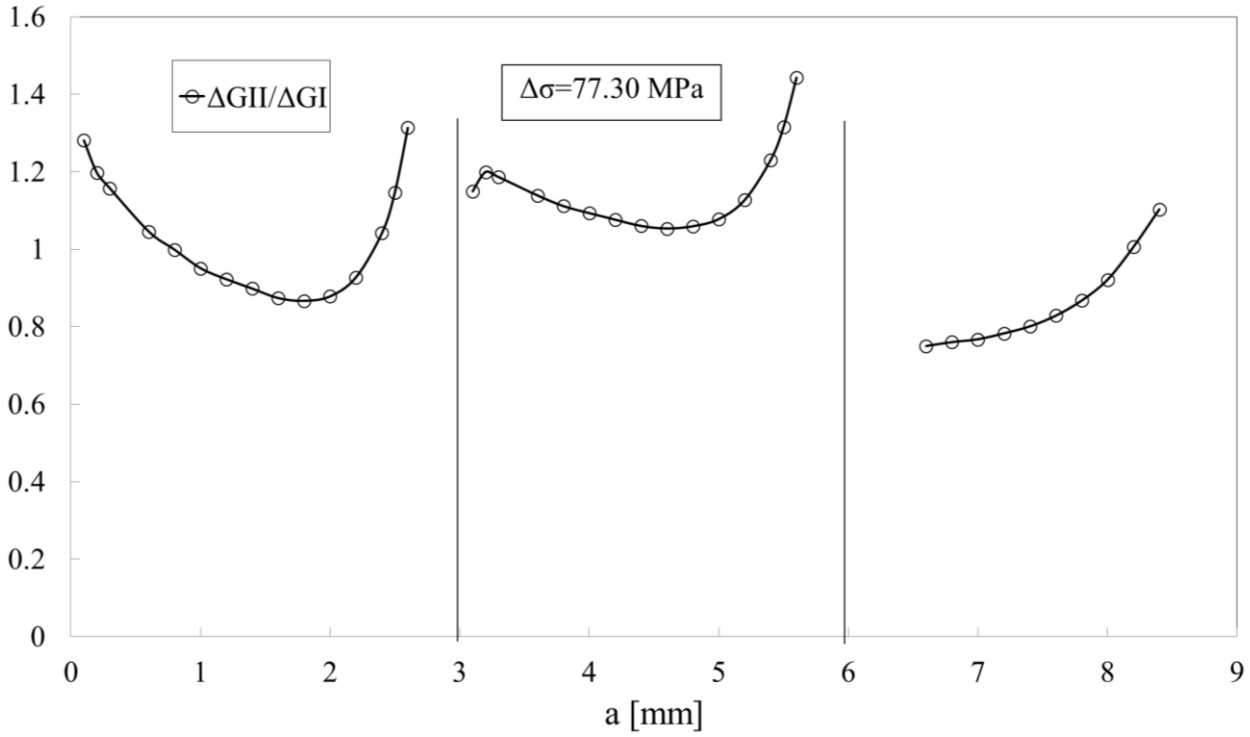


Fig. 3.12 Andamento del rapporto $\Delta G_{II}/\Delta G_I$ al propagare della delaminazione per zona di giunzione danneggiata, lunghezza di sovrapposizione w=3, Δσ=77.30 MPa (basso carico)

Di seguito sono rappresentati gli andamenti delle componenti del SERR e l'andamento del rapporto $\Delta G_{II}/\Delta G_I$ al variare della lunghezza delle delaminazione (*a*) per giunti con overlap w=5 mm, soggetti a basso carico.

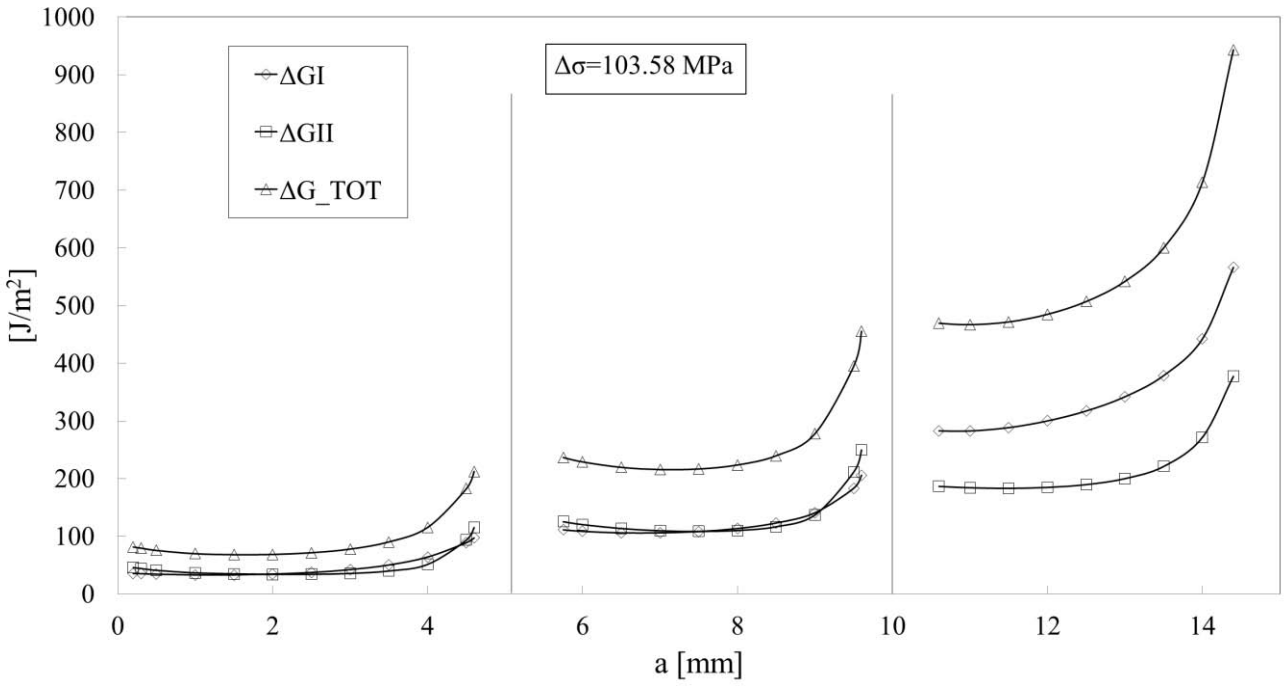


Fig.3.13 Andamento delle componenti del SERR al propagare della delaminazione per zona di giunzione danneggiata, lunghezza di sovrapposizione w=5, Δσ=103.58 MPa (basso carico)

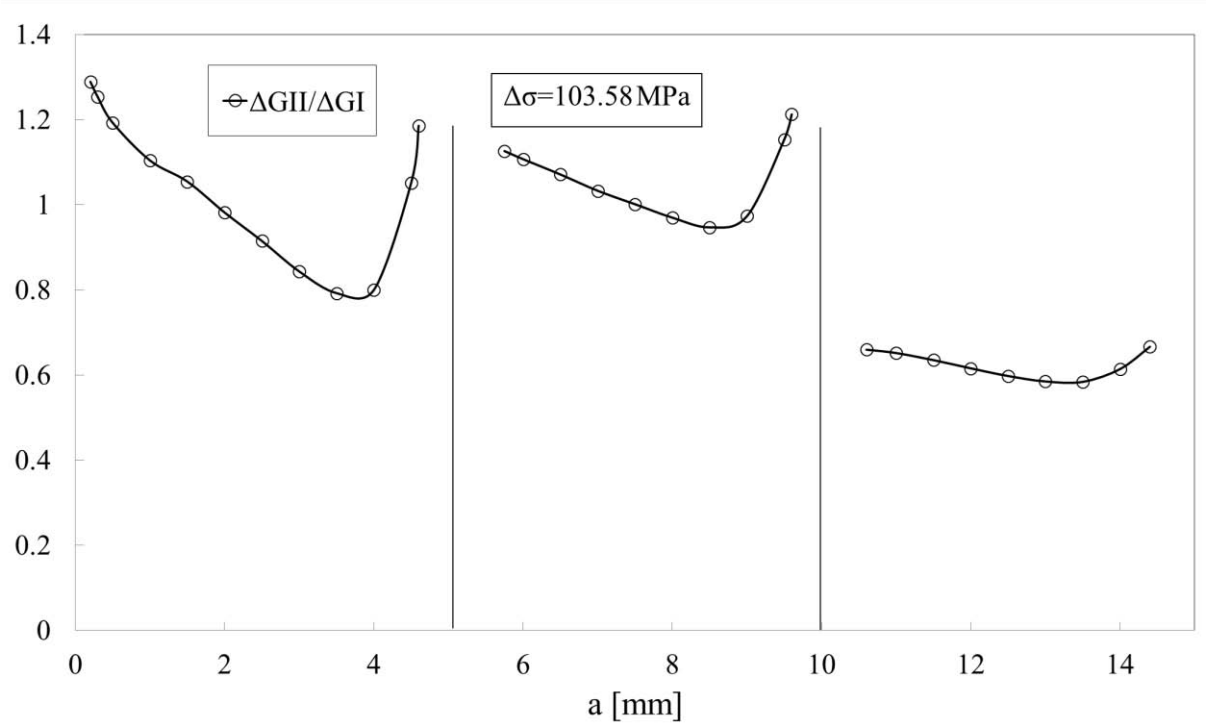


Fig.3.14 Andamento del rapporto $\Delta G_{II}/\Delta G_I$ al propagare della delaminazione per zona di giunzione danneggiata, lunghezza di sovrapposizione w=5, Δσ=103.58 MPa (basso carico)

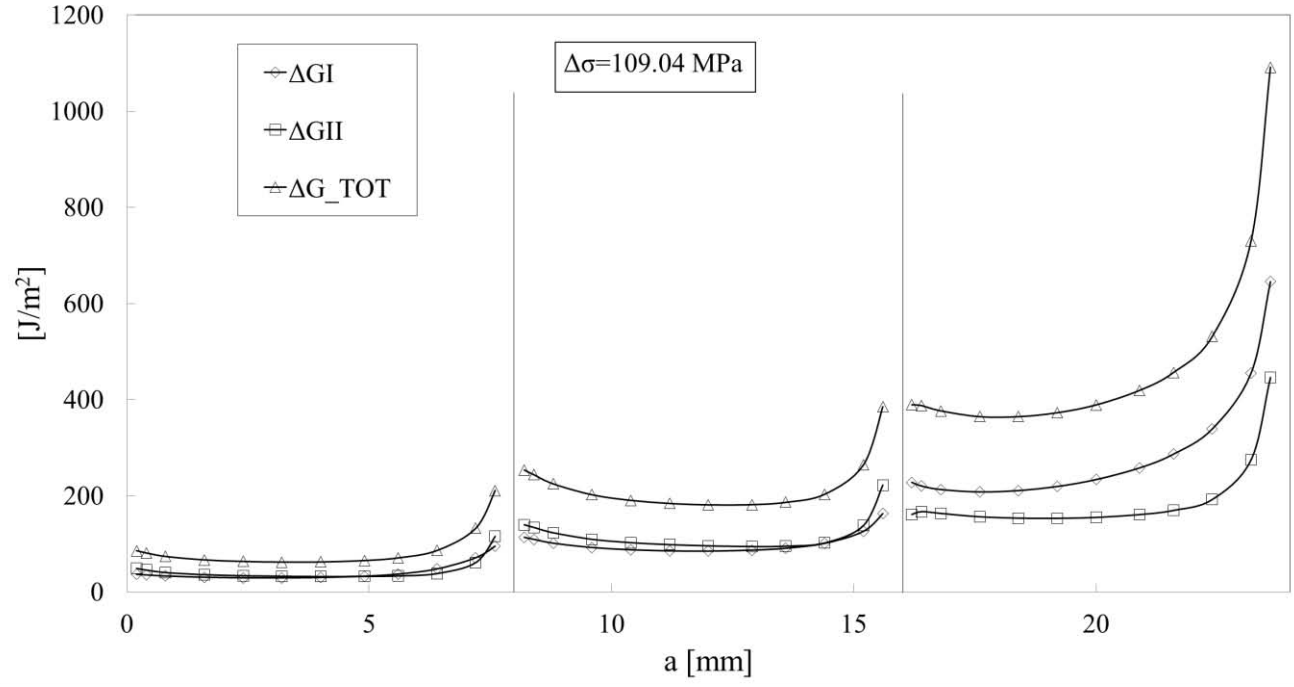


Fig.3.15 Andamento delle componenti del SERR al propagare della delaminazione per zona di giunzione danneggiata, lunghezza di sovrapposizione w=8, Δσ=109.04 MPa (basso carico)

Si riportano infine le medesime curve ricavate ponendo *w*=8 mm e Δσ =109.04 MPa

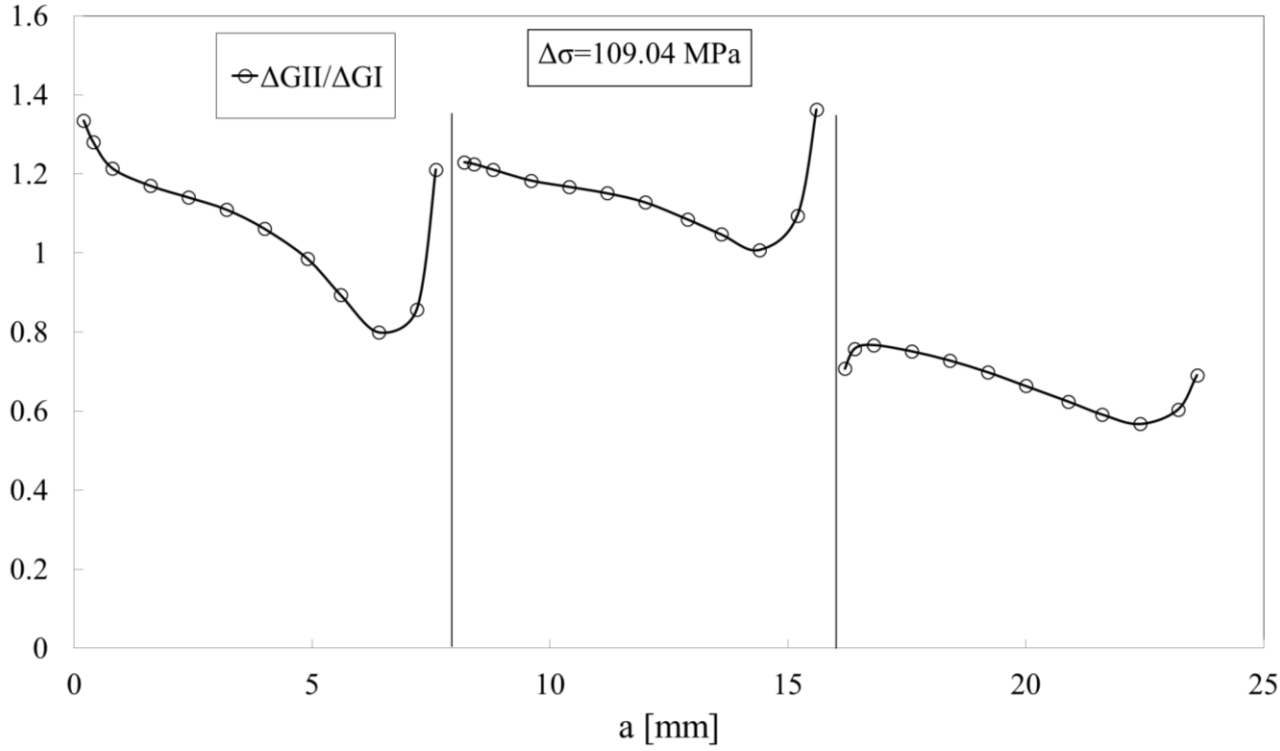


Fig.3.16 Andamento del rapporto $\Delta G_{II}/\Delta G_I$ al propagare della delaminazione per zona di giunzione danneggiata, lunghezza di sovrapposizione w=8, Δσ=109.04 MPa (basso carico)

Si può osservare che ΔG_I, ΔG_{II} e quindi ΔG_{TOT}, per piccole lunghezze di cricca esibiscono un andamento decrescente; per lunghezze di cricca intermedie, rispetto alla lunghezza di sovrapposizione del giunto, presentano invece un andamento pressoché costante e cioè il giunto sembra non risentire dell'avanzare della cricca; questo carattere costante della propagazione interessa una zona tanto più ampia man mano che aumenta la lunghezza di sovrapposizione. Verso la fine dell'*overlap* inoltre si registrano tendenzialmente aumenti di ΔG e questi sono tanto più ritardati quanto maggiore è la lunghezza di sovrapposizione *w*. Il passaggio della delaminazione da un'interfaccia all'altra è accompagnato da un salto di energia e questo perché è stato ipotizzato un fronte di rottura unico che avanza lungo l'interfaccia; tale energia è quella necessaria per far sì che la delaminazione possa avanzare allo strato successivo.

Osservando infine i grafici riportanti l'andamento del rapporto $\Delta G_{II}/\Delta G_I$ si evince come la propagazione avvenga sostanzialmente a Modo misto. Per maggior precisione si può osservare che, per tutti i 3 diversi *overlap* analizzati, il Modo II è quello che influisce di più sul danneggiamento della giunzione quando la cricca si trova a propagare nella prima e seconda interfaccia, mentre il Modo I è dominante nel caso la cricca si trovi a propagare lungo la terza interfaccia.

I grafici successivi riportano invece i valori di ΔG_I, ΔG_{II} e ΔG_{TOT} ed il rapporto $\Delta G_{II}/\Delta G_I$ ottenuti dalle analisi per provini con il medesimo lay-up $[0_2/45_2]_s$ e overlap *w* pari a 3, 5, 8 questa volta però soggetti ad alto carico:

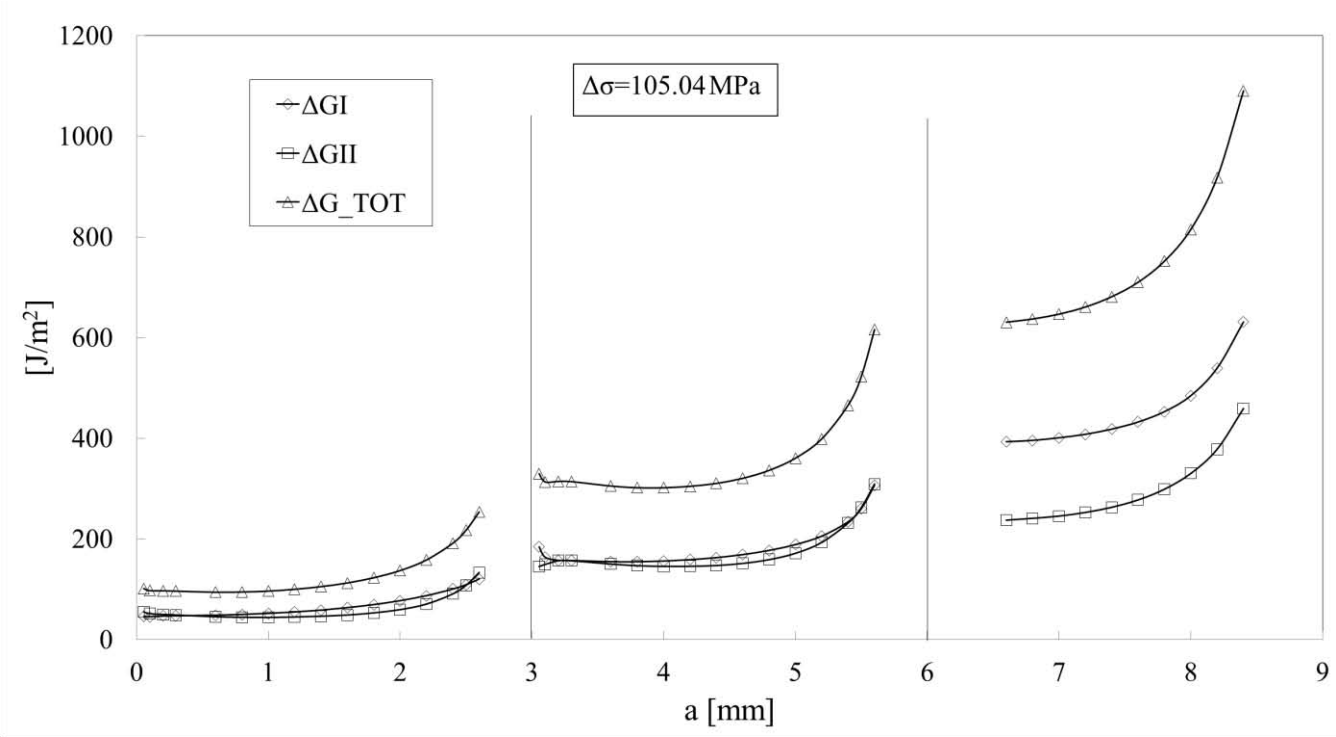


Fig.3.17 Andamento delle componenti del SERR al propagare della delaminazione per zona di giunzione danneggiata, lunghezza di sovrapposizione w=3, Δσ=105.04 MPa (alto carico)

Si può vedere che per delaminazioni propaganti a ridosso della prima interfaccia tra primo e secondo strato aventi lunghezza compresa tra 0 e 3 mm e per cricche propaganti tra il secondo e terzo strato di lunghezza compresa tra 3 e 6 mm, i valori assunti da ΔG_I e ΔG_{II} si discostano solo leggermente tra di loro, indice che la propagazione avviene per lo più a Modo Misto senza che un Modo prevalga nettamente sull'altro. Per lunghezze di delaminazione comprese tra 6 e 9 mm si osserva come ΔG_I sia nettamente superiore rispetto a ΔG_{II} a testimonianza del fatto che la propagazione in questi casi avviene prevalentemente a causa del Modo I. Le medesime considerazioni possono essere fatte se si considera la variazione del rapporto $\Delta G_{II}/\Delta G_I$ al variare della lunghezza di delaminazione.

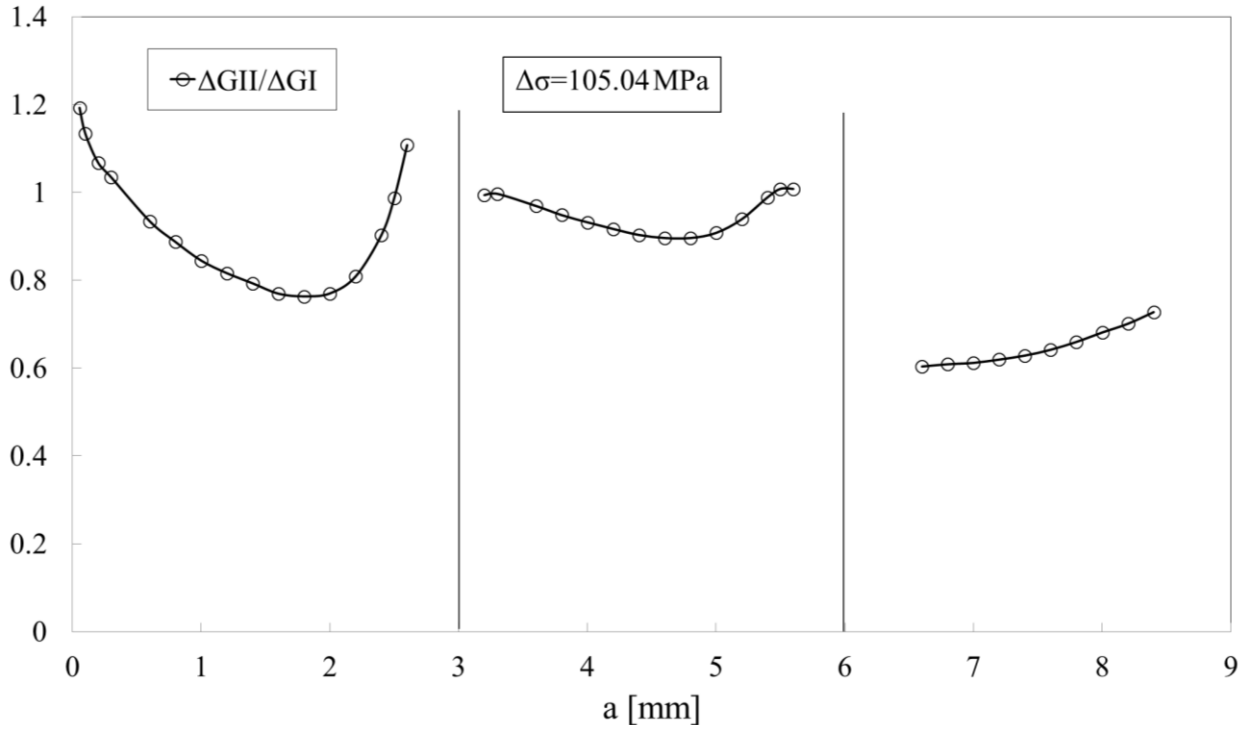


Fig.3.18 Andamento del rapporto $\Delta G_{II}/\Delta G_I$ al propagare della delaminazione per zona di giunzione danneggiata, lunghezza di sovrapposizione w=3, Δσ=105.04 MPa (alto carico)

Di seguito sono rappresentati gli andamenti delle componenti del SERR e l'andamento del rapporto $\Delta G_{II}/\Delta G_I$ al variare della lunghezza delle delaminazione (a) per giunti con overlap *w*=5 mm, soggetti ad alto carico.

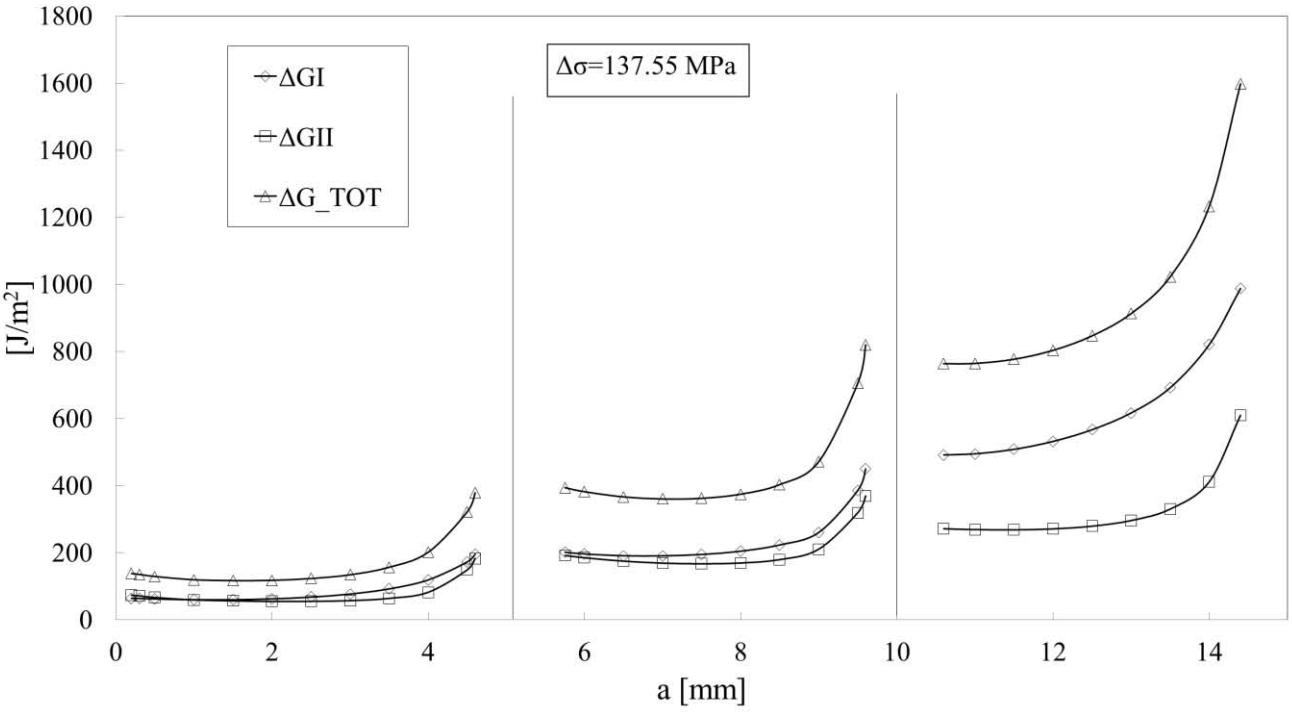


Fig.3.19 Andamento delle componenti del SERR al propagare della delaminazione per zona di giunzione danneggiata, lunghezza di sovrapposizione w=5, Δσ=137.55 MPa (alto carico)

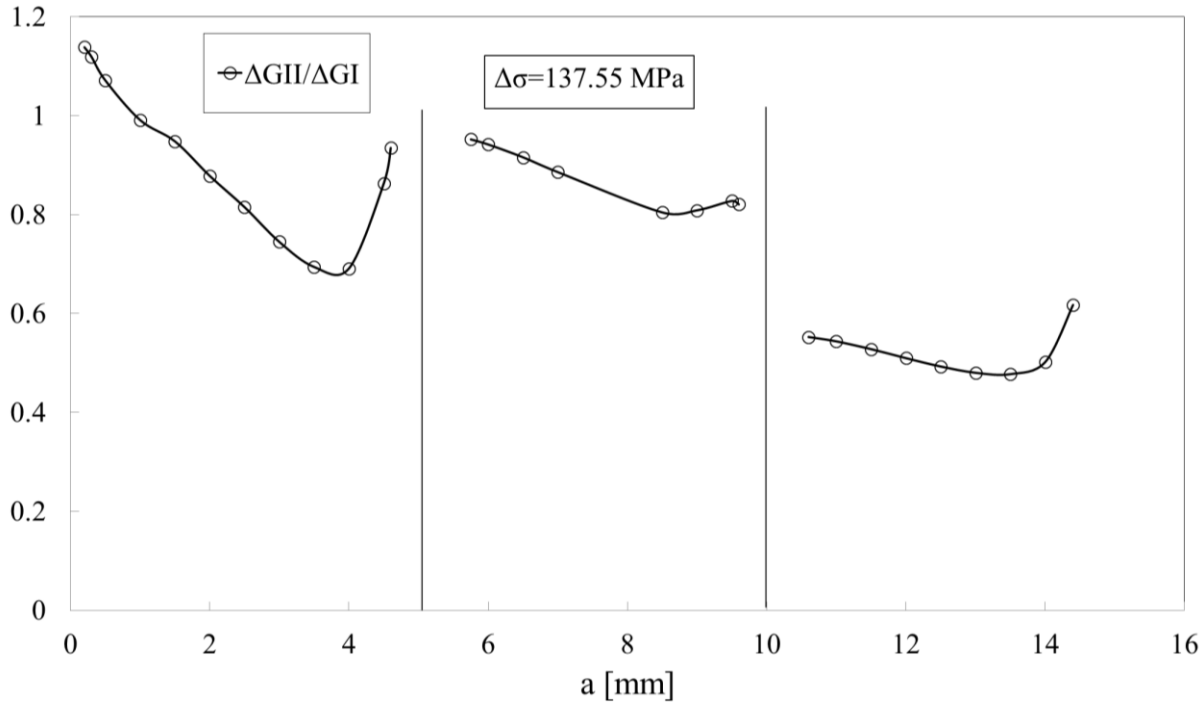


Fig.3.20 Andamento del rapporto $\Delta G_{II}/\Delta G_I$ al propagare della delaminazione per zona di giunzione danneggiata, lunghezza di sovrapposizione w=5, Δσ=137.55 MPa (alto carico)

Si riportano infine le medesime curve ricavate ponendo *w*=8 mm e Δσ = 153.14 MPa

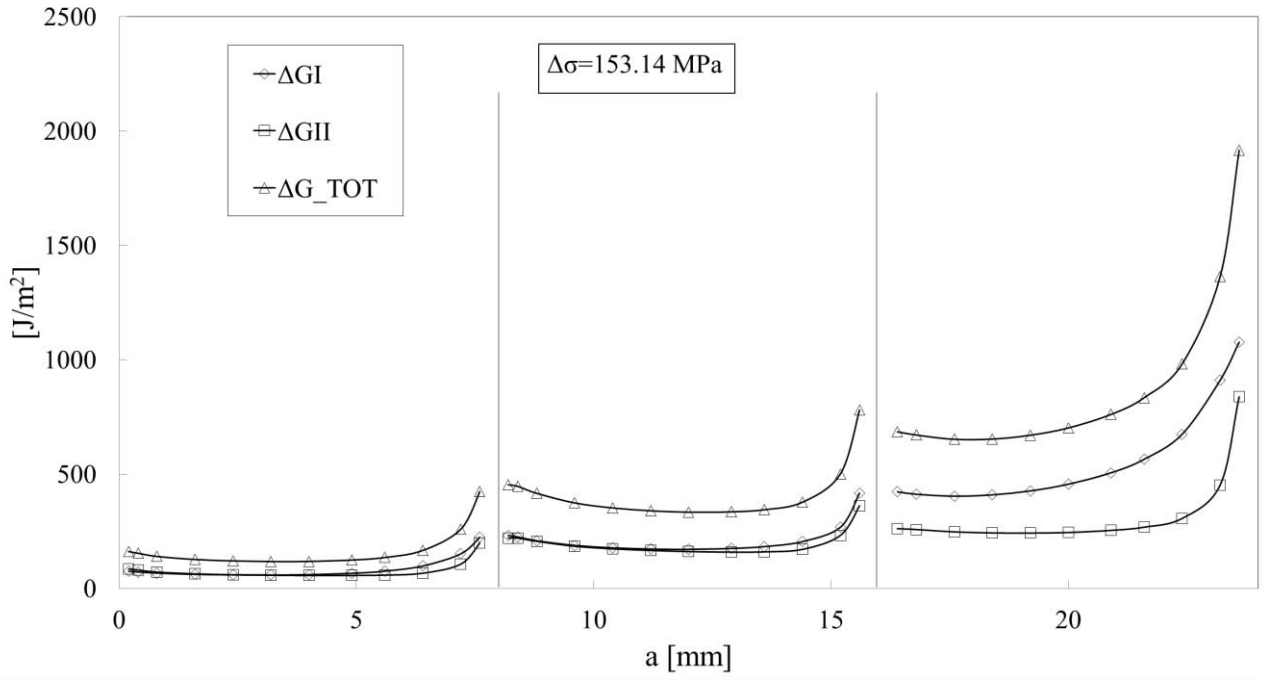


Fig.3.21 Andamento delle componenti del SERR al propagare della delaminazione per zona di giunzione danneggiata, lunghezza di sovrapposizione w=8, Δσ=153.14 MPa (alto carico)

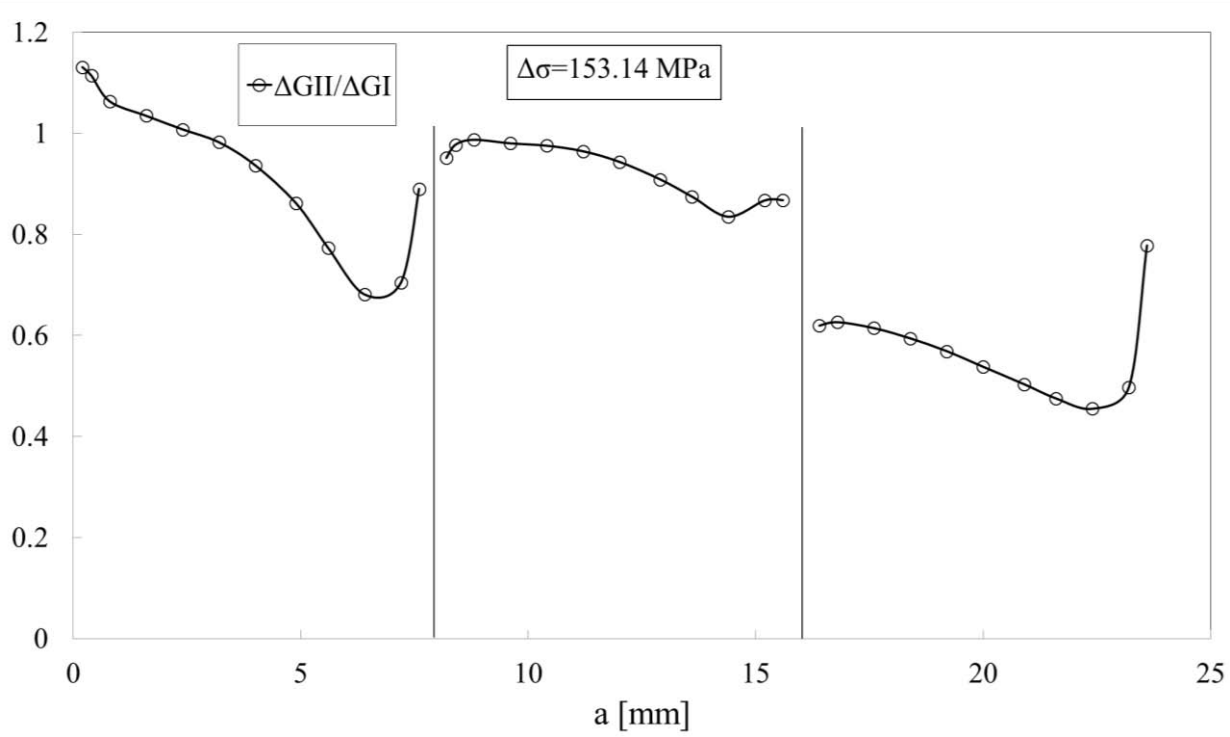


Fig.3.22 Andamento del rapporto $\Delta G_{II}/\Delta G_I$ al propagare della delaminazione per zona di giunzione danneggiata, lunghezza di sovrapposizione w=8, Δσ=153.14 MPa (alto carico)

Gli andamenti delle curve ottenuti per l'alto carico sono del tutto simili a quelli ottenuti per il basso carico perciò valgono le considerazioni già fatte in precedenza. Ciò che invece varia sono i valori delle componenti del SERR ΔG_I, ΔG_{II} e ΔG_{TOT} che per l'alto carico risultano essere superiori, come facilmente si può intuire.

Si possono a questo punto riassumere i risultati ottenuti nei seguenti grafici dove sono riportati i valori ΔG_I e ΔG_{II} e naturalmente il rapporto $\Delta G_{II}/\Delta G_I$ per i vari *overlap* e per i due livelli di carico analizzati (basso carico ed alto carico) in funzione della lunghezza di delaminazione *a* normalizzata rispetto alla lunghezza di sovrapposizione:

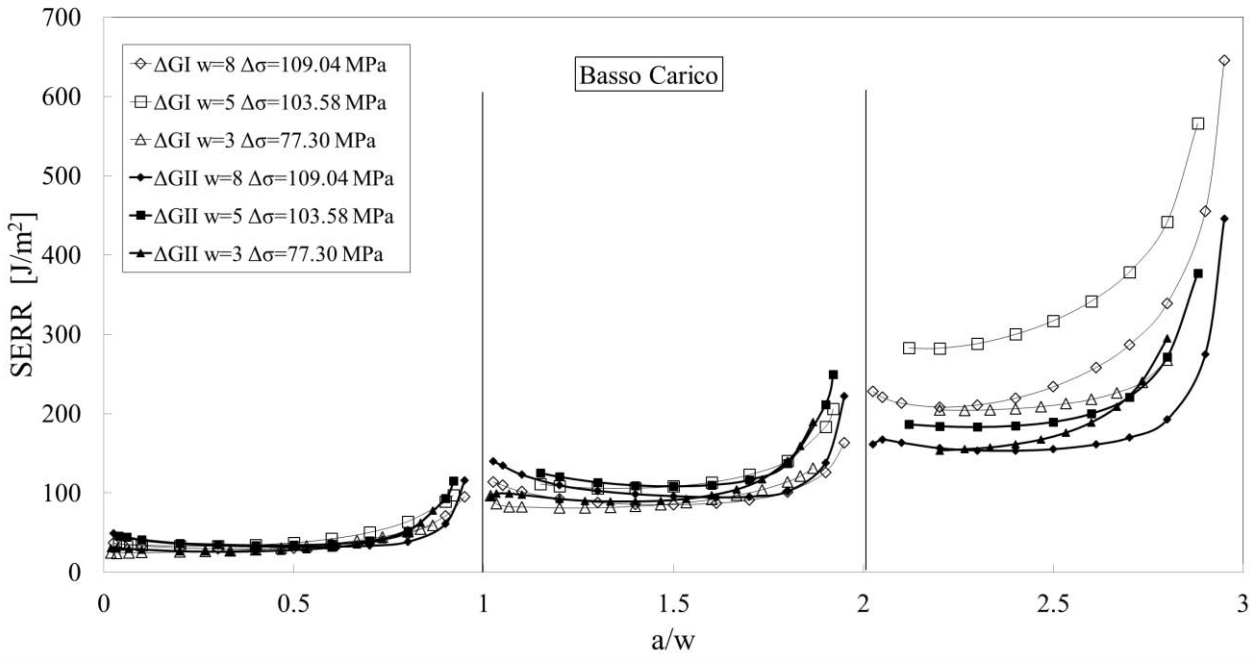


Fig.3.23 andamento di ΔG_I e ΔG_{II} per i diversi overlap soggetti a basso carico in funzione della lunghezza di delaminazione normalizzata rispetto alla lunghezza di sovrapposizione

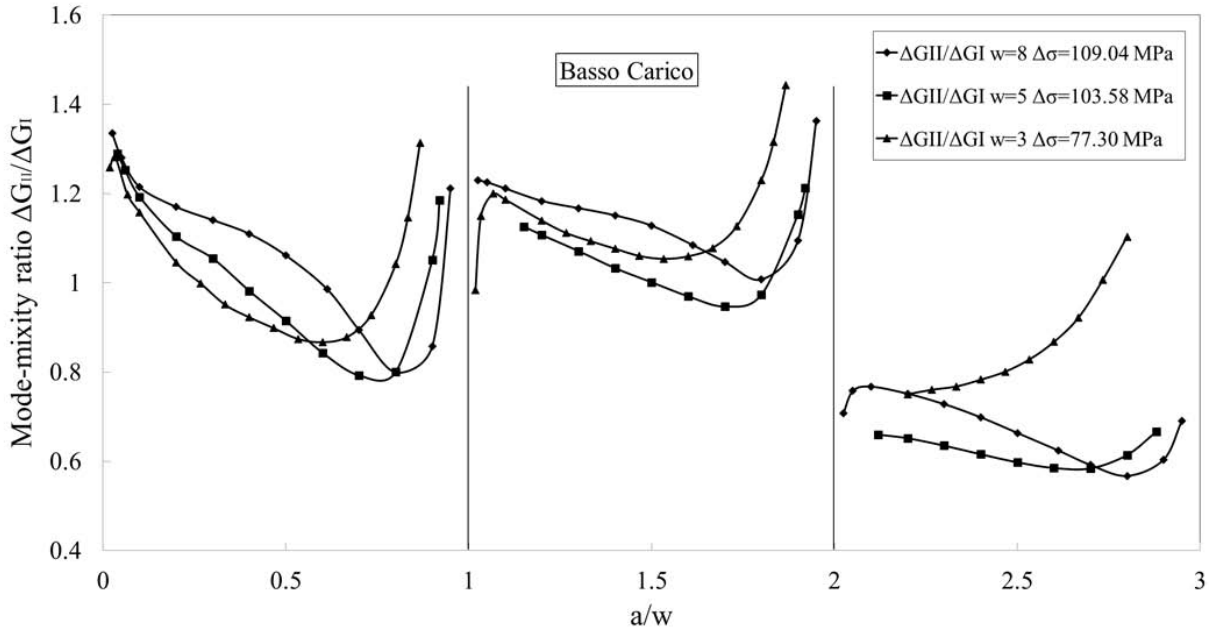


Fig.3.24 andamento di $\Delta G_{II}/\Delta G_I$ per i vari *overlap* soggetti a basso carico in funzione della lunghezza di delaminazione normalizzata rispetto alla lunghezza di sovrapposizione

Utilizzando in aggiunta la formulazione del Modo Misto (MM) reperita in ([17] P.A.Carraro G. Meneghetti M. Quaresimin M. Ricotta, 2012):

$$MM = \frac{G_{II}}{G_I + G_{II}} \tag{3.3}$$

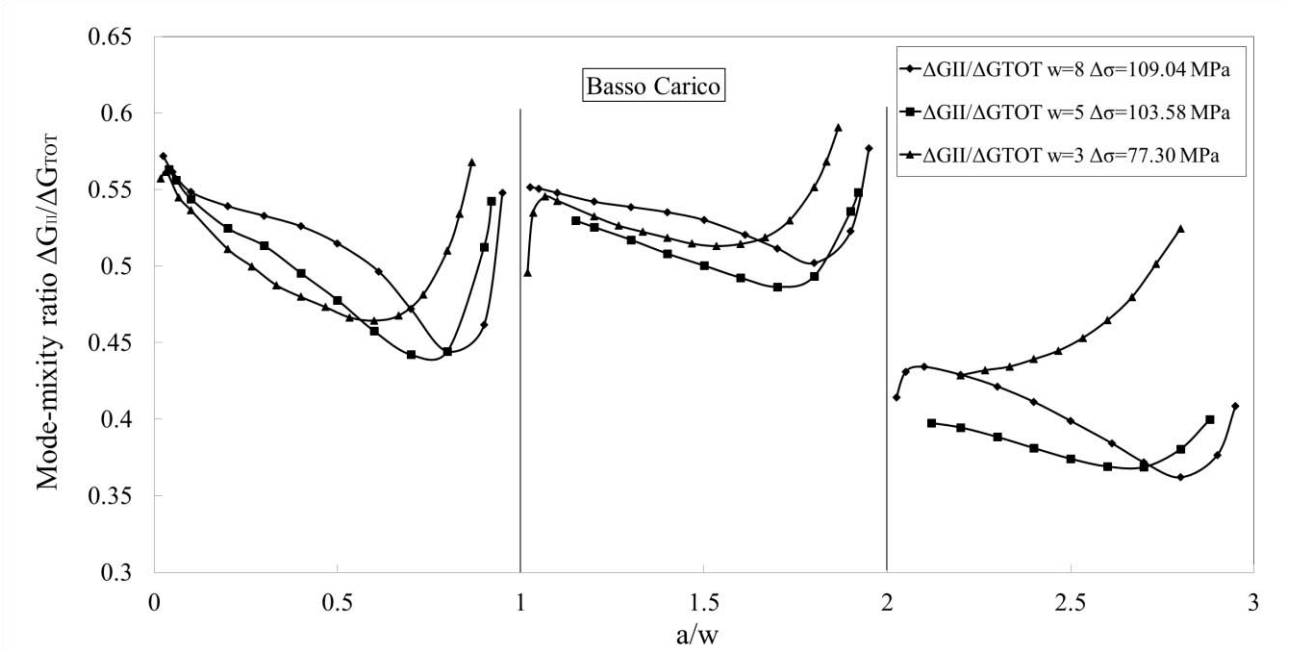


Fig.3.25 andamento di $\Delta G_{II}/\Delta G_I$ per i vari *overlap* soggetti a basso carico in funzione della lunghezza di delaminazione normalizzata rispetto alla lunghezza di sovrapposizione

Se si confrontano invece le curve ottenute per l'alto carico, si ottengono i seguenti grafici

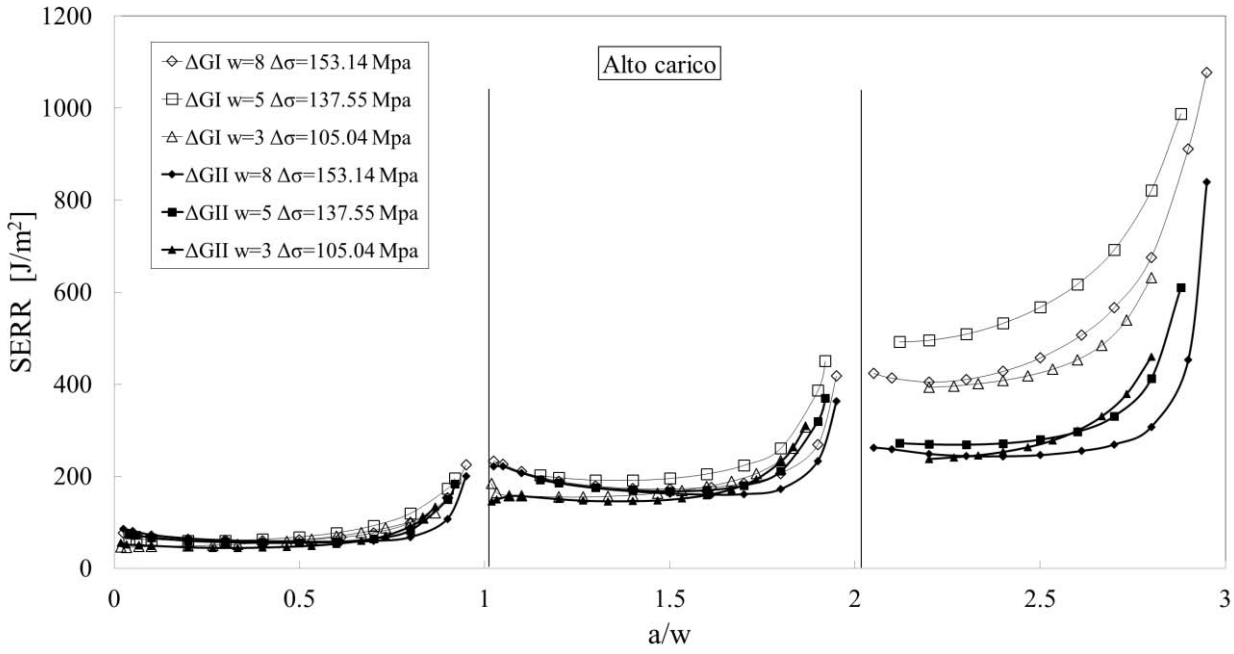


Fig.3.26 andamento di ΔG_{II} e ΔG_I per i vari *overlap* soggetti ad alto carico in funzione della lunghezza di delaminazione normalizzata rispetto alla lunghezza di sovrapposizione

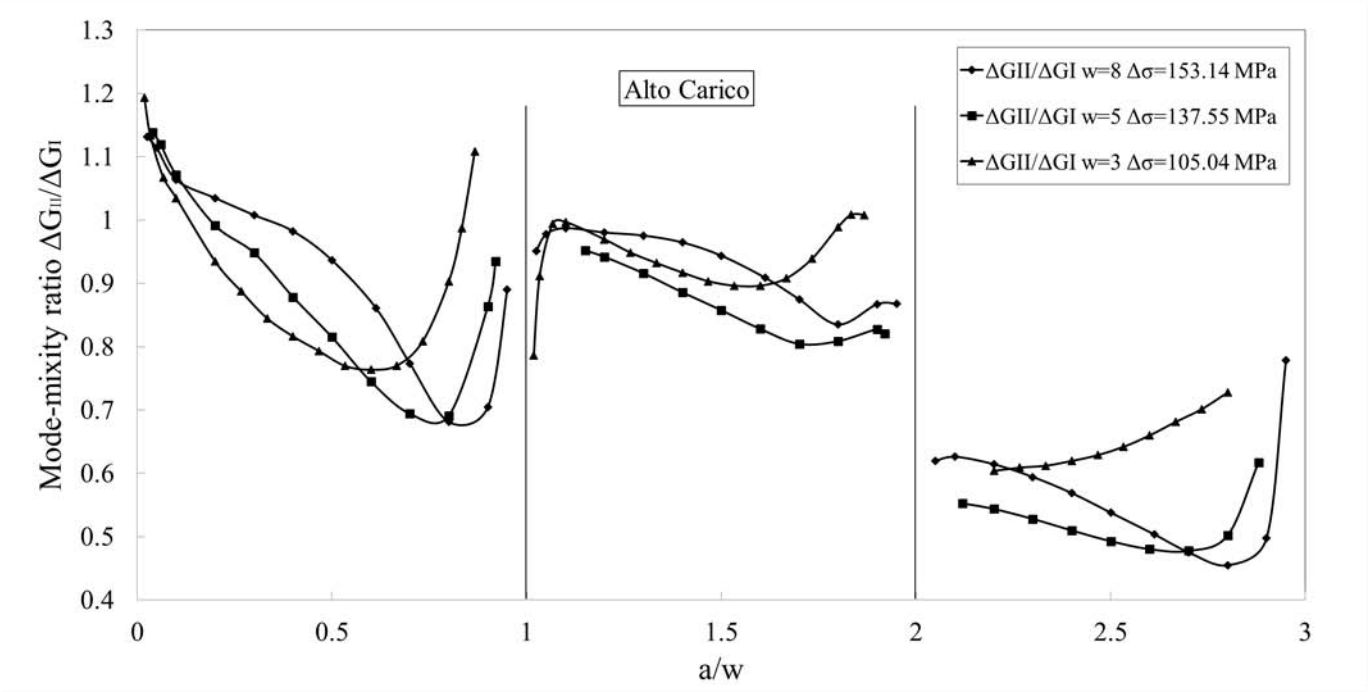


Fig.3.27 andamento di $\Delta G_{II}/\Delta G_I$ per i vari *overlap* soggetti ad alto carico in funzione della lunghezza di delaminazione normalizzata rispetto alla lunghezza di sovrapposizione

Applicando ancora una volta la formulazione del Modo Misto (MM) di P.A.Carraro, G. Meneghetti, M. Quaresimin, M. Ricotta, si ottengono le seguenti curve, che presentano un andamento analogo alle precedenti.

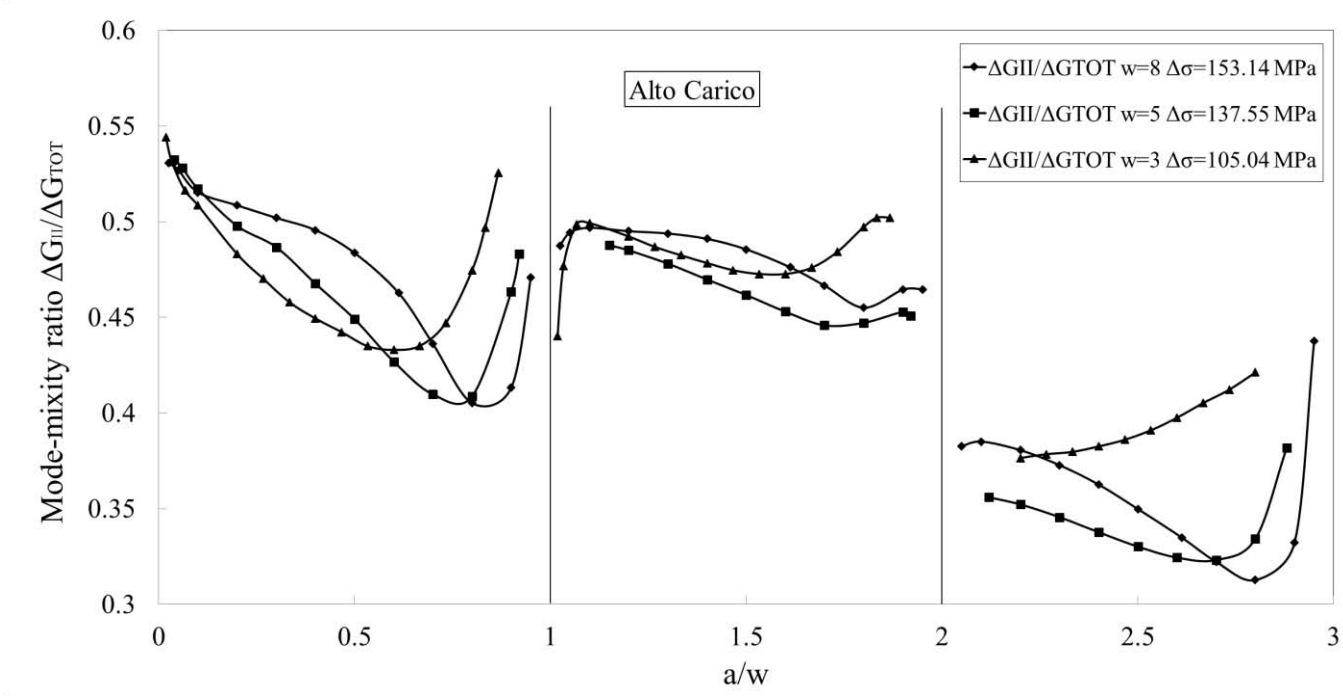


Fig.3.28 andamento di $\Delta G_{II}/\Delta G_{TOT}$ per i vari overlap soggetti ad alto carico in funzione della lunghezza di delaminazione normalizzata rispetto alla lunghezza di sovrapposizione

3.3 Confronto tra lay-up $[0]_8$ e $[0_2/45_2]_s$

Una volta terminate le analisi FEM per le giunzioni stepped con *lay-up* $[0_2/45_2]_s$, si sono confrontati i risultati ottenuti in termini di ΔG_I, ΔG_{II}, ΔG_{TOT} e $\Delta G_{II}/\Delta G_I$ con quelli trovati da Michele Ferrari [6] per giunti con *lay-up* $[0]_8$, al variare della lunghezza di sovrapposizione e della tipologia di carico (alto o basso carico). I primi risultati ad essere confrontati riguardano l'andamento delle componenti del SERR e del rapporto $\Delta G_{II}/\Delta G_I$ per provini con lunghezza di sovrapposizione *w*=3 mm soggetti ad alto carico.

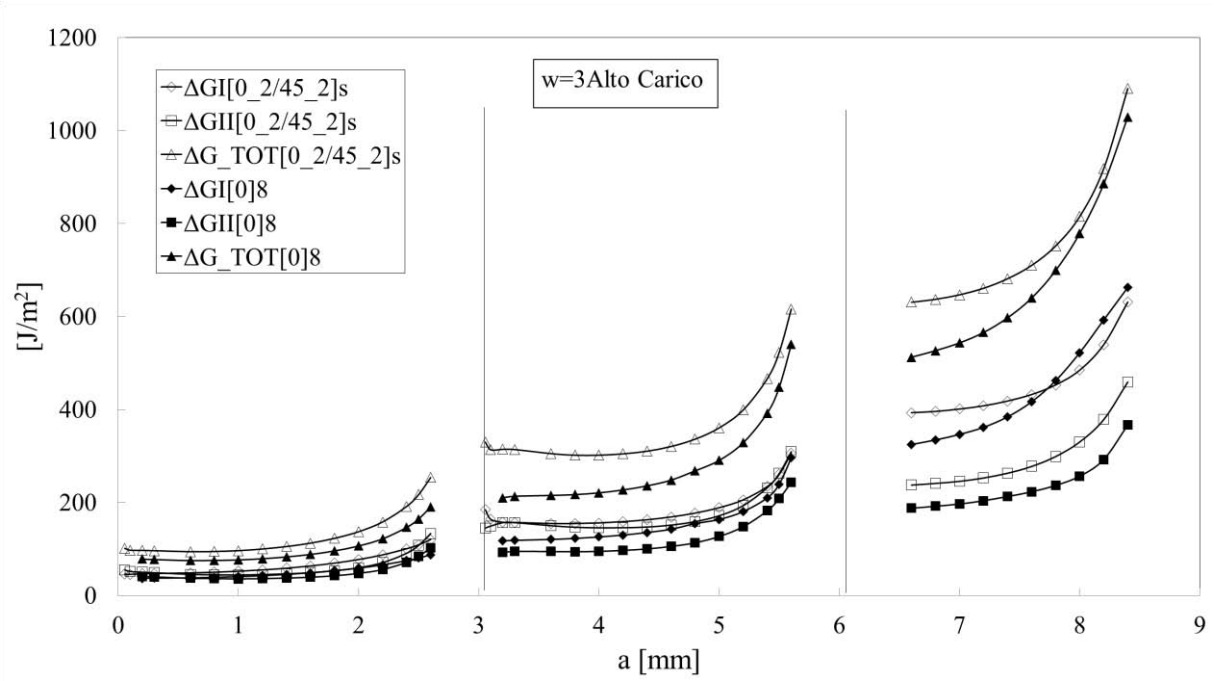


Fig.3.29 andamento di ΔG_{II}, ΔG_I e ΔG_{TOT} in funzione della lunghezza di delaminazione per le due tipologie di lay-up. Overlap 3mm. Alto Carico.

L'andamento delle componenti del SERR per i due diversi *lay-up* è analogo; si può solo evidenziare il fatto che i valori di ΔG_I, ΔG_{II} e ΔG_{TOT} per il *lay-up* $[0_2/45_2]_s$ sono superiori rispetto a quelli assunti per lo $[0]_8$ soprattutto se si considerano lunghezze di delaminazione superiori a 3 mm. L'analisi dell'andamento del rapporto $\Delta G_{II}/\Delta G_I$ evidenzia come per i provini con *lay-up* $[0]_8$ la propagazione della delaminazione avvenga maggiormente in presenza di Modo II rispetto a quelli con *lay-up* $[0_2/45_2]_s$; questo fatto si verifica specialmente per delaminazioni di lunghezza compresa tra 6 e 9 mm propaganti lungo la terza interfaccia.

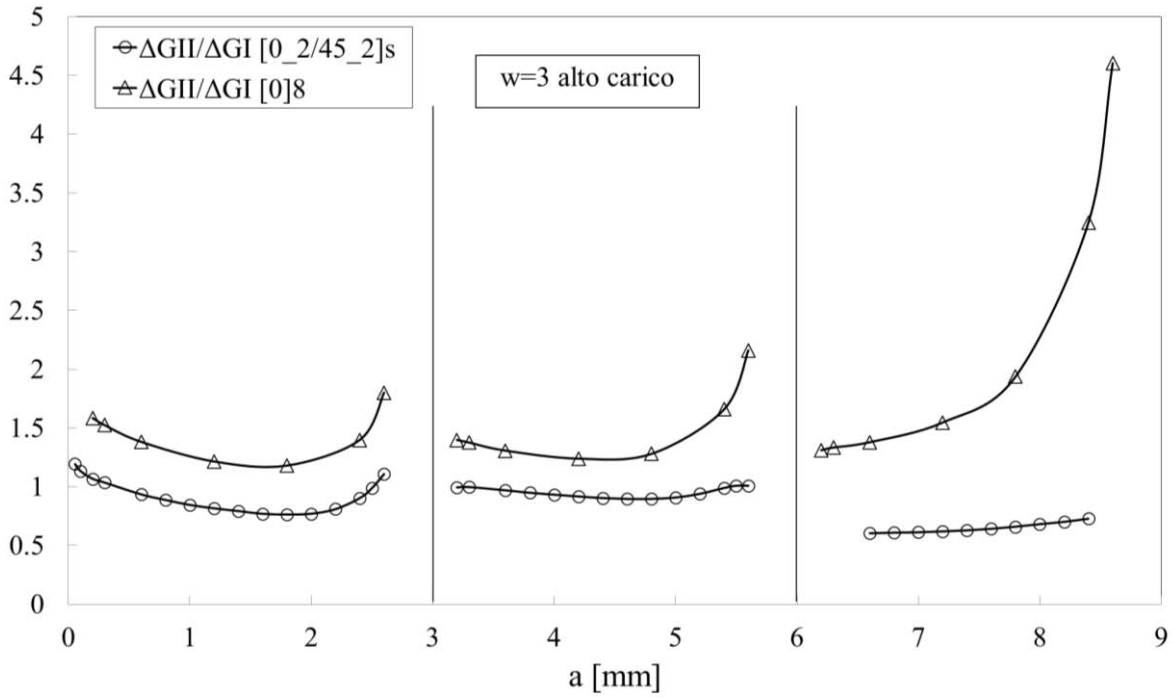


Fig.3.30 andamento di ΔG_{II}, ΔG_I e ΔG_{TOT} in funzione della lunghezza di delaminazione per le due tipologie di lay-up. Overlap 3mm. Basso Carico.

Passando ad analizzare il basso carico si può vedere che l'andamento delle componenti del SERR sia analogo al precedente tuttavia questa volta sono i valori ΔG_I, ΔG_{II} e ΔG_{TOT} del *lay-up* $[0_2/45_2]_s$ ad essere superiori rispetto a quelli del *lay-up* $[0]_8$. L'andamento del rapporto ΔG_{II} / ΔG_I mostra come la tipologia di *lay-up*, per lunghezze di delaminazione comprese tra 0 e 3 mm, non influisca sul Modo di sollecitazione in quanto le curve risultano essere quasi sovrapposte. Per lunghezze di delaminazione comprese tra 3 e 9 mm invece si può vedere un discostamento accentuato delle curve ed in particolare si evidenzia come per i provini con *lay-up* $[0_2/45_2]_s$ la propagazione della delaminazione avvenga maggiormente in presenza di Modo II rispetto a quelli con *lay-up* $[0]_8$, situazione opposta alla precedente.

Si può infine vedere come per delaminazioni propaganti lungo la terza interfaccia il Modo I aumenti all'aumentare della lunghezza di propagazione nel caso di *lay-up* $[0]_8$ mentre diminuisce nel caso di *lay-up* $[0_2/45_2]_s$.

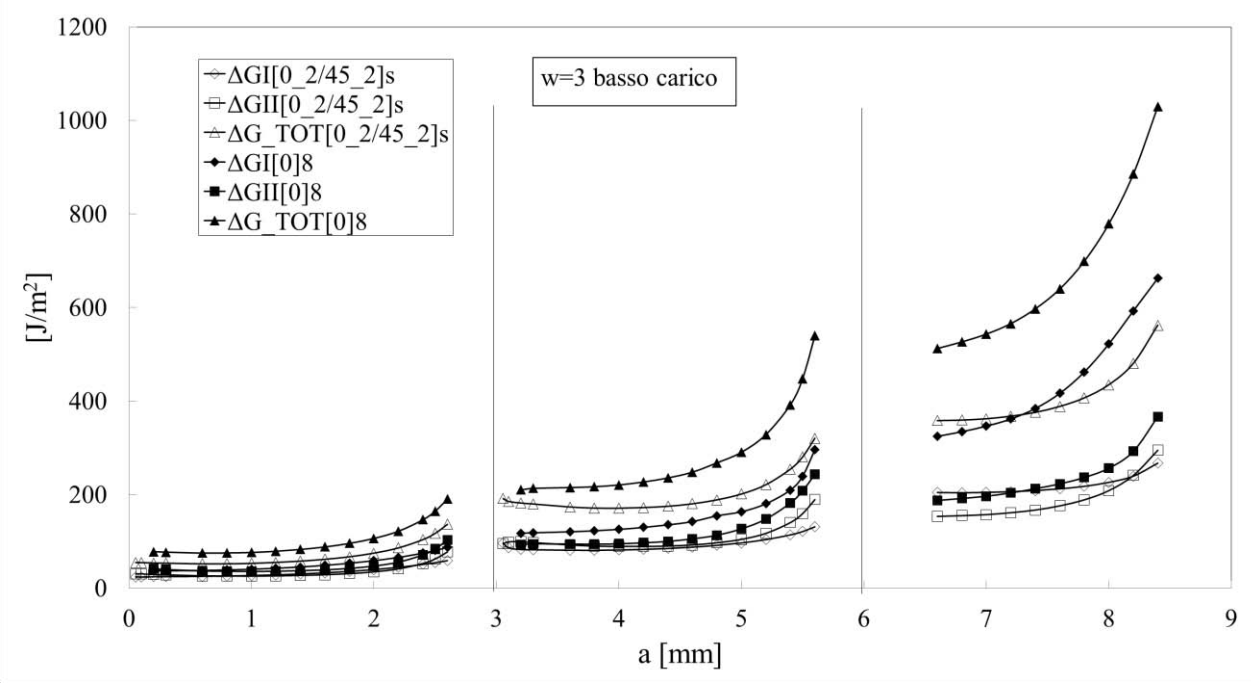


Fig.3.31 andamento di $\Delta G_{II}/\Delta G_I$ in funzione della lunghezza di delaminazione per le due tipologie di lay-up. Overlap 3mm. Alto Carico.

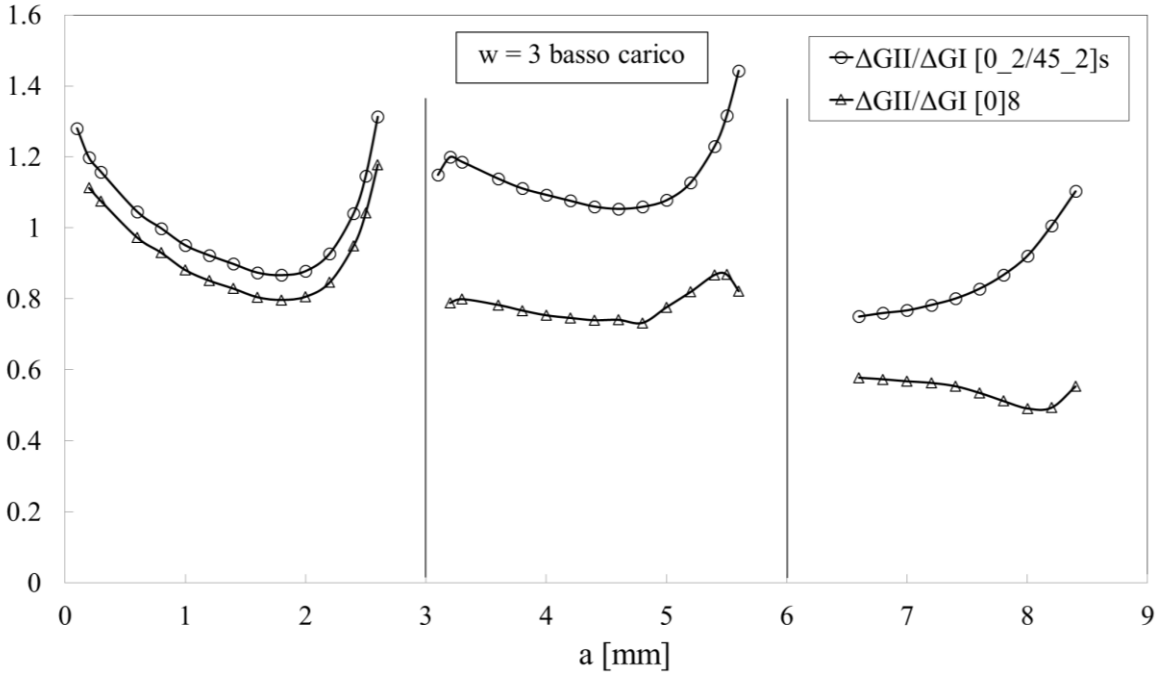


Fig.3.32 andamento di $\Delta G_{II}/\Delta G_I$ in funzione della lunghezza di delaminazione per le due tipologie di lay-up. Overlap 3mm. Basso Carico.

Si considera ora la variante con lunghezza di sovrapposizione w = 5 mm soggetta ad alto carico. Risulta subito evidente che non sono riportate le curve del SERR relative al *lay-up* $[0]_8$ per lunghezze di delaminazione comprese tra 10 e 15 mm. Nel lavoro di tesi di Michele Ferrari [6] infatti le analisi condotte in tale intervallo non sono arrivate a convergenza. Per quanto invece riguarda gli andamenti delle componenti del SERR e del rapporto $\Delta G_{II}/\Delta G_I$, si possono fare le medesime cosiderazioni fatte per il caso con *over-lap* w=3 mm soggetto a basso carico.

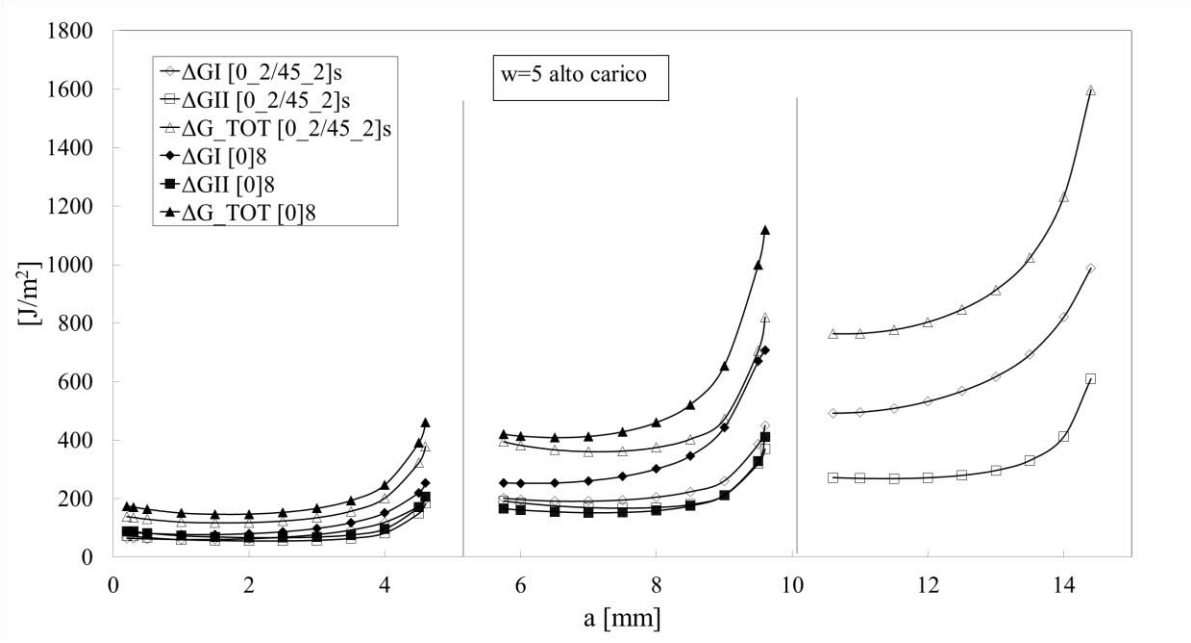


Fig.3.33 andamento di ΔG_{II}, ΔG_I e ΔG_{TOT} in funzione della lunghezza di delaminazione per le due tipologie di lay-up. Overlap 5mm. Alto Carico.

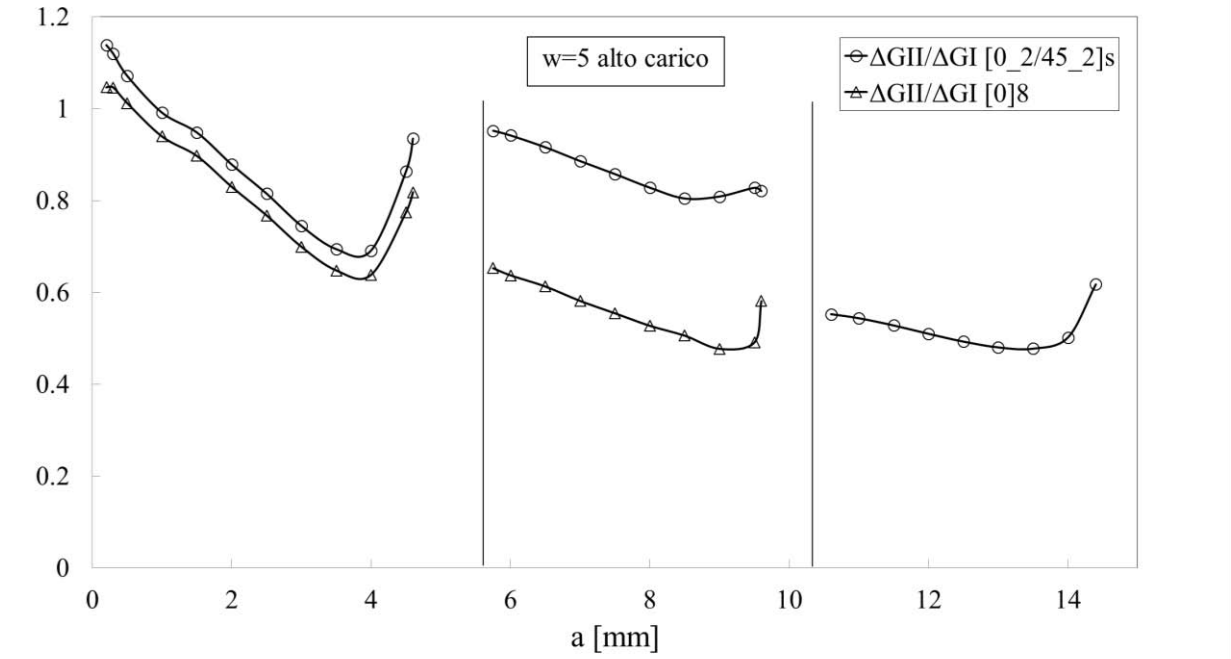


Fig.3.34 andamento di $\Delta G_{II}/\Delta G_I$ in funzione della lunghezza di delaminazione per le due tipologie di lay-up. Overlap 5mm. Alto Carico.

Se si considera ora la giunzione con *overlap* = 5mm soggetta a basso carico si può vedere come per lunghezze di delaminazione comprese tra 10 e 15 mm siano presenti le curve delle componenti del SERR e del rapporto $\Delta G_{II}/\Delta G_I$ per entrambi i *lay-up* a differenza di quanto trovato per l'alto carico.

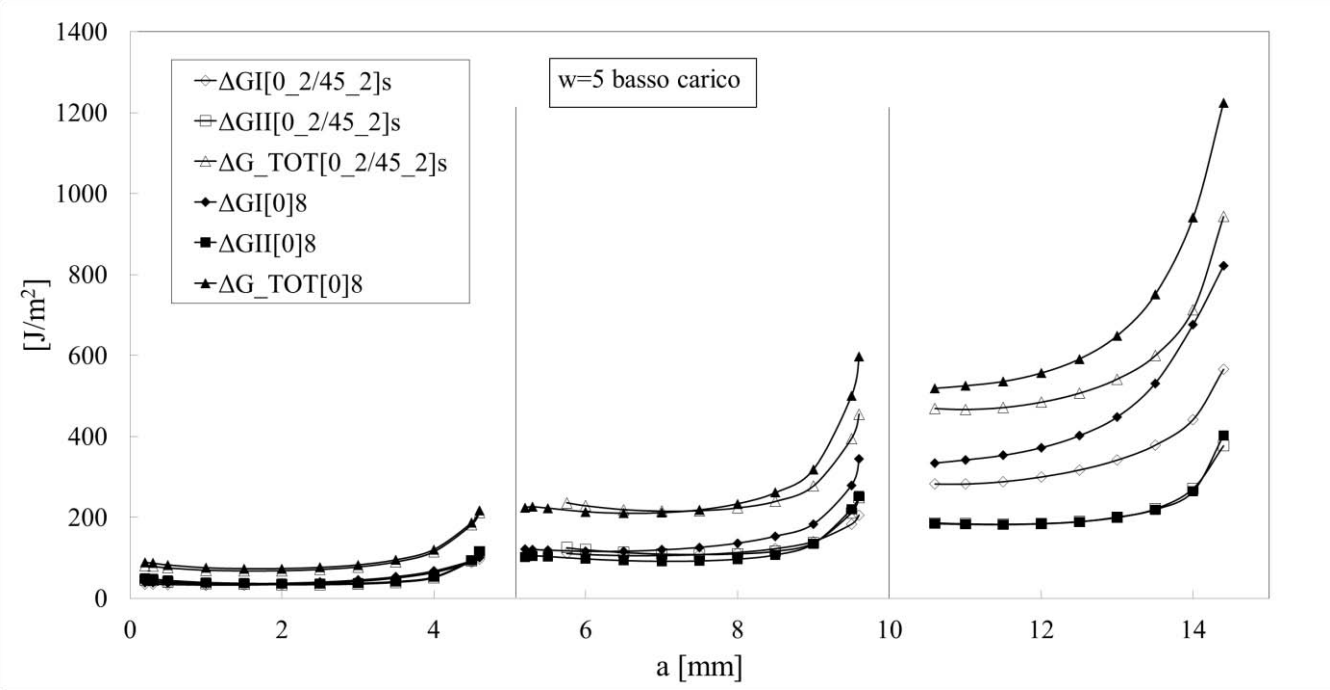


Fig.3.35 andamento di ΔG_{II}, ΔG_I e ΔG_{TOT} in funzione della lunghezza di delaminazione per le due tipologie di lay-up. Overlap 5mm. Basso Carico.

Ancora una volta se si analizza l'andamento del rapporto $\Delta G_{II}/\Delta G_I$ si nota che per lunghezze di delaminazioni comprese tra 0 e 5 mm, il Modo di sollecitazione non varia al variare del *lay-up* considerato. Per delaminazioni propaganti invece lungo la seconda e la terza interfaccia si nota come il Modo II di sollecitazione sia maggiormente influente nel *lay-up*

$[0_2/45_2]_s$ rispetto a quanto accade per lo $[0]_8$. L'andamento del rapporto $\Delta G_{II}/\Delta G_I$ al variare della lunghezza di delaminazione, per giunzioni con *overlap* 5mm soggette a basso carico, è riportata in *Fig.3.36*.

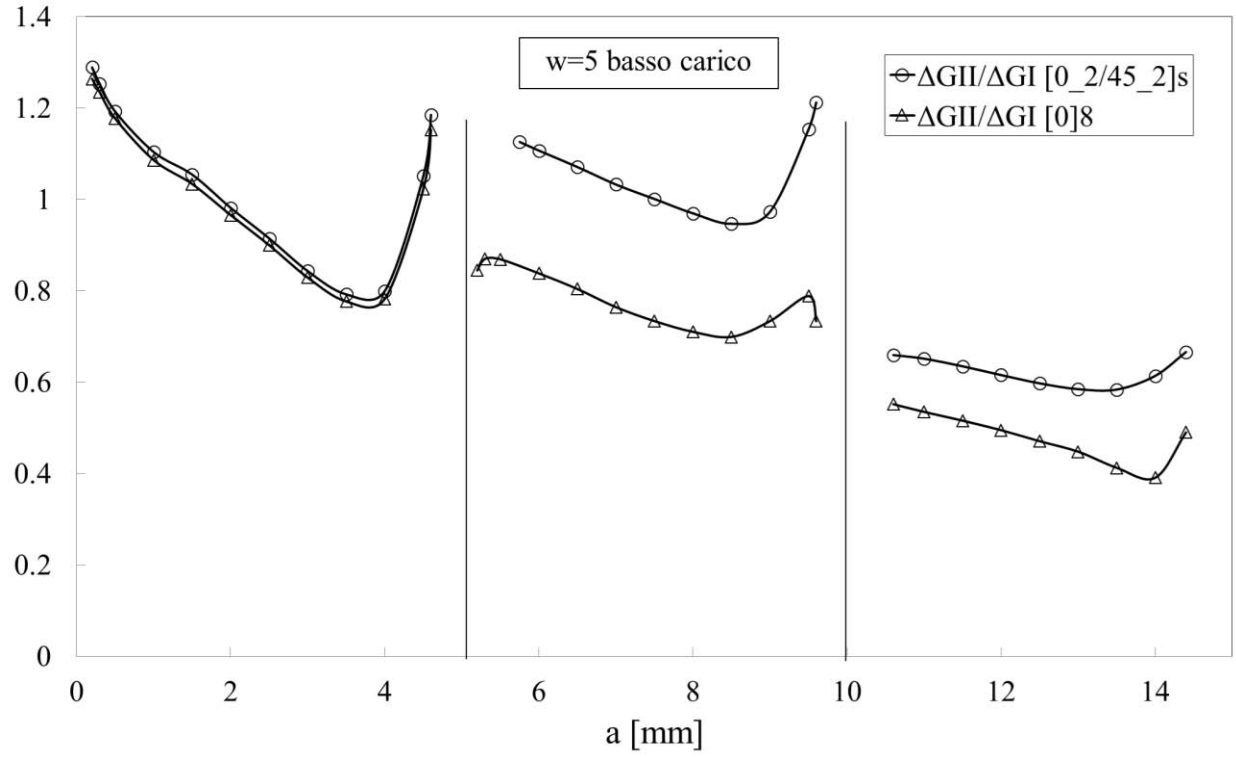


Fig.3.36 andamento di $\Delta G_{II}/\Delta G_I$ in funzione della lunghezza di delaminazione per le due tipologie di lay-up. Overlap 5mm. Basso Carico.

Si riporta, infine, il confronto dei due *lay-up* per lunghezza di sovrapposizione pari a 8 mm; come fatto precedentemente si confrontano prima i risultati relativi alle componenti del SERR e al rapporto $\Delta G_{II}/\Delta G_I$ per l'alto carico e poi si considera il basso carico.

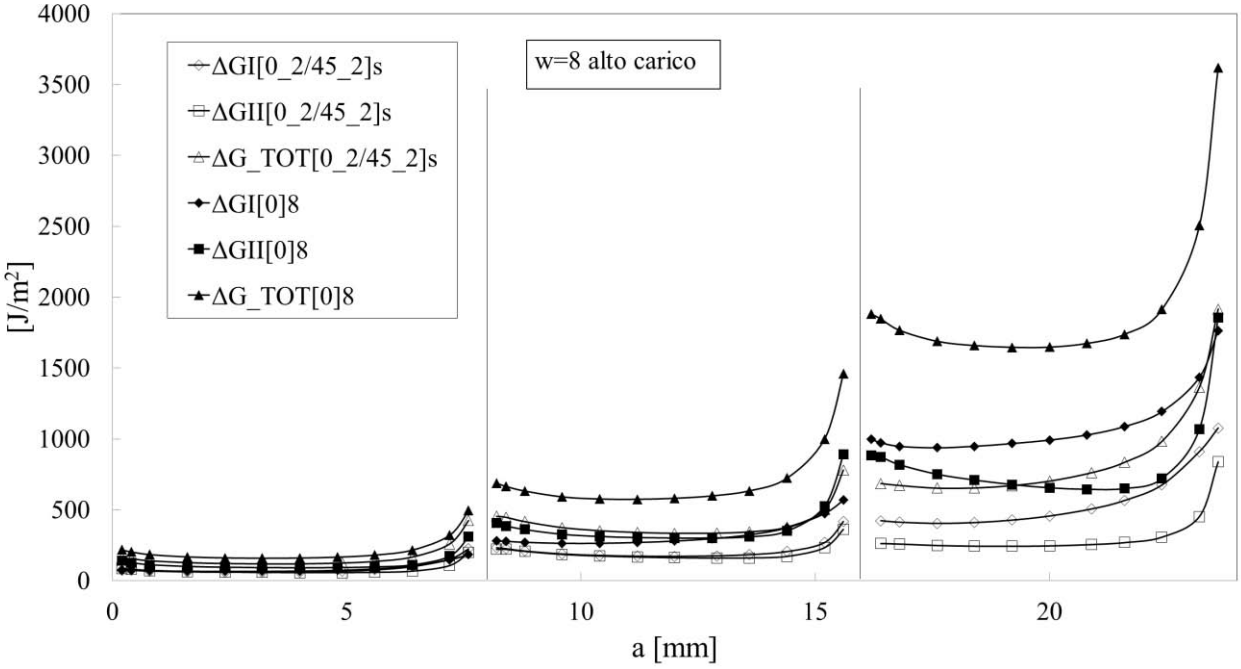


Fig.3.37 andamento di ΔG_{II}, ΔG_I e ΔG_{TOT} in funzione della lunghezza di delaminazione per le due tipologie di lay-up. Overlap 8mm. Alto Carico.

Si nota che a differenza dei precedenti casi la tipologia di *lay-up* influisce sul rapporto $\Delta G_{II}/\Delta G_I$ se si considera una delaminazione propagante lungo la prima interfaccia. Per lunghezze di delaminazione fino a 24 mm si può vedere un discostamento delle curve ed in particolare si evidenzia come per i provini con *lay-up* $[0_2/45_2]_s$ la propagazione della delaminazione avvenga maggiormente in presenza di Modo II rispetto a quelli con *lay-up* $[0]_8$.

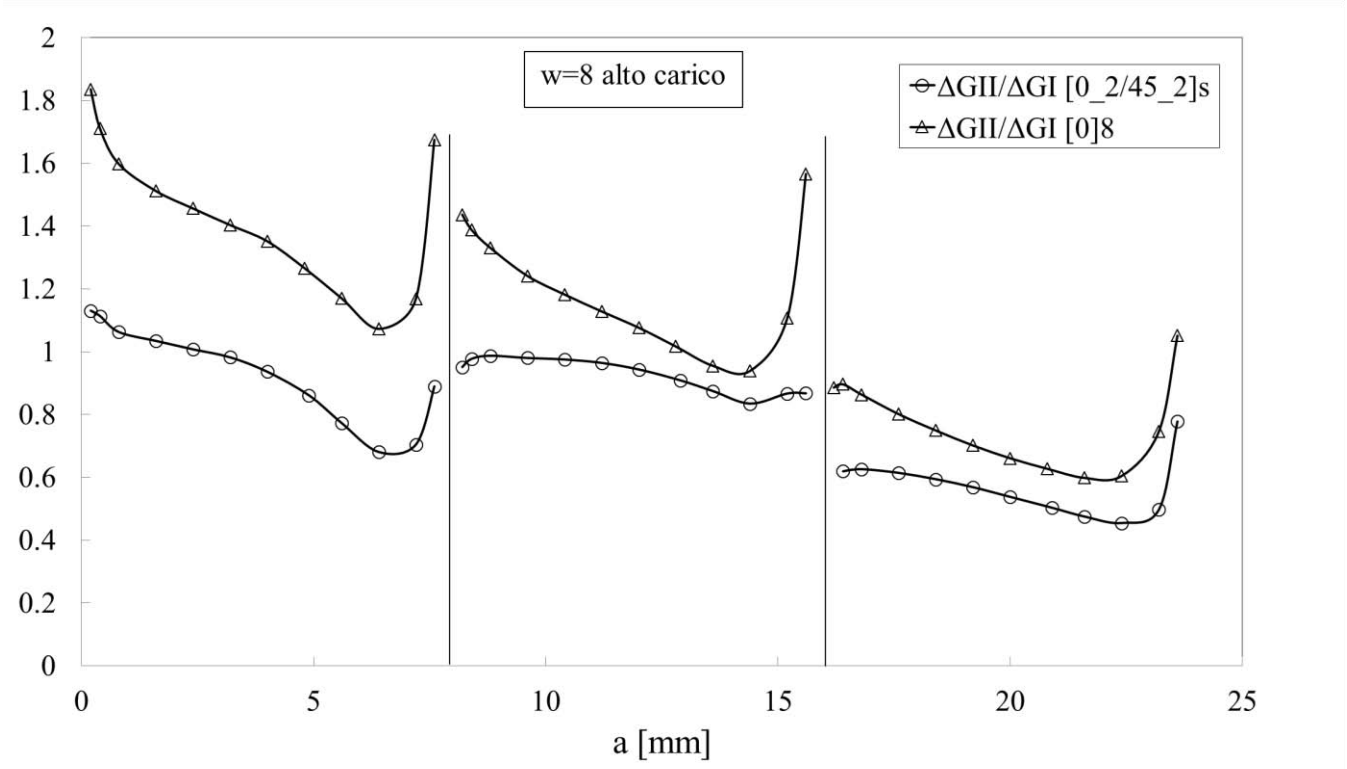


Fig.3.38 andamento di $\Delta G_{II}/\Delta G_I$ in funzione della lunghezza di delaminazione per le due tipologie di lay-up. Overlap 8mm. Alto Carico.

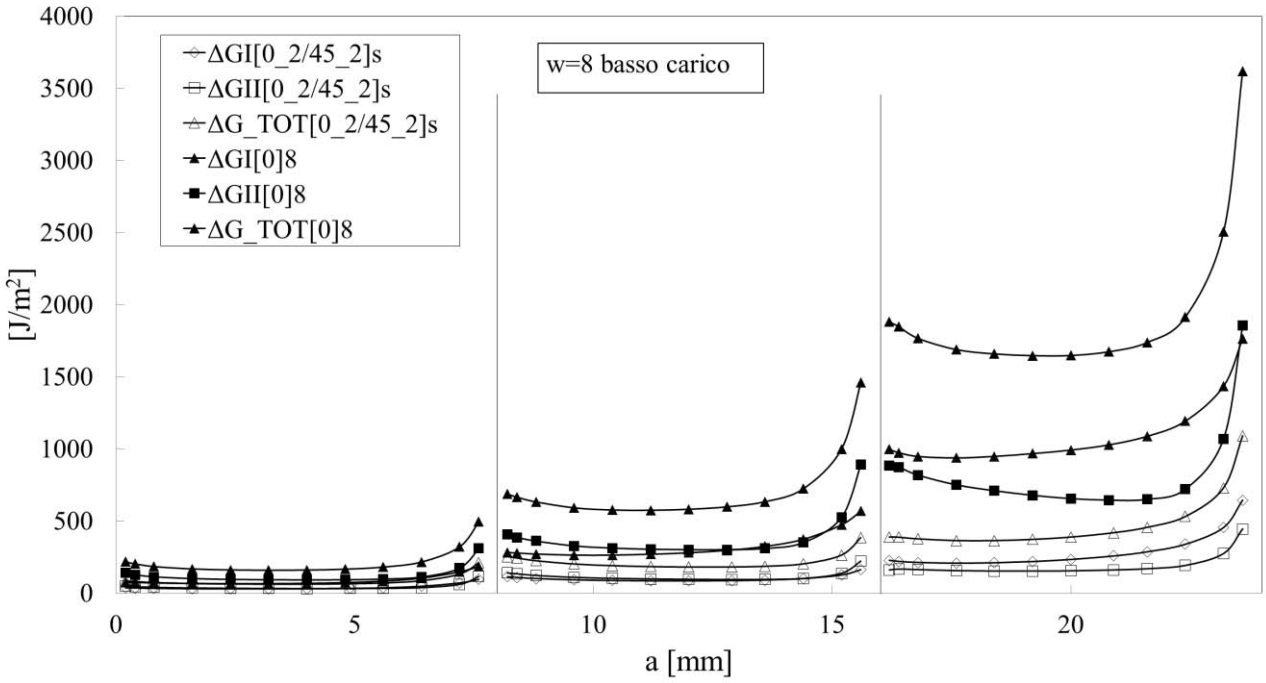


Fig.3.39 andamento di ΔG_I, ΔG_{II},ΔG_{TOT} in funzione della lunghezza di delaminazione per le due tipologie di lay-up. Overlap 8mm. Basso Carico.

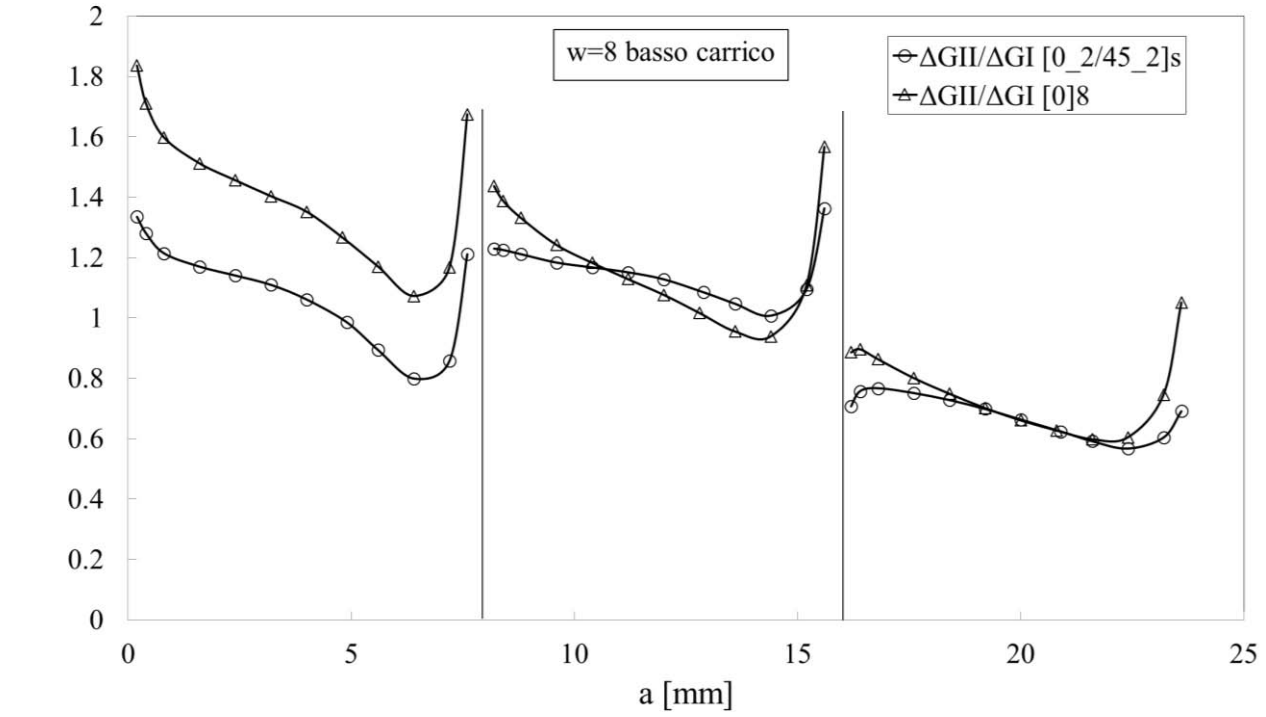


Fig.3.40 andamento di $\Delta G_{II}/\Delta G_I$ in funzione della lunghezza di delaminazione per le due tipologie di lay-up. Overlap 8mm. Basso Carico.

3.4 Confronto tra *lay-up* $[0_2/45_5/0]$ e $[0_2/45_2]_s$

Nell'ultima parte del capitolo viete fatto un raffronto tra gli andamenti delle componenti del SERR al variare della lunghezza di delaminazione ottenuti per i 2 diversi *lay-up*: $[0_2/45_5/0]$ e $[0_2/45_2]_s$. Il confronto è stato fatto considerando le due diverse ampiezze di tensione utilizzate nelle prove ad alto ed in quelle a basso carico: per l'alto carico $\Delta\sigma$=137.55 MPa mentre per le prove a basso carico $\Delta\sigma$=103.58 MPa. La lunghezza di sovrapposizione è pari a 5 mm. Per ciascun livello di carico sono riportati 3 grafici rappresentanti gli andamenti di ΔG_I, ΔG_{II}, ΔG_{TOT} lungo la prima, la seconda e la terza interfaccia rispettivamente. Si riporta qui di seguito il confronto relativo all'alto carico.

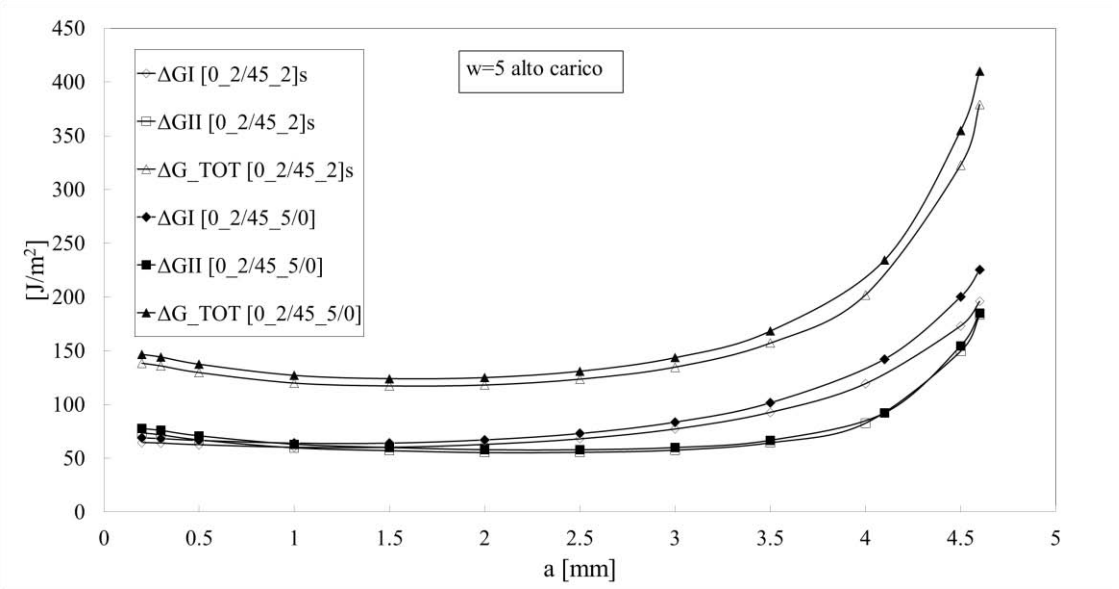


Fig.3.41 andamento di ΔG_I, ΔG_{II},ΔG_{TOT} in funzione della lunghezza di delaminazione per le due tipologie di lay-up. Overlap 5mm. Alto Carico. 1° interfaccia.

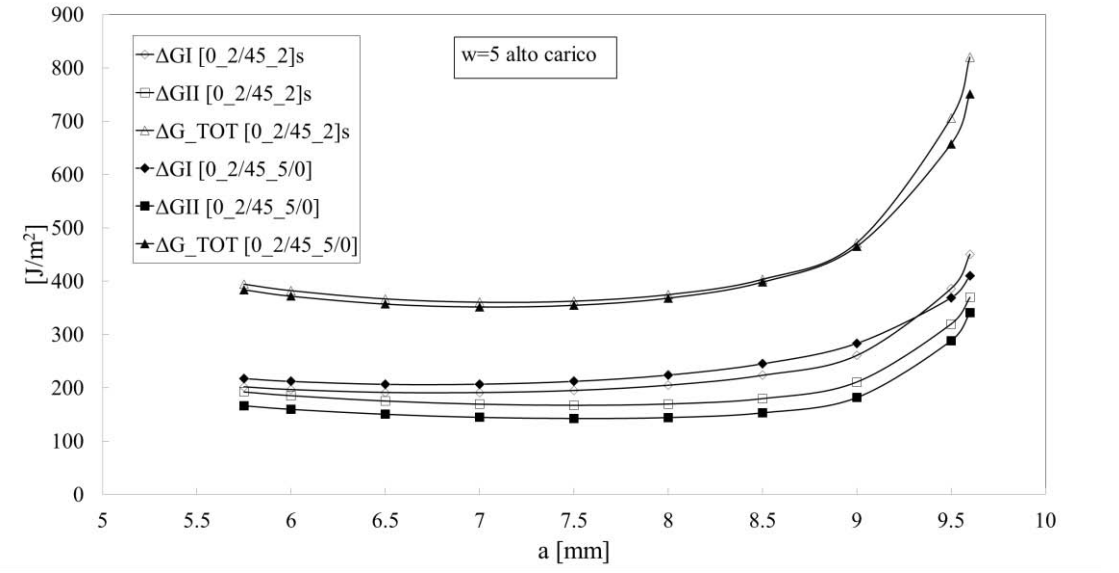


Fig.3.42 andamento di ΔG_I, ΔG_{II},ΔG_{TOT} in funzione della lunghezza di delaminazione per le due tipologie di lay-up. Overlap 5mm. Alto Carico. 2° interfaccia.

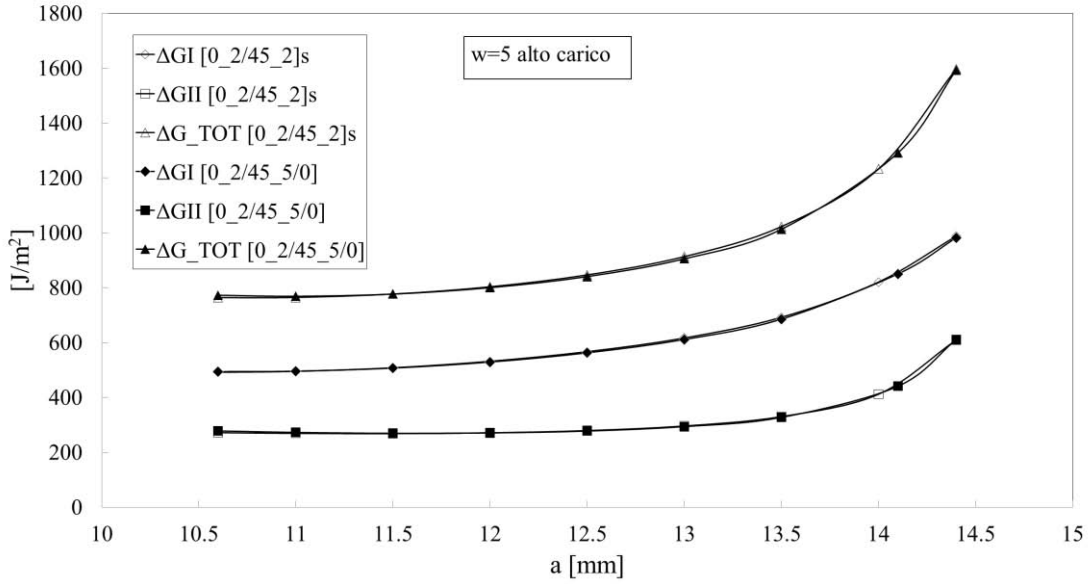


Fig.3.43 andamento di ΔG_I, ΔG_{II},ΔG_{TOT} in funzione della lunghezza di delaminazione per le due tipologie di lay-up. Overlap 5mm. Alto Carico. 2° interfaccia.

Da tale confronto si può osservare come per lunghezze di delaminazioni comprese tra 0 e 5mm i valori di ΔG_I, ΔG_{II} e ΔG_{TOT} per il *lay-up* $[0_2/45_5/0]$ sono superiori rispetto a quelli calcolati per il *lay-up* $[0_2/45_2]_s$ di circa 1,1 volte. Per lunghezze di delaminazioni comprese tra 5 e 10 mm si osserva che solamente ΔG_I riferita al *lay-up* $[0_2/45_5/0]$ è superiore alla medesima grandezza calcolata per il *lay-up* $[0_2/45_2]_s$, mentre ΔG_{II} risulta superiore nel caso si consideri quest'ultimo *lay-up*. Ne risulta che il ΔG_{TOT} è confrontabile per i due diversi *lay-up,* essendo dato dalla somma di ΔG_I e ΔG_{II}.
Infine per lunghezze di delaminazioni comprese tra 10 e 15 mm gli andamenti delle componenti del SERR risultano pressoché sovrapposti per i due diversi *lay-up* a testimonianza del fatto che maggiore è la lunghezza di delaminazione minore è l'influenza della tipologia del *lay-up* sull'andamento delle componenti del SEER.

Delle considerazioni analoghe possono essere fatte se si considera il confronto tra i due differenti *lay-up* in giunzioni sottoposte a basso carico. Viene di seguito raffigurato il confronto tra gli andamenti di ΔG_I, ΔG_{II} e ΔG_{TOT} riferendosi anche in questo caso ad una lunghezza di sovrapposizione di 5 mm.

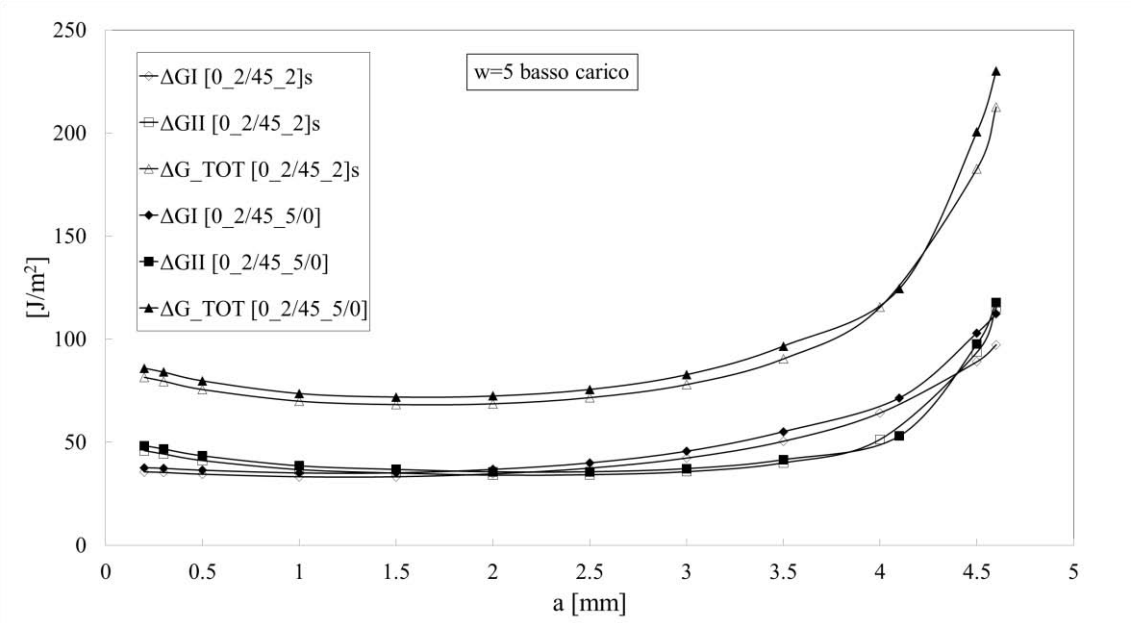


Fig.3.44 andamento di ΔG_I, ΔG_{II},ΔG_{TOT} in funzione della lunghezza di delaminazione per le due tipologie di lay-up. Overlap 5mm. Basso Carico. 1° interfaccia.

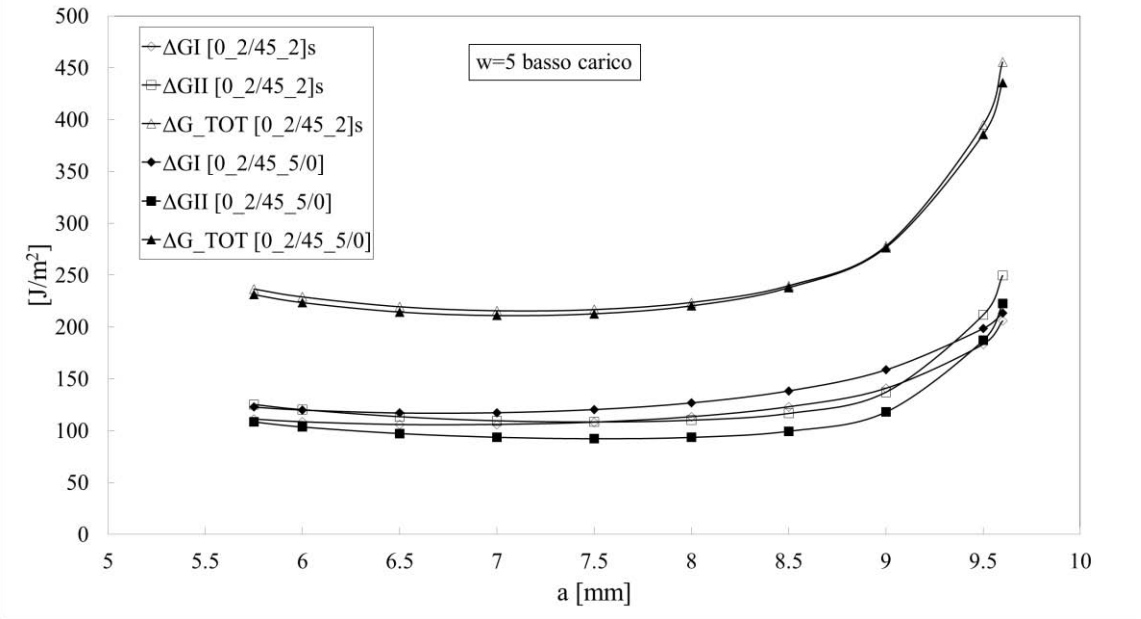


Fig.3.45 andamento di ΔG_I, ΔG_{II},ΔG_{TOT} in funzione della lunghezza di delaminazione per le due tipologie di lay-up. Overlap 5mm. Basso Carico. 2° interfaccia.

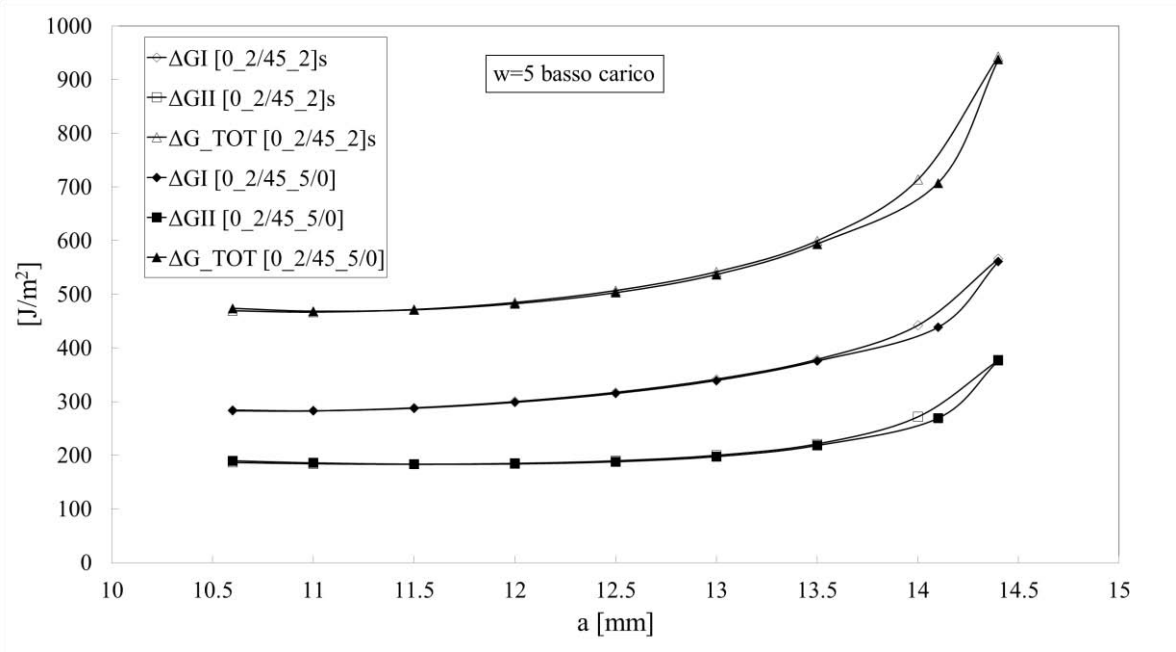


Fig.3.46 andamento di ΔG_I, ΔG_{II},ΔG_{TOT} in funzione della lunghezza di delaminazione per le due tipologie di lay-up. Overlap 5mm. Basso Carico. 3° interfaccia.

Capitolo 4

PROVE SPERIMENTALI E ANALISI DEL DANNEGGIAMENTO

4.1 Esecuzione prove sperimentali

In questo capitolo vengono descritte in dettaglio le prove effettuate in laboratorio per studiare la dinamica della propagazione del danneggiamento a fatica relativo alle giunzioni *stepped-lap* in materiale composito, realizzate con resina epossidica rinforzata con tessuto di fibra di carbonio a matrice polimerica. Questo lavoro di tesi prosegue lo studio intrapreso da S.Cristanini [4] prima e da E.Balzarini [5] poi, sull'evoluzione del danneggiamento in giunzioni a gradino su provini caratterizzati da diversi *lay-up* ($[0]_8$, $[0_2/45_2]_S$) e *overlap* (3,5,8 mm).

I provini sono stati sottoposti a prove a fatica effettuate in controllo di carico su una macchina servoidraulica a trazione *MTS 858 Mini Bionix II*, con rapporto di sollecitazione R=0.05, utilizzando una forma d'onda sinusoidale per l'applicazione del carico ed una frequenza di caricamento variabile dai 5 ai 10 Hz in funzione del livello di tensione applicato e del blocco di carico impostato.

Le diverse prove sono state interrotte dopo una certa percentuale della durata prevista a fatica per poter valutare accuratamente lo stato del danneggiamento del provino. In particolare per non perdere i dati sull'innesco della cricca e l'inizio della delaminazione sono stati utilizzati blocchi di carico con un ridotto numero di cicli nelle fasi iniziali. Con il procedere della prova si è passati a blocchi di carico con elevato numero di cicli in quanto, in base alle esperienze precedenti, la crescita della delaminazione è contenuta nella fascia che va dal 20 all'80% della vita totale prevista, infine, nelle fasi finali dalla vita del provino, si è nuovamente passati a blocchi di carico con un ridotto numero di cicli in quanto la delaminazione cresce velocemente fino a provocare la rottura del campione.

La procedura di rilevazione dei dati si basa sull'osservazione al microscopio ottico della lunghezza di delaminazione della cricca ad ogni interruzione effettuata. I campioni sono stati precedentemente lucidati da ambo i lati mediante una lucidatrice utilizzando in successione carte con grana da 180, 600 per la sgrossatura, 1200, per la levigatura e 2400 e 4000 per la lucidatura vera e propria. Le immagini che riportano lo stato di avanzamento delle varie delaminazioni sono state acquisite a 100 ingrandimenti (100X) e sono state inserite nell'analisi per meglio comprendere la situazione reale del danneggiamento subito dalla giunzione.

In questa tesi sono stati testati complessivamente 12 provini, 6 aventi *lay-up* $[0]_8$ e *overlap* 8 mm e 6 aventi *lay-up* $[0_2/45_5/0]_S$ e *overlap* 5mm .

In particolare vengono qui riportati i dati e le curve che descrivono l'evoluzione del danneggiamento per i campioni S08_10, S08_12, S08_13, S08_14, S08_15, S08_16, S08_17, SQI5_01, SQI5_02, SQI5_03, SQI5_04, SQI5_05, SQI5_06; la dicitura dei campioni S08 ha un significato ben preciso infatti ,"S" sta per *specimen,* che tradotto significa *provino*, "0" fa riferimento al tipo di *lay-up* in questo caso $[0]_{8,}$ con 8 lamine orientate a 0°, "8" si riferisce alla lunghezza di sovrapposizione *w*= 8mm mentre il numero che completa il codice di identificazione fa riferimento alla posizione originaria del provino nella piastra prima che questa venisse tagliata. Per i provini SQI5 la denominazione *QI* significa "Quasi Isotropo" mentre *5* fa riferimento all'*overlap* del provino

I risultati sperimentali hanno evidenziato la rottura prematura di tutti i provini testati con un numero di cicli a rottura pari a circa un decimo dei cicli previsti inizialmente. Questo fatto si è pensato fosse collegato inizialmente all'umidità assorbita dai provini nel corso del tempo, tuttavia i risultati non sono cambiati dopo aver eseguito un'asciugatura in forno a 70 °C per 12 ore di tutti i provini rimanenti. Si è pensato quindi che questo discostamento dei risultati delle prove sperimentali dai dati in nostro possesso fosse dovuto sostanzialmente all'invecchiamento dei provini, avendo questi all'incirca una decina d'anni.

Una volta completate per ciascun *lay-up* 2 prove ad alto e 2 a basso carico, sono stati posizionati i risultati sulla curva di Woheler per confrontarli con quelli in nostro possesso. Le nuove curve ottenute interpolando i risultati dei test, risultano, in entrambi i casi, essere traslate verso il basso rispetto alle precedenti come si vedrà nel corso di questo capitolo. Le prove che nei lavori di tesi di E.Balzarini e S.Cristanini sono state definite a *basso carico* essendosi concluse nell'intervallo $1\text{-}2\cdot10^6$ cicli, in questo lavoro di tesi invece sono state definite prove a *medio carico* in quanto la rottura, a parità di livello di carico e geometria, è avvenuta per un numero di cicli 10 volte inferiore.

Così si è deciso di testare 4 nuovi provini, 2 con *lay-up* $[0]_8$ e 2 con *lay-up* $[0_2/45_5/0]$, riducendo il carico al fine di eseguire delle prove ad alto numero di cicli per poter descrivere in maniera completa la curva di Woheler.

4.1 Provini testati

Per descrivere più facilmente l'evoluzione del danneggiamento durante la vita a fatica del giunto, sono state numerate le zone di giunzione tra le varie interfacce come mostrato in *Fig.4.1*. Sono stati utilizzati i numeri da 1 a 8 per riferirsi alle cricche presenti in corrispondenza delle 8 giunzioni del profilo sinistro del provino ed i numeri dal 9 al 16 per indicare le corrispondenti cricche nel profilo destro secondo la vista di *Fig. 4.1*.

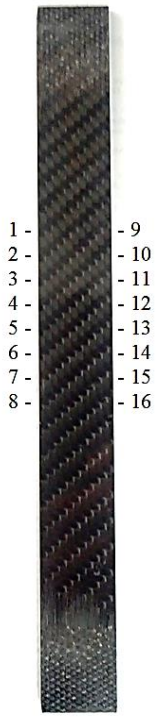


Fig. 4.1 Rappresentazione di un provino stepped lap. I numeri si trovano in corrispondenza dei gradini presenti all'interno della struttura del giunto, dove solitamente si originano le cricche. Le estremità del provino a causa della pressione esercitata delle morse di afferraggio, appaiono zigrinate.

La rappresentazione tridimensionale del giunto, in *Fig. 4.2*, contribuisce a chiarire meglio di cosa stiamo parlando. Le diverse interfacce che formano i gradini della giunzione *stepped* sono indicate con lettere dalla *a* alla *g*. La lettera *a* individua l'interfaccia tra la prima e la seconda lamina (per la numerazione delle diverse lamine vedere capitolo 3), mentre *g* individua indica l'interfaccia tra la settima e l'ottava lamina del provino.

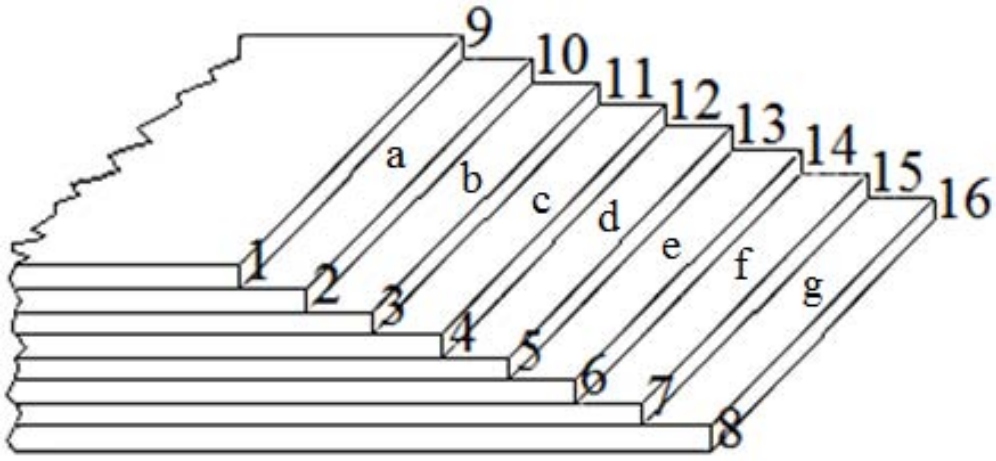


Fig. 4.2 Rappresentazione tridimensionale di una giunzione stepped. I numeri si trovano in corrispondenza dei gradini presenti all'interno della struttura del giunto, dove solitamente si originano le cricche.

Le cricche che vengono prese in considerazione per studiare l'evoluzione del danneggiamento sono le cricche *a1, a8, a9, a16* che si innescano dalle corrispondenti zone di giunzione 1,8,9,16.

I meccanismi più comuni di danneggiamento della giunzione durante la vita a fatica sono identificati dalla nucleazione di una cricca trasversale in corrispondenza del punto di giunzione di due diverse lamine e la sua praticamente istantanea propagazione fino all'interfaccia successiva. A questo si presenta l'insorgenza della delaminazione che propaga dagli strati esterni a quelli interni.

In particolare come successivamente si vedrà tali delaminazioni tenderanno inizialmente a propagare contemporaneamente verso l'interno e verso l'esterno della giunzione. Nel corso della prova a fatica si assiste poi ad un rallentamento progressivo, fino a completa stabilizzazione, delle cricche che propagano verso l'esterno, mentre per quelle che propagano verso l'interno si continua ad osservare una propagazione fintantoché la giunzione non raggiunge il punto di rottura. Si può quindi dire che per la delaminazione che porterà alla separazione della giunzione si sono stati evidenziati tre periodi:

Un primo periodo, che equivale al 10÷30% della vita del provino, in cui si ha la formazione di cricche trasversali e delaminazioni che avanzano rapidamente dalle interfacce partendo dai punti di giunzione1, 8, 9, 16 mentre nei punti interni non si presenta nessun tipo di danno se non al massimo la formazione di cricche trasversali. Inoltre dai punti di giunzione esterni, sopra citati, si hanno formazioni di delaminazioni che propagano all'esterno dell'area di giunzione; nonostante le prove sperimentali

abbiano evidenziato che tali delaminazioni possono assumere in alcuni casi delle ragguardevoli dimensioni queste non sono determinanti per quanto riguarda la vita a fatica del provino in quanto terminano di propagare nel corso della prova rimanendo ferme per tutta la vita del provino.

Nel secondo periodo, che equivale a circa il 50÷70% della vita del provino, si assiste ad un rallentamento della propagazione delle delaminazioni formatesi agli estremi , mentre per i punti interni di giunzione si può verificare come no la propagazione di rotture interlaminari che avanzano comunque di pochi decimi di millimetro.

Infine vi è un terzo ed ultimo periodo che rappresenta la fase finale della vita del provino e corrisponde a circa il 10÷30% della vita, nel quale le delaminazioni innescate dai punti 1,8,9,16 tornano ad avanzare rapidamente raggiungendo talvolta le delaminazioni formatesi nei punti di giunzione più interni. Si è potuto riscontrare che qualora questo fenomeno si verifichi, la rottura del provino avviene dopo poche migliaia di cicli, generalmente durante il blocco di carico successivo.

Dall'esperienza maturata nel corso delle prove si è visto che non tutte le delaminazioni presentano una fase finale in cui esse ricominciano ad avanzare portando a rapida rottura il provino, solitamente infatti si ha solamente una delaminazione di questo tipo mentre le altre restano ferme. È comunque capitato di osservare delaminazioni propaganti sulla stessa interfaccia, avanzare contemporaneamente presentando entrambi una fase finale con un cambiamento di pendenza. Quindi si può dire che solamente una o al massimo due delaminazioni portano a rottura la giunzione, mentre le altre non assumono un ruolo significativo nel comportamento a fatica della stessa.

È opportuno far presente che tramite le osservazioni al microscopio è possibile rilevare i danni solamente lungo i bordi del provino, non è invece possibile rilevare come si propaga la delaminazione lungo la larghezza del campione. Per poter osservare tale propagazione è necessario analizzare il provino con una strumentazione agli ultrasuoni o ai raggi X come fatto da E.Balzarini [5] e S.Polloni [7] nei rispettivi lavori di tesi. L'analisi agli ultrasuoni è ottenuta con il sistema Epoch4 interfacciato ad un Pc che permette di esaminare con buona accuratezza il danneggiamento completo (C-Scan classico) oppure di rilevarlo per ogni singola interfaccia, l'analisi ai raggi X invece non ha portato ai risultati sperati data la difficoltà di evidenziare nettamente le parti danneggiate.

Nella tabella seguente sono riportati i dati riassuntivi delle prove e i principali risultati ottenuti. In particolare troviamo:

- R, il rapporto di ciclo.
- f, frequenza utilizzata nella prova.
- σ_{max} [MPa], tensione massima applicata
- N_f , numero di cicli effettuati a rottura.
- a_f , lunghezza finale raggiunta dalla delaminazione (con riferimento alla cricca più lunga).

I campioni che nelle prove a fatica oltrepassano i $2 \cdot 10^6$ cicli si dicono in *run-out*; una volta raggiunta tale soglia la prova viene comunque considerata terminata anche se il provino non è arrivato a rottura.

Provino	**R**	**f [Hz]**	**σ_{max} [MPa]**	**Carico**	**N_f a rottura [cicli]**	**a_f cricca [mm]**	**Rotto**
S08_12	0,05	5/8	200	medio	116620	29,2	si
S08_13	0,05	5/8	200	medio	280454	11,9	si
S08_14	0,05	5	260	alto	23867	10,4	si
S08_15	0,05	5	260	alto	19232	6,98	si
S08_16	0,05	10	160	basso	1766376	33,59	si
S08_17	0,05	5/8/10	150	basso	non rilevato	—	no run out
SQI5_01	0,05	8	144,8	alto	7542	12,01	si
SQI5_02	0,05	8	144,8	alto	8961	14,59	si
SQI5_03	0,05	10	109	medio	120131	15,31	si
SQI5_04	0,05	10	109	medio	62149	15.34	si
SQI5_05	0,05	10	90	basso	484189	14,78	si
SQI5_06	0,05	10	80	basso	1948821	11,44	si

Tab. 1 tabella contente i principali dati e risultati delle prove effettuate

4.3 Giunti stepped con lay-up $[0]_8$ soggetti ad alto carico

I carichi da applicare durante i test a fatica e la vita stimata dei campioni sono stati scelti e previsti sulla base dei dati di resistenza e curve di Woehler per i giunti stampati stepped di medesimo *lay-up* e lunghezza di sovrapposizione riportate nei lavori di S. Cristanini [4] e E.Balzarini [5]. Nelle prove effettuate ogni tipologia di giunto è stata sollecitata a fatica con una percentuale di carico alta oppure con una percentuale bassa rispetto al carico di rottura statico, e quindi è stata sottoposta ad una prova a basso oppure alto numero di cicli.

I risultati ottenuti da [4] e [5] relativi al *lay-up* $[0]_8$ sono riportati nelle curve di Woehler di *Fig 4.3*. In tali curve si osserva come varia il numero di cicli a rottura di ciascun provino al variare della σ_{max} applicata per giunzioni *stepped-lap* con *lay-up* $[0]_8$ e lunghezze di sovrapposizione w =3,5,8 mm.

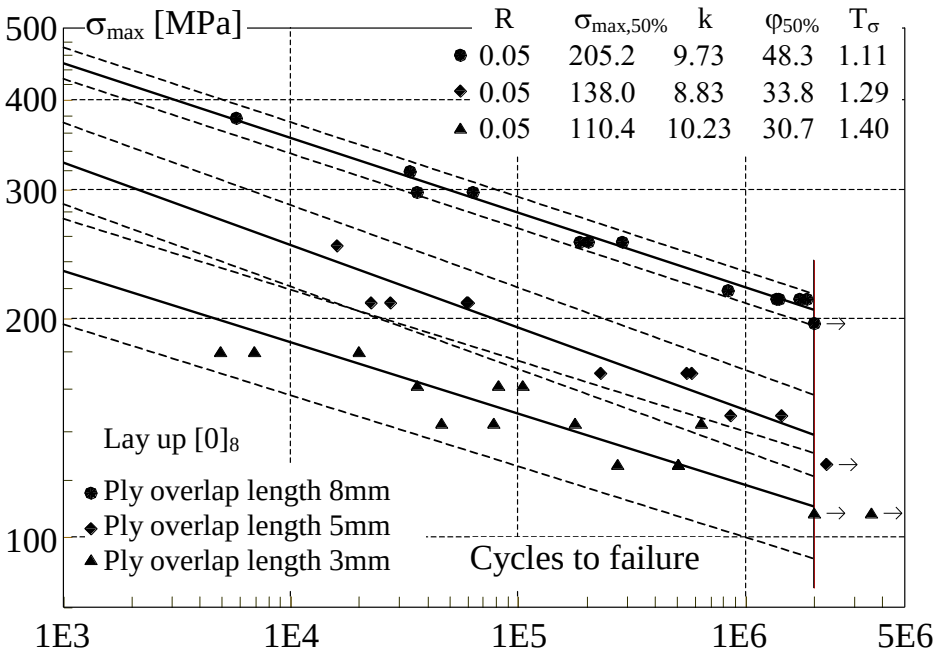


Fig. 4.3 Curve di Woehler per giunzioni con lay-up $[0]_8$

Per determinare il carico da applicare nelle prove, si è entrati nella curva di *Fig. 1.12* ipotizzando una vita di $2 \cdot 10^5$ e $2 \cdot 10^6$ cicli, fino ad intersecare la retta di interpolazione dei dati riferiti all'overlap *w*=8 mm, ottenendo rispettivamente per l'alto carico una tensione massima di 260 MPa mentre per il basso carico una tensione massima di 200 MPa (vedi *Fig.4.4*).

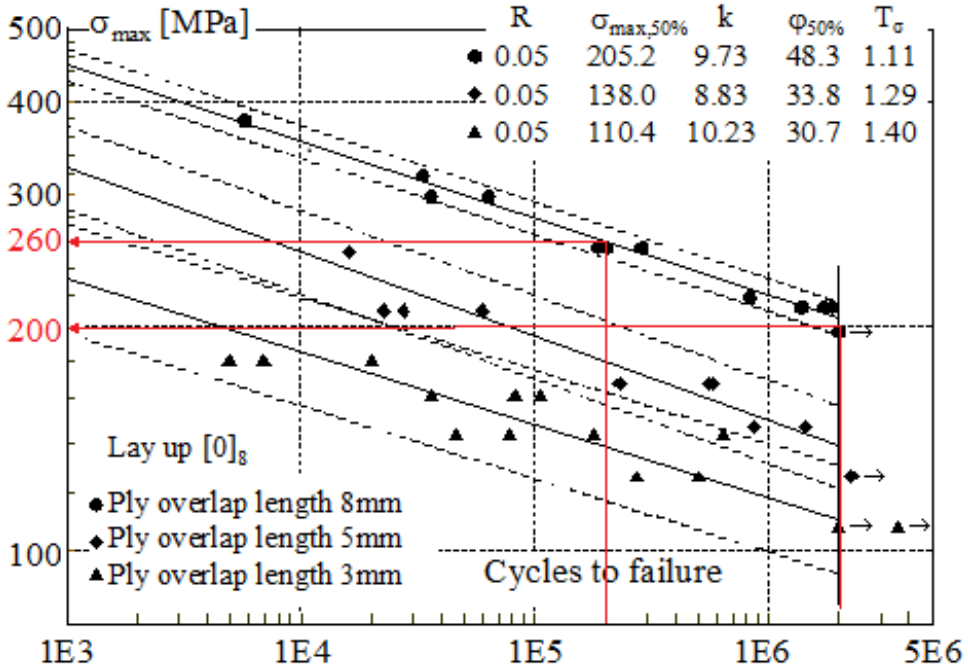


Fig. 4.4 Carichi da applicare ai provini con lay-up $[0]_8$ e w =8 mm

I provini S08_14 e S08_15 sono stati testati con una σ_{max}=260 MPa mentre i provini S08_12, S08_13 sono stati testati una σ_{max}=200 MPa.

4.3.1 Provino S08_14

Di seguito sono elencate le dimensioni geometriche del provino S08_14 utili al fine del calcolo delle forze da applicare:

Larghezza b [mm]	22,8
Spessore t [mm]	2,3

Tab. 2 dimensioni provino

Una volta note la larghezza e lo spessore del provino, e conosciuti la tensione massima (260 MPa) e il rapporto di ciclo R da applicare (0.05) è possibile determinare la forza

massima e la forza minima da dare in input alla macchina per eseguire la prova attraverso le seguenti espressioni:

$$F_{max} = \frac{b \cdot t \cdot \sigma_{max}}{1000} \tag{4.1}$$

$$F_{min} = F_{max}(1 - R) \tag{4.2}$$

Da cui risulta

F_{max} [kN]	13,6344
F_{min} [kN]	0,68172

Tab. 3 limiti di forza entro cui viene eseguita la prova

Si riassumono in seguito i dati relativi al provino S08_14

Dimensioni	
b [mm]	22,8
t [mm]	2,3
L [mm]	217

Tab. 4 dimensioni del provino S08_14

Tensioni e Carichi	
σ_{UTS} [MPa]	425
σ_{max} [MPa]	260
σ_{min} [MPa]	13
σ_A [MPa]	123,5
R	0,05
f [Hz]	5
F max [kN]	13,6344
F min [kN]	0,68172

Tab. 5 tensioni e carichi applicati al provino S08_14

In questa prova è stata usata una frequenza f = 5 Hz per tutti i blocchi di carico in cui è suddivisa la prova. Sono stati eseguiti 6 blocchi di carico ciascuno dei quali composto dal seguente numero di cicli

N° blocco di carico	N° cicli per blocco di carico	Cicli totali
1	1000	1000
2	2000	3000
3	2000	5000
4	5000	10000
5	10000	20000
6	10000	23867

Tab. 6 blocchi di carico applicati al provino S08_14

I risultati del danneggiamento rilevati nel corso della prova sono riportati nella tabella seguente:

cicli	% vita a fatica	a_{1trasv}	a_{1int}	a_{1est}
0	0	0	0	0
3000	12.57	0.34	1.33	2.61
5000	20.95	0.33956	1.72967	3.092308
10000	41.90	0.337363	2.350549	3.148352
20000	83.80	0.32967	2.632967	4.314286

cicli	% vita a fatica	a_{9trasv}	a_{9int}	a_{9est}
0	0	0	0	0
3000	12.57	0.3	3.47	0.33
5000	20.95	0.30989	3.862637	3.887912
10000	41.90	0.310989	4.548352	4.878022
20000	83.80	0.310989	10.41429	5.618681

cicli	% vita a fatica	$a_{16trasv}$	a_{16int}	a_{16est}
0	0	0	0	0
3000	12.57	0.345	0.85	3.13
5000	20.95	0.353846	1.016484	3.638462
10000	41.90	0.358791	2.050549	4.038462
20000	83.80	0.364286	4.464835	4.915385

Tab. 7 tabella riassuntiva delle propagazioni per il provino S08_14. Alto Carico.

Sono state diagrammate successivamente le lunghezze delle cricche riportate nella pagina precedente rispetto al numero di cicli in modo da poter osservare l'evoluzione del danneggiamento del provino

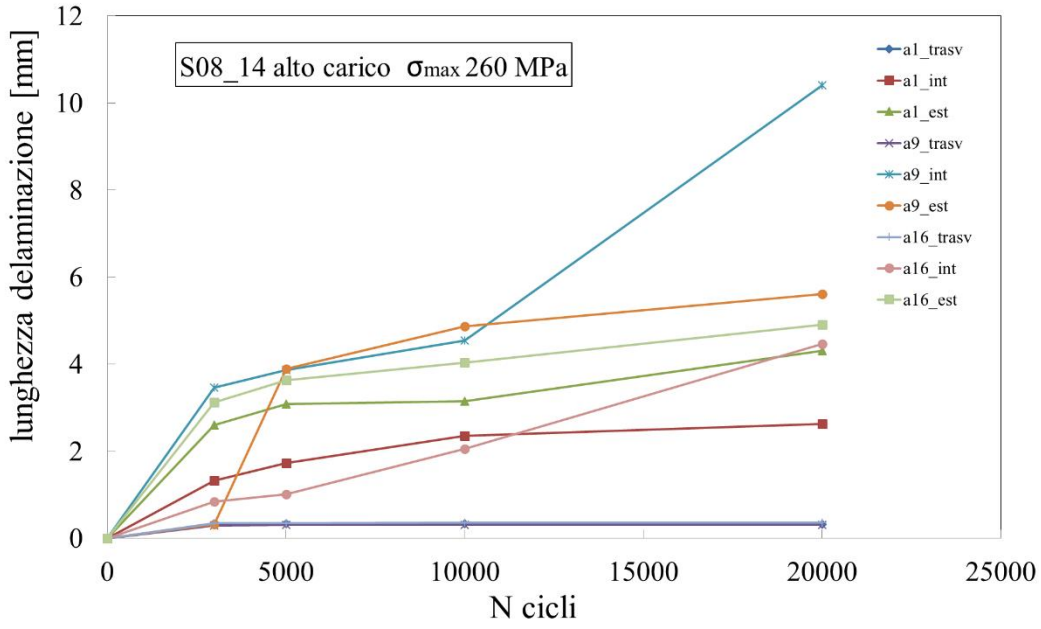


Fig. 4.5 propagazione delle cricche al variare del numero di cicli relative al provino S08_14

Si nota che il danneggiamento per questo giunto soggetto ad alto carico comincia a basse percentuali della vita del campione. A 3000 cicli corrispondenti al 12% della vita del campione, si osserva la formazione di cricche trasversali originatesi in corrispondenza delle zone di giunzione degli strati a 0° adiacenti. Si nota che in prossimità dei punti di giunzione 1,8,9,16 si sono formate delle delaminazioni che tendono a propagare sia verso l'interno che verso l'esterno della giunzione *stepped*. La delaminazione più critica deve essere ricercata tra le delaminazioni che propagano verso l'interno, in quanto sono queste che porteranno a rottura il pezzo, e tra queste è quella di lunghezza maggiore. La delaminazione in prossimità del punto di giunzione 9, che propaga verso l'interno, avente una lunghezza di ben 3,47 mm dopo soli 3000 cicli è quella che denota maggiori criticità

Col procedere della vita a fatica queste cricche continuano a delaminare verso l'interno della struttura a scalini, nella direzione delle altre giunzioni, e, anche se in misura minore, verso l'esterno della stessa. E' da notare che la tabella ed il grafico precedentemente presentati non contengono i dati sperimentali della delaminazione che origina dal punto di giunzione 8. Le osservazioni di quest'area al microscopio non hanno infatti evidenziato alcun principio di delaminazione né verso l'interno né verso l'esterno della giunzione, di

conseguenza tale delaminazione è stata considerata nulla. Al 20% della vita a fatica le delaminazioni che procedono verso l'esterno rallentano il loro avanzamento ed il danneggiamento prosegue sostanzialmente con l'allungamento e l'inspessimento delle delaminazioni dirette verso l'interno. Un'eccezione è rappresentata dalla delaminazione, avente origine nel punto 1 e propagante verso l'interno, che arresta la propria propagazione già a partire dal 40% della vita a fatica del provino.

La rottura del campione avviene dopo che la delaminazione, con origine nel punto 9 ha raggiunto e oltrepassato il punto di giunzione 10, proseguendo la propagazione lungo la seconda interfaccia. La lunghezza di tale cricca rilevata nel penultimo blocco di carico (corrispondente all'83,3% della vita a fatica), prima che la giunzione cedesse, è di 10,41mm.

Se si considera esclusivamente la variazione della lunghezza delle delaminazioni critiche, quelle che cioè propagano verso l'interno della giunzione e che portano al cedimento della giunzione, si ottiene il seguente grafico

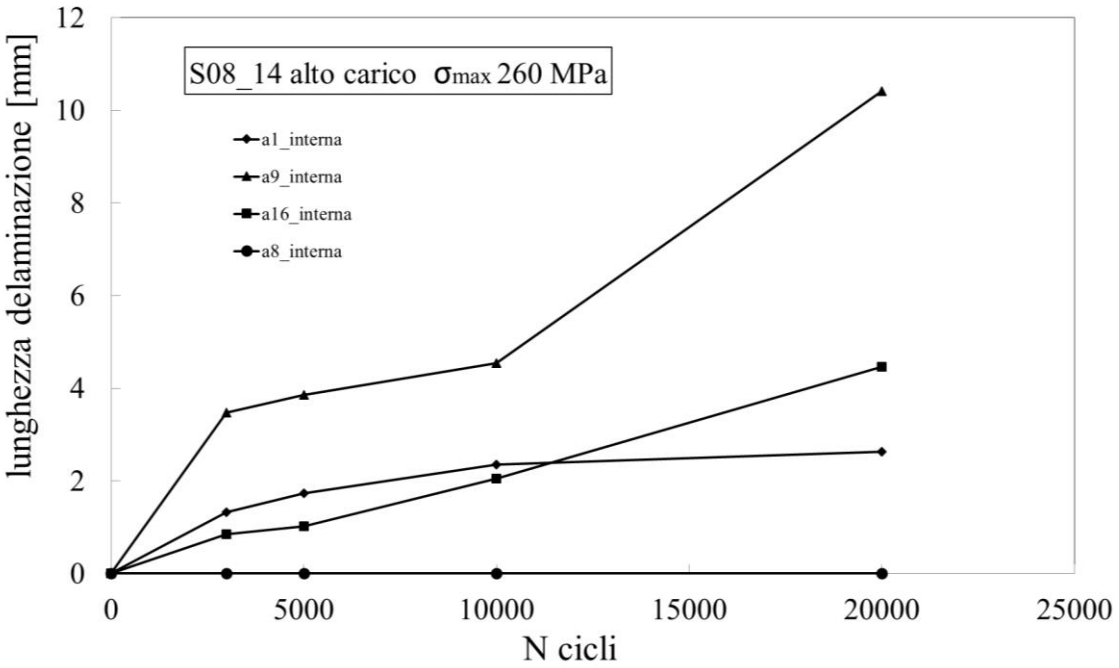


Fig. 4.6 propagazione delle delaminazioni critiche al variare del numero di cicli relative al provino S08_14

Al fine di valutare la vita a fatica del giunto è necessaria l'identificazione di un parametro monodimensionale in grado di descrivere e quantificare in modo affidabile il danneggiamento della giunzione: tale parametro prende il nome di *media delle delaminazioni medie* e viene indicata con la lettera *a.* Questa grandezza è definita come la media delle quattro delaminazioni (dette critiche) che originano dai punti 1,8,9,16: più precisamente per il calcolo di questo parametro si calcola prima la media tra le delaminazioni 1-9 e 8-16 e poi si fa a sua volta la media tra questi due valori appena calcolati, da qui appunto il nome media delle delaminazioni medie.

Questo parametro è inoltre utile per stabilire una correlazione tra il danneggiamento del provino e le componenti del SERR calcolate attraverso le analisi FEM.

Si riporta qui di seguito il grafico ottenuto calcolando la *media delle delaminazioni medie* in funzione del numero di cicli per il provino S08_14:

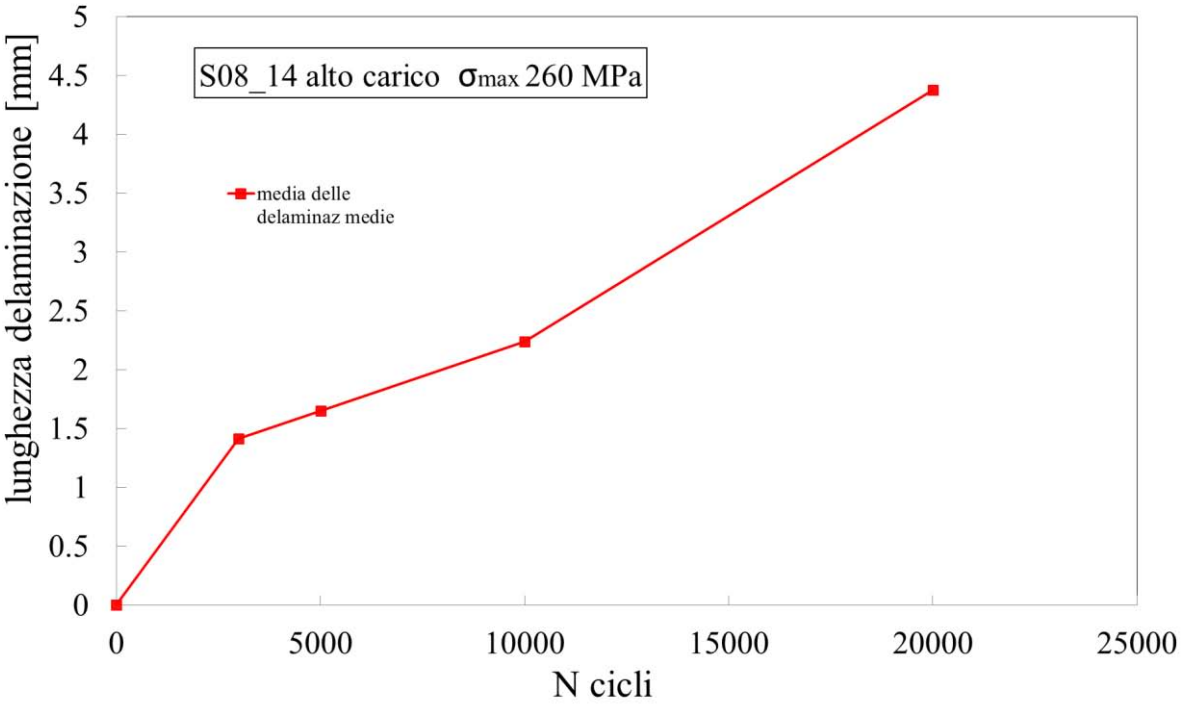


Fig. 4.7 andamento della media delle delaminazioni medie al variare del numero di cicli relativa al provino S08_14

Di seguito sono riportate alcune immagini, aquisite nel corso delle prove sperimentali, utili a documentare la modalità di danneggiamneto di questo tipo di giunzioni stepped.

Fig. 4.8 S08_14 -1°blocco di carico- (100X) cricca trasversale e principio di delaminazione innescate dal punto di giunzione 16 - Danneggiamento al 13% della vita reale a fatica del giunto stepped, overlap 8 mm caricato con σ_{max}=260MPa.

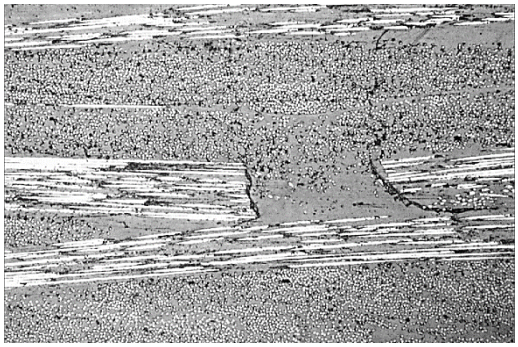


Fig 4.9 S08_14 -1°blocco di carico- (100X) cricche trasversali propagate dal punto di giunzione 12 tra la 3a e la 4a interfaccia- Danneggiamento al 13% della vita reale a fatica del giunto stepped, overlap 8 mm caricato con σ_{max}=260MPa.

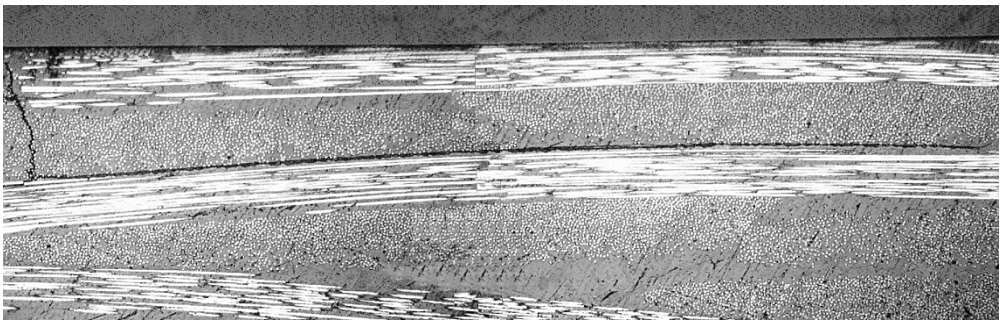


Fig 4.10 S08_14 -3°blocco di carico- cricca trasversale e propagazione della delaminazione innescate dal punto di giunzione 1 - Danneggiamento al 41% della vita reale a fatica del giunto stepped, overlap 8 mm caricato con σ_{max}=260MPa.

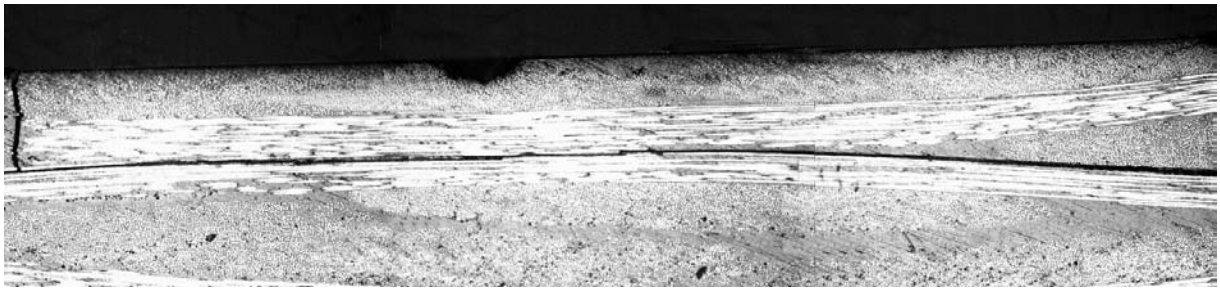


Fig. 4.11 a S08_14 -6°blocco di carico- cricca trasversale e propagazione della delaminazione innescate dal punto di giunzione 9 - Danneggiamento al 83% della vita reale a fatica del giunto stepped, overlap 8 mm caricato con σ_{max}=260MPa.

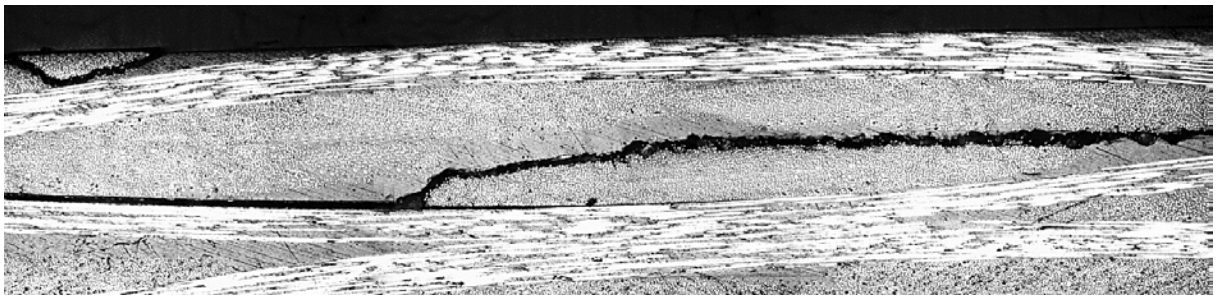


Fig. 4.11 b S08_14 -6°blocco di carico- propagazione della delaminazione innescate dal punto di giunzione 9 - Danneggiamento al 83% della vita reale a fatica del giunto stepped, overlap 8 mm caricato con σ_{max}=260MPa.

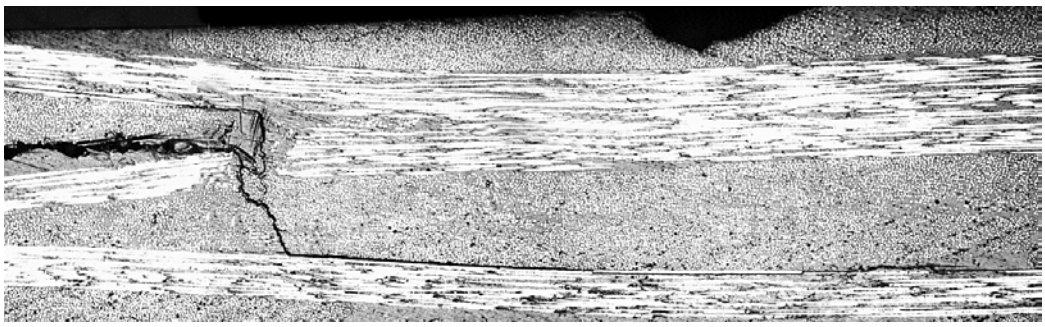


Fig. 4.11 c S08_14 -6°blocco di carico- propagazione della delaminazione innescate dal punto di giunzione 9 che passa dalla prima alla 2 interfaccia. Danneggiamento al 83% della vita reale a fatica del giunto stepped, overlap 8 mm caricato con σ_{max}=260MPa.

4.3.2 Provino S08_15

Il secondo giunto stampato di cui si analizza il comportamento a fatica è l'S08_15, con un *lay-up* $[0]_8$ ed *overlap* di 8 mm, caricato con una tensione massima di 260 MPa.

Di seguito si riportano i dati riguardanti le dimensioni del campione testato, il valore delle tensioni (σ_{max},σ_{min} e σ_A) e dei carichi applicati (F_{MAX} e F_{MIN}) durante la prova, il rapporto di sollecitazione $R = F_{MIN} / F_{MAX}$ e la frequenza di prova f.

Dimensioni	
b [mm]	22,6
t [mm]	2,3
L [mm]	217

Tab. 8 dimensioni del provino S08_15

Tensioni e Carichi	
σ_{UTS} [MPa]	425
σ_{max} [MPa]	260
σ_{min} [MPa]	13
σ_A [MPa]	123,5
R	0,05
f [Hz]	5
F max [kN]	13,5148
F min [kN]	0,67574

Tab. 9 tensioni e carichi applicati al provino S08_15

Nella tabella seguente sono illustrati i blocchi di carico in cui è stata suddivisa la prova

N° blocco di carico	N° cicli per blocco di carico	Cicli totali
1	1000	1000
2	2000	3000
3	2000	5000
4	5000	10000
5	5000	15000
6	5000	19232

Tab. 10 blocchi di carico applicati al provino S08_14

I risultati del danneggiamento rilevati nel corso della prova sono riportati nella tabella che segue:

cicli	% vita a fatica	a_{1trasv}	a_{1int}	a_{1est}
0	0	0	0	0
1000	5.2	0.401099	0	0
3000	15.6	0.404396	0	0.776923
5000	26	0.410989	0	0.806593
10000	52	0.410989	0	1.806593
15000	78	0.410989	0	6.985714

cicli	% vita a fatica	a_{8trasv}	a_{8int}	a_{8est}
0	0	0	0	0
1000	5.2	0.312088	2.446154	0
3000	15.6	0.313187	3.378022	0
5000	26	0.314286	3.443956	0.678022
10000	52	0.314286	3.832967	1.263736
15000	78	0.314286	3.76044	1.241758

cicli	% vita a fatica	a_{9trasv}	a_{9int}	a_{9est}
0	0	0	0	0
1000	5.2	0.417582	0.395604	1.351648
3000	15.6	0.420879	0.742857	2.678022
5000	26	0.420879	2.874725	3.612088
10000	52	0.432967	3.38022	3.961538
15000	78	0.432967	6.831868	4.121978

cicli	% vita a fatica	$a_{16trasv}$	a_{16int}	a_{16est}
0	0	0	0	0
1000	5.2	0.210989	0.307692	3.110989
3000	15.6	0.216484	2.441758	4.797802
5000	26	0.217582	3.491209	4.968132
10000	52	0.217582	4.312088	4.935165
15000	78	0.217582	5.572527	4.983516

Tab. 11 tabella riassuntiva delle propagazioni per il provino S08_15. Alto Carico.

L'andamento della variazione della lunghezza delle delaminazioni all'aumentare del numero di cicli per il provino S08_15 è rappresentato nella *Fig. 4.9.*

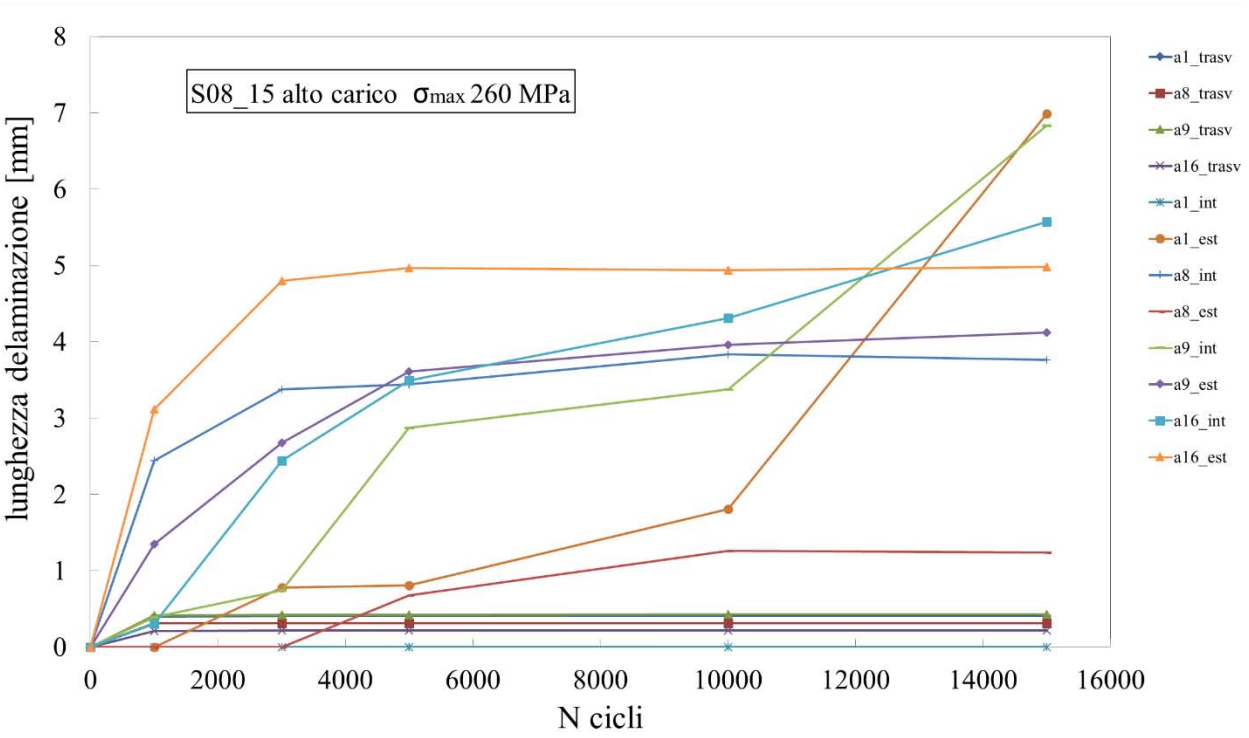


Fig. 4.12 propagazione delle diverse delaminazioni al variare del numero di cicli relative al provino S08_15

Si può vedere che questo provino, soggetto ad alto carico, presenta dopo 1000 cicli (corrispondenti a circa il 5% della vita a fatica), sia delle cricche trasversali che delle cricche che delaminano verso l'interno e verso l'esterno della giunzione. La velocità delle cricche che delaminano verso l'esterno è maggiore inizialmente rispetto a quelle che propagano verso l'interno. Dopo il 30% della vita si assiste ad un rallentamento generale di tutte le delaminazioni, rallentamento che termina con l'arresto delle delaminazioni che propagano verso l'esterno fatta eccezione per la cricca avente origine nel punto 1. A partire da 10000 cicli, aumenta la velocità di propagazione delle cricche che propagano verso l'interno (delaminazioni *a9* e *a16*) fintantoché la giunzione non arriva a rottura. Le cricche trasversali si formano ad un bassissimo numero di cicli, propagandosi quasi istantaneamente, e rimangono costanti per tutta la durata della prova, non influenzando per questo motivo, la durata a fatica della giunzione.

Di seguito sono riportati gli andamenti del parametro *media delle delaminazioni medie* e delle delaminazioni critiche necessarie per il calcolo dello stesso.

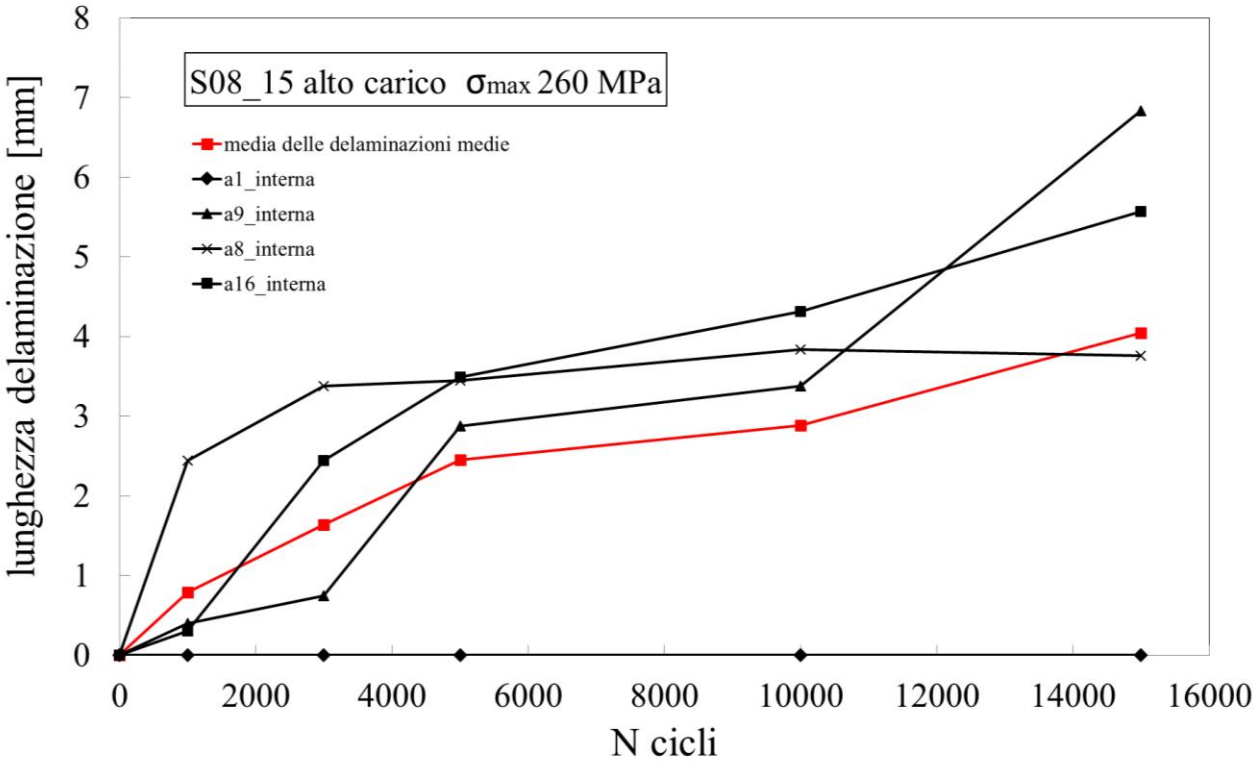


Fig. 4.13 propagazione delle delaminazioni critiche e della media della delaminazioni medie al variare del numero di cicli relative al provino S08_15

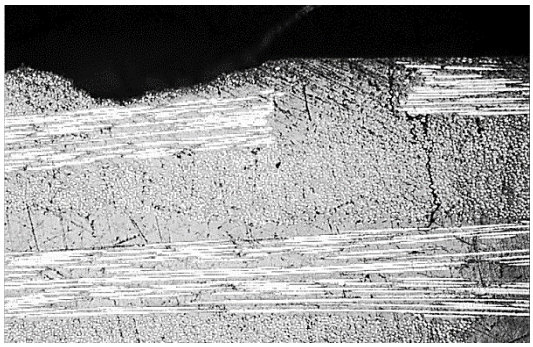


Fig 4.14 S08_15 -1°blocco di carico- (100X) cricca trasversale innescata dal punto di giunzione 1 - Danneggiamento al 5,2% della vita reale a fatica del giunto stepped, overlap 8 mm caricato con σ_{max}=260MPa.

Fig 4.15 S08_15 -1°blocco di carico- (100X) doppia cricca trasversale innescata dal punto di giunzione 16 - Danneggiamento al 5,2% della vita reale a fatica del giunto stepped, overlap 8 mm caricato con σ_{max}=260MPa.

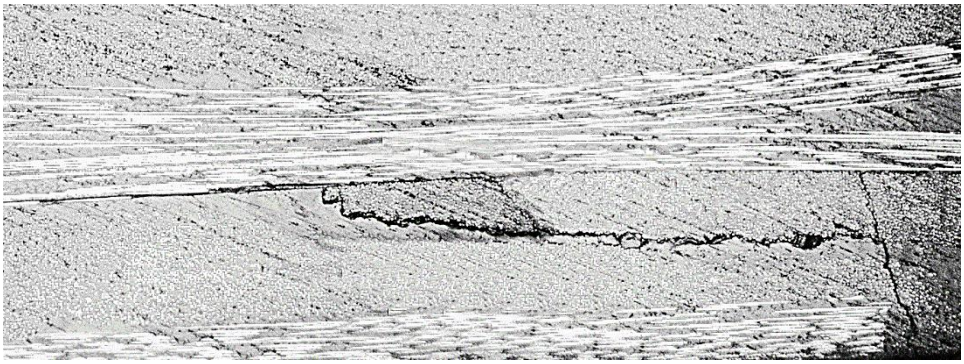


Fig 4.16 S08_15 -2°blocco di carico- (100X) cricca trasversale innescata dal punto di giunzione 9 propagante verso l'esterno - Danneggiamento al 15.6% della vita reale a fatica del giunto stepped, overlap 8 mm caricato con σ_{max}=260MPa.

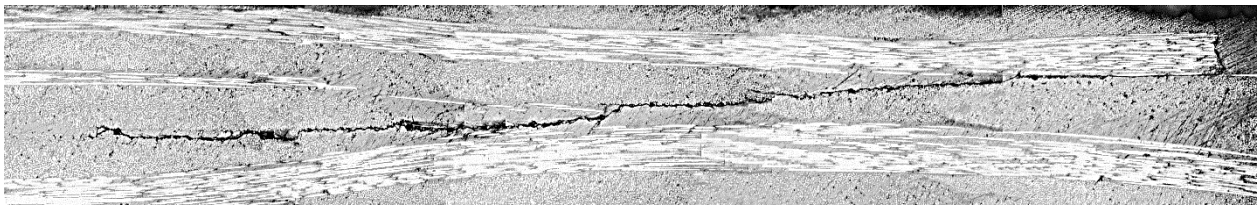


Fig 4.17 S08_15 -6°blocco di carico- cricca trasversale innescata dal punto di giunzione 16 propagante verso l'interno - Danneggiamento al 78% della vita reale a fatica del giunto stepped, overlap 8 mm caricato con σ_{max}=260MPa.

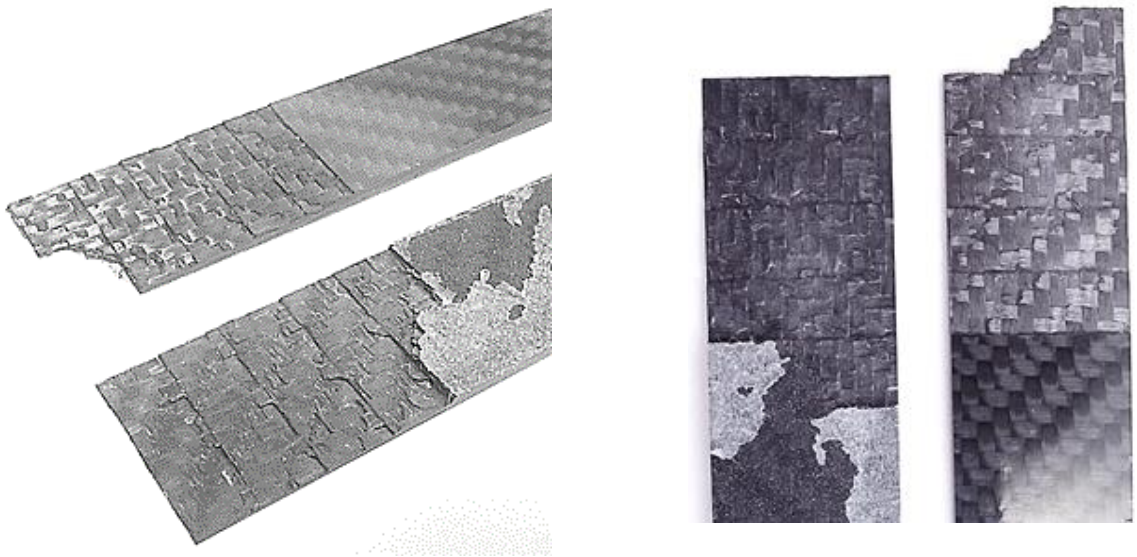


Fig.4.18 superfici aderende di rottura per fatica della giunzione S08_15

4.4 Giunti stepped con lay-up $[0]_8$ soggetti a medio carico

In questa sezione vengono riportati in dettaglio i risultati ottenuti dalle prove su provini con *lay-up* $[0]_8$, *overlap* 8 mm soggetti a medio carico con una tensione massima di 200 MPa. Le prove condotte da S.Cristanini [4] sulla stessa tipologia di provini, hanno evidenziato che per il medesimo livello di carico (σ_{max}=200 MPa), la vita a fatica attesa è di circa $2 \cdot 10^6$ cicli.

4.4.1 Provino S08_12

Come fatto già fatto in precedenza si riportano i dati riguardanti le dimensioni del campione testato, il valore delle tensioni (σ_{max},σ_{min} e σ_A) e dei carichi applicati (F_{MAX} e F_{MIN}) durante la prova, il rapporto di sollecitazione $R = F_{MIN} / F_{MAX}$ e la frequenza di prova f. In questo caso la frequenza è stata variata in funzione del numero di cicli di ciascun blocco di carico; per blocchi di carico con un ridotto numero di cicli si è scelta una frequenza di 5 Hz, mentre per quelli con un numero maggiore di cicli si è scelta una frequenza di 8 Hz e 10 Hz.

Dimensioni	
b [mm]	22,5
t [mm]	2,4
L [mm]	217

Tab. 12 dimensioni del provino S08_12

Tensioni e Carichi	
σ_{UTS} [MPa]	425
σ_{max} [MPa]	200
σ_{min} [MPa]	10
σ_A [MPa]	95
R	0,05
f [Hz]	5 ; 8
F max [kN]	10,8
F min [kN]	0,54

Tab. 13 tensioni e carichi applicati al provino S08_12

Sono stati eseguiti 9 blocchi di carico ciascuno dei quali composto dal seguente numero di cicli

N° blocco di carico	N° cicli per blocco di carico	Cicli totali
1	5000	5000
2	5000	10000
3	5000	15000
4	10000	25000
5	30000	55000
6	50000	105000
7	5000	110000
8	5000	115000
9	5000	116620

Tab. 14 blocchi di carico applicati al provino S08_12

Il provino come si può vedere ha ceduto nel corso del nono blocco di carico dopo aver completato complessivamente 116620 cicli rispetto ai $2 \cdot 10^6$ cicli previsti inizialmente.

I risultati del danneggiamento rilevati nel corso della prova sono riportati nella tabella che segue:

cicli	% vita a fatica	a_{1trasv}	a_{1int}	a_{1est}
0	0	0	0	0
5000	4.29	0.21978	0	0
10000	8.57	0.27033	0	2.572527
15000	12.86	0.263736	0	2.624176
25000	21.44	0.247253	0	3.236264
55000	47.16	0.249451	2.296703	3.949451
105000	90.03	0.249451	9.527473	3.984615
110000	94.32	0.249451	10.49121	4.103297
115000	98.61	0.249451	18.35385	4.113187

cicli	% vita a fatica	a_{8trasv}	a_{8int}	a_{8est}
0	0	0	0	0
5000	4.29	0.293407	0.443956	1.538462
10000	8.57	0.32967	0.552747	1.596703
15000	12.86	0.313187	0.487912	1.634066
25000	21.44	0.331868	1.103297	1.828571
55000	47.16	0.331868	1.728571	1.892308
105000	90.03	0.331868	1.916484	1.936264
110000	94.32	0.331868	2.847253	1.964835
115000	98.61	0.331868	3.39011	2.317582

cicli	% vita a fatica	a_{9trasv}	a_{9int}	a_{9est}
0	0	0	0	0
5000	4.29	0.750549	1.262637	0
10000	8.57	0.750549	1.830769	0
15000	12.86	0.713187	2.498901	0
25000	21.44	0.713187	2.620879	0.827473
55000	47.16	0.713187	2.715385	1.723077
105000	90.03	0.713187	8.395604	2.053846
110000	94.32	0.713187	18.28791	2.018681
115000	98.61	0.713187	29.17143	2.054945

cicli	% vita a fatica	$a_{16trasv}$	a_{16int}	a_{16est}
0	0	0	0	0
5000	4.29	0.254945	1.752747	0.154945
10000	8.57	0.27033	1.930769	0.164835
15000	12.86	0.254945	2.634066	5.206593
25000	21.44	0.254945	2.084615	5.235415
55000	47.16	0.254945	3.901099	6.159341
105000	90.03	0.254945	4.034066	6.191209
110000	94.32	0.254945	4.116484	6.254945
115000	98.61	0.254945	4.664835	6.262637

Tab. 15 tabella riassuntiva delle propagazioni per il provino S08_12. Basso Carico.

L'andamento della variazione della lunghezza delle delaminazioni all'aumentare del numero di cicli per il provino S08_12 è così rappresentabile

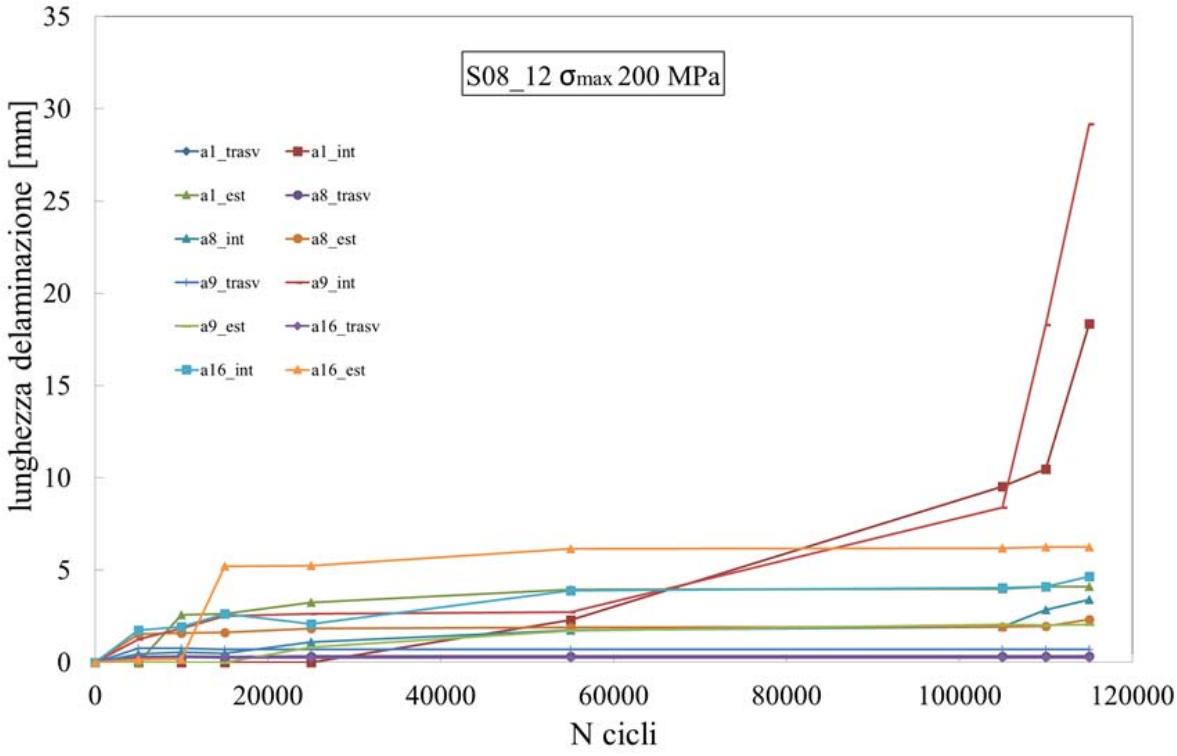


Fig. 4.19 propagazione delle diverse delaminazioni al variare del numero di cicli relative al provino S08_12

Si può osservare che le delaminazioni critiche innescate a partire dai punti di giunzione 9 e 16, dopo 5000 cicli (corrispondenti a circa il 5% della vita a fatica), hanno già una lunghezza superiore ad 1 mm, mentre non si sono osservate delaminazioni in corrispondenza del punto 8. A 15000 cicli (12% della vita a fatica reale) si nota un brusco avanzamento della delaminazione diretta verso l'esterno della giunzione e avente origine a partire dal punto 16. Dopo 20000 cicli si assiste ad un rallentamento e assestamento generale di tutte le delaminazioni, ad eccezione delle cricche *a1* e *a9* propaganti verso l'interno della giunzione, le quali continuano a propagarsi a velocità costante. A 1150000 cicli, aumenta la velocità di propagazione delle delaminazioni *a9* e *a16* fintantoché la giunzione non arriva a rottura. Le altre delaminazioni rappresentate in figura ed aventi un andamento pressoché "piatto" per gran parte della vita del provino, non incidono nella resistenza a fatica della giunzione.

Nel dettaglio l'andamento del parametro *media delle delaminazioni medie* e delle delaminazioni critiche è il seguente

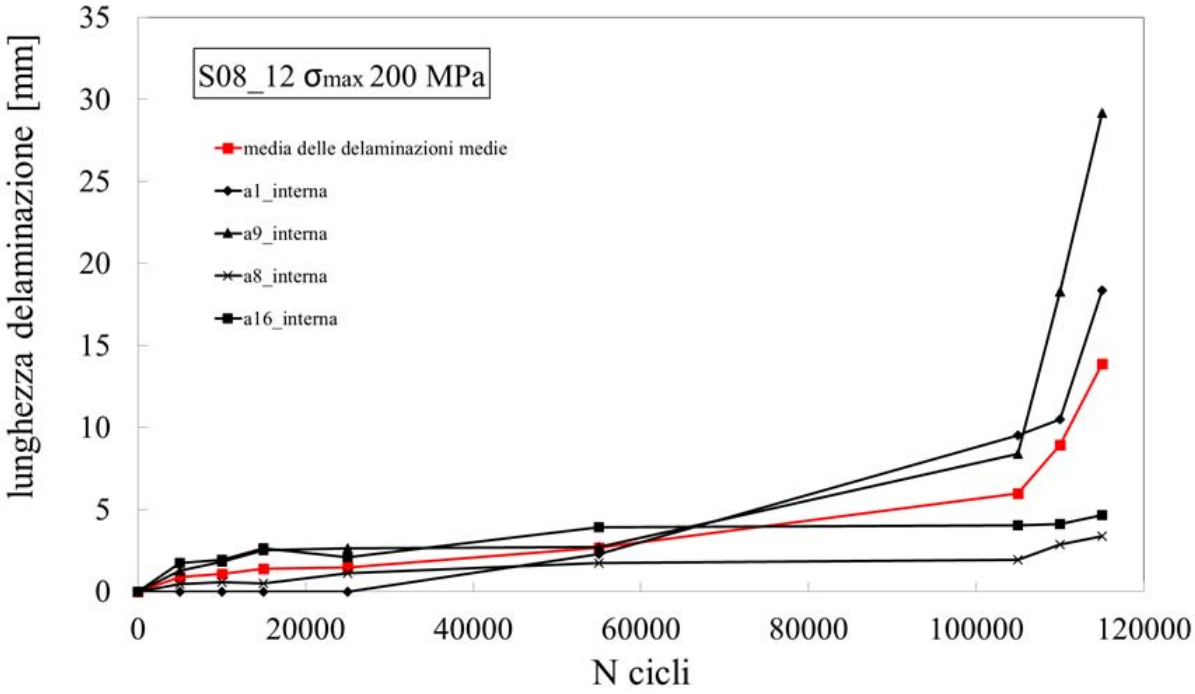


Fig. 4.20 propagazione delle delaminazioni critiche e della media della delaminazioni medie al variare del numero di cicli relative al provino S08_12

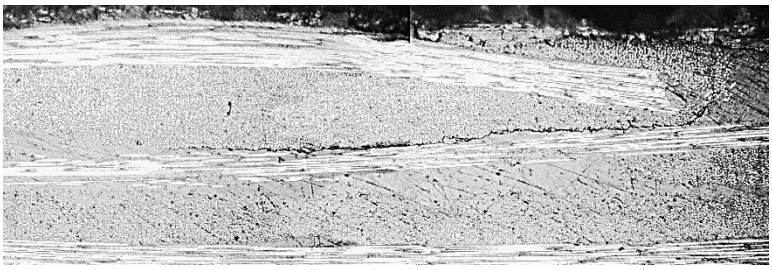


Fig 4.21 S08_12 -1°blocco di carico- (100X) cricca trasversale e delaminazione innescate dal punto di giunzione 16 - Danneggiamento al 4,2% della vita reale a fatica del giunto stepped, overlap 8 mm caricato con σ_{max}=200MPa.

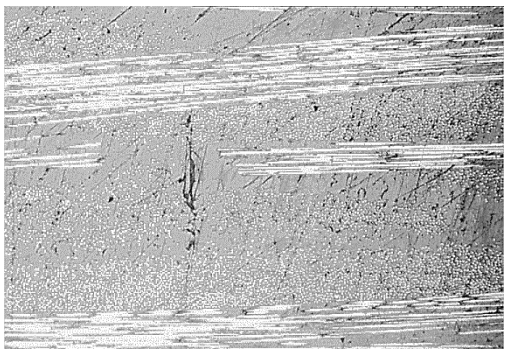


Fig 4.22 S08_12 -1°blocco di carico- (100X) cricca trasversale innescata dal punto di giunzione 14 - Danneggiamento al 4,2% della vita reale a fatica del giunto stepped, overlap 8 mm caricato con σ_{max}=200MPa.

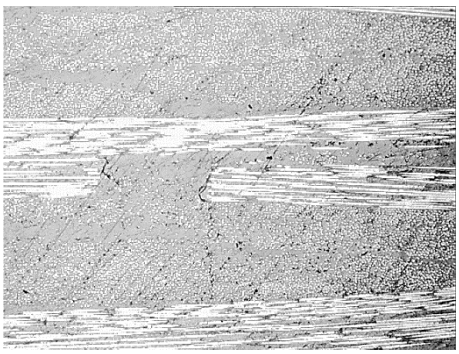


Fig 4.23 S08_12 -2°blocco di carico- (100X) cricca trasversale innescata dal punto di giunzione 4 - Danneggiamento al 8,2 % della vita reale a fatica del giunto stepped, overlap 8 mm caricato con σ_{max}=200MPa.

Fig 4.24 S08_12 -5°blocco di carico- cricca trasversale e delaminazione innescate dal punto di giunzione 9 - Danneggiamento al 47,1% della vita reale a fatica del giunto stepped, overlap 8 mm caricato con σ_{max}=200MPa.

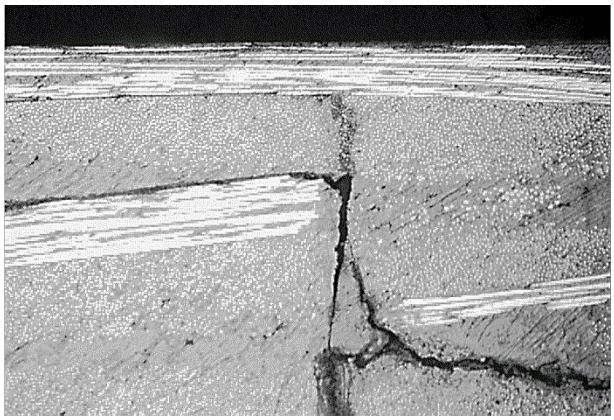


Fig 4.25 S08_12 -5°blocco di carico- (100X) propagazione della delaminazione (punto1) tra prima e seconda interfaccia - Danneggiamento al 98,6% della vita reale a fatica del giunto stepped, overlap 8 mm caricato con σ_{max}=200MPa.

Fig 4.26 S08_12 -5°blocco di carico- (100X) propagazione della delaminazione (punto1) tra seconda e terza interfaccia - Danneggiamento al 98,6% della vita rele a fatica del giunto stepped, overlap 8 mm caricato con σ_{max}=200MPa.

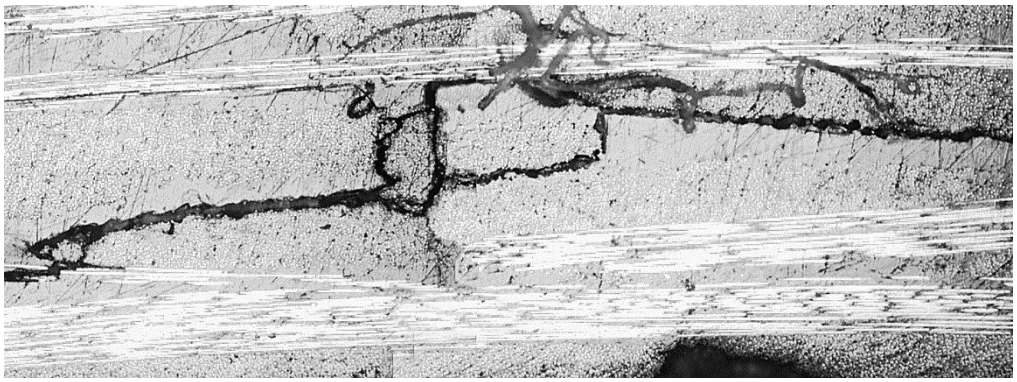


Fig 4.27 S08_12 -5°blocco di carico- (100X) propagazione della delaminazione originatasi a partire dal punto 9 tra prima e seconda interfaccia - Danneggiamento al 98,6% della vita reale a fatica del giunto stepped, overlap 8 mm caricato con σ_{max}=200MPa.

4.4.2 Provino S08_13

Il provino S08_13, al pari del S08_12, è stato testato applicando una tensione massima di 200 MPa. Di seguito sono riportati i dati riguardanti le dimensioni del campione testato, il valore delle tensioni (σ_{max},σ_{min} e σ_A) e dei carichi (F_{MAX} e F_{MIN}) applicati durante la prova, il rapporto di sollecitazione $R = F_{MIN} / F_{MAX}$ e la frequenza di prova f. Trattandosi di una prova ad elevato numero di cicli sono state scelte due diverse frequenze, 5 e 8 Hz, a seconda dell'estensione di ciascun blocco di carico.

Dimensioni	
b [mm]	22,7
t [mm]	2,3
L [mm]	217

Tab. 16 dimensioni del provino S08_13

Tensioni e Carichi	
σ_{UTS} [MPa]	425
σ_{max} [MPa]	200
σ_{min} [MPa]	10
σ_A [MPa]	95
R	0,05
f [Hz]	5 ; 8
F max [kN]	10,442
F min [kN]	0,5221

Tab. 17 tensioni e carichi applicati al provino S08_13

Sono stati eseguiti 10 blocchi di carico ciascuno dei quali composto dal seguente numero di cicli

N° blocco di carico	N° cicli per blocco di carico	Cicli totali
1	5000	5000
2	5000	10000
3	5000	15000
4	10000	25000
5	30000	55000
6	50000	105000
7	50000	155000
8	50000	205000
9	50000	255000
10	50000	280454

Tab. 18 blocchi di carico applicati al provino S08_13

Il provino anche in questo caso si è rotto molto prima rispetto alle previsioni iniziali. Ha ceduto infatti nel corso del decimo blocco di carico dopo aver completato complessivamente 280454 cicli rispetto ai $2 \cdot 10^6$ cicli previsti inizialmente.

I risultati del danneggiamento rilevati nel corso della prova sono riportati nella tabella che segue:

cicli	% vita a fatica	a_{1trasv}	a_{1int}	a_{1est}
0	0	0	0	0
5000	1.78	0.281319	0.684615	0.475824
10000	3.56	0.292308	0.695604	0.594505
15000	5.35	0.289011	0.702198	1.043956
25000	8.91	0.298901	0.705495	1.098901
55000	19.61	0.29011	0.806593	1.113187
105000	37.44	0.296703	0.808791	1.220879
155000	55.26	0.296703	1.079121	1.10989
205000	73.09	0.296703	2.848352	1.103297
255000	90.92	0.296703	11.8989	1.114286

cicli	% vita a fatica	a_{8trasv}	a_{8int}	a_{8est}
0	0	0	0	0
5000	1.78	0.342857	0	0.740659
10000	3.56	0.359341	0	0.895604
15000	5.35	0.362637	0	0.937363
25000	8.91	0.362637	0	1.106593
55000	19.61	0.343956	0.769231	1.304396
105000	37.44	0.343956	1.112088	2.145055
155000	55.26	0.343956	2.730769	2.478022
205000	73.09	0.343956	4.503297	2.47033
255000	90.92	0.343956	4.659341	3.587912

cicli	% vita a fatica	a_{9trasv}	a_{9int}	a_{9est}
0	0	0	0	0
5000	1.78	0.252747	1.389011	0.206593
10000	3.56	0.27033	1.576923	0.616484
15000	5.35	0.274725	1.771429	1.063736
25000	8.91	0.276923	2.095604	1.065934
55000	19.61	0.275824	2.112088	1.59011
105000	37.44	0.275824	2.418681	2.896703
155000	55.26	0.275824	2.657143	4.063736
205000	73.09	0.275824	2.58022	4.11978
255000	90.92	0.275824	7.29011	4.601099

cicli	% vita a fatica	$a_{16trasv}$	a_{16int}	a_{16est}
0	0	0	0	0
5000	1.78	0.43956	0.734066	0.659341
10000	3.56	0.453846	0.932967	1.375824
15000	5.35	0.463736	1.428571	1.595604
25000	8.91	0.463736	1.430769	1.66044
55000	19.61	0.463736	1.872527	1.784615
105000	37.44	0.463736	2.557143	1.934066
155000	55.26	0.463736	2.9	5.630769
205000	73.09	0.463736	2.930769	7.320879
255000	90.92	0.463736	3.587912	8.218681

Tab. 19 tabella riassuntiva delle propagazioni per il provino S08_13. Basso Carico.

L'andamento della variazione della lunghezza delle delaminazioni all'aumentare del numero di cicli, per il provino S08_13, è così rappresentabile

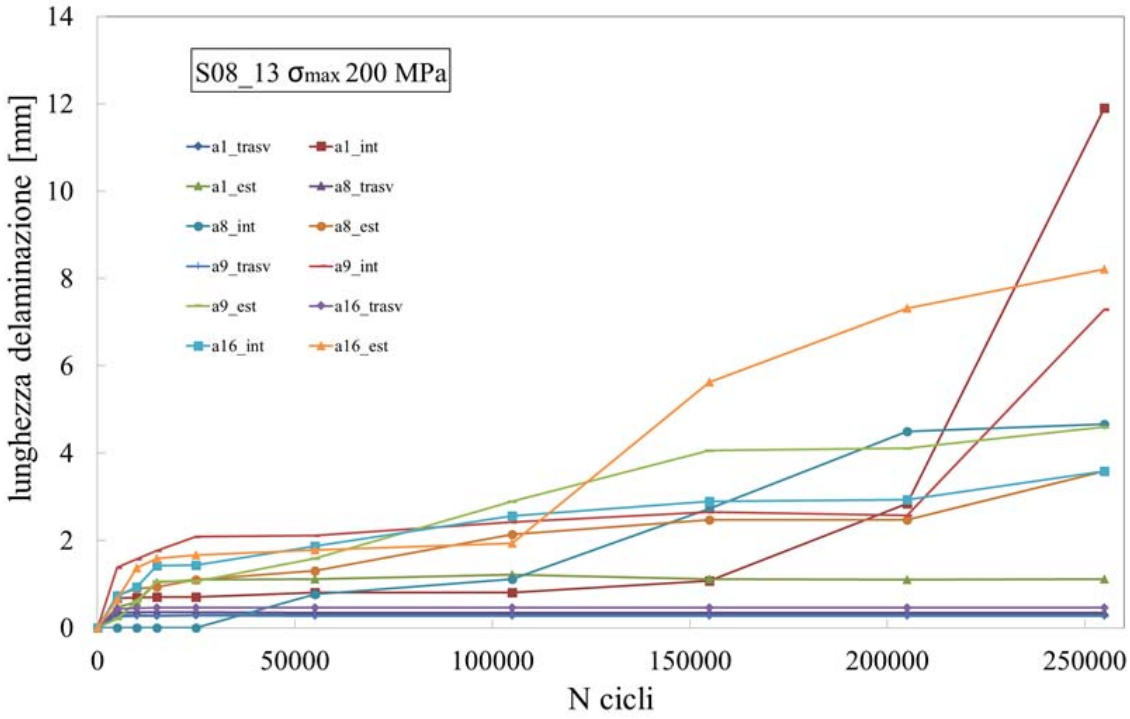


Fig. 4.28 propagazione delle diverse delaminazioni al variare del numero di cicli relative al provino S08_12

Nelle prime fasi di vita del provino l'andamento delle delaminazioni è simile a quello registrato nel provino S08_12. In questo caso l'ultima delaminazione ad innescarsi è quella che prende origine dal punto 8 e propaga verso l'interno. Appare evidente, osservando il grafico di *Fig.4.28*, che la delaminazione *a16_est*, non presenta la classica curva "piatta", bensì evidenzia un andamento crescente a partire da 100000 cicli. Questo fatto può essere imputato in parte ad un disallineamento accidentale del provino rispetto alle morse di serraggio della macchina. Per quanto riguarda le fasi finali di vita del provino le considerazioni che si possono fare sono analoghe a quelle fatte per il provino S08_12.

Si può notare come in quest'ultima fase, le delaminazioni *a9_int* e *a1_int* aumentino repentinamente la propria velocità di propagazione fino a quando il pezzo non raggiunge il punto di rottura a 280454 cicli. Una considerazione opposta va fatta per le altre due delaminazioni critiche, *a8_int* e *a16_int*, le quali diminuiscono e mantengono costante rispettivamente, la propria velocità di propagazione.

Nel dettaglio vengono rappresentati, nella figura successiva, gli andamenti del parametro *media delle delaminazioni medie* e delle delaminazioni critiche

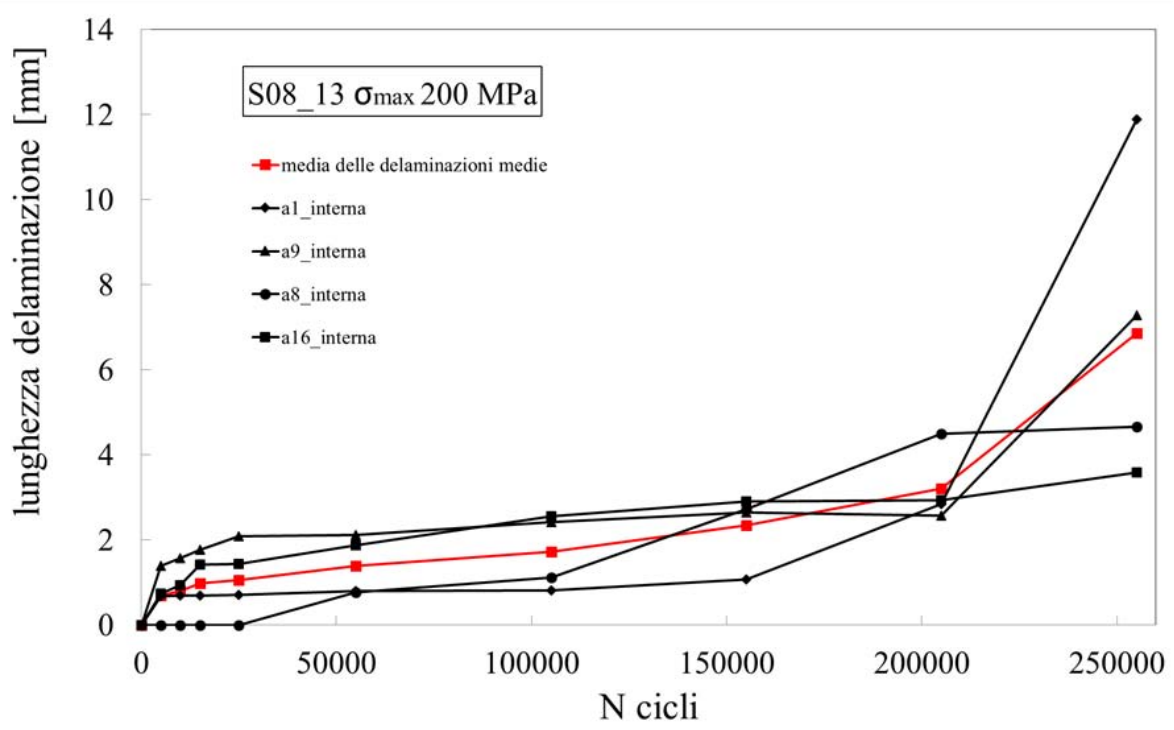


Fig. 4.29 propagazione delle delaminazioni critiche e della media della delaminazioni medie al variare del numero di cicli relative al provino S08_13

Fig. 4.30 superfici aderende di rottura per fatica della giunzione S08_13

Fig 4.31 S08_13-1°blocco di carico- (100X) cricca trasversale e delaminazione innescate dal punto di giunzione 16 - Danneggiamento al 1,8% della vita reale a fatica del giunto stepped, overlap 8 mm caricato con σ_{max}=200MPa.

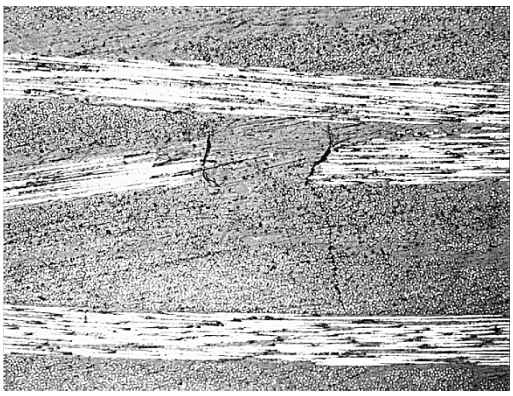


Fig 4.32 S08_13-1°blocco di carico- (100X) doppia cricca trasversale innescata dal punto di giunzione 4 - Danneggiamento al 1,8% della vita reale a fatica del giunto stepped, overlap 8 mm caricato con σ_{max}=200MPa.

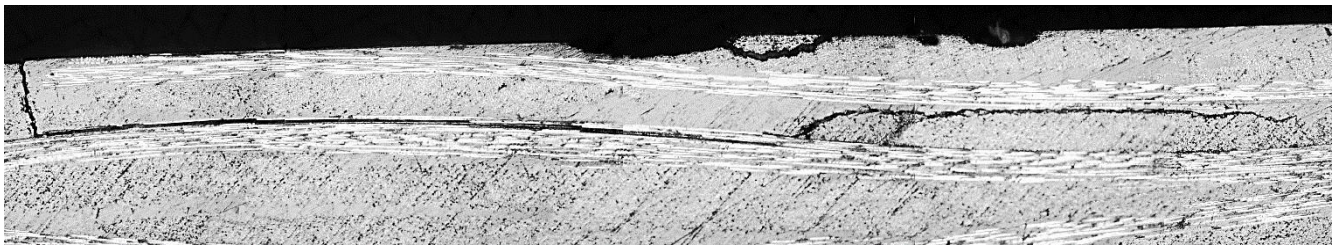


Fig 4.33 S08_13-1°blocco di carico- cricca trasversale e delaminazione innescate dal punto di giunzione 8 - Danneggiamento al 37.44% della vita reale a fatica del giunto stepped, overlap 8 mm caricato con σ_{max}=200MPa.

Fig 4.34 S08_13-10°blocco di carico- cricca trasversale (con origine nel punto 1) e delaminazione propagante verso l'interno della giunzione - Danneggiamento al 90.92% della vita reale a fatica del giunto stepped, overlap 8 mm caricato con σ_{max}=200MPa.

4.5 Giunti stepped con lay-up $[0]_8$ soggetti a basso carico

4.5.1 Provino S08_17

Una volta terminate queste prime quattro prove, avendo notato che le previsioni di vita a fatica attesa si discostavano notevolmente dai risultati ottenuti, si è deciso di riportare tali risultati in una curva di Woehler per poterli meglio confrontare con quelli già in nostro possesso. Quello che si può immediatamente osservare è che i nuovi punti sperimentali risultano traslati verso il basso rispetto agli altri dati, facendo riferimento ovviamente alla lunghezza di sovrapposizione *w*=8 mm.

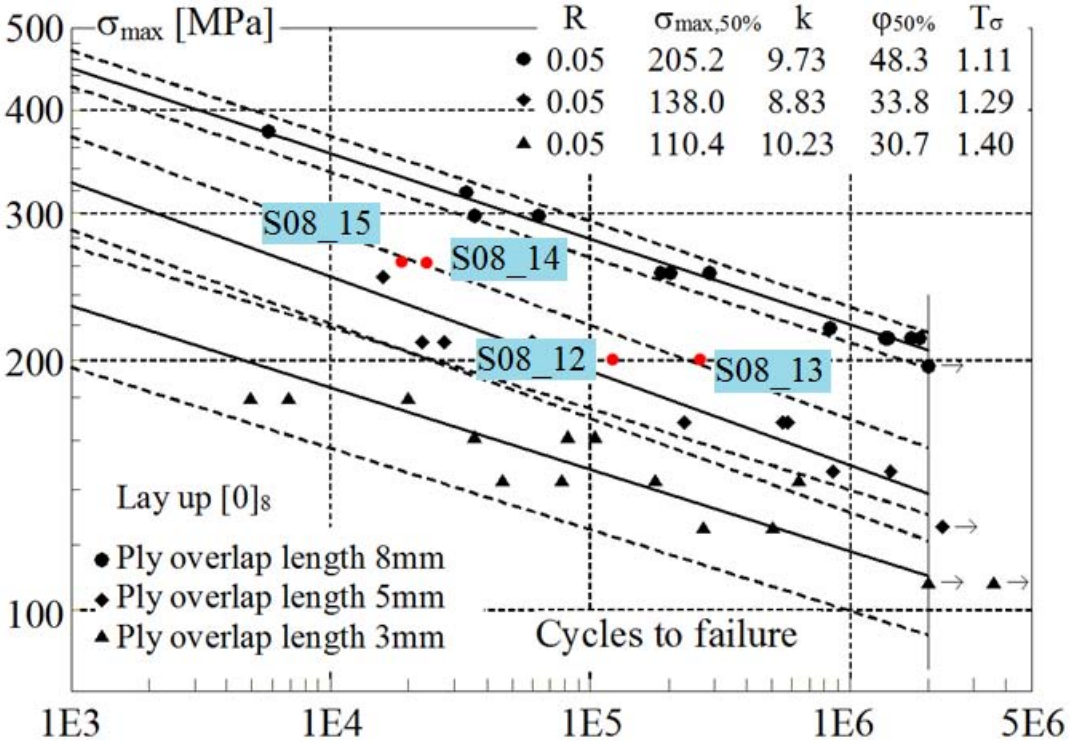


Fig.4.35 Curva di Woheler con i 4 nuovi punti sperimentali relativi al lay-up $[0]_8$ ed overlap 8mm

Si è deciso quindi di condurre ulteriori prove per cercare di tracciare una nuova curva di Woehler con i nuovi risultati ottenuti.

Il nuovo provino testato, l'S08_17, è stato caricato con una tensione massima di 150 MPa, prevedendo una vita a fatica di $1 \cdot 10^6$ / $2 \cdot 10^6$ cicli. Di seguito sono riportati i dati riguardanti le dimensioni del campione testato, il valore delle tensioni (σ_{max},σ_{min} e σ_A) e dei carichi (F_{MAX} e F_{MIN}) applicati durante la prova, il rapporto di sollecitazione R = F_{MIN} / F_{MAX} e la frequenza di prova f, che è stata variata in funzione dell'estensione dei diversi blocchi di carico.

Dimensioni	
b [mm]	22,8
t [mm]	2,3
L [mm]	217

Tab. 20 dimensioni del provino S08_17

Tensioni e Carichi	
σ_{UTS} [MPa]	425
σ_{max} [MPa]	150
σ_{min} [MPa]	7,5
σ_A [MPa]	71,25
R	0,05
f [Hz]	5; 8; 10
F max [kN]	7,866
F min [kN]	0,3933

Tab. 21 tensioni e carichi applicati al provino

Sono stati eseguiti 27 blocchi di carico ciascuno dei quali composto dal seguente numero di cicli

N° blocco di carico	N° cicli per blocco di carico	Cicli totali
1	1000	1000
2	4000	5000
3	5000	10000
4	10000	15000
5	30000	25000
6	50000	55000
7	50000	105000
8	75000	155000
9	100000	230000
10	100000	330000
11	100000	430000
12	100000	530000
13	100000	630000
14	100000	730000
15	100000	830000
16	100000	930000
17	100000	1030000
18	100000	1130000
19	100000	1230000
20	100000	1330000
21	100000	1430000
22	100000	1530000
23	100000	1630000
24	100000	1730000
25	100000	1830000
26	100000	1930000
27	70000	2000000

Tab. 22 blocchi di carico applicati al provino S08_17

In questo caso come si può vedere la prova si è conclusa in *run-out* a $2 \cdot 10^6$ cicli senza che il provino si sia rotto. Dato il considerevole numero di blocchi carico, si è scelto di non riportare tutte le misurazioni effettuate al termine di ciascun blocco.

I risultati del danneggiamento rilevati nel corso della prova sono riportati nella tabella che segue:

cicli	a_{1trasv}	a_{1int}	a_{1est}	a_{9trasv}	a_{9int}	a_{9est}
0	0	0	0	0	0	0
1000	0	0	0	0.368132	0.326374	0
5000	0.371429	0	0	0.362637	1.258242	0
10000	0.37033	0	0	0.365934	1.527473	0
15000	0.381319	0	0	0.374725	1.405495	0
25000	0.38022	0	0	0.358242	1.482418	0
55000	0.381319	0	1.346154	0.358242	1.904396	0
105000	0.381319	0	1.336264	0.358242	2.004396	0

cicli	a_{1trasv}	a_{1int}	a_{1est}	a_{9trasv}	a_{9int}	a_{9est}
155000	0.381319	0	1.352747	0.358242	2.125275	0
230000	0.381319	0.804511	1.334066	0.358242	2.154945	0
330000	0.381319	0.922365	1.334066	0.358242	2.161538	0
430000	0.381319	1.245652	1.334066	0.358242	2.159341	0
530000	0.381319	1.982418	1.334066	0.358242	2.159341	0
630000	0.381319	2.805495	1.334066	0.358242	2.162619	0
830000	0.381319	3.582418	1.334066	0.358242	2.176422	0
1030000	0.381319	3.663736	1.334066	0.358242	2.189011	0
1230000	0.381319	3.676923	1.357143	0.358242	2.194505	0
1430000	0.381319	3.689011	1.334066	0.358242	2.194505	0
1630000	0.381319	3.676923	1.334066	0.358242	2.206593	0
1830000	0.381319	3.676923	1.334066	0.358242	2.853846	0
2000000	0.381319	4.002198	1.469231	0.358242	3.112088	0

cicli	a_{8trasv}	a_{8int}	a_{8est}	$a_{16trasv}$	a_{16int}	a_{16est}
0	0	0	0	0	0	0
1000	0	0	0	0	0	0
5000	0	0	0	0	0	0
10000	0.368132	0	0	0.297802	0.203297	0
15000	0.361538	0	0	0.302198	0.282418	0
25000	0.362637	0	0	0.303297	0.314286	0
55000	0.363736	0	0	0.303297	0.347253	0
105000	0.363736	0	0	0.303297	0.40989	1.614286
155000	0.363736	0.637363	0.405495	0.303297	0.321978	1.681319
230000	0.363736	0.640659	0.408791	0.303297	0.327473	1.68022
330000	0.363736	0.640659	0.408791	0.303297	0.327473	1.702198
430000	0.363736	0.640659	0.415385	0.303297	0.330769	1.710989

530000	0.363736	0.640659	0.415385	0.303297	0.330769	1.710989
630000	0.363736	0.640659	1.646154	0.303297	0.330769	1.751612
830000	0.363736	0.640659	2.125275	0.303297	0.337363	1.782418
1030000	0.363736	0.640659	3.010044	0.303297	0.337363	1.782418
1230000	0.363736	0.651648	3.193407	0.303297	0.336264	1.793407
1430000	0.363736	0.640659	3.213187	0.303297	0.358242	1.820879
1630000	0.363736	0.640659	3.289011	0.303297	0.368132	1.837363
1830000	0.363736	0.640659	3.662637	0.303297	0.336264	2.013187
2000000	0.363736	0.656044	3.921978	0.303297	0.37033	2.196703

Tab. 23 tabella riassuntiva delle propagazioni per il provino S08_17

L'andamento della variazione della lunghezza delle delaminazioni all'aumentare del numero di cicli, per il provino S08_17 è riportato di seguito

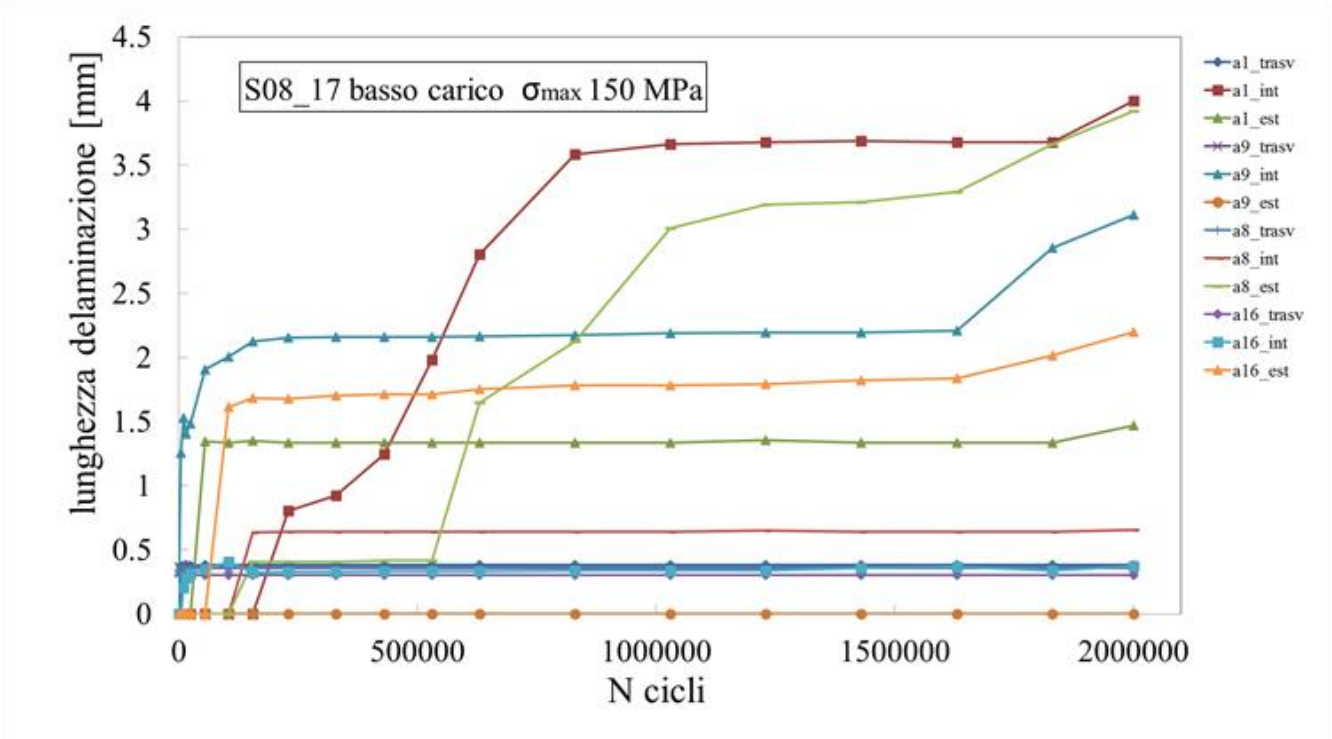


Fig. 4.36 propagazione delle diverse delaminazioni al variare del numero di cicli relative al provino S08_17

Analizzando la figura sopra riportata si può vedere come le diverse cricche dopo essersi innescate e aver propagato nella fase iniziale, subiscano un improvviso arresto attorno a 150000 cicli, rimanendo apparentemente "congelate" fino al termine della prova a $2 \cdot 10^6$ cicli. Un discorso a parte meritano le delaminazioni a1_int e *a8_est* le quali continuano a propagare fino a circa $1 \cdot 10^6$ cicli. Dal momento che la delaminazione *a8_est*, non è

influente sulla dinamica del cedimento in quanto propaga verso l'esterno, l'unica possibile criticità è rappresentata dalla delaminazione a1_int; dall'andamento di tale cricca e dalla lunghezza massima raggiunta dopo $2 \cdot 10^6$ cicli (4mm) si può notare che il punto di rottura è ben oltre il limite superiore che definisce il *run-out* delle prove.

Nel dettaglio vengono rappresentati, nella figura successiva, gli andamenti del parametro *media delle delaminazioni medie* e delle delaminazioni critiche

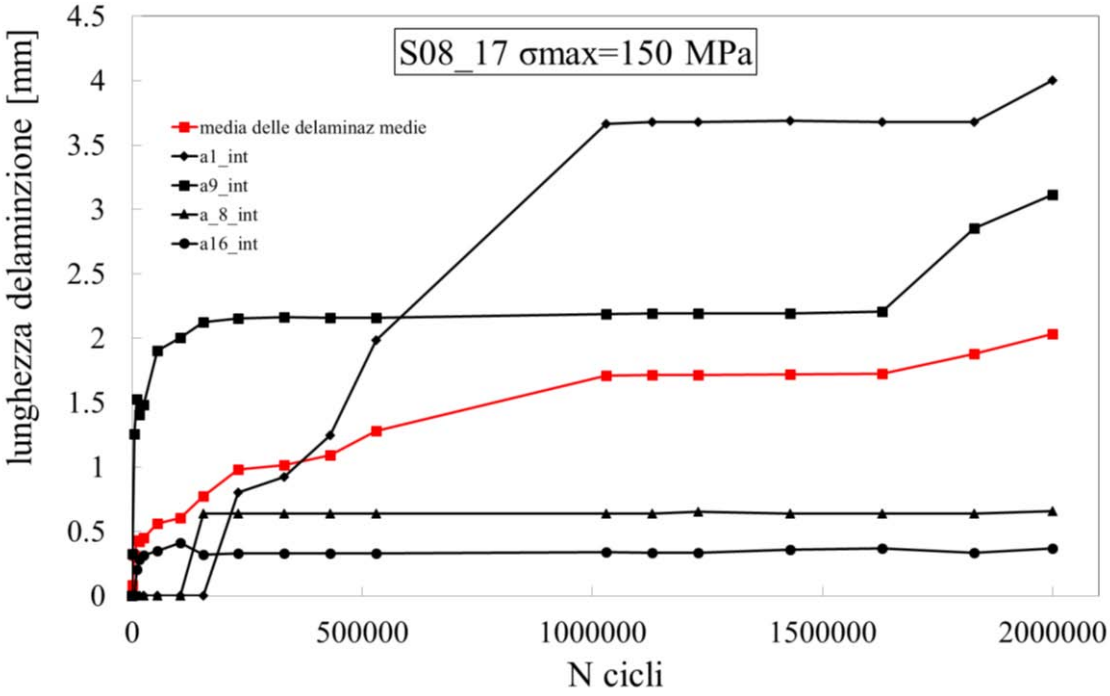


Fig. 4.37 propagazione delle delaminazioni critiche e della media della delaminazioni medie al variare del numero di cicli relative al provino S08_17

Fig 4.38 S08_17-3°blocco di carico- (100X) cricca trasversale e delaminazione innescate dal punto di giunzione 9 - giunto stepped, overlap 8 mm caricato con σ_{max}=150MPa.

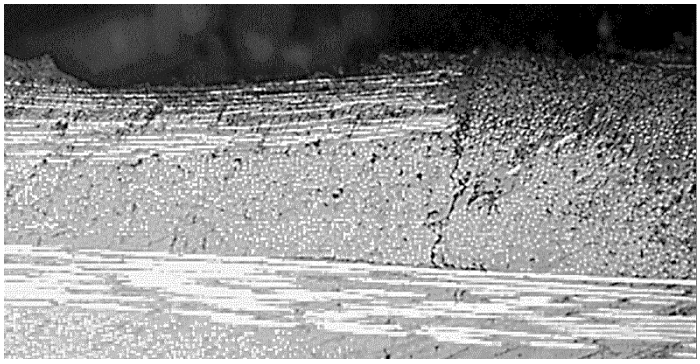


Fig 4.39 S08_17-7°blocco di carico- (100X) cricca trasversale e delaminazione innescate dal punto di giunzione 16 - giunto stepped, overlap 8 mm caricato con σ_{max}=150MPa.

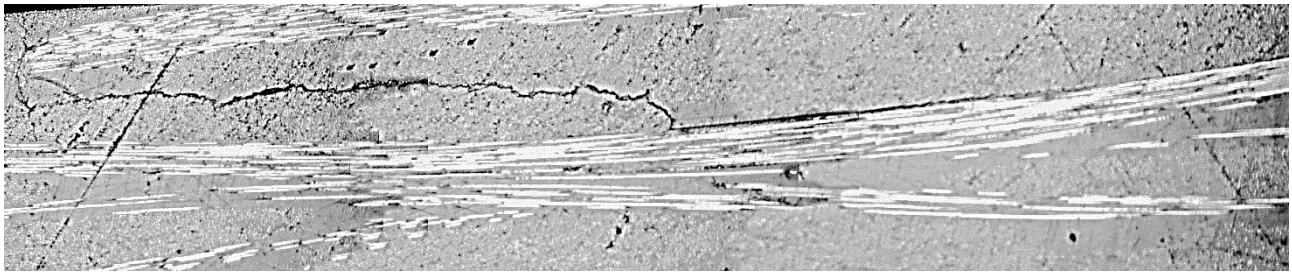


Fig 4.40 S08_17-18°blocco di carico- cricca trasversale e delaminazione innescate dal punto di giunzione 1 - giunto stepped, overlap 8 mm caricato con σ_{max}=150MPa.

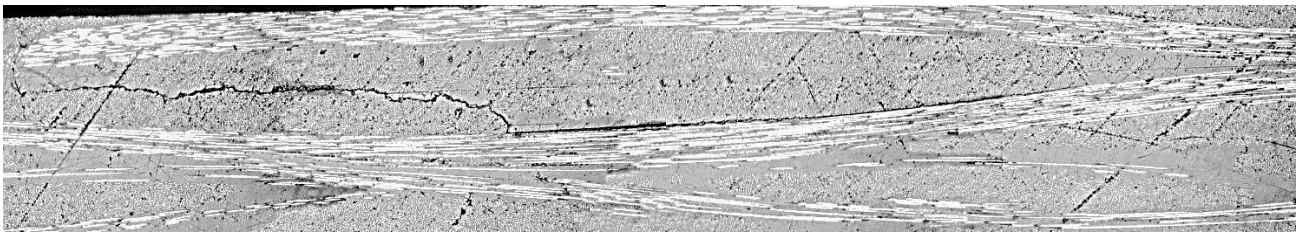


Fig 4.41 S08_17-25°blocco di carico- cricca trasversale e delaminazione innescate dal punto di giunzione 1 - giunto stepped, overlap 8 mm caricato con σ_{max}=150MPa.

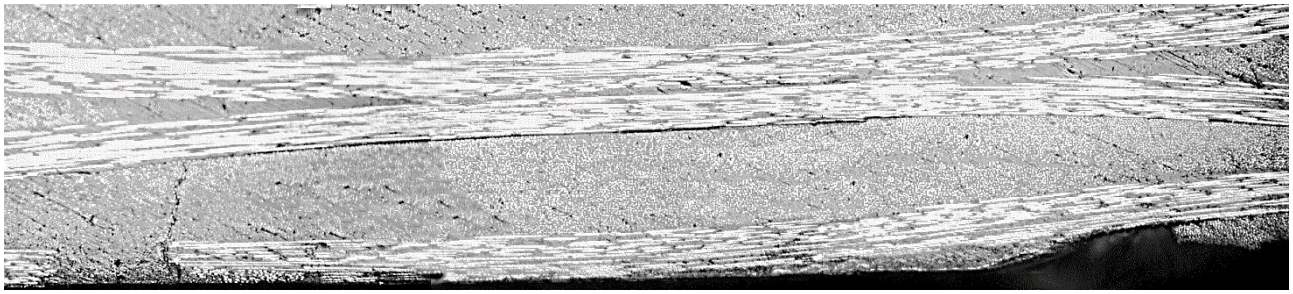


Fig 4.42 S08_17-27°blocco di carico- cricca trasversale e delaminazione innescate dal punto di giunzione 9 - giunto stepped, overlap 8 mm caricato con σ_{max}=150MPa.

4.5.2 Provino S08_16

Dal momento che il provino S08_17 è andato in *run-out* avendo applicato una tensione massima di 150 MPa, per la prova successiva si è scelto di aumentare il carico massimo a 160 MPa, prevedendo anche in questo caso una vita a fatica di $1 \cdot 10^6$ / $2 \cdot 10^6$ cicli. Il nuovo provino testato è l'S08_16. Le caratteristiche geometriche e i dati relativi alla prova sono riportati nelle tabelle seguenti

Dimensioni	
b [mm]	22,8
t [mm]	2,3
L [mm]	217

Tab. 24 dimensioni del provino S08_16

Tensioni e Carichi	
σ_{UTS} [MPa]	425
σ_{max} [MPa]	160
σ_{min} [MPa]	8
σ_A [MPa]	76
R	0,05
f [Hz]	10
F max [kN]	8,3904
F min [kN]	0,4195

Tab. 25 tensioni e carichi applicati al provino S08_16

Sono stati eseguiti i seguenti blocchi di carico

N° blocco di carico	N° cicli per blocco di carico	Cicli totali	% vita a fatica
1	5000	5000	0.28
2	15000	20000	1.13
3	30000	50000	2.83
4	50000	100000	5.66
5	100000	200000	11.32
6	30000	230000	13.02
7	100000	330000	18.68
8	100000	430000	24.34
9	100000	530000	30
10	100000	630000	35.67
11	70000	700000	39.63
12	70000	770000	43.59
13	70000	840000	47.55
14	70000	910000	51.51
15	70000	980000	55.48
16	70000	1050000	59.44
17	100000	1150000	65.10
18	100000	1250000	70.76
19	100000	1350000	76.42
20	100000	1450000	82.09
21	100000	1550000	87.75
22	30000	1580000	89.44
23	50000	1630000	92.27
24	50000	1680000	95.11
25	50000	1730000	97.94
26	50000	1766376	100

Tab. 26 blocchi di carico applicati al provino S08_16

La prova come si può vedere si è conclusa con la rottura del provino dopo 1766376 cicli. Dato il considerevole numero di blocchi carico, si è scelto di non riportare tutte le misurazioni effettuate al termine di ciascun blocco.

I risultati del danneggiamento rilevati nel corso della prova sono riportati nella tabella che segue:

cicli	a1_trasv	a1_dx	a1_sx	a9_trasv	a9_dx	a9_sx
0	0	0	0	0	0	0
5000	0.465934	0	0	0.451648	0.323077	0
20000	0.459341	1.124176	0	0.449451	0.327473	0
50000	0.461538	1.163736	0	0.452747	0.67033	0
100000	0.463736	1.759341	0	0.456044	0.789011	0
200000	0.463736	1.976923	0	0.456044	1.112088	0
330000	0.462637	2.601099	2.986813	0.456044	1.823077	0
430000	0.464835	2.605495	3.117582	0.452747	1.925275	0
530000	0.467033	2.631868	3.117582	0.454945	1.925275	0
630000	0.468132	2.657143	3.241758	0.457143	5.598901	0
700000	0.472527	3.308791	3.865934	0.459341	6.179121	0
770000	0.472527	3.313187	3.868132	0.459341	7.51978	0
840000	0.472527	3.324176	3.871429	0.459341	9.593407	0
910000	0.472527	3.332967	3.875824	0.459341	9.60989	0
980000	0.472527	3.332967	3.875824	0.459341	9.624176	0
1050000	0.472527	3.332967	3.885714	0.459341	10.22857	0
1150000	0.472527	3.332967	3.885714	0.459341	10.52637	0
1350000	0.472527	3.345055	3.885714	0.459341	10.55824	0
1550000	0.472527	3.345055	4.364835	0.459341	17.01209	0
1630000	0.472527	3.345055	4.364835	0.459341	20.59451	0
1730000	0.472527	3.345055	4.364835	0.459341	33.59341	0

cicli	a8_trasv	a8_dx	a8_sx	a16_trasv	a16_dx	a16_sx
0	0	0	0	0	0	0
5000	0	0	0	0.320879	0	0
20000	0.253846	0	0	0.263736	0	0.612088
50000	0.250549	0	0.423077	0.283516	0.154945	1.38022
100000	0.249451	0	0.741758	0.286813	0.176923	1.408791
200000	0.249451	0	0.857143	0.286813	2.858242	1.443956
330000	0.251648	0	0.859341	0.29011	3.034066	1.465934
430000	0.252747	0	0.859341	0.291209	3.271429	1.673626
530000	0.258242	0	0.859341	0.293407	3.271429	1.673626
630000	0.253846	0	0.905495	0.291209	3.325275	1.72967
700000	0.256044	0	1.905495	0.292308	3.351648	1.79011
770000	0.256044	0	1.905495	0.292308	3.395604	1.901099
840000	0.256044	0	1.905495	0.292308	3.403297	1.906593
910000	0.256044	0	1.906593	0.292308	3.415385	1.906593

cicli	a8_trasv	a8_dx	a8_sx	a16_trasv	a16_dx	a16_sx
980000	0.256044	0	1.906593	0.292308	3.415385	1.906593
1050000	0.256044	0	1.906593	0.292308	3.436264	2.038462
1150000	0.256044	0	1.961538	0.292308	3.436264	2.038462
1350000	0.256044	0	1.975824	0.292308	3.447253	2.101099
1550000	0.256044	0	2.006593	0.292308	3.451648	2.107692
1630000	0.256044	0	2.030769	0.292308	3.451648	2.107692
1730000	0.256044	0	2.030769	0.292308	3.451648	2.107692

Tab. 27 tabella riassuntiva delle propagazioni per il provino S08_16

L'andamento della variazione della lunghezza delle delaminazioni all'aumentare del numero di cicli, per il provino S08_16 è riportato nella figura seguente

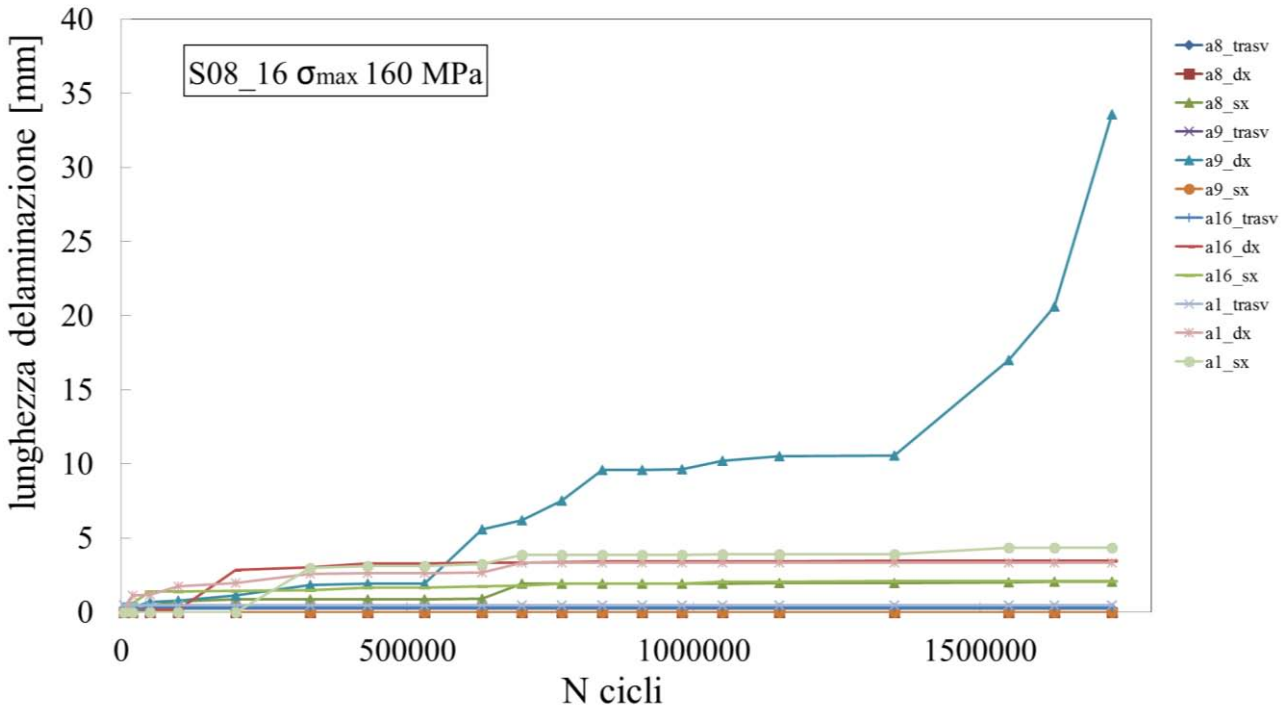


Fig. 4.43 propagazione delle diverse delaminazioni al variare del numero di cicli relative al provino S08_16

Appare evidente come il cedimento del giunto sia causato dalla delaminazione originatasi in corrispondenza del punto 9. A partire da 500000 cicli si osserva infatti un repentino aumento della velocità di propagazione che si traduce in un incremento sensibile della lunghezza di tale delaminazione. Con il passare della vita a fatica si osserva un rallentamento della propagazione di *a9_int* con conseguente stabilizzazione della cricca da $8 \cdot 10^5$ a $1{,}3 \cdot 10^6$. Nella fase finale della prova si nota una nuova brusca accelerazione della propagazione di tale delaminazione fino al raggiungimento del punto di rottura.

Tutte le altre delaminazioni meritano una diversa considerazione; queste infatti dopo essersi innescate e aver propagato nelle fasi iniziali della prova a fatica, si stabilizzano rallentando e in alcuni casi arrestando il proprio avanzamento fino al termine della prova.

Nel dettaglio vengono rappresentati, nella figura successiva, gli andamenti del parametro m*edia delle delaminazioni medie* e delle delaminazioni critiche

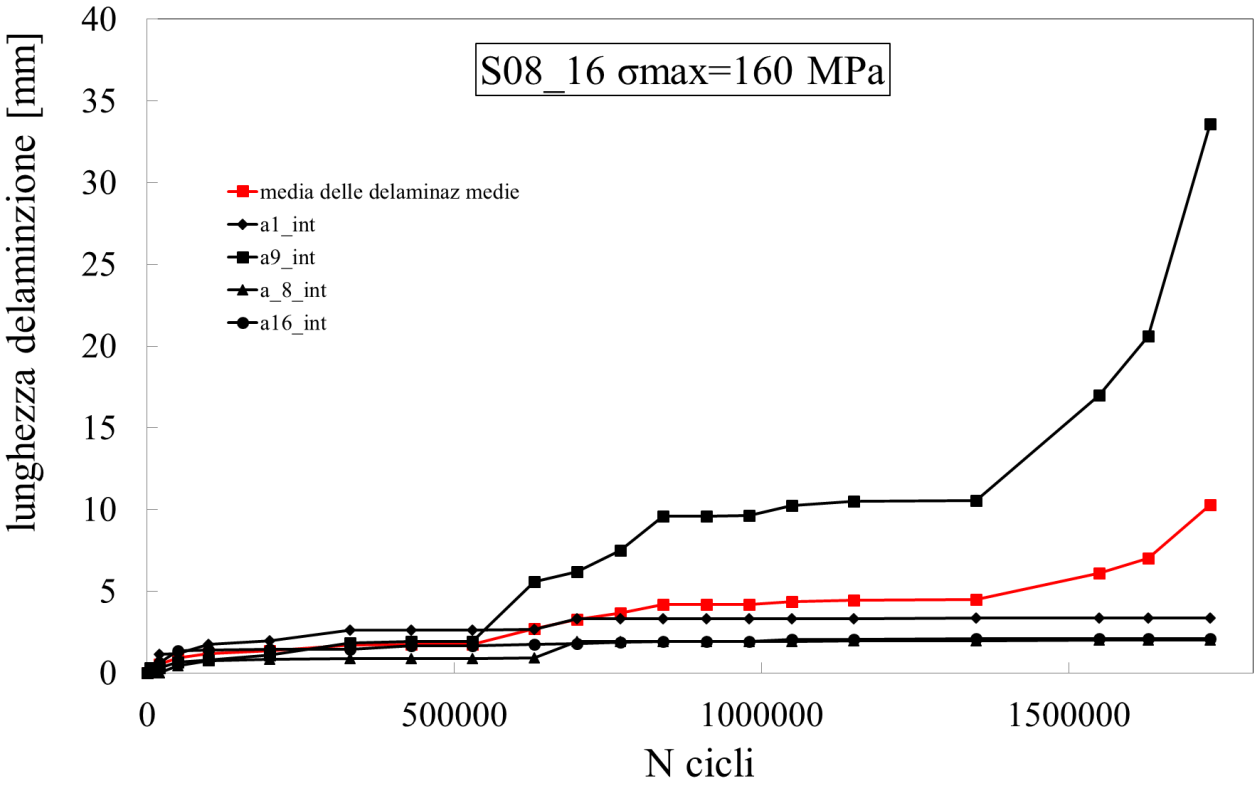


Fig. 4.44 propagazione delle delaminazioni critiche e della media della delaminazioni medie al variare del numero di cicli relative al provino S08_16

Fig 4.45 S08_16-4°blocco di carico- (100X) cricca trasversale e delaminazione innescate dal punto di giunzione 9 - giunto stepped, overlap 8 mm caricato con σ_{max} =160MPa.

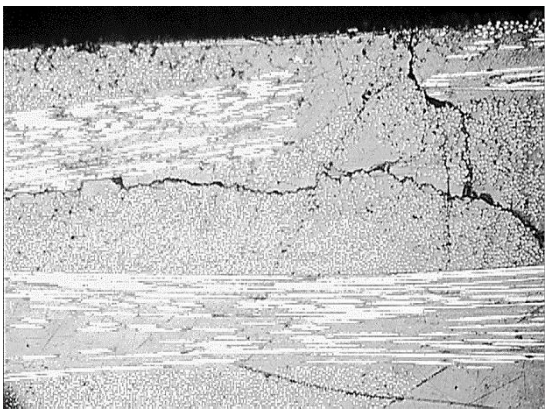


Fig 4.46 S08_16-6°blocco di carico- (100X) cricca trasversale e delaminazione innescate dal punto di giunzione 1 - giunto stepped, overlap 8 mm caricato con σ_{max} =160MPa.

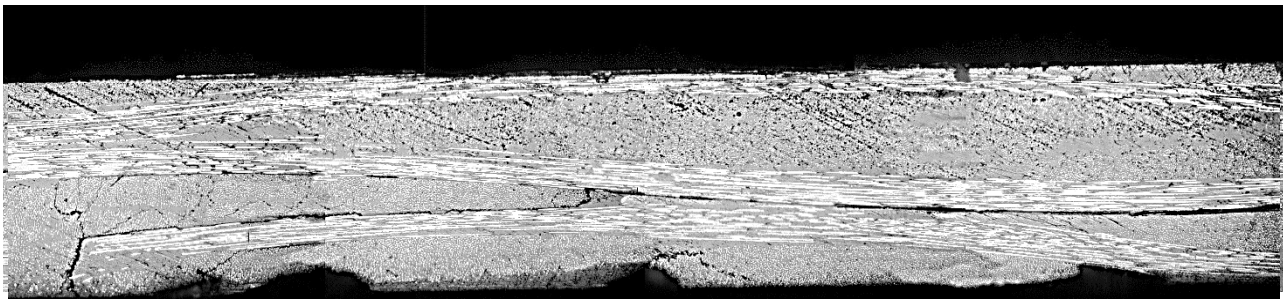


Fig 4.47 S08_16-19°blocco di carico- cricca trasversale e delaminazione innescate dal punto di giunzione 9 - giunto stepped, overlap 8 mm caricato con σ_{max} =160MPa.

Fig 4.48 S08_16-21°blocco di carico- passaggio della delaminazione a9_int dalla prima alla seconda interfaccia- giunto stepped, overlap 8 mm caricato con σ_{max} =160MPa.

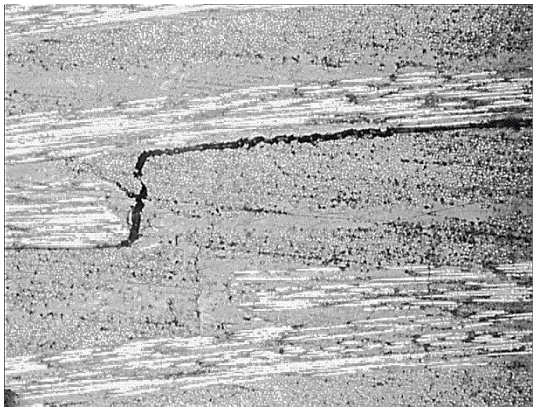


Fig 4.49 S08_16-26°blocco di carico- (100X) passaggio della delaminazione a9_int dalla seconda alla terza interfaccia- giunto stepped, overlap 8 mm caricato con σ_{max} =160MPa.

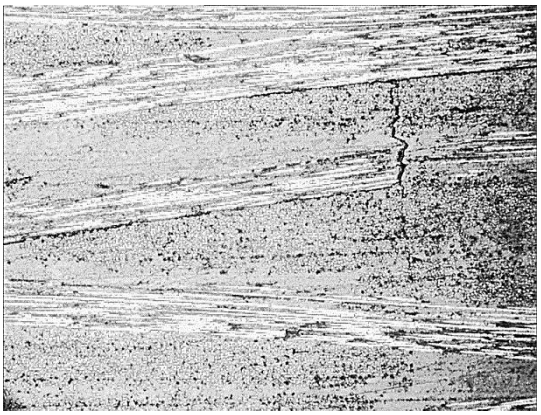


Fig 4.50 S08_16-26°blocco di carico- (100X) passaggio della delaminazione a9_int dalla terza alla quarta interfaccia- giunto stepped, overlap 8 mm caricato con σ_{max} =160MPa.

4.6 Giunti *stepped* con lay-up [$0_2/45_5/0$]

La seconda parte delle prove sperimentali ha riguardato prove a fatica su provini con *lay-up* [$0_2/45_5/0$] e lunghezza di sovrapposizione pari a 5 mm. Al pari di quanto fatto per provini con *lay-up* $[0]_8$, sono state condotte 6 prove complessive: 2 ad alto carico, 2 a medio e 2 a basso carico. Per stabilire i valori delle tensioni da applicare nelle diverse prove, si è fatto riferimento alla curva di Woheler, evidenziata in rosso, riportata in figura 4.46 relativa al lay-up $[0_2/45_2]_s$ ed overlap 5mm. Queste curve sono state ricavate dalle prove sperimentali condotte da E.Balzarini [5] e S.Cristanini [4] nei rispettivi lavori di tesi.

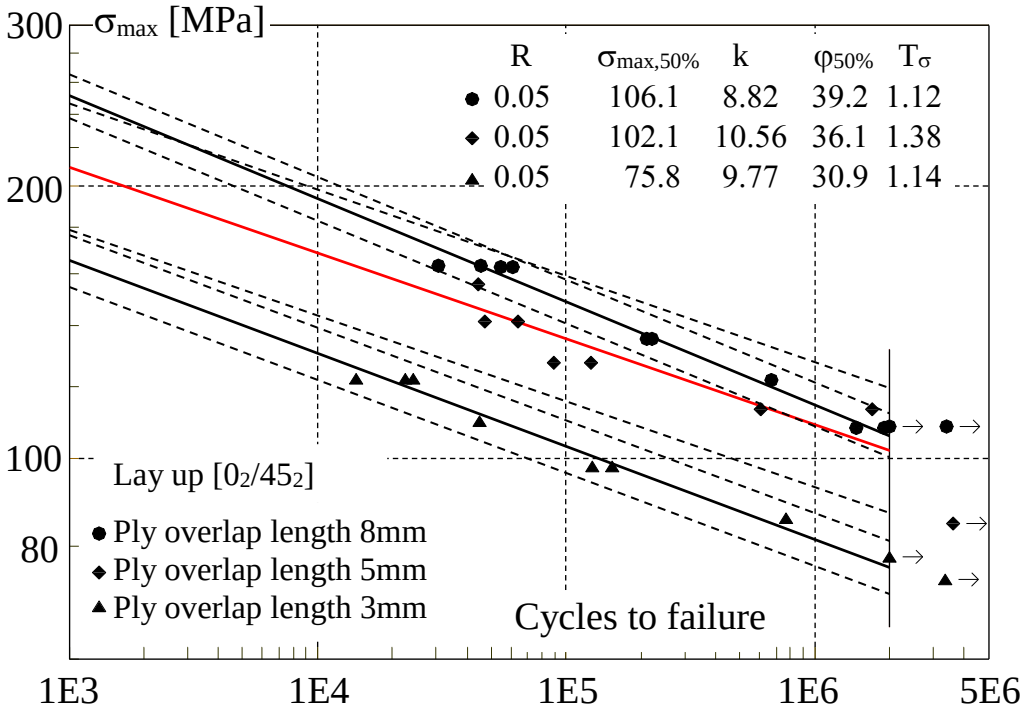


Fig. 4.51 curve di Woheler per giunzioni stepped con lay-up [$0_2/45_5/0$] per i tre diversi overlap

Per la retta di interpolazione evidenziata vale la seguente relazione:

$$\sigma_{max}^{k} \cdot N = cost \tag{4.3}$$

Sostituendo i valori delle costanti con quelli riportati in figura relativi alla lunghezza di sovrapposizione w=5 mm si può ricavare il valore di σ_{max} da applicare alla prova per ottenere un determinato numero di cicli; $5 \cdot 10^4$ cicli per le prove ad alto carico e $1 \cdot 10^6$ cicli per le prove a basso carico.

Il valore della tensione massima da applicare ad una prova ad alto carico, prevedendo una vita a fatica di $5 \cdot 10^4$, cicli vale:

$$\sigma_{max}^{k} \cdot N = cost = 102.1^{10.56} \cdot 2 \cdot 10^6 \tag{4.4}$$

$$\sigma_{max} = 102.1 \cdot (\frac{2 \cdot 10^6}{50000})^{\frac{1}{10.56}} = 144.8\ MPa \tag{4.5}$$

Il valore dell'ampiezza di tensione, considerando il rapporto di ciclo R= 0,05, vale

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} = \sigma_{max} - R \cdot \sigma_{max} = \tag{4.6}$$

$$= \sigma_{max} \cdot (1 - R) = 144.8 \cdot (1 - 0.05) = 137.55\ MPa$$

Se si considera invece una prova a basso carico, il valore della tensione massima da applicare, prevedendo una vita a fatica di $2 \cdot 10^6$, cicli vale:

$$\sigma_{max}^{k} \cdot N = cost = 102.1^{10.56} \cdot 2 \cdot 10^6 \tag{4.7}$$

$$\sigma_{max} = 102.1 \cdot (\frac{2 \cdot 10^6}{1 \cdot 10^6})^{\frac{1}{10.56}} = 109.02\ MPa$$

Il valore dell'ampiezza di tensione, considerando il rapporto di ciclo R= 0,05, vale

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} = \sigma_{max} - R \cdot \sigma_{max} = \tag{4.8}$$

$$= \sigma_{max} \cdot (1 - R) = 109.02 \cdot (1 - 0.05) = 103.5\ MPa$$

Inizialmente sono quindi state condotte 4 prove sperimentali, due prove applicando una tensione massima di 144,8 MPa (provini SQI5_01, SQI5_02) e due applicando una tensione massima di 109 MPa (provini SQI5_03, SQI5_04). L'obiettivo di queste prove, al pari delle precedenti è quello di vedere se si ottengono dei risultati comparabili con quelli in nostro possesso oppure se anche in questo caso, per effetto dell'invecchiamento dei provini, i risultati si discostano notevolmente da essi.

4.7 Giunti stepped con lay-up [$0_2/45_5/0$] soggetti ad alto carico

In questa sezione vengono riportati in dettaglio i risultati ottenuti dalle prove su provini con *lay-up* [$0_2/45_5/0$], *overlap* 5 mm soggetti ad alto carico con una tensione massima di 144.8 MPa. La vita a fatica attesa per questa tipologia di provini sottoposti ad un ampiezza di carico di 137.55 MPa è di $5 \cdot 10^4$ cicli.

4.7.1 Provino SQI5_01

Come fatto già fatto in precedenza si riportano i dati riguardanti le dimensioni del campione testato, il valore delle tensioni (σ_{max},σ_{min} e σ_A) e dei carichi applicati (F_{MAX} e F_{MIN}) durante la prova, il rapporto di sollecitazione $R = F_{MIN} / F_{MAX}$ e la frequenza di prova f.

Dimensioni	
b [mm]	20.9
t [mm]	2.4
L [mm]	217

Tab. 28 dimensioni del provino SQI5_01

Tensioni e Carichi	
σ_{UTS} [MPa]	255
σ_{max} [MPa]	144.8
σ_{min} [MPa]	7.25
σ_A [MPa]	137.5
R	0.05
f [Hz]	8
F max [kN]	7.26
F min [kN]	0.36

Tab. 29 tensioni e carichi applicati al provino SQI5_01

Sono stati eseguiti complessivamente i seguenti 7 blocchi di carico a

N° blocco di carico	N° cicli per blocco di carico	Cicli totali
1	1000	1000
2	1000	2000
3	1000	3000
4	2000	5000
5	1000	6000
6	1000	7000
7	1000	7542

Tab. 30 blocchi di carico applicati al provino SQI5_01

Come si può vedere, la giunzione *stepped* si è rotta durante il settimo blocco di carico dopo aver completato complessivamente 7542 cicli rispetto ai $5 \cdot 10^4$ cicli previsti inizialmente. Appare evidente dunque che anche i provini di *lay-up* $[0_2/45_5/0]$ risentono del fenomeno dell'invecchiamento il quale incide negativamente sulla resistenza a fatica del provino riducendo, in questo caso, di oltre un fattore 6 il numero di cicli compiuti dal provino.

I risultati del danneggiamento rilevati nel corso della prova sono riportati nella tabella che segue:

cicli	% vita a fatica	a_{1_trasv}	a_{1_int}	a_{1_est}
0	0	0	0	0
1000	13.2591	0.25824	2.20549	0
2000	26.5182	0.26484	2.72967	0
3000	39.7772	0.26593	2.9967	0
5000	66.2954	0.26593	9.23956	1.97802
6000	79.5545	0.26374	9.46264	1.98571
7000	92.8136	0.26374	12.0132	1.98571

cicli	% vita a fatica	a_{8_trasv}	a_{8_int}	a_{8_est}
0	0	0	0	0
1000	13.2591	0.34945	0	0.60659
2000	26.5182	0.35385	0	0.80659
3000	39.7772	0.35714	0	0.98681
5000	66.2954	0.35714	0	1.18681
6000	79.5545	0.36044	2.48634	2.77363
7000	92.8136	0.36044	9.97143	3.54835

cicli	% vita a fatica	a_{9_trasv}	a_{9_int}	a_{9_est}
0	0	0	0	0
1000	13.2591	0.38791	0.41648	0.8989
2000	26.5182	0.39231	0.64505	2.07143
3000	39.7772	0.39231	0.74286	3.0022
5000	66.2954	0.39231	0.74286	3.16703
6000	79.5545	0.39011	0.98242	3.85165
7000	92.8136	0.39011	8.9011	3.87253

cicli	% vita a fatica	a_{16_trasv}	a_{16_int}	a_{16_est}
0	0	0	0	0
1000	13.2591	0.38681	2.04066	0
2000	26.5182	0.3967	2.10879	0
3000	39.7772	0.3956	2.11758	0
5000	66.2954	0.3956	4.54835	0
6000	79.5545	0.3967	9.36593	2.42527
7000	92.8136	0.3967	11.6121	2.43077

Tab. 31 tabella riassuntiva delle propagazioni per il provino SQI5_01

L'andamento della variazione della lunghezza delle delaminazioni all'aumentare del numero di cicli, per il provino SQI5_01 è riportato nella figura seguente

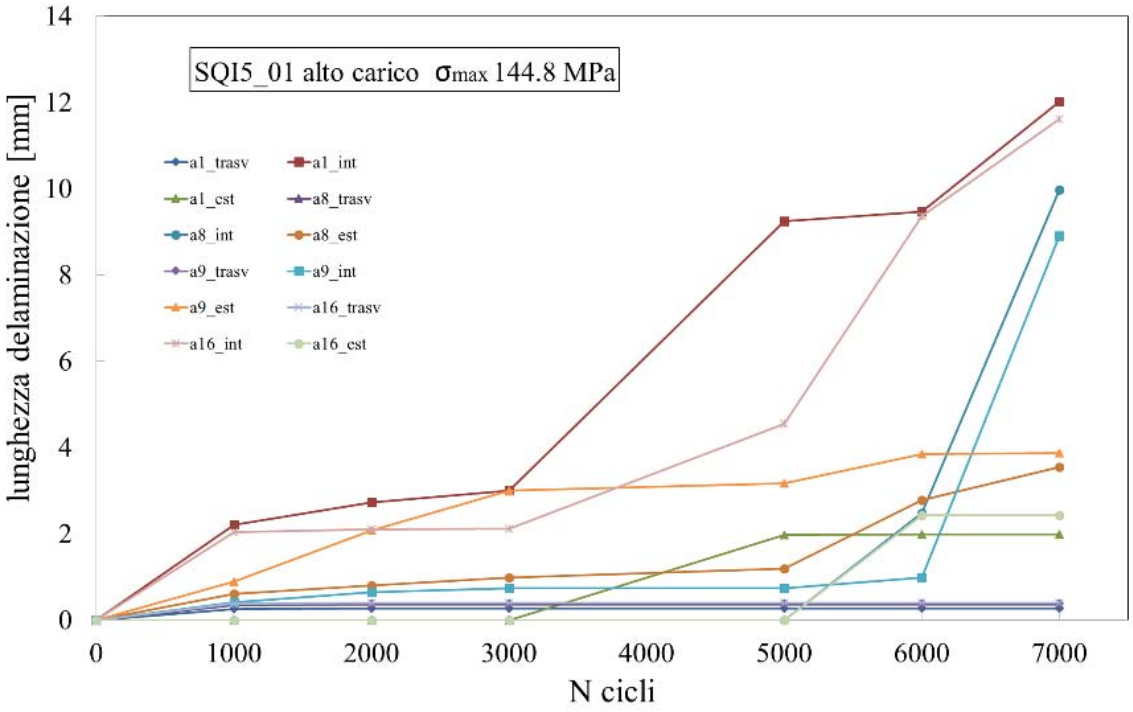


Fig. 4.52 propagazione delle diverse delaminazioni al variare del numero di cicli relative al provino SQI5_01

Fin dai primi cicli si nota come le delaminazioni originatasi a partire dai punti 1 e 16 propaganti verso l'interno della giunzione siano quelle che propagano con maggiore velocità. Da 1000 a 3000 cicli si nota un periodo di assestamento, al termine del quale la velocità di propagazione tende nuovamente ad aumentare.

Anche la delaminazione *a9* propagante verso l'esterno cresce considerevolmente nella prima parte della prova a fatica fino a circa 3000 cicli, successivamente si stabilizza rimanendo, come ci si aspetta, circa costante per tutto il resto della prova. Se si considerano le delaminazioni critiche che portano a rottura il provino, si può osservare che le delaminazioni *a8* e *a9* propaganti verso l'interno, avanzano rapidamente solamente nell'ultima parte della prova, a partire da 5000 e 6000 cicli rispettivamente. Entambe queste delaminazioni arrivano a propagare sulla seconda interfaccia tra secondo e terzo strato del laminato, mentre le delaminazioni *a1* e *a16* propagano fino alla terza interfaccia tra terzo e quarto strato.

Un'ultima osservazione che può essere fatta riguarda il numero di delaminazioni che portano a rottura il provino; se nei provini precedentemente testati solamente una o al massimo due delaminazioni raggiungevano una lunghezza tale da portare al cedimento la giunzione, in questo caso sono tutte e 4 le delaminazioni critiche a svilupparsi quasi simmetricamente fino a che il provino non cede. In questo caso la dinamica della propagazione ipotizzata nel modello FEM, trova diretto riscontro anche nel modello reale.

In *Fig. 4.53*, sono rappresentati nel dettaglio gli andamenti del parametro media delle delaminazioni medie e delle delaminazioni critiche

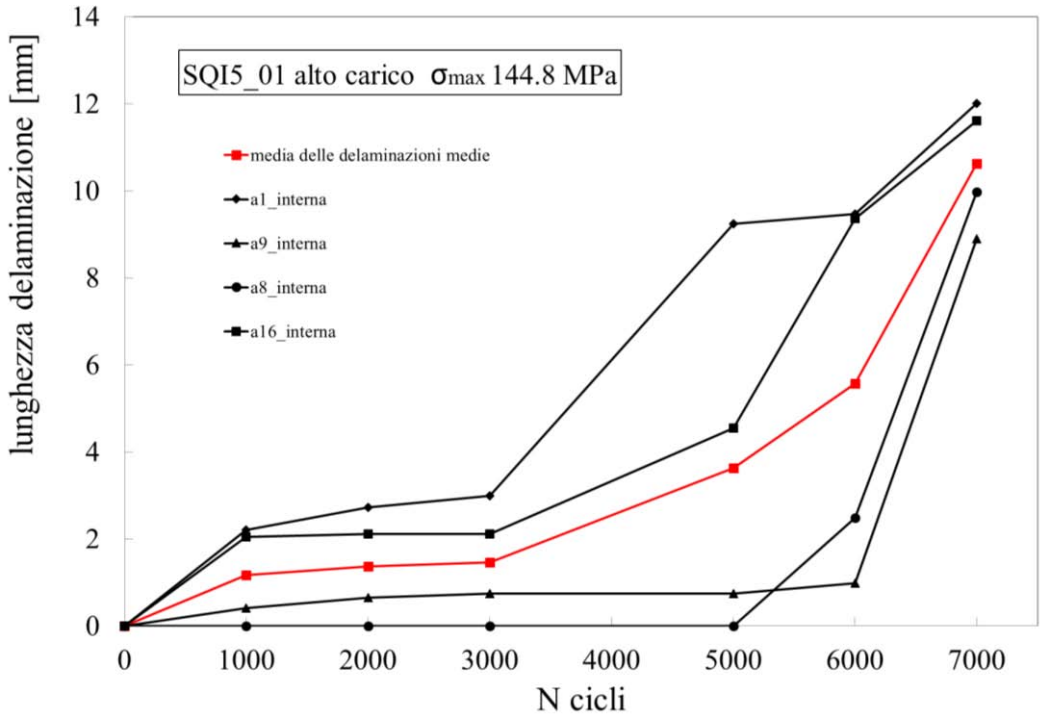


Fig. 4.53 propagazione delle delaminazioni critiche e della media della delaminazioni medie al variare del numero di cicli relative al provino SQI5_01

Fig 4.54 SQI5_01-1°blocco di carico- (100X) cricca trasversale e delaminazione innescate dal punto di giunzione 1 - giunto stepped, overlap 5 mm caricato con σ_{max} =144.8MPa.

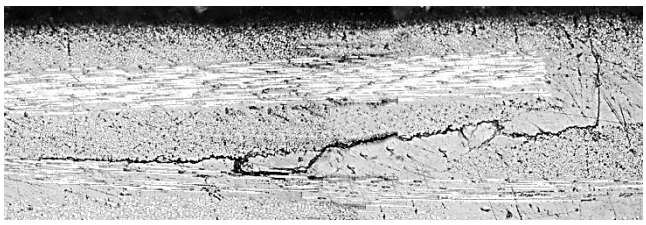


Fig 4.55 SQI5_01-2°blocco di carico- cricca trasversale e delaminazione innescate dal punto di giunzione 16 - giunto stepped, overlap 5 mm caricato con σ_{max} =144.8MPa.

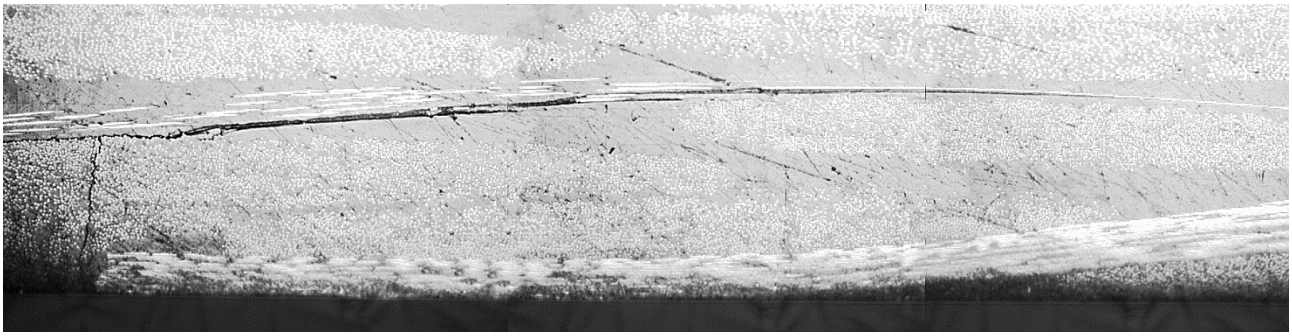


Fig 4.56 SQI5_01-3°blocco di carico- cricca trasversale e delaminazione innescate dal punto di giunzione 9 - giunto stepped, overlap 5 mm caricato con σ_{max} =144.8MPa.

Fig 4.57 SQI5_01-5°blocco di carico- delaminazione innescata dal punto di giunzione 1 e propagante lungo la seconda interfaccia - giunto stepped, overlap 5 mm caricato con σ_{max} =144.8MPa.

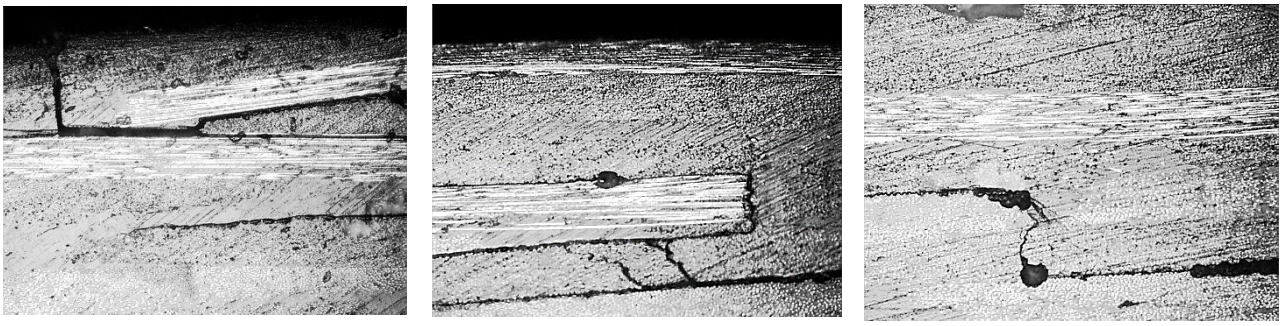


Fig 4.58 SQI5_01-7°blocco di carico- (100X) delaminazione innescata dal punto di giunzione 1. Particolari relativi al passaggio della delaminazione tra le diverse interfaccie - giunto stepped, overlap 5 mm caricato con σ_{max} =144.8MPa.

Il danneggiamento del giunto stampato stepped con 5 mm di sovrappposizione si concentra principalmente nelle zone esterne, di superficie. In effetti gli strati superficiali, a 0°, sono maggiormente sollecitati in quanto più rigidi rispetto quelli centrali a 45°. Il danneggiamento a basse percentuali della vita a fatica, 15%, si manifesta sottoforma di criccature verticali in corrispondenza delle giunzioni degli strati di superficie; tali criccature, dopo aver rotto il 1° strato di giunzione, *Fig 4.54 Fig. 4.55*, sfociano in una delaminazione lungo l'interfaccia tra strati con fibre a 0° del 2° e 7° strato rispettivamente.

La propagazione del danneggiamento del campione risulta pressoché lenta entro il 40% della sua vita a fatica limitandosi all'incremento delle delaminazioni già presenti come nel caso di *Fig 4.56* relativa all'8° strato, e delle cricche verticali già presenti come nel caso di *Fig 4.54* relativa al 1° strato. Entro questa percentuale di vita a fatica, si è osservato il comportamento compatto degli strati a 45°, centrali, che non manifestano danneggiamento ne all'interfaccia di medesima orientazione ne in corrispondenza delle giunzioni tra gli strati stessi. Il peggioramento dello stato del campione si manifesta sicuramente tra il 66% ed il 92% dove le condizioni del danneggiamento preesistente degradano comportando un allargamento delle cricche verticali, delle delaminazioni che peraltro come avviene nel 1° e 2° strato, *Fig 4.57*, uniscono le giunzioni dei due strati, e la comparsa di delaminazioni negli strati a 45° adiacenti a quelli a 0° come si evince dalle *Fig 4.57 e 4.58*.

4.7.2 Provino SQI5_02

Si riportano i dati riguardanti le dimensioni del campione SQI5_02, il valore delle tensioni (σ_{max},σ_{min} e σ_A) e dei carichi applicati (F_{MAX} e F_{MIN}) durante la prova, il rapporto di sollecitazione $R = F_{MIN} / F_{MAX}$ e la frequenza di prova f.

Dimensioni	
b [mm]	21.4
t [mm]	2.4
L [mm]	217

Tab. 32 dimensioni del provino SQI5_02

Tensioni e Carichi	
σ_{UTS} [MPa]	255
σ_{max} [MPa]	144.8
σ_{min} [MPa]	7.43
σ_A [MPa]	137.5
R	0.05
f [Hz]	8
F max [kN]	7.44
F min [kN]	0.37

Tab. 33 tensioni e carichi applicati al provino SQI5_02

Sono stati eseguiti complessivamente i seguenti 8 blocchi di carico

N° blocco di carico	N° cicli per blocco di carico	Cicli totali
1	1000	1000
2	1000	2000
3	1000	3000
4	2000	5000
5	1000	6000
6	1000	7000
7	1000	8000
8	1000	8961

Tab. 34 blocchi di carico applicati al provino SQI5_02

Come si può vedere, la giunzione *stepped* si è rotta durante l'ottavo blocco di carico dopo aver completato complessivamente 8961 cicli rispetto ai $5 \cdot 10^4$ cicli previsti inizialmente. Anche per questo provino quindi la rottura è avvenuta in anticipo rispetto alle previsioni, avendo questo completato il 18% dei cicli ipotizzati inizialmente.

I risultati del danneggiamento rilevati nel corso della prova sono riportati nella tabella che segue:

cicli	% vita a fatica	a_{1_trasv}	a_{1_int}	a_{1_est}
0	0	0	0	0
1000	11.1595	0.46813	0.23187	0
2000	22.3189	0.46374	0.23516	0
3000	33.4784	0.46923	0.23956	0
5000	55.7973	0.46923	2.20549	0
6000	66.9568	0.46923	3.21868	0
7000	78.1163	0.46923	3.98242	0
8000	89.2758	0.46923	7.03626	0.61538

cicli	% vita a fatica	a_{8_trasv}	a_{8_int}	a_{8_est}
0	0	0	0	0
1000	11.1595	0.34396	0	1.85604
2000	22.3189	0.34945	0	2.57582
3000	33.4784	0.36044	0	3.53297
5000	55.7973	0.35824	1.23407	4.32967
6000	66.9568	0.35824	8.66923	4.32967
7000	78.1163	0.35824	9.7	4.38681
8000	89.2758	0.35824	10.9286	4.38681

cicli	% vita a fatica	a_{9_trasv}	a_{9_int}	a_{9_est}
0	0	0	0	0
1000	11.1595	0.41978	0	1.5967
2000	22.3189	0.42308	0	2.07253
3000	33.4784	0.42747	0	2.45934
5000	55.7973	0.42198	0.33846	3.04505
6000	66.9568	0.42198	0.33846	3.12198
7000	78.1163	0.42198	0.33846	3.15495
8000	89.27575	0.421978	0.338462	3.154945

cicli	% vita a fatica	a_{16_trasv}	a_{16_int}	a_{16_est}
0	0	0	0	0
1000	11.1595	0.41209	0.87582	0.78791
2000	22.3189	0.40659	2.58022	1.36374
3000	33.4784	0.41099	2.68681	1.47363
5000	55.7973	0.41319	7.29341	1.47363
6000	66.9568	0.41319	10.7758	1.47363
7000	78.1163	0.41319	11.9143	1.49011
8000	89.2758	0.41319	14.5923	1.49011

Tab. 35 tabella riassuntiva delle propagazioni per il provino SQI5_02

L'andamento della variazione della lunghezza delle delaminazioni all'aumentare del numero di cicli, per il provino SQI5_02 è riportato nella figura seguente

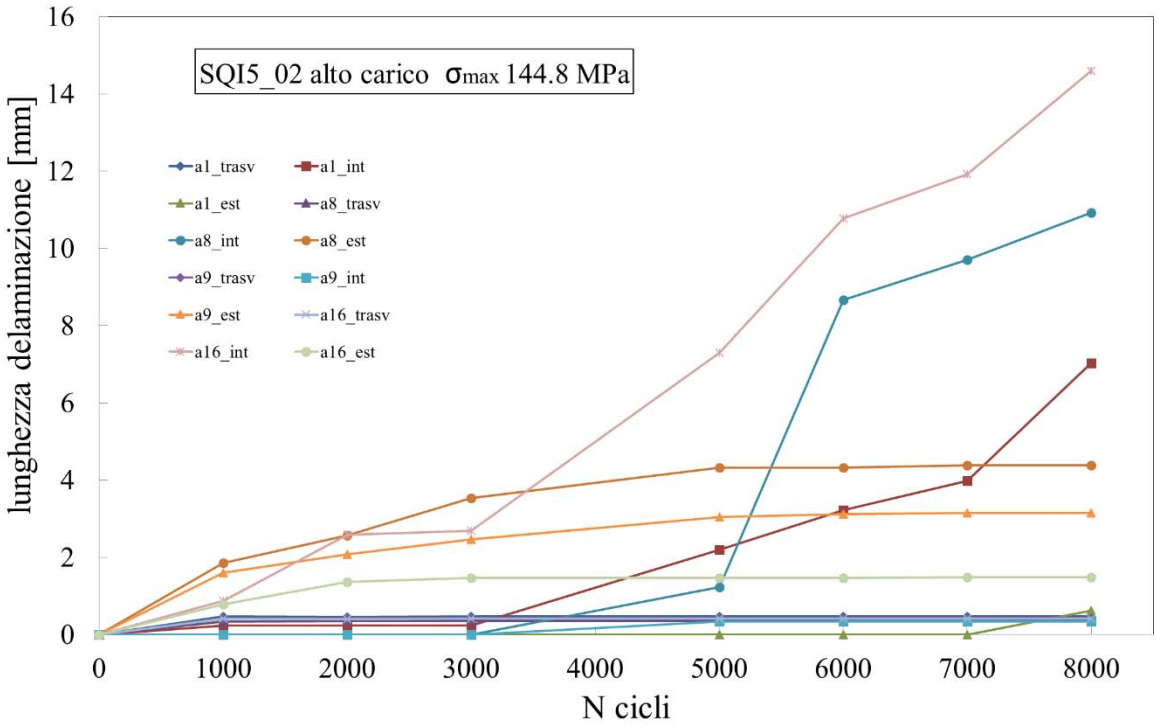


Fig. 4.59 propagazione delle diverse delaminazioni al variare del numero di cicli relative al provino SQI5_02

L'andamento delle diverse delaminazioni è in linea con quello riscontrato nelle precedenti prove. Le cricche trasversali originatesi dalla superficie, in corrispondenza delle zone di giunzione degli strati a 0°adiacenti alla superficie del provino, propagano istantaneamente ad inizio prova e rimangono costanti durante tutto lo svolgimento del test. Da tali cricche trasversali si originano le delaminazioni che con il procedere della prova delaminano verso l'interno della giunzione a gradini, nella direzione delle altre giunzioni e, anche se

in misura minore verso l'esterno della stessa. Le cricche che propagano verso l'esterno della giunzione a gradino, dopo una propagazione che si manifesta durante i primi 3000 cicli, si assestano fino a fermarsi ed il danneggiamento prosegue sostanzialmente con l'allungamento e l'inspessimento delle delaminazioni dirette verso l'interno. Le delaminazioni critiche *a8_int* e *a1_int* manifestano una crescita a velocità variabile a partire da 3000 cicli, senza mostrare successivi propri periodi di assestamento. La cricca *a16_int*, è la principale responsabile del danneggiamento della giunzione; tale delaminazione inizia a propagare nelle prime fasi della prova, successivamente si nota un assestamento dai 2000 ai 3000 cicli, infine si osserva una nuova accelerazione che porta dapprima alla separazione della prima interfaccia al 40% della vita, e successivamente al distacco completo anche della seconda interfaccia fino a delaminare lungo l'interfaccia tra la terza e la quarta lamina.

Per quanto riguarda la delaminazione con origine nel punto di giunzione 9, si vede come questa propaghi solo verso l'esterno del gradino; la delaminazione *a9_int* infatti non incrementa la propria lunghezza all'aumentare del numero di cicli.

Nel dettaglio vengono rappresentati, in *Fig. 4.60*, gli andamenti del parametro *media delle delaminazioni medie* e delle delaminazioni critiche

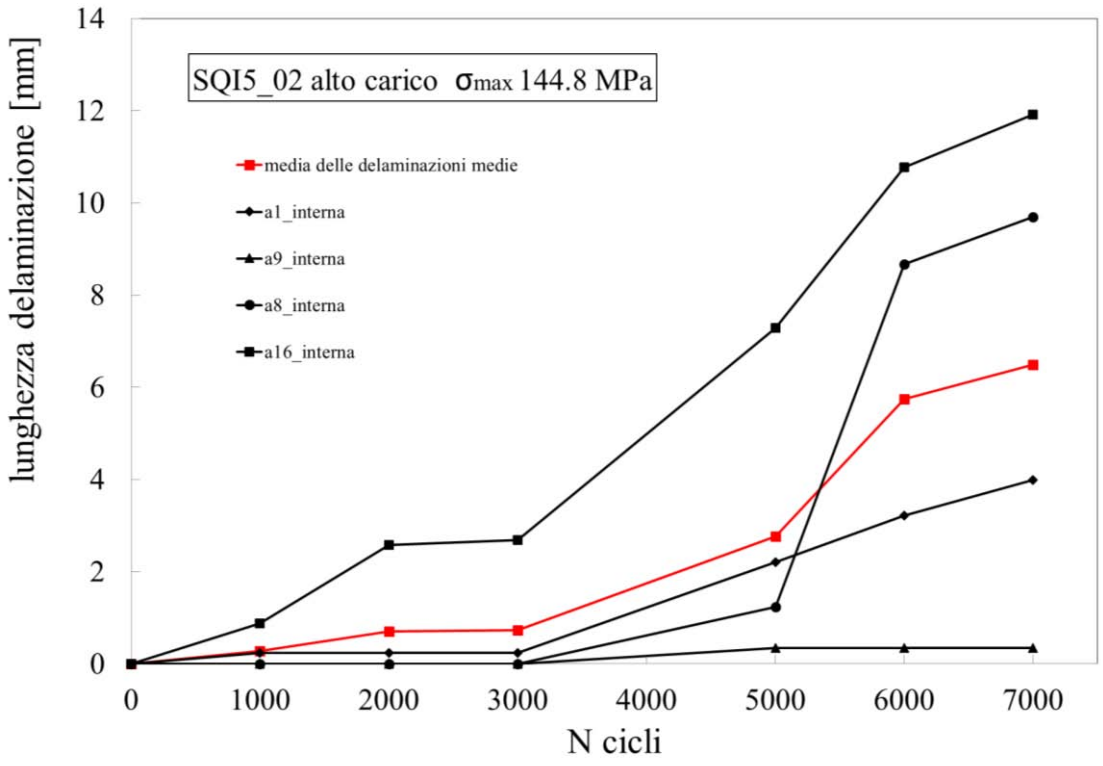


Fig. 4.60 propagazione delle delaminazioni critiche e della media della delaminazioni medie al variare del numero di cicli relative al provino SQI5_02

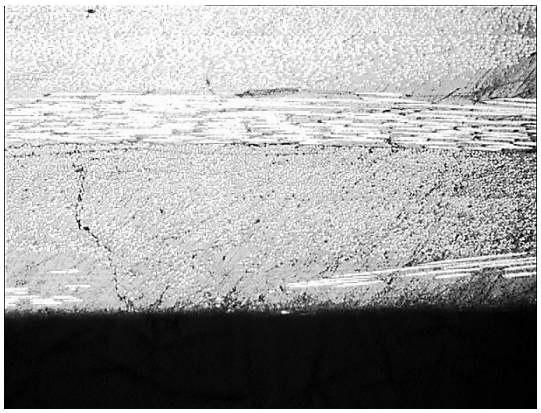


Fig 4.61 SQI5_02-1°blocco di carico- (100X) cricca trasversale e delaminazione innescate dal punto di giunzione 16 - giunto stepped, overlap 5 mm caricato con σ_{max} =144.8MPa.

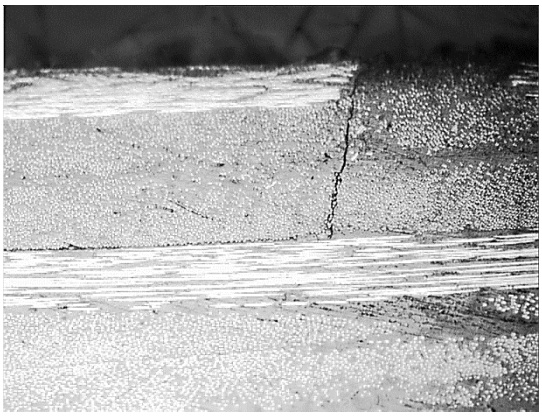


Fig 4.62 SQI5_02-1°blocco di carico- (100X) cricca trasversale e delaminazione innescate dal punto di giunzione 9 - giunto stepped, overlap 5 mm caricato con σ_{max} =144.8MPa.

Fig 4.63 SQI5_02-2°blocco di carico- (100X) cricca trasversale e delaminazione innescate dal punto di giunzione 8 - giunto stepped, overlap 5 mm caricato con σ_{max} =144.8MPa.

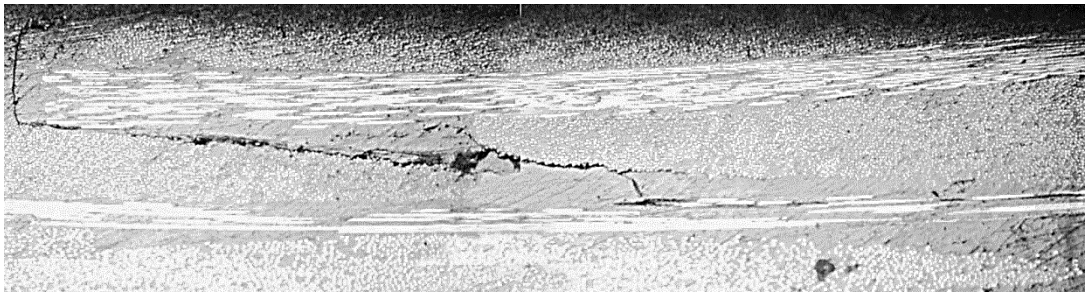


Fig 4.64 SQI5_02-6°blocco di carico- propagazione tra prima e seconda interfaccia della delaminazione innescata dal punto di giunzione 8 - giunto stepped, overlap 5 mm caricato con σ_{max} =144.8MPa.

Fig 4.65 SQI5_02-8°blocco di carico- propagazione lungo la terza interfaccia della delaminazione innescata dal punto di giunzione 16 - giunto stepped, overlap 5 mm caricato con σ_{max} =144.8MPa.

4.8 Giunti stepped con lay-up $[0_2/45_5/0]$ soggetti a medio carico

4.8.1 Provino SQI5_03

Dopo aver analizzato i provini SQI5_01 e SQI5_02 testati ad alto carico, vengono ora presentate altre due prove (provini SQI5_03, SQI5_04) nelle quali è stata applicata una tensione massima di 109 MPa, ipotizzando una vita a fatica di $1 \cdot 10^6$ cicli.

Si riportano i dati riguardanti le dimensioni del campione SQI5_03, il valore delle tensioni (σ_{max},σ_{min} e σ_A) e dei carichi applicati (F_{MAX} e F_{MIN}) durante la prova, il rapporto di sollecitazione $R = F_{MIN} / F_{MAX}$ e la frequenza di prova f.

Dimensioni	
b [mm]	20.05
t [mm]	2.4
L [mm]	217

Tab. 36 dimensioni del provino SQI5_03

Tensioni e Carichi	
σ_{UTS} [MPa]	255
σ_{max} [MPa]	109
σ_{min} [MPa]	5.45
σ_A [MPa]	103.55
R	0.05
f [Hz]	10
F max [kN]	5.25
F min [kN]	0.26

Tab. 37 tensioni e carichi applicati al provino SQI5_03

Sono stati eseguiti complessivamente i seguenti 8 blocchi di carico

N° blocco di carico	N° cicli per blocco di carico	Cicli totali
1	1000	1000
2	5000	6000
3	10000	16000
4	15000	31000
5	30000	61000
6	50000	111000
7	5000	116000
8	5000	120131

Tab. 38 blocchi di carico applicati al provino SQI5_03

La giunzione a gradino si è rotta durante l'ottavo blocco di carico dopo aver completato complessivamente 120131 cicli rispetto ai $1 \cdot 10^6$ cicli previsti inizialmente. Anche per il provino SQI5_03 la rottura è avvenuta in anticipo rispetto alle previsioni essendosi questo rotto a poco più di un decimo dei cicli ipotizzati in partenza.

I risultati del danneggiamento rilevati nel corso della prova sono riportati nella tabella che segue:

cicli	% vita a fatica	a_{1_trasv}	a_{1_int}	a_{1_est}
0	0	0	0	0
1000	0.83242	0.37692	0.29451	0.42967
6000	4.99455	0.37912	0.32088	0.74835
16000	13.3188	0.37912	0.45275	1.03297
31000	25.8052	0.37363	0.49231	1.95604
61000	50.7779	0.37363	0.51868	1.9978
111000	92.3991	0.37363	13.6879	2.01978
116000	96.5613	0.37363	15.3132	2.01978

cicli	% vita a fatica	a_{8_trasv}	a_{8_int}	a_{8_est}
0	0	0	0	0
1000	0.83242	0.37912	1.14286	0.38791
6000	4.99455	0.38352	1.25824	0.39451
16000	13.3188	0.38352	1.86154	0.39451
31000	25.8052	0.37253	2.20659	0.3978
61000	50.7779	0.37253	2.62088	0.3978
111000	92.3991	0.37253	2.71209	0.3978
116000	96.5613	0.37253	3.06154	0.3978

cicli	% vita a fatica	a_{9_trasv}	a_{9_int}	a_{9_est}
0	0	0	0	0
1000	0.83242	0.35824	0.80659	0
6000	4.99455	0.35385	2.57802	0
16000	13.3188	0.35385	3.2956	0
31000	25.8052	0.36044	4.37802	0
61000	50.7779	0.36044	5.58681	0
111000	92.3991	0.36044	11.28571	0
116000	96.5613	0.36044	11.3308	0

cicli	% vita a fatica	a_{16_trasv}	a_{16_int}	a_{16_est}
0	0	0	0	0
1000	0.83242	0.34505	0	0
6000	4.99455	0.35604	0	1.3989
16000	13.3188	0.35604	0	2.32637
31000	25.8052	0.36703	0	2.46593
61000	50.7779	0.36703	0	2.90879
111000	92.3991	0.36703	2.13626	3.01868
116000	96.5613	0.367033	5	3.043956

Tab. 39 tabella riassuntiva delle propagazioni per il provino SQI5_03

L'andamento della variazione della lunghezza delle delaminazioni all'aumentare del numero di cicli, per il provino SQI5_03 è riportato nella figura seguente

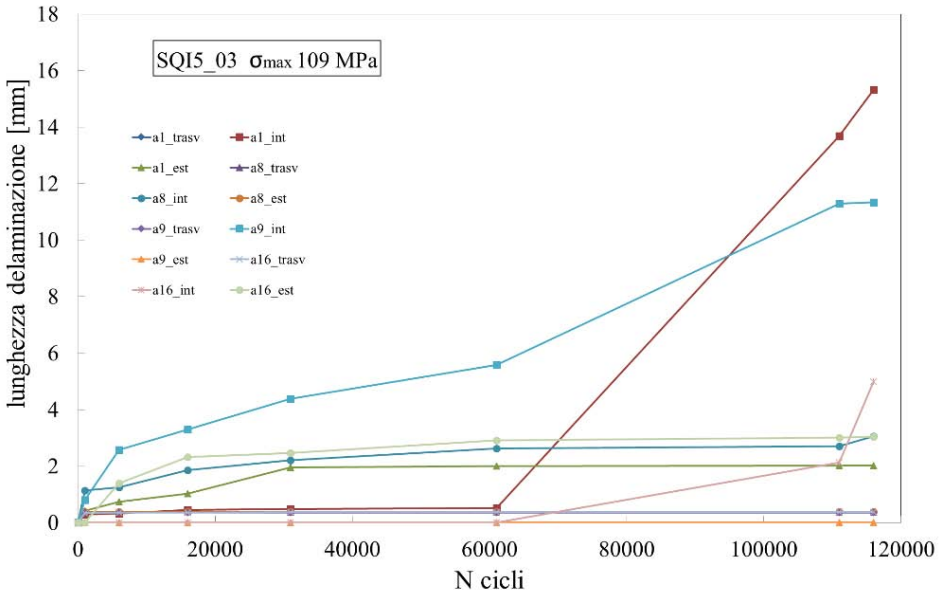


Fig. 4.66 propagazione delle diverse delaminazioni al variare del numero di cicli relative al provino SQI5_03

Per questo campione, giunto stepped di *lay-up* $[0_2/45_5/0]$ ed *overlap* 5 mm, il dannegiamento durante la vita a fatica è caratterizzato dalla formazione di cricche trasversali in corrispondenza delle giunzioni dei vari strati. Successivamente si osserva la formazione delle delaminazioni; in seguito non vengono prese in considerazione tutte quelle delaminazioni che delaminano verso l'esterno del giunto, in quanto come è stato visto sperimentalmente, esse non concorrono a determinare il cedimento della struttura.

Nel dettaglio vengono rappresentati, in *Fig 4.62*, gli andamenti del parametro *media delle delaminazioni medie* e delle delaminazioni critiche.

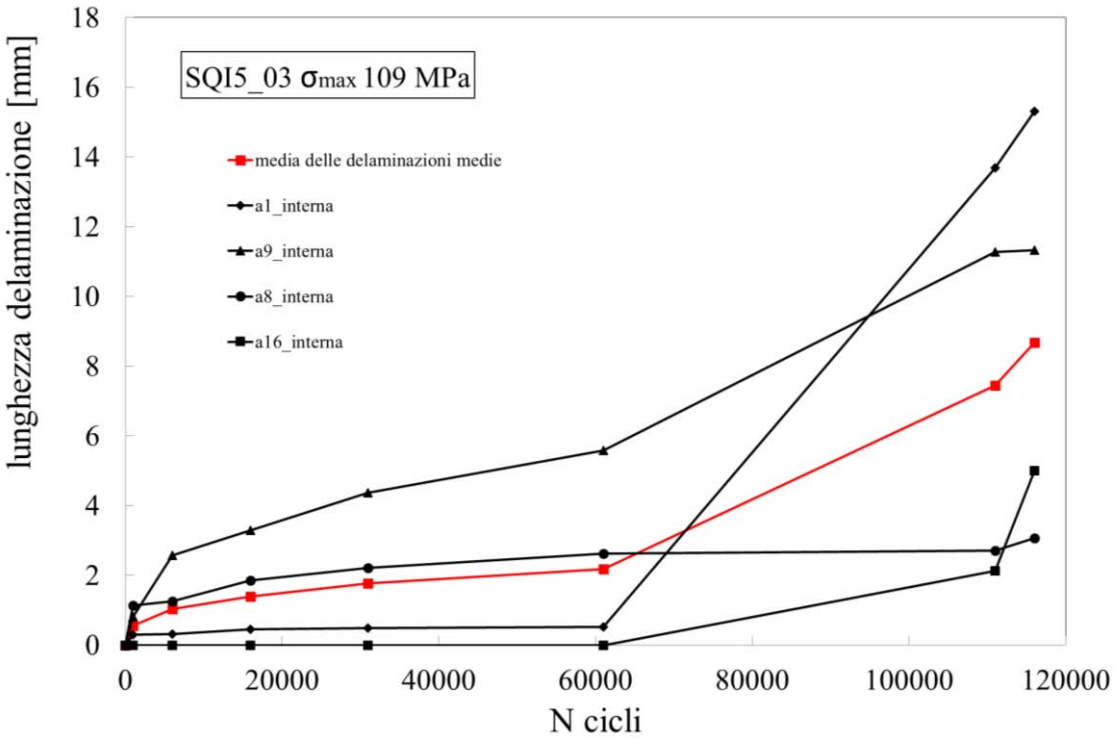


Fig. 4.67 propagazione delle delaminazioni critiche e della media della delaminazioni medie al variare del numero di cicli relative al provino SQI5_03

Se si considerano esclusivamente le delaminazioni critiche si osserva che nelle prime fasi della prova a fatica propagano le delaminazioni *a9_int* e *a8_int*. Queste delaminazioni tuttavia evolvono poi in maniera differente durante il corso della prova. Si nota infatti che a partire da $6 \cdot 10^4$ cicli la delaminazione *a8_int* si stabilizza cessando la propria propagazione a differenza di quanto accade per la cricca *a9_int*, la quale incrementa la propria velocità di propagazione fino a portare a rottura il pezzo. La delaminazione *a16_int* si forma quando la percentuale della vita a fatica reale ha raggiunto il 50% e

propaga lentamente per i restanti cicli, non incidendo in modo rilevante sulla resistenza complessiva del provino.

Infine si può vedere il rapido accrescimento della cricca *a1_int* a partire dal settimo blocco di carico fino a rottura. A 116000 cicli, la delaminazione *a1_int* si trova a propagare all'interfaccia tra la terza e la quarta lamina, misurado complessivamente 15,32 mm.

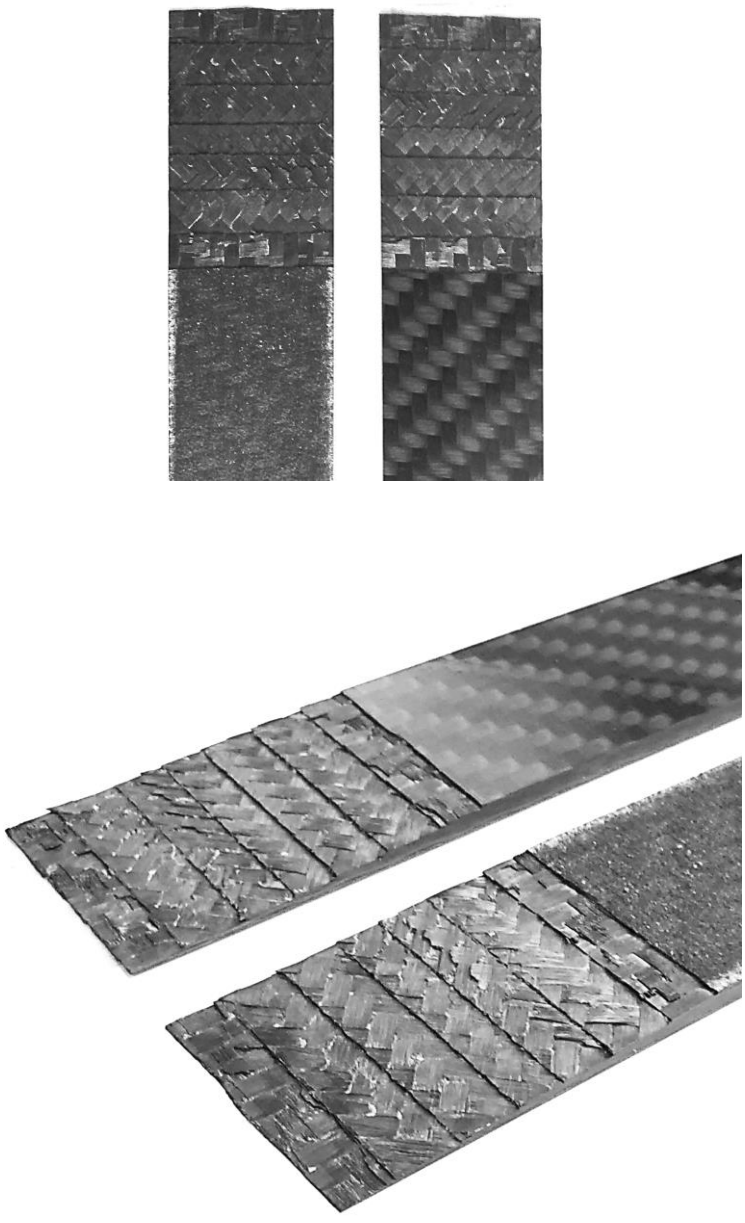


Fig.4.68 superfici aderende di rottura per fatica della giunzione SQI5_03

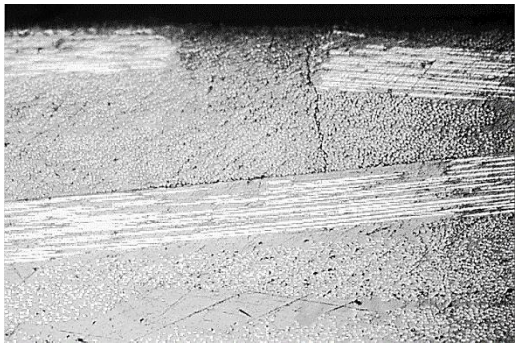


Fig 4.69 SQI5_03-1°blocco di carico- (100X) cricca trasversale e delaminazione innescate dal punto di giunzione 1 - giunto stepped, overlap 5 mm caricato con σ_{max} =109 MPa.

Fig 4.70 SQI5_03-2°blocco di carico- (100X) cricca trasversale e delaminazione innescate dal punto di giunzione 9 - giunto stepped, overlap 5 mm caricato con σ_{max} =109 MPa.

Fig 4.71 SQI5_03-7°blocco di carico- (100X) delaminazione innescata dal punto di giunzione 1 - giunto stepped, overlap 5 mm caricato con σ_{max} =109MPa.

Fig 4.72 SQI5_03-7°blocco di carico- (100X) passaggio tra prima e seconda lamina della delaminazione innescata dal punto di giunzione 1 - giunto stepped, overlap 5 mm caricato con σ_{max} =109MPa.

Fig 4.73 SQI5_03-7°blocco di carico- (100X) passaggio tra prima e seconda lamina della delaminazione innescata dal punto di giunzione 1 - giunto stepped, overlap 5 mm caricato con σ_{max} =109MPa.

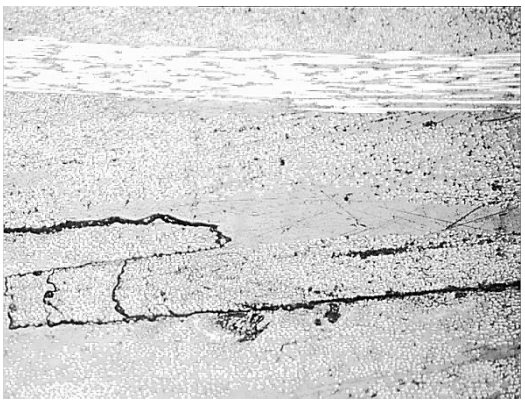


Fig 4.74 SQI5_03-7°blocco di carico- (100X) passaggio tra seconda e terza lamina della delaminazione innescata dal punto di giunzione 1 - giunto stepped, overlap 5 mm caricato con σ_{max} =109MPa.

4.8.2 Provino SQI5_04

Si riportano i dati riguardanti le dimensioni del campione SQI5_04, il valore delle tensioni (σ_{max},σ_{min} e σ_A) e dei carichi applicati (F_{MAX} e F_{MIN}) durante la prova, il rapporto di sollecitazione $R = F_{MIN} / F_{MAX}$ e la frequenza di prova f.

Dimensioni	
b [mm]	23
t [mm]	2.4
L [mm]	217

Tab. 40 dimensioni del provino SQI5_04

Tensioni e Carichi	
σ_{UTS} [MPa]	255
σ_{max} [MPa]	109
σ_{min} [MPa]	5.45
σ_A [MPa]	103.55
R	0.05
f [Hz]	10
F max [kN]	6.02
F min [kN]	0.30

Tab. 41 tensioni e carichi applicati al provino SQI5_04

Sono stati eseguiti complessivamente i seguenti 7 blocchi di carico

N° blocco di carico	N° cicli per blocco di carico	Cicli totali
1	1000	1000
2	5000	6000
3	10000	16000
4	15000	31000
5	30000	61000
6	1000	62000
7	1000	62149

Tab. 42 blocchi di carico applicati al provino SQI5_04

La rottura del provino SQI5_04 è arrivata dopo aver completato complessivamente 62149 cicli. Rispetto al provino SQI5_03, che a parità di tensione applicata si è rotto dopo 120131 cicli, la vita a fatica del provino SQI5_04 si discosta ulteriormente dalla previsione iniziale di $1 \cdot 10^6$ cicli. In questo caso la durata effettiva è 16 volte inferiore rispetto alla durata prevista sulla base dei dati sperimentali in nostro possesso.

I risultati del danneggiamento rilevati nel corso della prova sono riportati nella tabella che segue

cicli	% vita a fatica	a_{1_trasv}	a_{1_int}	a_{1_est}
0	0	0	0	0
1000	1.60904	0.27473	0	0
6000	9.65422	0.30989	0.74945	0
16000	25.7446	0.30549	0.98901	0
31000	49.8801	0.30879	5.36374	2.19341
61000	98.1512	0.30879	13.1527	2.26374
62000	99.7603	0.30879	15.3132	2.37363

cicli	% vita a fatica	a_{8_trasv}	a_{8_int}	a_{8_est}
0	0	0	0	0
1000	1.60904	0	0	0
6000	9.65422	0.28681	0	0.18352
16000	25.7446	0.28681	1.26703	0.18352
31000	49.8801	0.29011	6.99451	0.68352
61000	98.1512	0.29011	14.9758	1.07692
62000	99.7603	0.29011	15.3473	1.07692

cicli	% vita a fatica	a_{9_trasv}	a_{9_int}	a_{9_est}
0	0	0	0	0
1000	1.60904	0.47033	0.66813	0
6000	9.65422	0.46923	1.05055	0.97802
16000	25.7446	0.45714	1.10879	1.57912
31000	49.8801	0.46044	2.34505	1.59341
61000	98.1512	0.46044	11.8967	2.86154
62000	99.7603	0.46044	12.6462	2.8956

cicli	% vita a fatica	a_{16_trasv}	a_{16_int}	a_{16_est}
0	0	0	0	0
1000	1.60904	0.25495	0	0.1956
6000	9.65422	0.24505	0	0.54945
16000	25.7446	0.25385	0	1.71319
31000	49.8801	0.25714	0	1.88022
61000	98.1512	0.25714	10.144	1.88352
62000	99.7603	0.25714	11.2868	1.9022

Tab. 43 tabella riassuntiva delle propagazioni per il provino SQI5_04

L'andamento della variazione della lunghezza delle delaminazioni all'aumentare del numero di cicli, per il provino SQI5_04 è riportato nella figura seguente

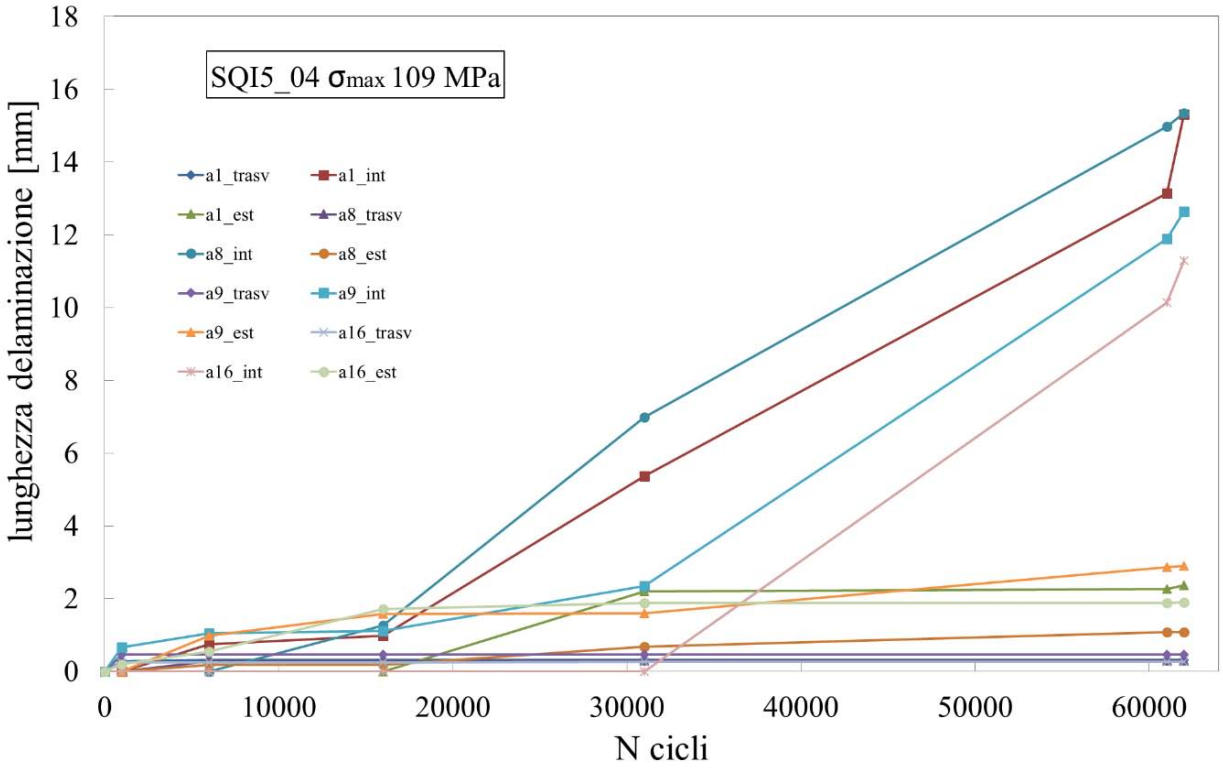


Fig. 4.75 propagazione delle diverse delaminazioni al variare del numero di cicli relative al provino SQI5_04

Dal grafico riportato nella figura precedente si nota che le lunghezza delle cricche trasversali e delle delaminazioni propaganti verso l'esterno della giunzione, dopo una fase di avanzamento iniziale, rimane perlopiù costante per tutto lo svolgimento della prova a fatica rispettando quella che è la dinamica della frattura vista per questo tipo di giunzioni.

Nel dettaglio vengono rappresentati, nella figura successiva, gli andamenti del parametro *media delle delaminazioni medie* e delle delaminazioni critiche.

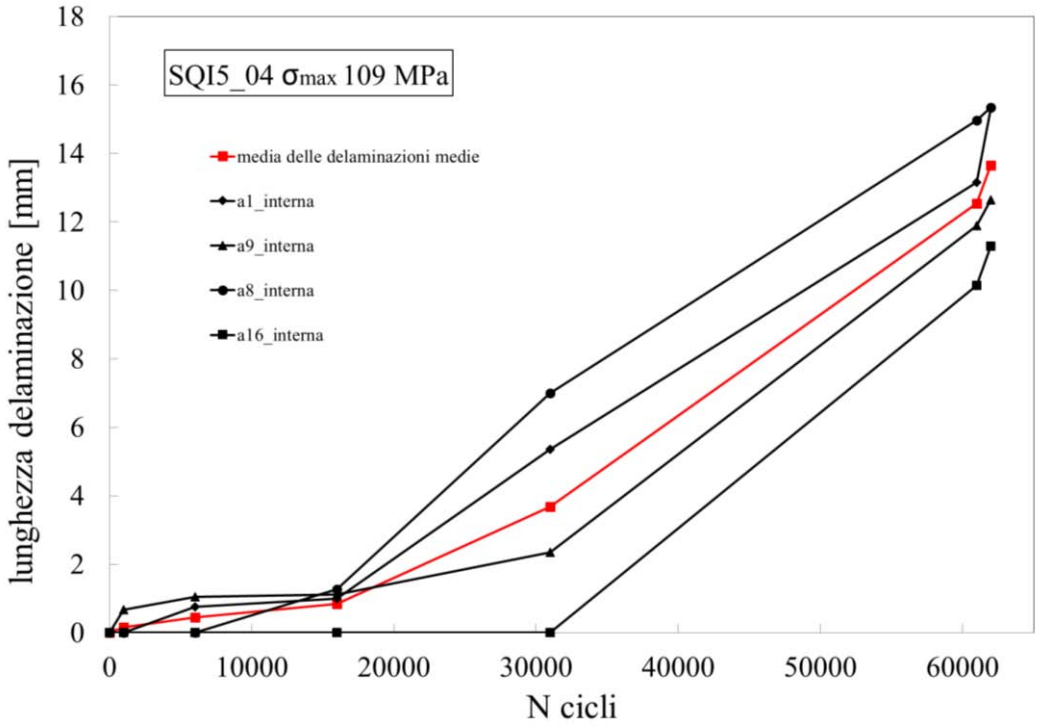


Fig. 4.76 propagazione delle delaminazioni critiche e della media della delaminazioni medie al variare del numero di cicli relative al provino SQI5_04

Si nota che a partire dalla seconda metà della prova a fatica tutte e 4 le delaminazioni critiche avanzano con velocità paragonabili. Questo fatto è deducibile osservando che l'andamento delle rette risulta essere quasi parallelo nell'intervallo che va $3{,}1 \cdot 10^4$ a $6{,}1 \cdot 10^4$ cicli.

Un'ulteriore osservazione riguarda il numero di delaminazioni che portano a rottura il provino; al pari di quanto è stato osservato nell'analisi del danneggiamento del provino SQI5_01, tutte le 4 delaminazioni critiche evolvono quasi simmetricamente nel corso della prova, contribuendo in egual misura al cedimento del pezzo. Anche in questo caso quindi, la dinamica della propagazione ipotizzata nel modello FEM, trova diretto riscontro nel modello reale.

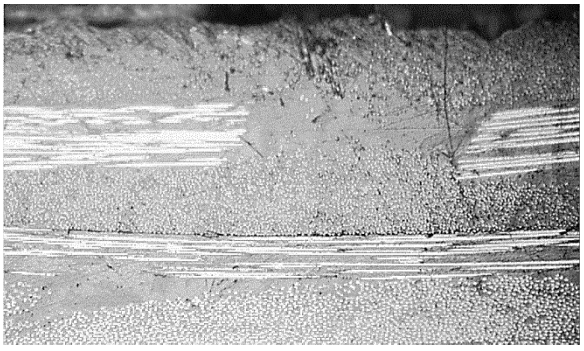


Fig 4.77 SQI5_04-2°blocco di carico- (100X) cricca trasversale e delaminazione innescate dal punto di giunzione 9 - giunto stepped, overlap 5 mm caricato con σ_{max} =109 MPa.

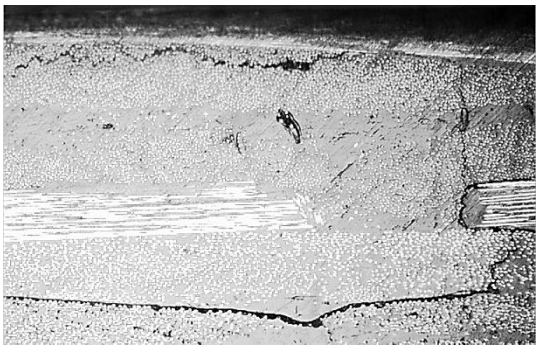


Fig 4.78 SQI5_02-4°blocco di carico- (100X) passaggio dalla prima alla seconda interfaccia della delaminazione innescata dal punto di giunzione 8 - giunto stepped, overlap 5 mm caricato con σ_{max} =109 MPa.

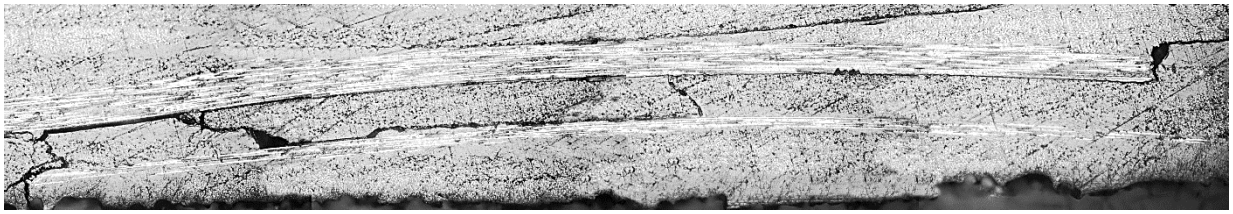


Fig 4.79 SQI5_04-5°blocco di carico- delaminazione innescata dal punto di giunzione 1 - giunto stepped, overlap 5 mm caricato con σ_{max} =109 MPa.

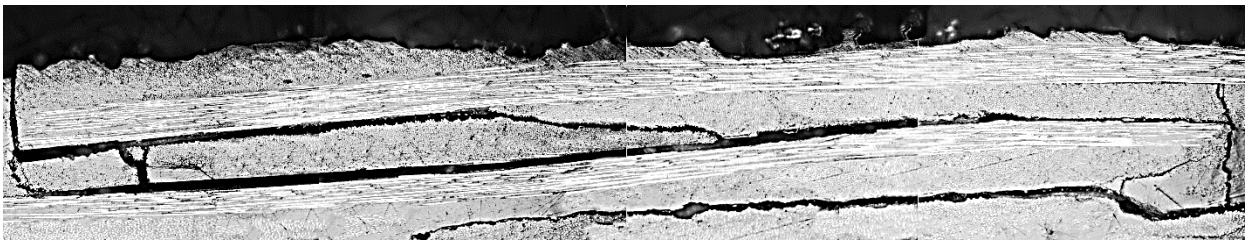


Fig 4.80 SQI5_04-5°blocco di carico- (100X) delaminazione innescata dal punto di giunzione 9 - giunto stepped, overlap 5 mm caricato con σ_{max} =109 MPa.

Fig 4.81 SQI5_04-6°blocco di carico- delaminazione innescata dal punto di giunzione 1 - giunto stepped, overlap 5 mm caricato con σ_{max} =109 MPa.

Il danneggiamento del giunto stepped SQI5_04 di *lay-up* $[0_2/45_5/0]$ ed *overlap* 5 mm, interessa inizialmente, a basse percentuali della vita a fatica, 10%, gli strati a 0° di superficie maggiormente sollecitati rispetto quelli centrali a 45° in quanto più rigidi. Dalla *Fig 4.77*, relativa al 1° strato, si nota la criccatura verticale che dalla superficie sfocia nella delaminazione orizzontale lungo l'ordito a 0° del secondo strato. In *Fig 4.78*, si osserva come la delaminazione originatasi a partire dalla criccca trasversale in corrispondenza del punto di giunzione 8, si sia integrata con un'ulteriore criccatura trasversale in corrispondenza della giunzione (punto 7) del 7° strato, comportando il parziale distaccamentto della 7° dall'8° lamina. In questa zona del giunto al 50% della vita, gli strati a 45° adiacenti al 7° strato subiscono il danneggiamento derivante da quest'ultimo che si posiziona in parte all'interfaccia con gli strati a 0° ed in parte all'interfaccia tra ordito e trama del 6° strato. All'85% della vita si nota quanto si prevedeva già dal 10% della vita stessa del campione ossia il progredire del danneggiamento verso gli strati interni del giunto, *Fig 4.79*, *Fig 4.80*, e l'inizio del collasso definitivo della struttura localizzato nell'8° strato, *Fig. 4.81*, ove si assiste al netto distacco dello strato stesso.

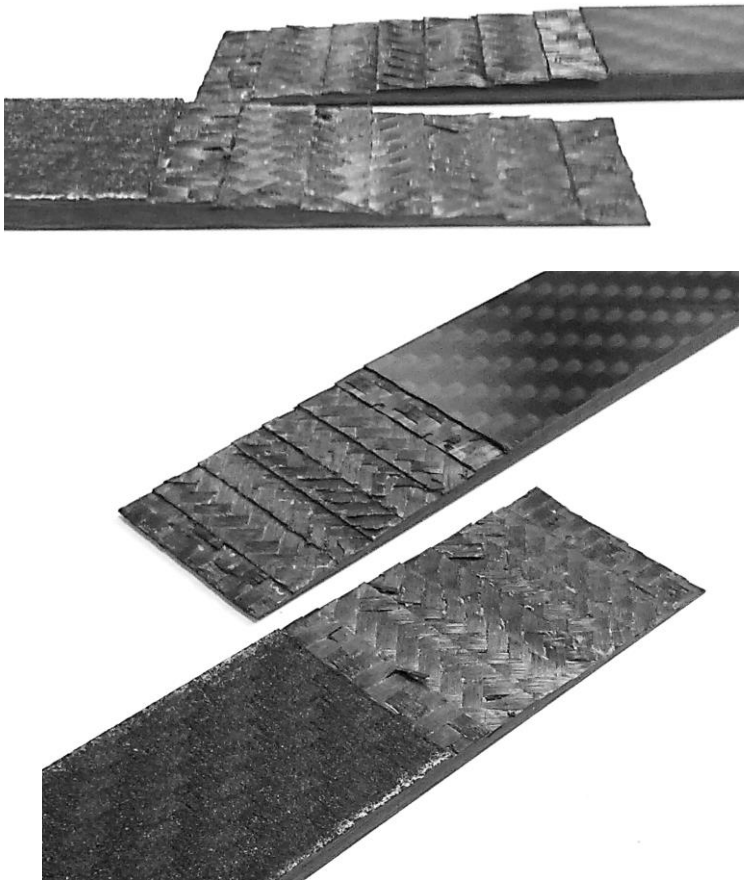


Fig. 4.82 superfici aderende di rottura per fatica della giunzione SQI5_04

4.9 Giunti stepped con lay-up [$0_2/45_5/0$] soggetti a basso carico

4.9.1 Provino SQI5_05

Una volta concluse le prime 4 prove sui provini con *lay-up* [$0_2/45_5/0$], si è deciso di posizionare sulla curva di Woheler riportata in *Fig. 4.76*, i punti relativi ai risultati ottenuti.

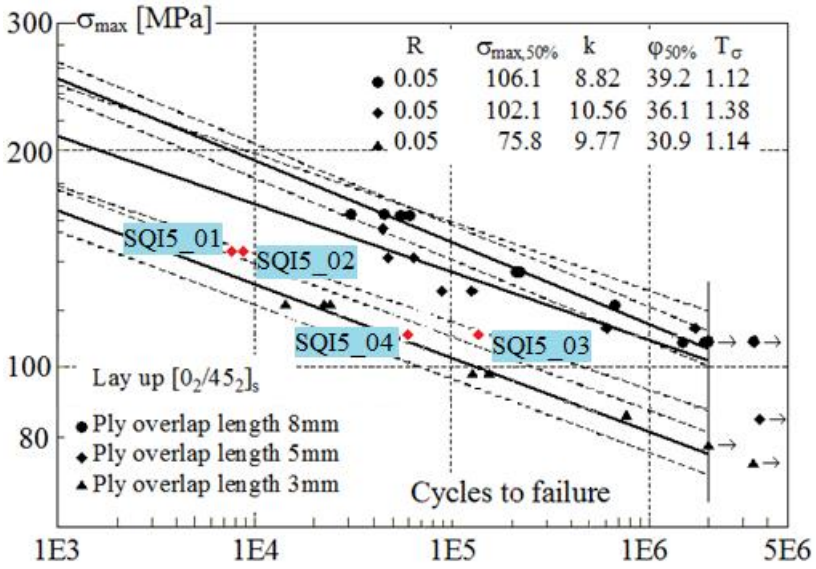


Fig.4.83 Curva di Woheler con i 4 nuovi punti sperimentali relativi al lay-up [$0_2/45_5/0$] ed overlap 5 mm

Si può vedere come i dati ottenuti nelle precedenti prove relativi con *lay-up* [$0_2/45_5/0$], sono stati confrontati con i risultati ottenuti da E.Balzarini [5] e S.Cristanini [4] nelle loro prove sperimentali su provini con *lay-up* $[0_2/45_2]_s$. Questo lavoro di tesi è il primo nel quale sono state fatte prove su giunti con *lay-up* [$0_2/45_5/0$], quindi non si dispongono di dati direttamente confrontabili come invece accaduto per i test su giunzioni con *lay-up* $[0]_8$.

Nonostante questo fatto, si è ugualmente deciso di comparare i risultati ottenuti con quelli ricavati per il *lay-up* $[0_2/45_2]_s$ in quanto la disposizione delle lamine nei due lay-up è comunque simile ciò che cambia invece sono le 4 lamine a 0° e 4 lamine a 45° che si hanno per il *lay-up* $[0_2/45_2]_s$ contro le 3 lamine a 0° e 5 a 45° che si hanno per il *lay-up* [$0_2/45_5/0$]. Per chiarimenti riguardo la sistemazione delle lamine nei due diversi *lay-up* si consiglia di vedere il capitolo 3 riguardante la costruzione del modello FEM. Si è visto inoltre che, le curve delle componenti del SERR per i due *lay-up* non differiscono in

maniera apprezzabile, di conseguenza la scelta di confrontare provini $[0_2/45_5/0]$ con provini $[0_2/45_2]_s$ è giustificata anche dalla similarità di tali parametri.

Una volta posizionati i risultati ottenuti con tensione massima pari a 144.8 MPa (provini SQI5_01, SQI5_02) e quelli con σ_{max} = 109 MPa (provini SQI5_03, SQI5_04), si è tracciata la retta di interpolazione che li approssima. Si può facilmente vedere come tale retta risulti traslata verso il basso rispetto a quella trovata da S.Cristanini per provini con medesimo *overlap*. Valgono, in questo caso, le medesime considerazioni fatte per i provini con lay-up $[0]_8$ dal momento che, la lastra da cui poi sono stati ricavati i provini è stata prodotta una decina di anni fa. I materiali compositi non soffrono dei problemi di corrosione cui vanno soggetti i materiali tradizionali, ma vedono le proprie caratteristiche degradate a causa dell'invecchiamento ambientale (*environmental ageing*) il quale si manifesta con l'assorbimento di umidità e la riduzione delle caratteristiche elastiche in dipendenza del valore della temperatura esterna. L'esposizione più o meno prolungata di laminati compositi ad ambienti umidi, soprattutto in presenza di alte temperature, (condizioni "*hot-wet*"), influisce dunque negativamente sulle caratteristiche meccaniche così come eventuali danneggiamenti dovuti a sollecitazioni meccaniche accidentali.

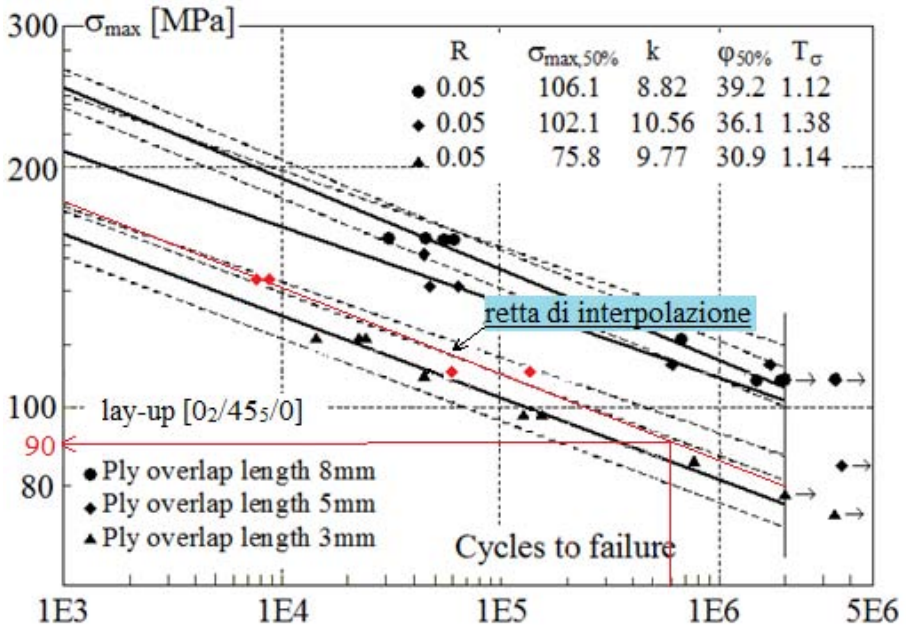


Fig.4.84 Curva di Woheler con i 4 nuovi punti sperimentali relativi al lay-up $[0_2/45_5/0]$ ed overlap 5 mm

Si è deciso a questo punto di condurre ulteriori due prove abbassando il carico in modo da allungare la vita a fatica del provino. Il nuovo provino testato è l'SQI5_05. Osservando

i risultati ottenuti nelle prove precedenti si è deciso di effettuare questa prova applicando una tensione massima di 90 MPa prevedendo una vita a fatica di $6 \cdot 10^5$ cicli (vedi *Fig 4.77*).

Si riportano i dati riguardanti le dimensioni del campione SQI5_05, il valore delle tensioni (σ_{max},σ_{min} e σ_A) e dei carichi applicati (F_{MAX} e F_{MIN}) durante la prova, il rapporto di sollecitazione $R = F_{MIN} / F_{MAX}$ e la frequenza di prova f.

Dimensioni	
b [mm]	22
t [mm]	2.4
L [mm]	217

Tab. 44 dimensioni del provino SQI5_05

Tensioni e Carichi	
σ_{UTS} [MPa]	255
σ_{max} [MPa]	90
σ_{min} [MPa]	4.5
σ_A [MPa]	85.5
R	0.05
f [Hz]	10
F max [kN]	4.75
F min [kN]	0.238

Tab. 45 tensioni e carichi applicati al provino SQI5_05

Sono stati eseguiti complessivamente i seguenti 11 blocchi di carico

N° blocco di carico	N° cicli per blocco di carico	Cicli totali
1	1000	1000
2	4000	5000
3	15000	20000
4	30000	50000
5	50000	100000
6	100000	200000
7	100000	300000

8	50000	350000
9	50000	400000
10	50000	450000
11	50000	484189

Tab. 46 blocchi di carico applicati al provino SQI5_05

Il cedimento del provino SQI5_04 è arrivato dopo aver completato complessivamente 484189 cicli. Questo dato risulta essere in buon accordo con la previsione di $6 \cdot 10^5$ cicli fatta inizialmente.

I risultati del danneggiamento rilevati nel corso della prova sono riportati nella tabella che segue

cicli	% vita a fatica	a_{1_trasv}	a_{1_int}	a_{1_est}
0	0	0	0	0
1000	0.20653	0	0	0
5000	1.03265	0	0	0
20000	4.13062	0.32198	1.24945	0
50000	10.3265	0.31978	1.87143	0
100000	20.6531	0.31648	3.4	0
200000	41.3062	0.31648	7.10769	0
300000	61.9593	0.316484	10.83297	0
350000	72.2858	0.316484	11.59341	0
400000	82.6124	0.316484	12.77912	0
450000	92.9389	0.316484	14.78352	0

cicli	% vita a fatica	a_{8_trasv}	a_{8_int}	a_{8_est}
0	0	0	0	0
1000	0.20653	0	0	0
5000	1.03265	0.33626	0	0.34725
20000	4.13062	0.31868	0	0.73846
50000	10.3265	0.31758	0	0.75604
100000	20.6531	0.33187	0	1.27033
200000	41.3062	0.33187	0	1.31319
300000	61.9593	0.331868	1.305495	1.313187
350000	72.2858	0.331868	7.304396	1.313187
400000	82.6124	0.331868	8.42967	1.313187
450000	92.9389	0.331868	8.771429	0.334066

cicli	% vita a fatica	a_{9_trasv}	a_{9_int}	a_{9_est}
0	0	0	0	0
1000	0.20653	0	0	0
5000	1.03265	0	0	0
20000	4.13062	0	0	0
50000	10.3265	0.41978	0.5989	0.47692
100000	20.6531	0.41978	0.67582	0.75714
200000	41.3062	0.41978	0.67582	0.79011
300000	61.9593	0.41978	0.785714	0.79011
350000	72.2858	0.41978	0.942857	0.864835
400000	82.6124	0.41978	1.312088	0.79011
450000	92.9389	0.41978	8.716484	0.79011

cicli	% vita a fatica	a_{16_trasv}	a_{16_int}	a_{16_est}
0	0	0	0	0
1000	0.20653	0.43407	0	0
5000	1.03265	0.43626	0	0
20000	4.13062	0.41648	0.43297	0.64505
50000	10.3265	0.43956	0.7978	0.65055
100000	20.6531	0.43407	0.85055	0.65055
200000	41.3062	0.43407	0.86484	0.65055
300000	61.9593	0.434066	0.869231	0.650549
350000	72.2858	0.434066	0.872527	0.850549
400000	82.6124	0.434066	2.56044	0.861538
450000	92.9389	0.434066	2.657143	0.861538

Tab. 47 tabella riassuntiva delle propagazioni per il provino SQI5_05

L'andamento della variazione della lunghezza delle delaminazioni all'aumentare del numero di cicli, per il provino SQI5_05 è riportato nella figura seguente.

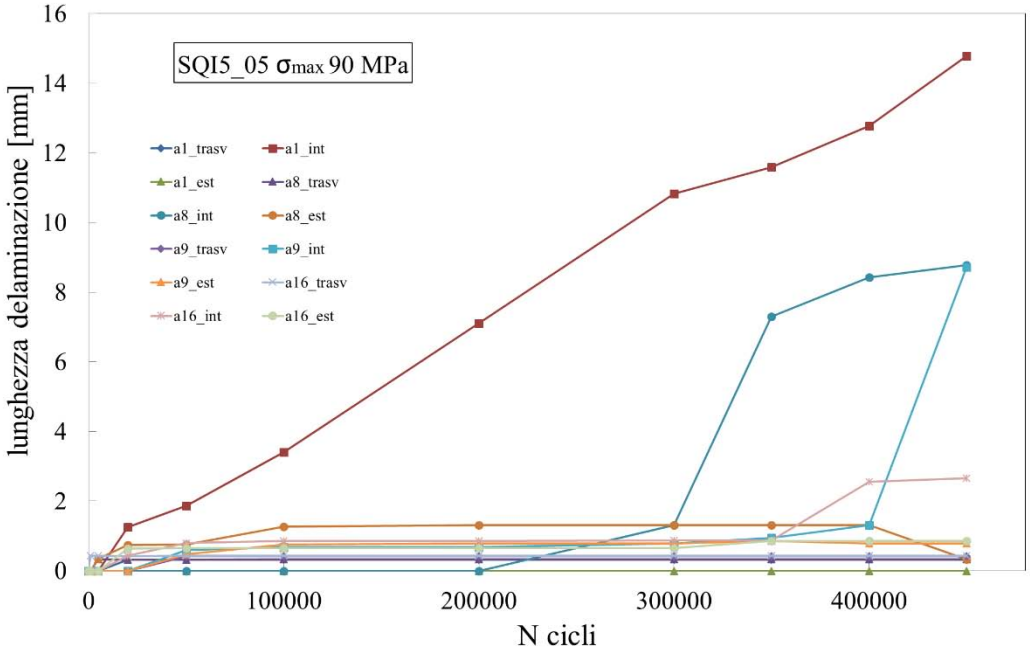


Fig. 4.85 propagazione delle diverse delaminazioni al variare del numero di cicli relative al provino SQI5_05

Si nota che la delaminazione *a1_int* inizia a propagare a partire dalle prime fasi della prova a fatica con una velocità che è circa costante per tutta la durata della prova, considerazione che può essere fatta se si osserva la pendenza della rispettiva retta. Questa delaminazione è la principale responsabile del cedimento della giunzione dal momento che nell'ultima rilevazione fatta prima della rottura, essa misura ben 14,8 mm e propaga lungo l'interfaccia tra la terza e la quarta lamina orientate a 45 gradi, A differenza della maggior parte delle altre delaminazioni critiche si vede che la cricca *a1_int* non è caraterizzata da un periodo intermedio nel quale la velocità di propagazione diminuisce con conseguente appiattimento della curva di propagazione; come messo in luce prima, l'andamento della curva è infatti crescente durante tutto il corso della prova. La delaminazione critica *a8_int* propaga a partire da $2 \cdot 10^5$ cicli, con un andamento ad "S" dove si possono distinguere tre fasi distinta: una prima fase in cui la delaminazione aumenta le proprie dimensioni con una ridotta velocità, una seconda fase in cui tale velocità aumenta considerevolmente ed una fase finale in cui si assiste ad un rallentamento; tale andamento risulta essere l'opposto di quanto ci si aspeterebbe da una

comune delaminazione critica, caratterizzata da una prima e una terza fase in cui la cricca accellera e da una fase intermedia in cui rallenta stabilizzandosi.

La cricca *a9_int* inizia a propagare solamente a partire da $4 \cdot 10^5$ cicli. Anche questo fatto può considerarsi anomalo, tuttavia può essere spiegato ipotizzando che la delaminazione nel corso della prova, propaga internamente alla giunzione, lungo la larghezza del provino, senza che essa sia direttamente visibile sul bordo del provino in corrispondenza del punto di giunzione 9. Per verificare tale ipotesi occorrerebbe una strumentazione agli ultrasuoni. Infine un'ultima considerazione può essere fatta per la delaminazione critica *a16_int* il cui andamento ricorda per la forma quello della delaminazione *a8_int*. L'ultima misurazione effettuata prima della rottura della giunzione evidenzia che la lunghezza raggiunta da questa delaminazione non oltrepassa i 3 mm perciò si può dire che questa cricca è quella che in misura inferiore ha compromesso la resistenza a fatica del pezzo

Nel dettaglio vengono rappresentati, in *Fig 4.86*, gli andamenti del parametro *media delle delaminazioni medie* e delle delaminazioni critiche.

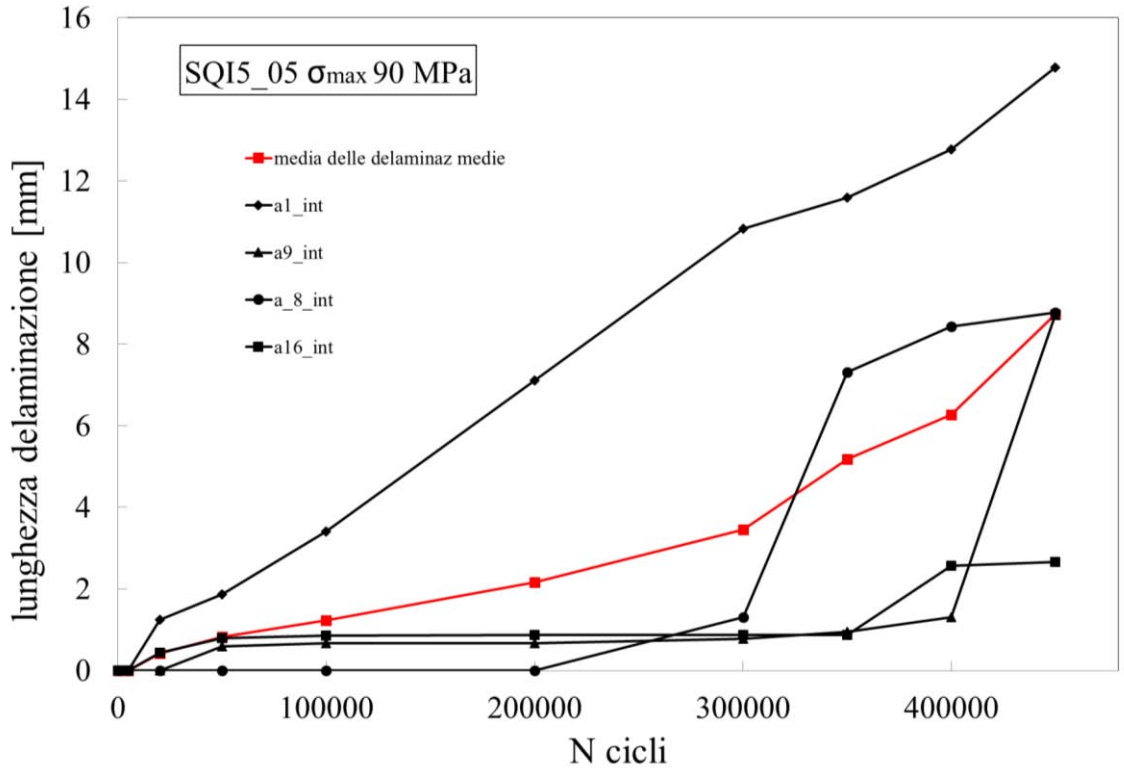


Fig. 4.86 propagazione delle delaminazioni critiche e della media della delaminazioni medie al variare del numero di cicli relative al provino SQI5_05

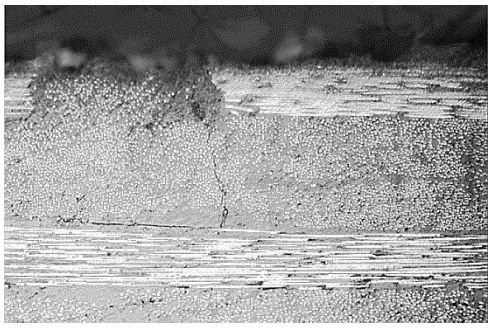


Fig 4.87 SQI5_05-3°blocco di carico- (100X) cricca trasversale e delaminazione innescate dal punto di giunzione 16 - giunto stepped, overlap 5 mm caricato con σ_{max} =90 MPa.

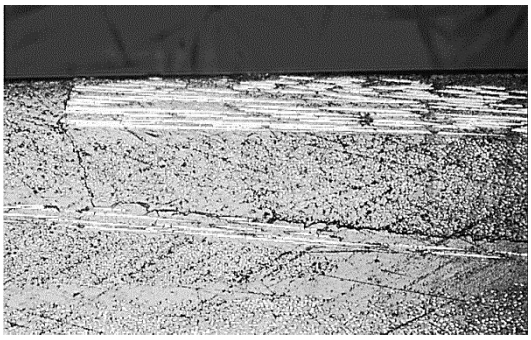


Fig 4.88 SQI5_05-4°blocco di carico- (100X) cricca trasversale e delaminazione innescate dal punto di giunzione 1 - giunto stepped, overlap 5 mm caricato con σ_{max} =90 MPa.

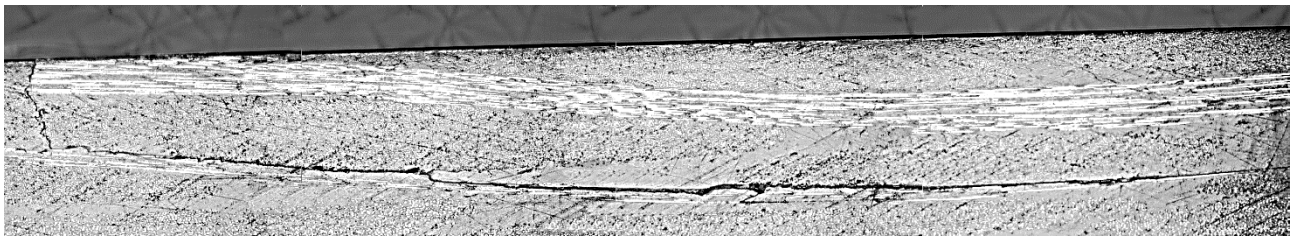


Fig 4.89 SQI5_05-5°blocco di carico- delaminazione innescata dal punto di giunzione 1 - giunto stepped, overlap 5 mm caricato con σ_{max} =90 MPa.

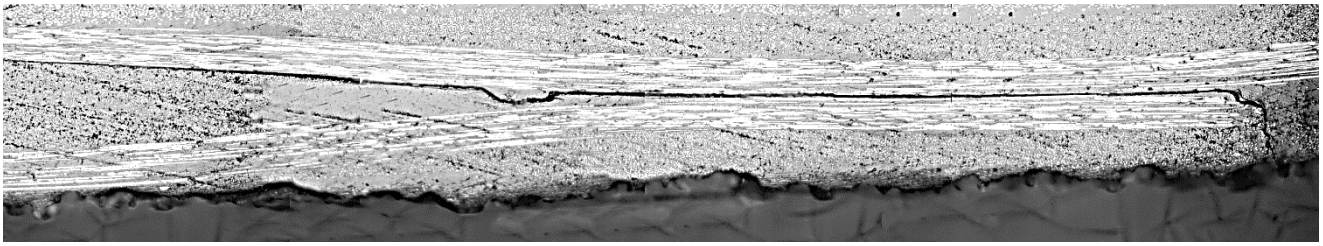


Fig 4.90 SQI5_05-9°blocco di carico- delaminazione innescata dal punto di giunzione 1 propagante lungo la terza interfaccia - giunto stepped, overlap 5 mm caricato con σ_{max} =90 MPa.

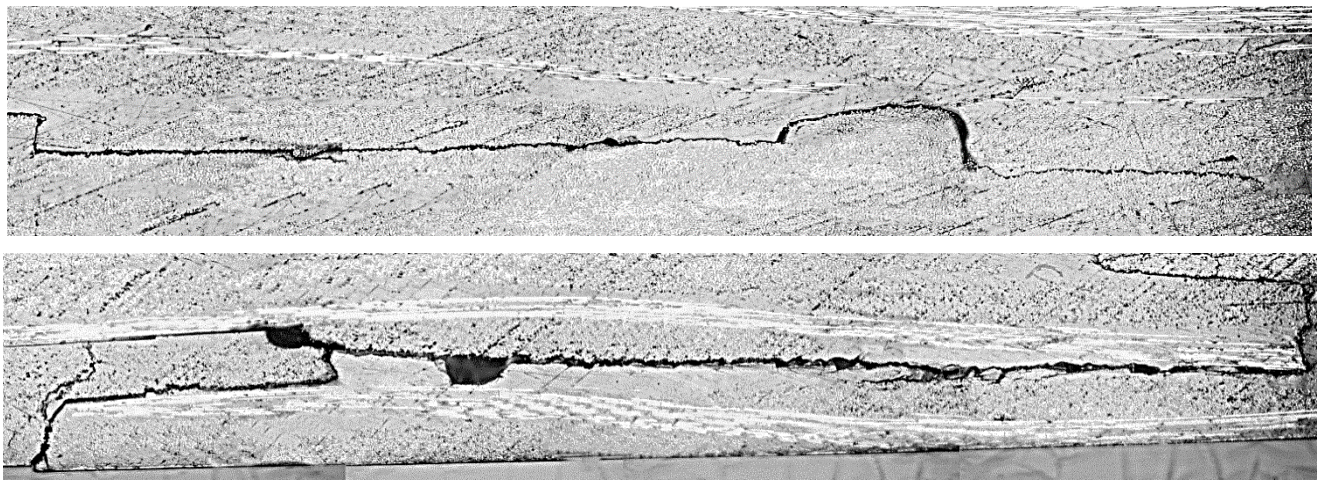


Fig 4.91 SQI5_05-9°blocco di carico- delaminazione innescata dal punto di giunzione 8 propagante lungo la prima interfaccia - giunto stepped, overlap 5 mm caricato con σ_{max} =90 MPa.

4.9.2 Provino SQI5_06

L'ultimo provino ad essere stato testato è denominato SQI5_06. Si è visto in precedenza che il provino SQI5_05, testato con un'ampiezza di tensione pari a 85,5 MPa, ha ceduto dopo aver completato complessivamente 484189 cicli. Per quest'ultima giunzione si è deciso di abbassare ulteriormente il carico in modo tale che la vita a fatica stimata rientrasse in un intervallo compreso tra $1 \cdot 10^6$ e $2 \cdot 10^6$ cicli.

Come già fatto per altre prove, per determinare il livello di carico sono stati posizionati sulla curva di Woheler i dati relativi ai test già completati, è stata poi tracciata la retta interpolatrice, ed infine sulla base del numero di cicli desiderato si è sfruttato l'andamento di tale retta per determinare il carico massimo da applicare nella prova successiva. Quanto scritto è riassunto nella *Fig 4.92*.

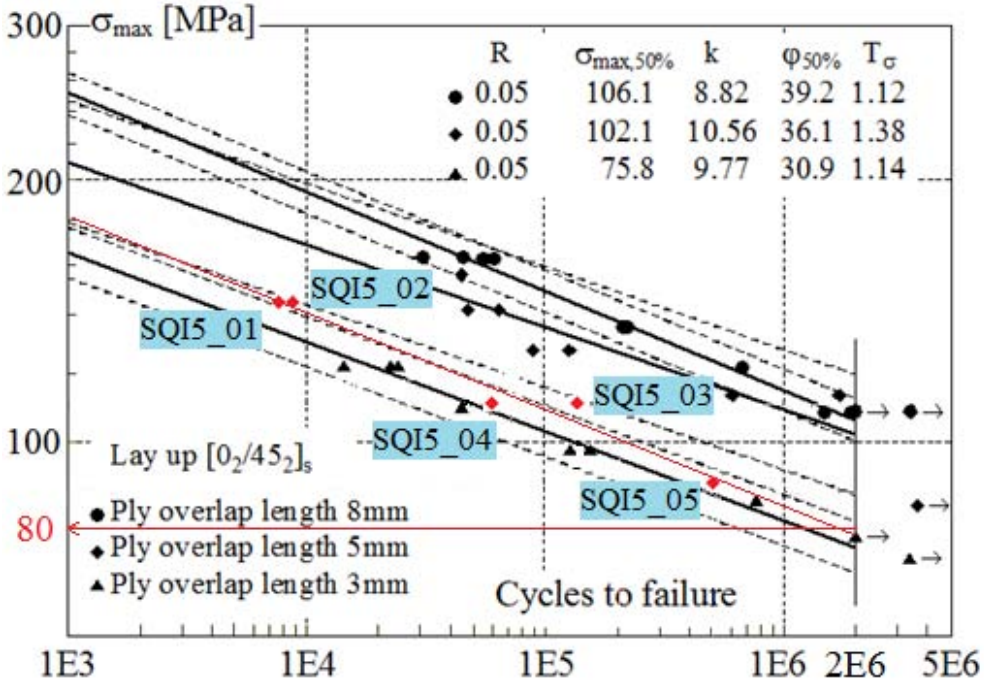


Fig. 4.92 determinazione del livello di carico per il provino SQI5_06

Si è scelto di applicare una tensione massima di 80 MPa ipotizzando una vita a fatica a ridosso di $2 \cdot 10^6$ cicli.

Si riportano i dati riguardanti le dimensioni del campione SQI5_06, il valore delle tensioni (σ_{max},σ_{min} e σ_A) e dei carichi applicati (F_{MAX} e F_{MIN}) durante la prova, il rapporto di sollecitazione $R = F_{MIN} / F_{MAX}$ e la frequenza di prova f.

Dimensioni	
b [mm]	23
t [mm]	2.4
L [mm]	217

Tab. 48 dimensioni del provino SQI5_06

Tensioni e Carichi	
σ_{UTS} [MPa]	255
σ_{max} [MPa]	80
σ_{min} [MPa]	4
σ_A [MPa]	76
R	0.05
f [Hz]	10
F max [kN]	4.4
F min [kN]	0.22

Tab. 49 tensioni e carichi applicati al provino SQI5_06

Sono stati eseguiti complessivamente i seguenti 24 blocchi di carico

N° blocco di carico	N° cicli per blocco di carico	Cicli totali
1	1000	1000
2	4000	5000
3	15000	20000
4	30000	50000
5	50000	100000
6	100000	200000
7	100000	300000
8	100000	400000
9	100000	500000
10	100000	600000
11	100000	700000

12	100000	800000
13	100000	900000
14	100000	1000000
15	100000	1100000
16	100000	1200000
17	100000	1300000
18	100000	1400000
19	100000	1500000
20	100000	1600000
21	100000	1700000
22	100000	1800000
23	100000	1900000
24	100000	1948821

Tab. 50 blocchi di carico applicati al provino SQI5_06

Il cedimento del provino SQI5_06 è arrivato dopo aver completato complessivamente 1948821 cicli. Questo dato risulta essere in buon accordo con la previsione di $2 \cdot 10^6$ cicli fatta inizialmente.

I risultati del danneggiamento rilevati nel corso della prova sono riportati nella tabella che segue

cicli	% vita a fatica	a_{1_trasv}	a_{1_int}	a_{1_est}	a_{8_trasv}	a_{8_int}	a_{8_est}
0	0	0	0	0	0	0	0
1000	0.05131	0	0	0	0	0	0
5000	0.25657	0	0	0	0	0	0
20000	1.02626	0.3022	0	0	0	0	0
50000	2.56565	0.30879	0.44176	0	0.32857	0.81209	0
100000	5.13131	0.3	0.7022	0	0.32857	1.07363	0
200000	10.2626	0.3011	0.90879	0	0.30879	3.13736	0
300000	15.3939	0.2989	1.18791	0.5022	0.31099	5	0
400000	20.5252	0.2989	1.30549	0.54615	0.31099	5	0
500000	25.6565	0.2989	1.30549	0.54615	0.30879	5	0
600000	30.7878	0.2967	1.63516	0.56484	0.30989	5	0
700000	35.9192	0.2989	1.65714	0.56484	0.31099	5	0
800000	41.0505	0.2989	1.76703	0.68681	0.31099	5	0
900000	46.1818	0.2989	1.78681	0.68681	0.31099	5	0
1100000	56.4444	0.2989	1.79231	0.8011	0.31099	5	0
1300000	66.707	0.2989	1.93297	0.8011	0.31099	5	0

1500000	76.9696	0.2989	1.93297	0.8011	0.31099	7.6978	0
1600000	82.1009	0.2989	2.02637	0.8033	0.31099	9.77912	0
1800000	92.3635	0.2989	5.32418	0.8033	0.31099	11.0011	0
1900000	97.4948	0.298901	10.35275	0.803297	0.310989	11.44066	0

cicli	% vita a fatica	a_{9_trasv}	a_{9_int}	a_{9_est}	a_{16_trasv}	a_{16_int}	a_{16_est}
0	0	0	0	0	0	0	0
1000	0.05131	0	0	0	0	0	0
5000	0.25657	0	0	0	0	0	0
20000	1.02626	0	0	0	0	0	0
50000	2.56565	0	0	0	0	0	0
100000	5.13131	0	0	0	0.11319	0	1.59451
200000	10.2626	0	0	0	0.26484	0	1.95604
300000	15.3939	0.24725	0	0.34176	0.26264	0	2.85385
400000	20.5252	0.25165	0	0.42747	0.26484	0	2.92308
500000	25.6565	0.25165	0	0.58901	0.26484	0	3.08791
600000	30.7878	0.24945	0	0.58901	0.26484	0	3.08901
700000	35.9192	0.25165	1.65385	1.92088	0.26484	1.2956	3.08901
800000	41.0505	0.25165	1.75275	2.14066	0.26484	1.2956	3.08901
900000	46.1818	0.25165	1.7978	2.14066	0.26484	1.2956	3.08901
1100000	56.4444	0.25165	2.14835	2.64945	0.26484	1.51429	3.08901
1300000	66.707	0.25165	3.04945	3.1989	0.26484	1.73407	3.08901
1500000	76.9696	0.25165	3.04945	3.1989	0.26484	2.00879	3.08901
1600000	82.1009	0.25165	3.04945	3.23407	0.26484	2.01209	3.08901
1800000	92.3635	0.25165	3.41429	3.23407	0.26484	8.60989	3.08901
1900000	97.4948	0.251648	7.645055	3.234066	0.264835	11.31868	3.154945

Tab. 51 tabella riassuntiva delle propagazioni per il provino SQI5_06

L'andamento della variazione della lunghezza delle delaminazioni all'aumentare del numero di cicli, per il provino SQI5_05 è riportato nella figura seguente.

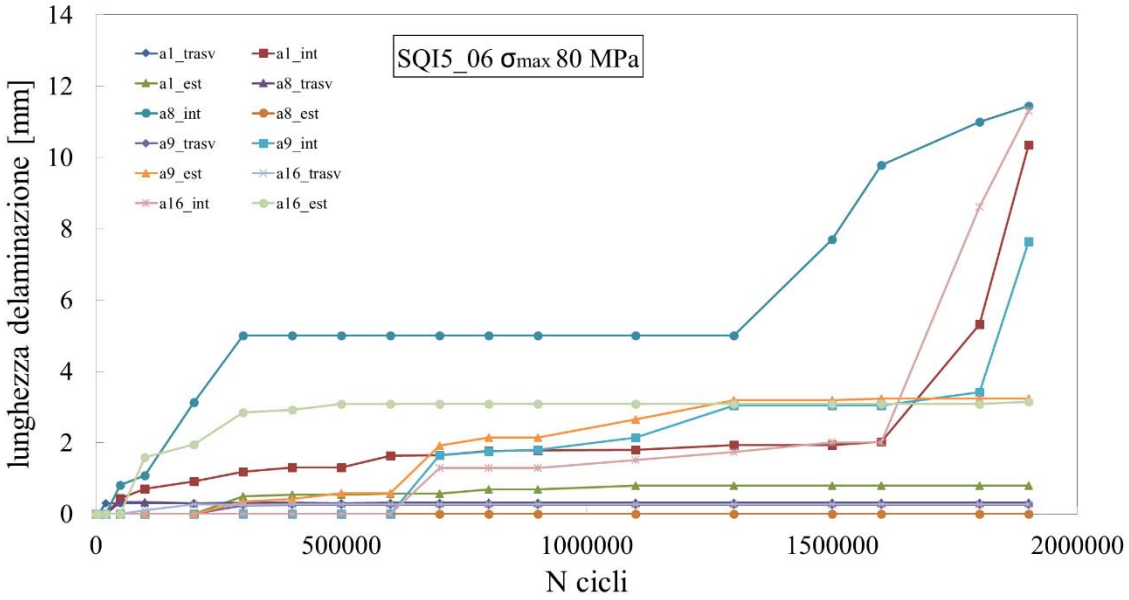


Fig. 4.93 propagazione delle diverse delaminazioni al variare del numero di cicli relative al provino SQI5_06

Nel dettaglio vengono rappresentati, in *Fig 4.94*, gli andamenti del parametro *media delle delaminazioni medie* e delle delaminazioni critiche.

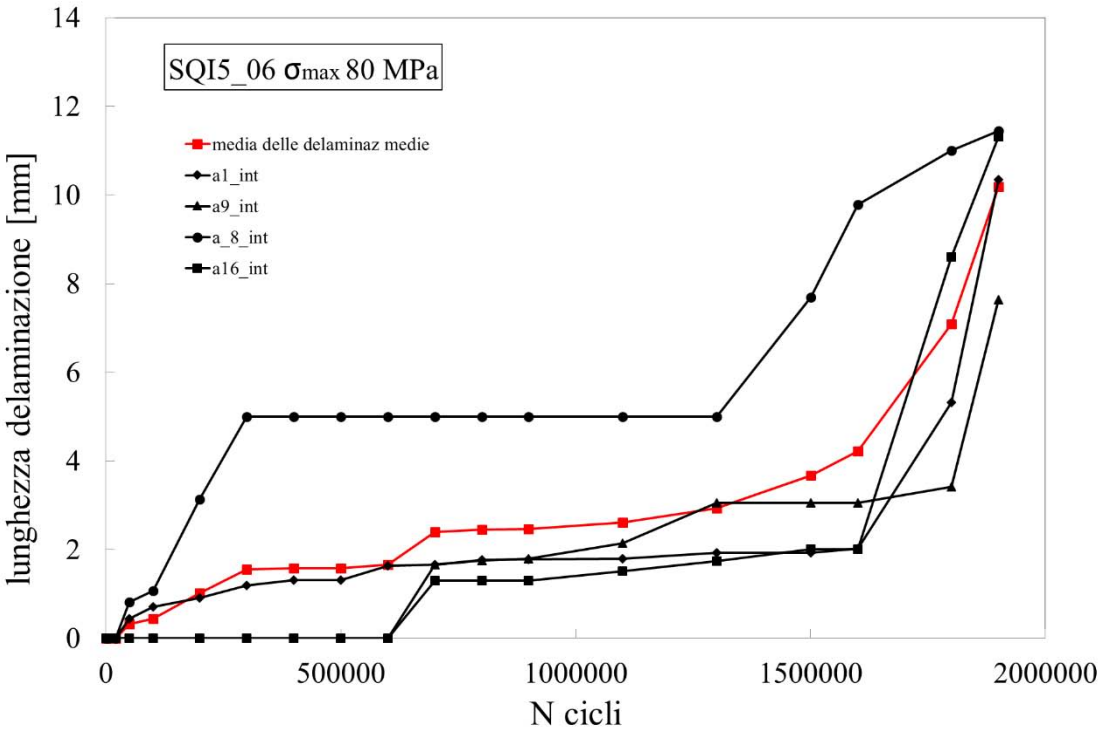


Fig. 4.94 propagazione delle delaminazioni critiche e della media della delaminazioni medie al variare del numero di cicli relative al provino SQI5_06

Le prime delaminazioni iniziano a propagare a partire a partire da $2 \cdot 10^4$ cicli, mentre per un numero di cicli inferiore si è registrata la sola formazione di cricche trasversali esterne in corrispondenza dei punti di giunzione più esterni.

Nello specifico se si considera la delaminazione critica *a8_int*, si osserva come dopo una fase di propagazione iniziale, a partire da $3 \cdot 10^5$ la cricca subisce un apparente arresto che si protrae per i successivi $1 \cdot 10^6$ cicli. Questo periodo così prolungato di stasi può trovare giustificazione nel fatto che un difetto di lucidatura in corrispondenza del punto di giunzione 7 non ha permesso di individuare l'esatto posizionamento dell'apice della cricca fino a quando questa non si è inspessita a partire da $1{,}5 \cdot 10^6$ cicli.

Passando alle delaminazioni *a9_int* e *a16_int* si vede come queste iniziano a propagare solamente a partire da $6 \cdot 10^5$ cicli. La fase intermedia di stabilizzazione si riscontra già a partire da $7 \cdot 10^5$ cicli e si protrae fino a $1{,}6 \cdot 10^6$ cicli momento in cui il provino entra nella terza e ultima fase della vita a fatica, entrambe le delaminazioni *a9_int* e *a16_int* accelerano progressivamente portando a cedimento la giunzione.

Un discorso analogo vale per la delaminazione critica *a1_int* con l'unica differenza che, rispetto ad *a9_int* e *a16_int*, questa inizia a delaminare a partire dalle prime fasi della prova a fatica

Di seguito sono riportate alcune immagini utili a documentare l'evoluzione del danneggiamento del provino SQI5_06.

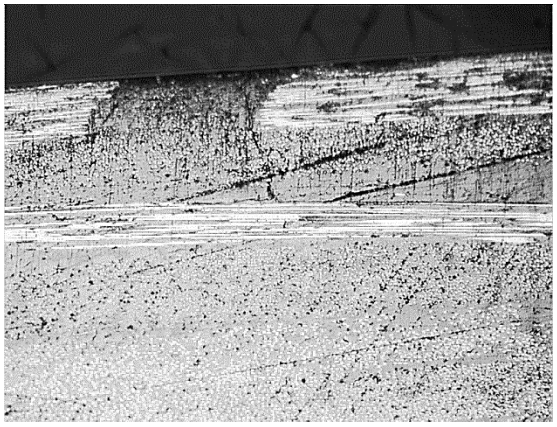


Fig 4.95 SQI5_06-5°blocco di carico- (100X) cricca trasversale e delaminazione innescate dal punto di giunzione 9 - giunto stepped, overlap 5 mm caricato con σ_{max} =80 MPa.

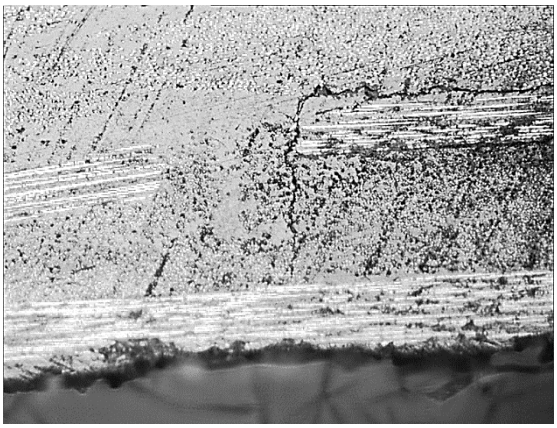


Fig 4.96 SQI5_06-10°blocco di carico- (100X) delaminazione innescate dal punto di giunzione 8 e "arrestasi" in corrispondenza del punto 7 - giunto stepped, overlap 5 mm caricato con σ_{max} =80 MPa.

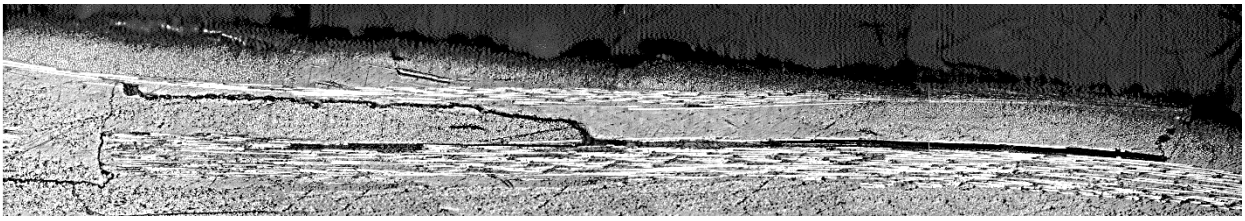


Fig 4.97 SQI5_06-19°blocco di carico- cricca trasversale e delaminazione innescate dal punto di giunzione 16 - giunto stepped, overlap 5 mm caricato con σ_{max} =80 MPa.

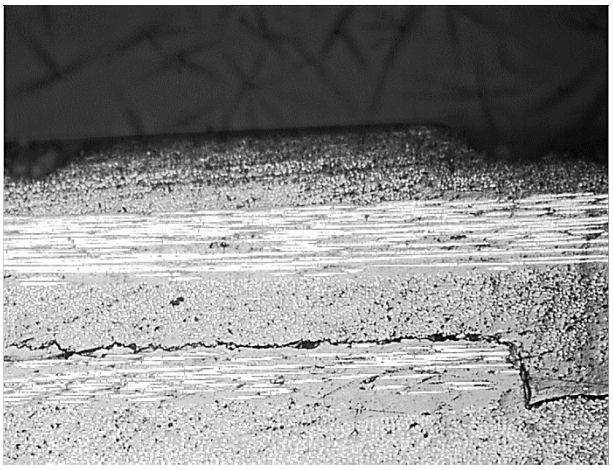


Fig 4.98 SQI5_06-22°blocco di carico- (100X) passaggio della delaminazione innescata dal punto di giunzione 9 dalla prima alla seconda interfaccia - giunto stepped, overlap 5 mm caricato con σ_{max} =80 MPa.

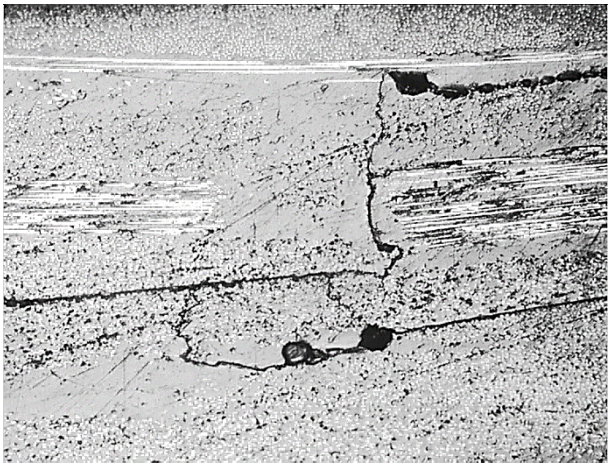


Fig 4.99 SQI5_06-22°blocco di carico- (100X) passaggio della delaminazione innescata dal punto di giunzione 16 dalla prima alla seconda interfaccia - giunto stepped, overlap 5 mm caricato con σ_{max} =80 MPa.

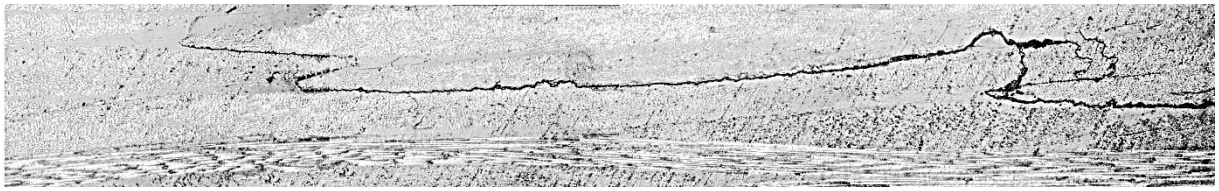


Fig 4.100 SQI5_06-23°blocco di carico- (100X) delaminazione innescate dal punto di giunzione 8 propagante lungo la sesta interfaccia- giunto stepped, overlap 5 mm caricato con σ_{max} =80 MPa.

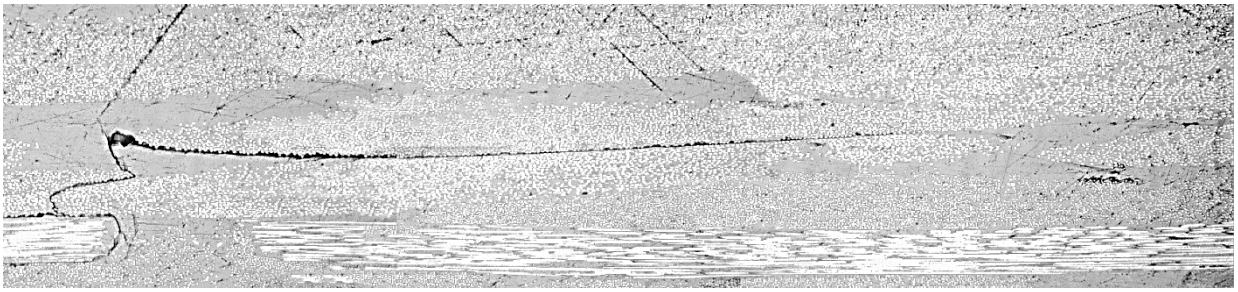


Fig 4.101 SQI5_06-23°blocco di carico- (100X) delaminazione innescate dal punto di giunzione 1 propagante lungo la sesta interfaccia - giunto stepped, overlap 5 mm caricato con σ_{max} =80 MPa.

4.10 Curve di Woheler riassuntive dei provini testati realizzate con il software FATICA W

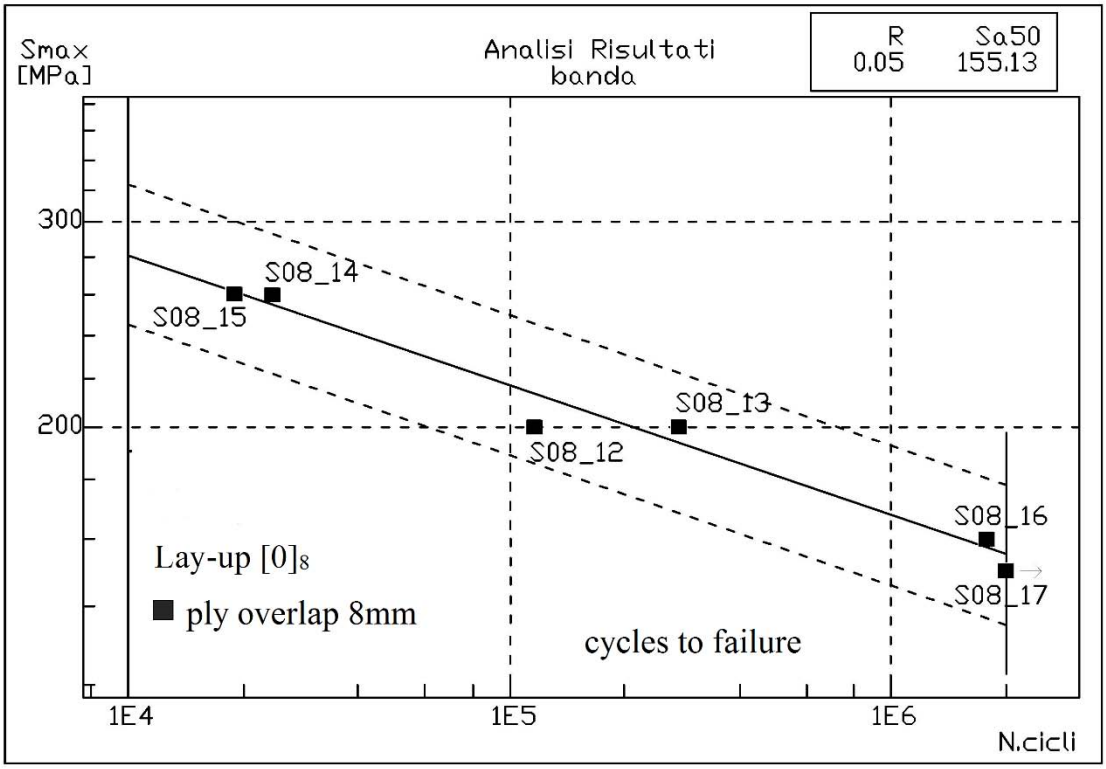


Fig 4.102 Curva di Woheler riepilogativa dei provini S08 testati

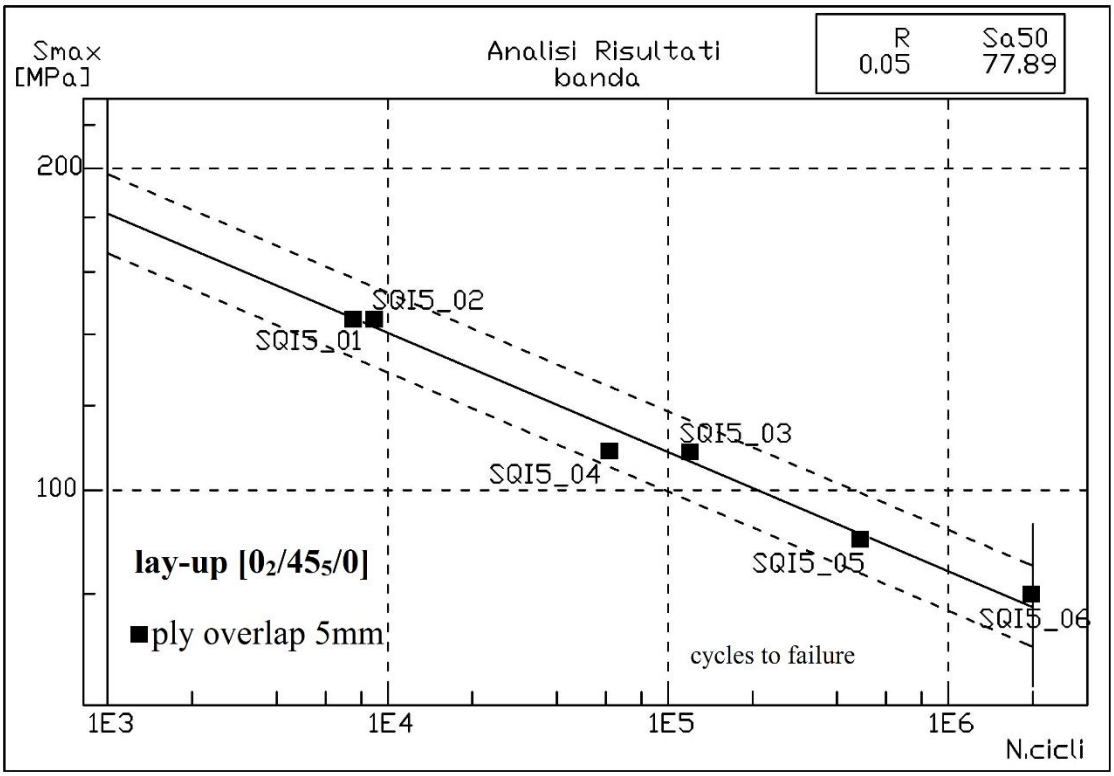


Fig 4.103 Curva di Woheler riepilogativa dei provini SQI5 testati

Capitolo 5

COSTRUZIONE DELLE CURVE DI PARIS

5.1 Interpretazione della propagazione a fatica della delaminazione

Lo studio e la caratterizzazione della propagazione a fatica della delaminazione è oggetto di un crescente interesse da parte della comunità scientifica a causa dell'utilizzo crescente di strutture in materiale composito nelle più diverse applicazioni. Per studiare la propagazione della cricca nei materiali metallici si fa riferimento alla meccanica della frattura lineare elastica (*LEFM*), utilizzando il fattore di intensificazione delle tensioni (*K*); per studiare invece la propagazione a fatica della delaminazione nei materiali compositi si impiega al posto di *K* lo *strain energy release rate* (*G*)

La ragione primaria che ha portato a preferire *G* invece di *K*, consiste nel fatto che è difficoltoso determinare il campo locale di tensione all'apice della cricca nei compositi laminati non omogenei. Esistono tuttavia delle soluzioni per materiali ortotropi stratificati che sfruttano ugualmente il parametro *K*; questi modelli possono portare a delle singolarità oscillatorie e a dei valori di *K* complessi con delle componenti reali ed immaginarie che complicano notevolmente l'analisi *LEFM* [18].

L'utilizzo di *G* evita invece tutti questi problemi.

È stato sperimentalmente osservato che la crescita della delaminazione, utilizzando una scala doppio logaritmica, varia linearmente al variare di *G*. La relazione trovata è la seguente:

$$\frac{db}{dN} = C[\, f(G)]^n \tag{5.1}$$

dove *C* e *n* sono delle costanti relative al materiale. Non è stato raggiunto un accordo univoco, tuttavia, circa la formulazione di *f(G)* che rappresenta la funzione di interpolazione dei dati sperimentali.

Le espressioni di gran lunga più utilizzate in letteratura sono $f(G) = G_{max}$ e $f(G) = \Delta G = G_{max} - G_{min}$ in analogia al ΔK, utilizzato nello studio della propagazione della cricca nei metalli.

.

5.2 Classificazione dei metodi per predire la propagazione della delaminazione

Nel corso degli anni sono stati proposti molti metodi e modelli per predire la crescita della delaminazione. Questi possono essere raggruppati sommariamente in 2 classi:

1. *Metodi basati sulla tensione/deformazione*. Questi correlano la propagazione della delaminazione con la tensione o la deformazione del materiale.
2. *Metodi basati sulla meccanica della frattura.* Questi metodi legano la crescita della delaminazione ad un parametro della meccanica della frattura come il fattore di intensificazione delle tensioni (SIF) o lo *strain energy release rate* (SERR). Tali metodi si basano specificatamente sulla meccanica della frattura lineare elastica (LEFM).

5.2.1 Metodi basati sulla tensione/deformazione

Questi metodi sono stati utilizzati a lungo per determinare la resistenza degli incollaggi. Gleich [19] riassunse in maniera completa e organica tutti gli studi che si fecero nel ventesimo secolo riguardanti questo tema. Generalmente questi metodi basati sulla tensione/deformazione sono utilizzati per trovare la vita a fatica e non per predire la crescita della delaminazione al pari di quanto avviene per i metalli dove l'ampiezza della tensione può essere utilizzata per predire la vita a fatica del provino mentre la propagazione a fatica della cricca è determinata usando il fattore di intensificazione della tensione SIF.

Renton e Vinson [20] utilizzarono un metodo di tensione/deformazione considerando solo la massima tensione per la quale una fissata vita a fatica può essere ottenuta. Liniecki [21], Imanaka e Iwata [22,23] e Ishii [24] utilizzarono l'ampiezza della tensione per predire la vita a fatica di un provino. Nonostante questa informazione può risultare utile, questi modelli non danno alcuna informazione riguardo il tasso di crescita della delaminazione e per questo motivo non si usano per comprendere le conseguenze dei difetti nelle prove a fatica.

In letteratura si trovano solamente due modelli dove la tensione è utilizzata per predire la crescita della delaminazione. Uno è quello di Ratwani e Kan [25] e l'altro è quello di Poursartip e Chinatambi [26]. Ratwani e Kan suggerirono che la propagazione della delaminazione può essere descritta dall'espressione seguente:

$$\frac{da}{dN} = C(\tau_{\max} - \tau_{\min} - \tau_{th})^n a^m \tag{5.2}$$

dove τ è lo sforzo di taglio e τ_{th} è il valore dello sforzo di taglio di soglia sotto il quale non si ha propagazione della delaminazione.
Poursartip e Chinatambi [26] studiarono la propagazione della delaminazione a partire da dei fori presenti su dei laminati in fibra di carbonio e proposero la seguente equazione per determinare il tasso di crescita della delaminazione:

$$\frac{da}{dN} = C\left(\frac{1+R}{1-R}\right)^m (\Delta\sigma)^n \tag{5.3}$$

dove R è il rapporto di ciclo, $\Delta\sigma$ l'ampiezza della tension, *C, n, m* dei parametri dipendenti dalle proprietà del materiale. La precedente equazione si può scrivere anche nel seguente modo:

$$\frac{da}{dN} = 2^n C\left(\frac{1+R}{1-R}\right)^{m-n} \sigma_{mean}^n \tag{5.4}$$

Questa relazione mostra come la formulazione di Poursartip e Chinatambi [26] includa sia l'ampiezza della tensione sia la tensione media nella definizione del ciclo di tensione. Poursartip e Chinatambi correlarono anche il tasso di crescita della delaminazione con il SERR. Sapendo che *G* si può esprimere nel seguente modo:

$$G = \frac{P^2}{2b}\frac{dC}{da} \tag{5.5}$$

è possibile riscrivere il tasso di crescita della delaminazione come:

$$\frac{da}{dN} = C\left(\frac{1+R}{1-R}\right)^m (\Delta G)^n \tag{5.6}$$

nonostante questa equazione sia molto simile all'equazione 5.3 i valori di *C, m, n* sono differenti dal caso precedente. Poursartip e Chinatambi [26] scrissero che non notarono delle particolari differenze nella bontà del metodo, tra l'uso di $\Delta\sigma$ e ΔG.

5.2.2 Metodi basati sulla meccanica della frattura

I metodi basati sulla meccanica della frattura correlano il tasso di crescita della delaminazione con il fattore di intensificazione delle tensioni (SIF) e lo *strain energy release rate* (SERR). Le difficoltà connesse con il calcolo del SIF nei materiali compositi non omogenei, ha portato ad una maggiore diffusione di modelli basati sul SERR. Il SERR può essere calcolato analiticamente oppure mediante analisi FEM. In quest'ultimo caso la tecnica più diffusa per la determinazione di *G* è la *virtual crack closure technique* (VCCT).

L'utilizzo della meccanica della frattura per studiare i problemi connessi alla delaminazione deriva dal successo ottenuto da Paris e dai sui collaboratori nell'applicare la meccanica della frattura allo studio della propagazione della cricca nei metalli [27-29]. L'equazione di Paris nella sua formulazione base può essere così scritta:

$$\frac{da}{dN} = C\Delta K^{n} \tag{5.7}$$

dove *C* e *n* sono parametri sperimentali, di cui non è ancora del tutto chiaro il significato fisico.

Per lo studio della delaminazione l'*Eq. 5.7* può essere riscritta in termini di *G* assumendo così la seguente forma:

$$\frac{da}{dN} = Cf(G)^{n} \tag{5.8}$$

Come notato da Mostovoy e Ripling [30] la funzione di Paris produce una curva sigmoide. Sono state proposte in seguito diverse altre modifiche per tener conto di diversi aspetti come quelli dovuti al *mode mixity*, al rapporto di ciclo *R* oppure all'effetto dovuto alla chiusura della cricca.

5.3 Ulteriori sviluppi teorici relazione di Paris

I primi ad applicare la relazione di Paris per studiare la propagazione della delaminazione a fatica furono Roderick, che studiò laminati con fibre metalliche e Mostovoy e Ripling, che si occuparono di giunti incollati. Studi successivi furono fatti dal NASA Langley Research Center [31]**,** Jablonski [32] e Brussat [33]. Wang fu il primo ad applicare la

meccanica della frattura a compositi fibro-rinforzati a matrice polimerica (FRP). Bisogna notare che in tutti questi primi studi, l'utilizzo della relazione di Paris non è stata motivata da un'interpretazione fisica del problema della delaminazione. Partendo da questi studi iniziali ed arrivando ad oggi, si è accertato che SIF e SERR sono legati certamente alla propagazione della delaminazione, come riportato molto frequentemente in letteratura. Tuttavia una domanda a cui in letteratura non trova risposta riguarda il perché di questo legame. Secondo gli autori per trovare una risposta a questo quesito è necessaria una migliore comprensione fisica del fenomeno.

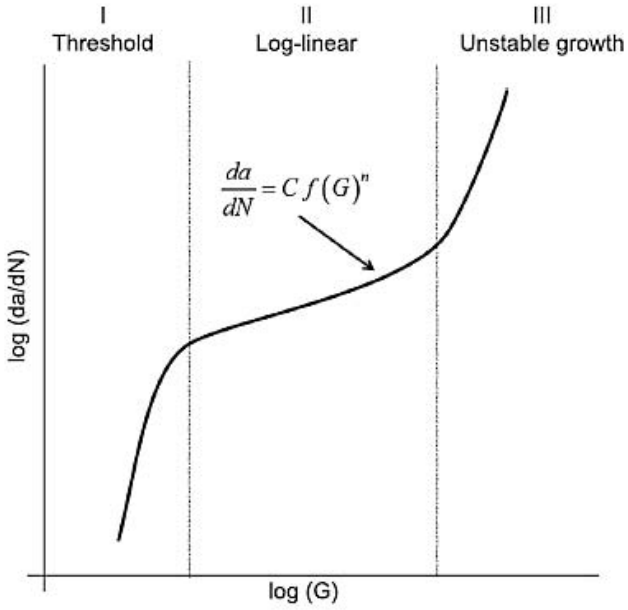


Fig. 5.1 Andamento della curva di Paris. Si possono distinguere 3 regioni. A valori piccoli di G si può notare un comportamento sub critico o di soglia (regione I), a valori intermedi il comportamento è lineare (regione II) mentre ad alti valori si ha un accrescimento instabile della delaminazione (regìone III)

Non è stato raggiunto nessun accordo che definisca se l'*Eq. 5.8* sia in funzione di G_{max} oppure di ΔG. Molti studiosi hanno preso o una o l'altra formulazione indifferentemente senza comparare mai le due possibilità: Roderick, per esempio utilizzò inizialmente G_{max} mentre Mostovoy e Ripling utilizzarono ΔG.

In un lavoro successivo Roderick [34] investigò più approfonditamente quale espressione di *f(G)* fosse più opportuno utilizzare nella relazione di Paris, arrivando a proporre 3 modelli: uno utilizza σ_{max}, uno $\Delta\sigma$ e infine un modello basato sulla combinazione di entrambi. Testando questi 3 diversi approcci su materiali diversi, Roderick trovò che la

propagazione della delaminazione dipende dal tipo di materiale, e a seconda dell'approccio utilizzato si ha una diversa sensibilità alla sollecitazione media.

I primi ad utilizzare nella formulazione di Paris, ΔG furono Mohlin [35] poi Bathias e Laksimi [36]: essi non motivarono la loro scelta.

Il ΔG (nella formulazione $\Delta G = (\sqrt{G_{max}} - \sqrt{G_{min}})^2$ è stato utilizzato per studiare la propagazione della delaminazione nel caso di alto numero di cicli a fatica ($>10^8$) e per investigare l'influenza della matrice nel comportamento a fatica.

Particolare attenzione va posta sugli effetti del rapporto di ciclo R sul comportamento a fatica del composito. Nessuno degli approcci basati su G_{max}, $\Delta G = (\sqrt{G_{max}} - \sqrt{G_{min}})^2$ o $\Delta G = G_{max} - G_{min}$ dà una spiegazione soddisfaciente a tal proposito. L'uso della meccanica della frattura per predire la propagazione della delaminazione si basa sul principio della similitudine, tale principio afferma che se due delaminazioni hanno lo stesso SERR (nello stesso provino o in provini differenti), queste avranno lo stesso tasso di crescita.

Si considerano le seguenti relazioni

$$G_{\max} = \frac{2}{(1+R^2)} G_m \tag{5.9}$$

$$\Delta G = \frac{2(1-R^2)}{(1+R^2)} G_m \tag{5.10}$$

dove G_m è la media del SERR. Queste equazioni mostrano che considerando costanti G_{max} oppure ΔG si ha che, variando il rapporto di ciclo, varia G_m. Di conseguenza G_{max} e ΔG non danno sufficienti informazioni sul ciclo di tensione applicato per essere in grado di caratterizzare completamente la crescita della delaminazione.

D'ora in poi si indica per comodità l'espressione $\Delta G = (\sqrt{G_{max}} - \sqrt{G_{min}})^2$ con il simbolo $\Delta\sqrt{G}$.

Un modo alternativo per descrivere il tasso di crescita della delaminazione in termini sia di $\Delta\sqrt{G}$ che di G_{max} è stato proposto da Hojo [37] che propose la seguente relazione:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta\sqrt{G})^{2(1-\gamma)n} G_{\max}^{\gamma n} \tag{5.11}$$

dove γ è un parametro dipendente dal materiale che varia tra 0 e 1 ed indica la sensibilità alla tensione media.

Atodaria [38] propose un'equazione simile a quella di Hojo

$$\frac{da}{dN} = C\left[(\sqrt{G})^{\gamma}_{average}(\Delta\sqrt{G})^{1-\gamma}\right]^{n} \tag{5.12}$$

dove $\sqrt{G}_{average}$ è una media pesata calcolata tramite

$$\left[\frac{1}{n}\sum_{\sqrt{G_{th}}}^{\sqrt{G_{\max}}}(\sqrt{G})^{w}\right]^{\frac{1}{w}} \tag{5.13}$$

dove n è il numero di divisioni tra G_{max} e G_{th} e w è una costante determinata sperimentalmente.

Un' ulteriore versione fu proposta da Jones [70]:

$$\frac{da}{dN} = C\left(\frac{\Delta\sqrt{G_I} - \Delta\sqrt{G_{Ith}}}{\sqrt{1-\sqrt{G_{\mathrm{Im}ax}}/\sqrt{G_{IC}}}}\right) \tag{5.14}$$

L'equazione per il Modo II è la medesima di questa valida per il Modo I. $\Delta\sqrt{G_{Ith}}$ e $\sqrt{G_{Ic}}$ sono parametri dipendenti dal materiale. Jones applicò questa equazione ai dati presenti in letteratura e dimostrò la sua indipendenza dal rapporto di ciclo.

5.4 Propagazione a Modo Misto

È noto che la propagazione della delaminazione dipende dal mix dei modi di sollecitazione. Le ricerche si sono concentrate principalmente sugli effetti dei Modi I e II, mentre quelli dovuti al modo III sono generalmente trascurabili. Nei casi in cui la componente dovuta al Modo III è sufficientemente grande, sicuramente questa contribuisce a far propagare la delaminazione.

Una panoramica completa dei vari metodi per analizzare il Modo Misto è stata realizzata da Blanco Villaverde [39].

Il primo a studiare il Modo Misto è stato Brussat [40] che suggerì la seguente relazione empirica:

$$\Delta G_{eff} = \left(1 + \frac{2G_{II}}{G_I + G_{II}}\right)\Delta G_I \tag{5.15}$$

Mall [41] trovò che $G_{tot} = G_I + G_{II}$ descrive in modo migliore la crescita della delaminazione nei provini FRP che studiò.

Un approccio differente è stato adottato da RamKumar e Whitcomb [42] che proposero una formulazione fenomenologica:

$$\frac{da}{dN} = C_I \left(\frac{G_{\mathrm{Im}ax}}{G_{Ic}} \right)^{n_I} + C_{II} \left(\frac{G_{I\,\mathrm{Im}ax}}{G_{IIc}} \right)^{n_{II}} \tag{5.16}$$

dove c_I, n_I, C_{II} *e* n_{II} sono costanti determinate sperimentalmente considerando rispettivamente il Modo I puro e il Modo II puro. Gustafson e Hojo suggerirono una relazione simile ma utilizzando ΔG al posto di G_{max}.

Basandosi sui test sperimentali Russel e Street svilupparono la seguente equazione:

$$\frac{da}{dN} = C_m \left(\frac{\Delta G}{G_c} \right)^{n_m} \tag{5.17}$$

dove C_m e n_m sono determinati a partire dai valori ricavati per il Modo I e Modo II puri mediante una regola che ha come fattori di peso $f_I = G_I/G_I+G_{II}$ e $f_{II} = 1\text{-}f_I$.

Kenane and Benzeggagh [43] i compositi con fibre di vetro unidirezionali e trovarono una dipendenza tra i parametri di Paris C e n, e il rapporto G_{II}/ G_{tot} dove $G_{tot} = G_I + G_{II}$.

Basandosi su quanto osservato sperimentalmente Kenane and Benzeggagh proposero una relazione di Paris in funzione di ΔG, definendo C e n nel seguente modo:

$$\ln(C) = \left[\ln(C_I) + \ln(C_{II}) \right] \left(1 - \frac{G_{II}}{G_{tot}} \right)^{m_c} \tag{5.18}$$

$$n = n_I + (n_{II} - n_I) \left(\frac{G_{II}}{G_{tot}} \right)^{m_n} \tag{5.19}$$

dove m_c e m_n sono dei parametri determinati empiricamente e caratteristici del materiale preso in considerazione.

Secondo Kardomates [44] la propagazione della delaminazione è in funzione di Gmax, Gmin/Gmax e dell'angolo di modo misto ψ definito come $\psi = \tan^{-1}(K_{II}/K_I)$. Basandosi su queste considerazioni propose il seguente modello:

$$\frac{da}{dn} = C(\psi)\frac{(\Delta \bar{G})^{m(\psi)}}{1-\bar{G}_{\max}} \tag{5.20}$$

dove $\bar{G}$ è una funzione del SERR e della tenacità Γ_o (dipendente dalla modalità di sollecitazione):

$$\bar{G} = \frac{G}{\Gamma_0(\psi)} \tag{5.21}$$

Γ_o è definita come: $\Gamma_o = G_{Ic}\left[1+(\lambda-1)\sin^2\psi\right]^{-1}$

λ è un parametro determinato sperimentalmente. Il vantaggio di questo modello è che esso è in funzione sia di G_{max} che di ΔG e di conseguenza si definisce completamente il ciclo di tensione applicata.

Blanco analizzò i dati presenti in [45] che mostrano che la dipendenza dal *mode-mix* non è lineare.

Tenendo conto di questo aspetto Blanco sviluppò un modello simile a quello proposto da Kenane and Benzeggagh, incorporando anche un termine quadratico:

$$\log C = \log C_I + \log C_m\left(\frac{G_{II}}{G_{tot}}\right) + \log\frac{C_{II}}{C_I C_m}\left(\frac{G_{II}}{G_{tot}}\right)^2 \tag{5.22}$$

$$n = n_I + n_m\left(\frac{G_{II}}{G_{tot}}\right) + (n_{II}-n_I-n_m)\left(\frac{G_{II}}{G_{tot}}\right)^2 \tag{5.23}$$

dove C_m ed n_m sono parametri relativi al modo misto calcolati sperimentalmente. I valori di C ed n trovati sono poi utilizzati nella relazione di Paris.

Quaresimin e Ricotta [46-47] proposero una relazione di Paris in funzione di ΔG_{eq}, dove la grandezza ΔG_{eq} è definita come:

$$G_{eq} = G_I + \frac{G_I}{G_I + G_{II}}G_{II} \tag{5.24}$$

questa espressione inserita nell'*Eq. 5.7* dà:

$$\frac{da}{dN} = C\left(G_{\mathrm{Im}ax} + \frac{G_{I\,\mathrm{Im}ax}}{G_{\mathrm{Im}ax} + G_{I\,\mathrm{Im}ax}} G_{I\,\mathrm{Im}ax} - G_{\mathrm{Im}in} - \frac{G_{I\,\mathrm{Im}in}}{G_{\mathrm{Im}in} + G_{I\,\mathrm{Im}in}} G_{I\,\mathrm{Im}in} \right)^n \qquad (5.25)$$

Quaresimin e Ricotta sottolinearono la capacità di esplicitare la variazione del *mode mixity* al variare della lunghezza della cricca. Comunque se si considera *G* per principio sempre in funzione di *a*, molti modelli discussi precedentemente hanno questa potenzialità, nonostante questa dipendenza dal *mode-mix* non sia così esplicita come nel modello proposto da Ricotta e Quaresimin.

Bisogna infine notare che, a parte il modello proposto da Kardomateas, tutti gli altri modelli per predire la propagazione della delaminazione a Modo Misto si basano su G_{max} o ΔG.

5.5 Normalizzazione del SERR

Numerosi ricercatori suggerirono che il SERR non può essere utilizzato direttamente nella definizione della relazione di Paris, ma deve essere normalizzato rispetto al SERR critico (tenacità a frattura) ottenendo:

$$\frac{da}{dN} = C\left(\frac{G_{\max}}{G_c}\right)^n \quad \text{oppure} \quad \frac{da}{dN} = C\left(\frac{\Delta G}{G_c}\right)^n \qquad (5.26)$$

Il primo a suggerire questo approccio fu Wang. Da notare che se la tenacità a frattura è assunta costante, può essere inclusa nel valore della cedevolezza *C.*

Poursartip suggerì che il SERR non dovrebbe essere normalizzato da un valore statico, bensì da un parametro $G_R(a)$ che rappresenta la variazione di resistenza alla delaminazione durante lo svolgimento della prova a fatica. La resistenza alla propagazione della delaminazione è causata da diversi meccanismi come per esempio *matrix cracking* e *fiber bridging* nel caso di compositi unidirezionali.

G_R combina in un solo valore numerosi effetti differenti e viene determinato dalla curva di delaminazione quasi statica (*R-curve).*

Giannis [48] e Murri [49] proposero una normalizzazione attraverso G_R come metodo per tener conto del *fiber bridging* durante le prove a fatica di Modo I. Tale fenomeno si verifica se si ha un laminato unidirezionale mentre non si verifica se la delaminazione avviene all'interfaccia tra due layers con differenti orientazioni. Attraverso questa normalizzazione si ha una riduzione della dispersione dei risultati riguardanti la propagazione della delaminazione.

5.6 Effetto delle condizioni ambientali sulla prova

L'effetto della temperatura sul tasso di crescita della delaminazione è stato studiato da diversi studiosi tra cui Chan e Wang [50], Sjögren[51], Shindo [52], Coronado [53], Burianek e Spearing [54] e infine da Rans [55]. Tutti questi studi affermano che la temperatura durante la prova influenza il tasso di propagazione della delaminazione. Generalmente un'elevata temperatura implica un tasso di crescita maggiore. Tuttavia sono state trovate alcune eccezioni. Chan e Wang riportarono che i provini testati a -55˚C hanno la tenacità a frattura più bassa.

Rans [55] riporta un comportamento non lineare. Nei suoi esperimenti il tasso di crescita della delaminazione a bassa temperatura (-40 ˚C) è inferiore rispetto a quello che si ha ad elevate temperature (70 ˚C), ma superiore rispetto a quello che si ha a temperatura ambiente.

Anche Shindo nei suoi studi trovò un comportamento non lineare.

Dei ricercatori citati in precedenza solo Burianek e Spearing [54] cercarono di trovare una relazione quantitativa tra la temperatura e il tasso di crescita della delaminazione. Essi inclusero una relazione di Arrhenius nell'equazione di Paris proponendo la seguente espressione:

$$\frac{da}{dN} = Ce^{\frac{-Q}{RT}}(\Delta G)^n \tag{5.27}$$

Dove R è la costante universale dei gas, Q l'energia di attivazione, T la temperatura, C e n le costanti di Paris. Non risulta chiaro immediatamente come un'equazione usata per lo studio del *creep* nei metalli risulti efficace nello studio della delaminazione dei compositi.

Anche gli effetti dell'umidità sono stati oggetto di studio da parte di Chan e Wang e di Russel e Street [56]. Entrambi gli studi trovarono che l'umidità nei compositi laminati comporta una diminuzione della tenacità a frattura anche se l'effetto sulla crescita della delaminazione risulta meno chiaro. Hojo trovò che l'umidità generalmente aumenta il tasso di crescita della delaminazione e riduce il valore di soglia per cui si osserva tale crescita. Bisogna tuttavia dire che ad oggi, non si è ancora giunti a formulare una relazione quantitativa che spieghi quest'ultimo fenomeno.

5.7 Costruzione sperimentale delle curve di Paris

Le prove sperimentali hanno evidenziato che il danneggiamento delle giunzioni *stepped* evolve in maniera non simmetrica e non simultanea a partire dai punti di giunzione 1, 8, 9 e 16. Per poter descrivere in modo univoco la vita a fatica di ciascun giunto è necessaria l'identificazione di un parametro monodimensionale in grado di descrivere e quantificare in modo affidabile il danneggiamento della giunzione e quindi una sua correlazione con le componenti del SERR calcolate nelle precedenti analisi (capitolo 3).

Tale parametro risulterebbe molto utile nella fase di progettazione preliminare, per poter stimare i valori del SERR.

Nel lavoro di tesi di Michele Ferrari [6] si è deciso di considerare come parametro la media delle quattro delaminazioni innescate dai punti 1, 8, 9, 16 (dette critiche) definita appunto *media delle delaminazioni medie* in quanto media delle medie 1-9 e 8-16.

Nella definizione di tale parametro sono ignorate le delaminazioni che pur partendo dai punti 1, 8, 9, 16 propagano verso l'esterno della giunzione a gradino. Si è osservato infatti che queste propagano solamente nella prima fase della vita a fatica, mentre poi si stabilizzano fino ad arrestarsi non influenzando in questo modo la durata della vita a fatica delle giunzioni. Nella definizione di tale parametro si escludono anche eventuali cricche che si formano negli strati più interni. Si è osservato che queste delaminazioni una volta formate, tendenzialmente non propagano fino a quando non vengono inglobate dall'avanzare della delaminazione principale lungo le varie interfacce del giunto.

Una volta calcolata la *media delle delaminazioni medie* per ciascun provino testato, è possibile risalire al valore delle componenti del SERR dai grafici che riproducono l'andamento di ΔG in funzione di a costruiti con le analisi FEM (capitolo 3). A questo punto per poter costruire la curva di Paris, utile per descrivere/riassumere il comportamento a fatica di questo tipo di giunzioni è necessario calcolare la velocità di propagazione della cricca semplicemente come rapporto incrementale.

Dal momento che in questa tipologia di giunzioni, come si è già visto, le cricche che si formano e che evolvono contemporaneamente sono molteplici, si è deciso di scegliere ancora una volta il parametro *media delle delaminazioni medie* per sintetizzare con un unico parametro la velocità con cui propagano le diverse cricche. Per semplicità espositiva questa grandezza nel corso del capitolo verrà anche indicata con a.

A questo punto si dispongono di tutti i dati necessari per poter costruire le diverse curve di Paris, curve che sono poi state confrontate con quelle ottenute nel lavoro precedente di

tesi da Michele Ferrari [6], il quale a sua volta aveva utilizzato nei suoi calcoli i dati sperimentali ottenuti da Polloni Simone [7].

5.7.1 Provino S08_14

Il primo provino considerato è l'S08_14, soggetto ad alto carico. L'andamento della *media delle delaminazioni medie* è riportato in *Fig.5.2*. Dal momento che tale parametro deriva dalla media delle lunghezze delle singole delaminazioni critiche che propagano all'interno della giunzione, si può riscontrare che l'andamento è del tutto simile a quello di una delaminazione critica caratterizzato dai tre periodi di inizio diffusione durato circa per il 20% della vita, proseguendo con il periodo di stasi presente per il 30% della vita ed infine il terzo e ultimo periodo in cui la delaminazione avanza più velocemente.

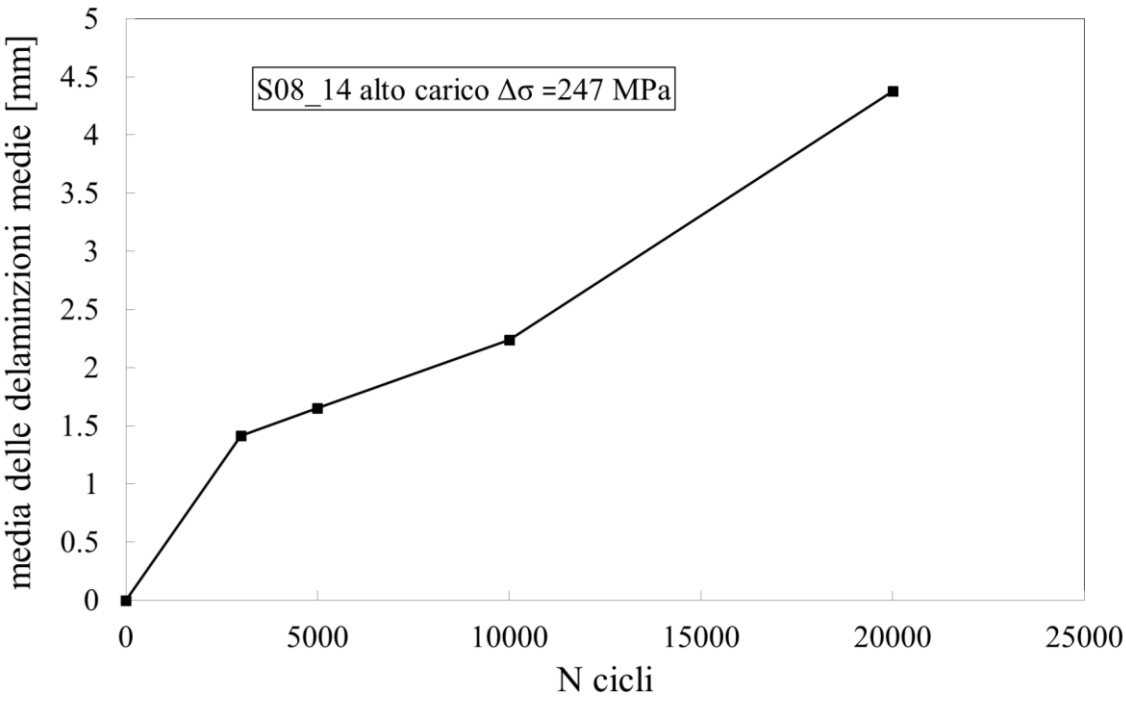


Fig. 5.2 propagazione della media delle delaminazioni medie. Provino S08_14.

Una volta determinato l'andamento della media delle delaminazioni medie, è stato possibile calcolare il valore delle componenti del SERR per ciascun punto costituente la curva, semplicemente andando a sostituire il valore di *a*, per un determinato numero di cicli, alle equazioni che costituiscono i polinomi di interpolazione delle curve riportate in *Fig 5.3*.

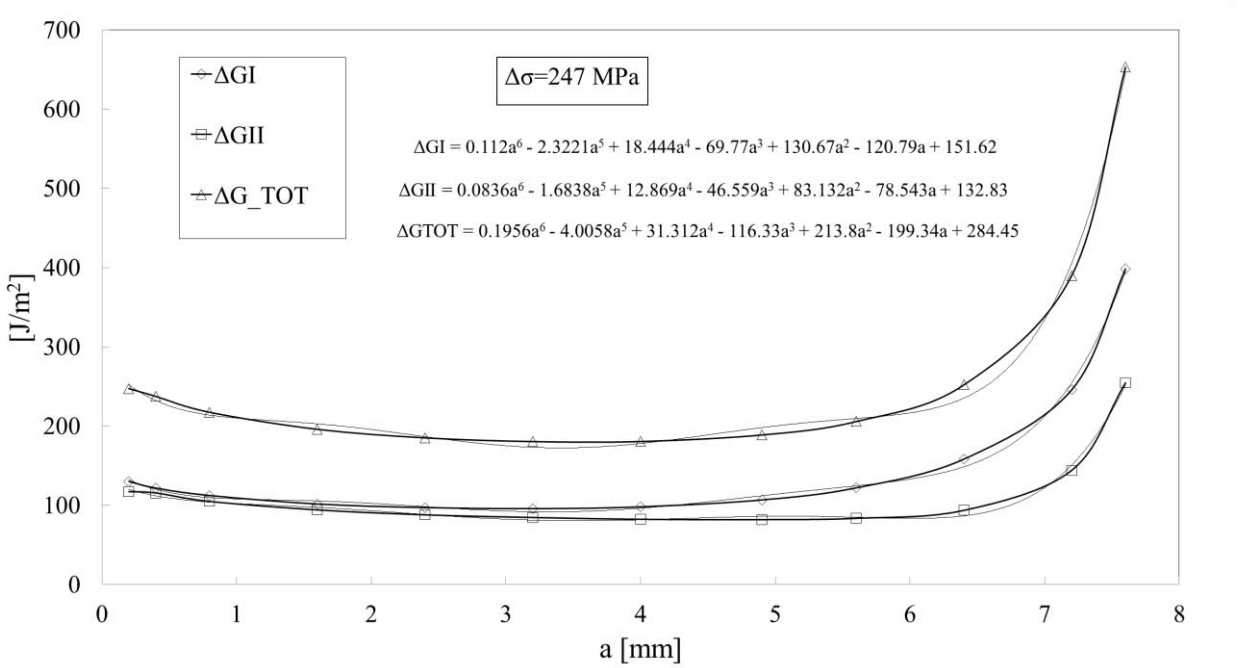


Fig. 5.3 andamento delle componenti del SERR e relative linee di tendenza (polinomiali) lungo la prima interfaccia al propagare della delaminazione, lunghezza di sovrapposizione w=8, Δσ=247 MPa (alto carico),

Si sono così ricavati i valori di ΔG_I, ΔG_{II} e ΔG_{TOT} al variare del parametro *media delle delaminazioni medie*. È stata inoltre calcolata la velocità di propagazione *da/dN* mediante il calcolo del rapporto incrementale tra due punti successivi. Si dispongono a questo punto di tutti i dati per costruire la curva di Paris del provino S08_14.

N cicli	Media delle delaminaz medie	da /dN	ΔGI	ΔGII	ΔG_TOT
0	0	0.000471	151.62	132.83	284.45
3000	1.4125	0.00012	106.332	98.96219	205.2826
5000	1.652197802	0.000117	105.1919	96.87069	202.0483
10000	2.237362637	0.000214	100.0661	90.34917	190.3925
20000	4.378021978	0.000219	102.1598	83.66636	185.7185

Tab. 1 provino S08_14. Dati curva di Paris

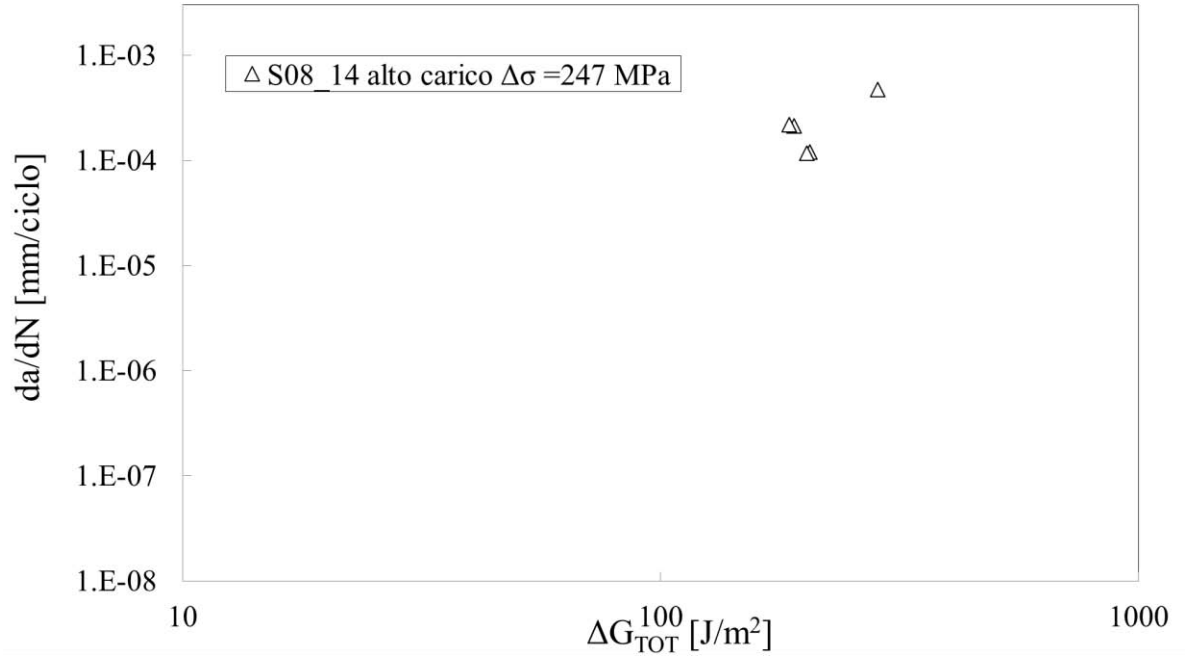


Fig.5.4 curva di Paris in ΔG_{TOT} per il provino S08_14.

Sebbene la propagazione sia dominata dalla componente di Modo I, come è ben visibile dai grafici riportanti il rapporto $\Delta G_{II}/\Delta G_I$ presenti nel capitolo precedente, al fine di sviluppare un modello idoneo di previsione della vita a fatica sarebbe utile definire opportunamente un parametro che tenga conto sia della componente di Modo I sia della componente di Modo II e descrivere così in modo affidabile la reale propagazione a modo misto. La componente ΔG_{TOT}, definita come somma di ΔG_I e ΔG_{II}, non tiene conto infatti di queste continue variazioni. A tal riguardo si è effettuato anche il calcolo di ΔG_{eqv} tramite la seguente formula, proposta dal Prof. M. Quaresimin e dall'Ing. M. Ricotta:

$$\Delta G_{eqv} = \Delta G_I + \frac{\Delta G_{II}}{\Delta G_I + \Delta G_{II}} \cdot \Delta G_{II} \tag{5.28}$$

Questa espressione rappresenta una delle possibili alternative alla valutazione della componente ΔG_{TOT} nella definizione di un modello di propagazione della cricca per una giunzione soggetta a carico ciclico e può essere usata anche in presenza del solo Modo I; infatti quando $\Delta G_{II}=0 \Rightarrow \Delta G_{eqv}=\Delta G_I$ e quando $\Delta G_I=0 \Rightarrow \Delta G_{eqv}=\Delta G_{II}$.

Questa formulazione si è rivelata inoltre essere abbastanza insensibile a variazione dell'*element size* della mesh. I risultati in termini di ΔG_{eqv} sono riportati nella tabella seguente.

N cicli	media delle delaminaz medie	ΔGeqv
0	0	213.6478
3000	1.4125	154.0368
5000	1.652197802	151.6326
10000	2.237362637	142.9354
20000	4.378021978	139.8297

Tab. 2 provino S08_14. Dati curva di Paris in ΔG_{eqv}

La curva di Paris in termini di ΔG_{eqv} è rappresentata in seguito

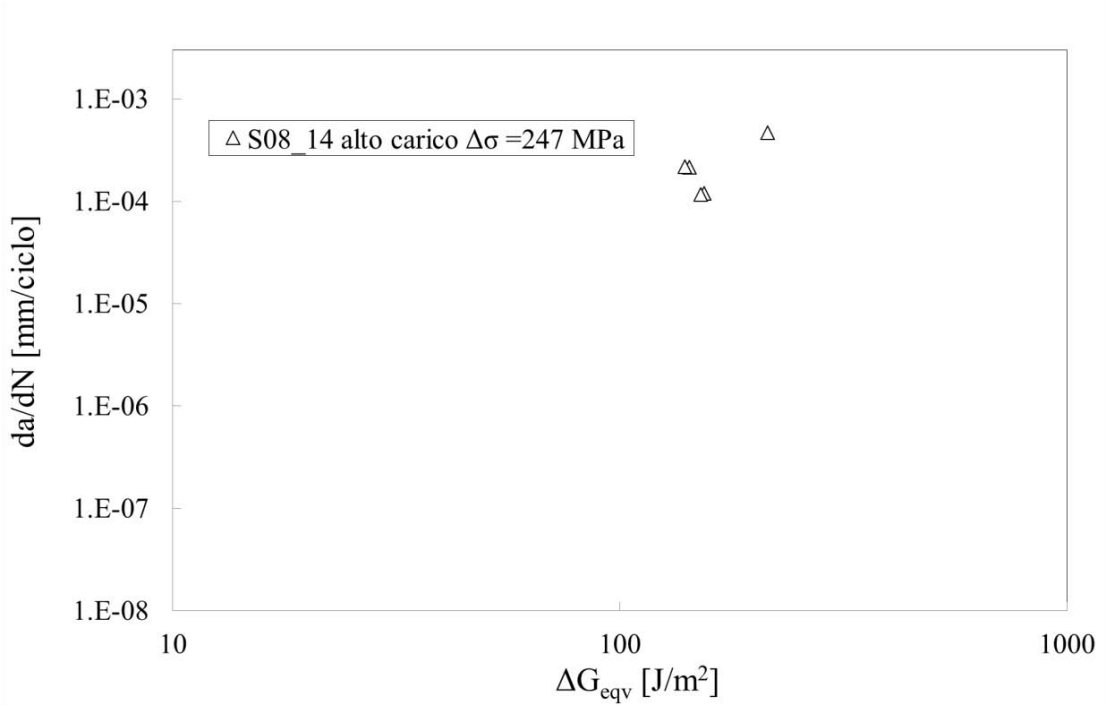


Fig.5.5 curva di Paris in ΔG_{eqv} per il provino S08_14.

5.7.2 Provino S08_15

L'andamento del parametro media delle delaminazioni per il provino S08_15, sollecitato con una tensione massima σ_{max} di 260 MPa (alto carico), è riportato in *Fig 5.6*

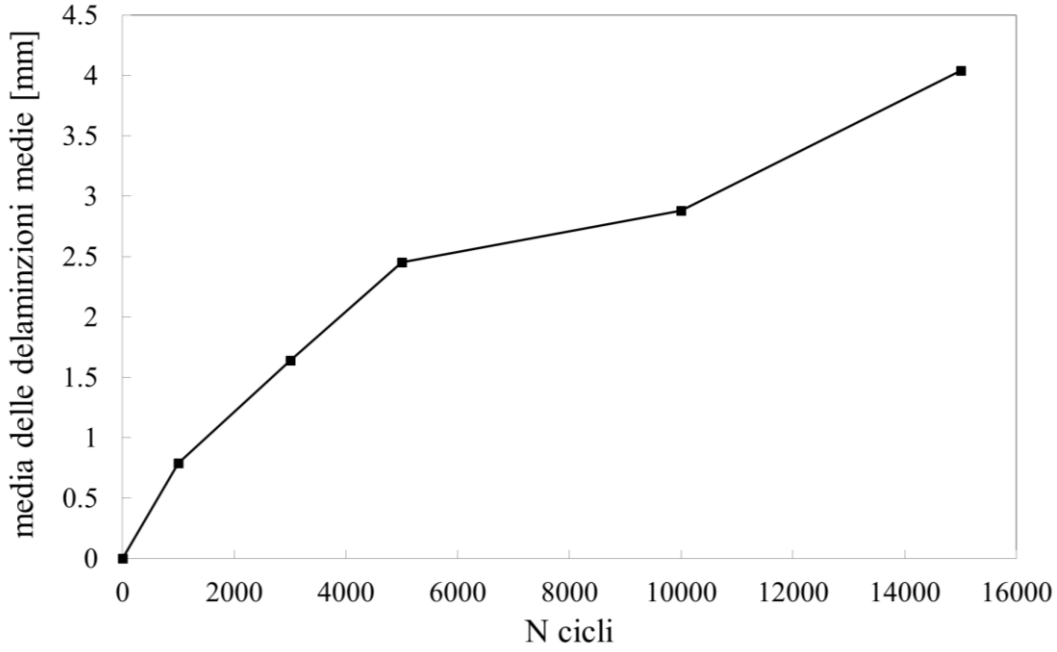


Fig.5.6 propagazione della media delle delaminazioni medie. Provino S08_15.

Entrando nel grafico di *Fig*. 5.3 è possibile determinare i valori delle componenti del SERR estrapolando dalle linee di tendenza i valori di ΔG_I, ΔG_{II} e ΔG_{TOT} per ciascun punto della curva di *Fig*. 5.6. I risultati sono riportati in *Tab*. 3

N cicli	media delle delaminaz medie	da/dN	ΔGI	ΔGII	ΔG_TOT	ΔGeqv
0	0	0.000787	151.62	132.83	284.45	213.6478
1000	0.787362637	0.000427	109.8771	104.255	214.126	160.636
3000	1.640659341	0.000406	105.2592	96.98012	202.2253	151.7643
5000	2.452472527	8.58E-05	97.6933	87.78359	185.4499	139.24
10000	2.881318681	0.000232	93.54877	83.38326	176.894	132.845
15000	4.041208791	0.000269	96.84138	81.86393	178.6174	134.3428

Tab.3 provino S08_15. Dati curva di Paris

Nelle *Fig. 5.7 e 5.8* sono riportate le curve di Paris rispettivamente in termini di ΔG_{TOT} e ΔG_{eqv} per il provino S08_15 soggetto ad alto carico.

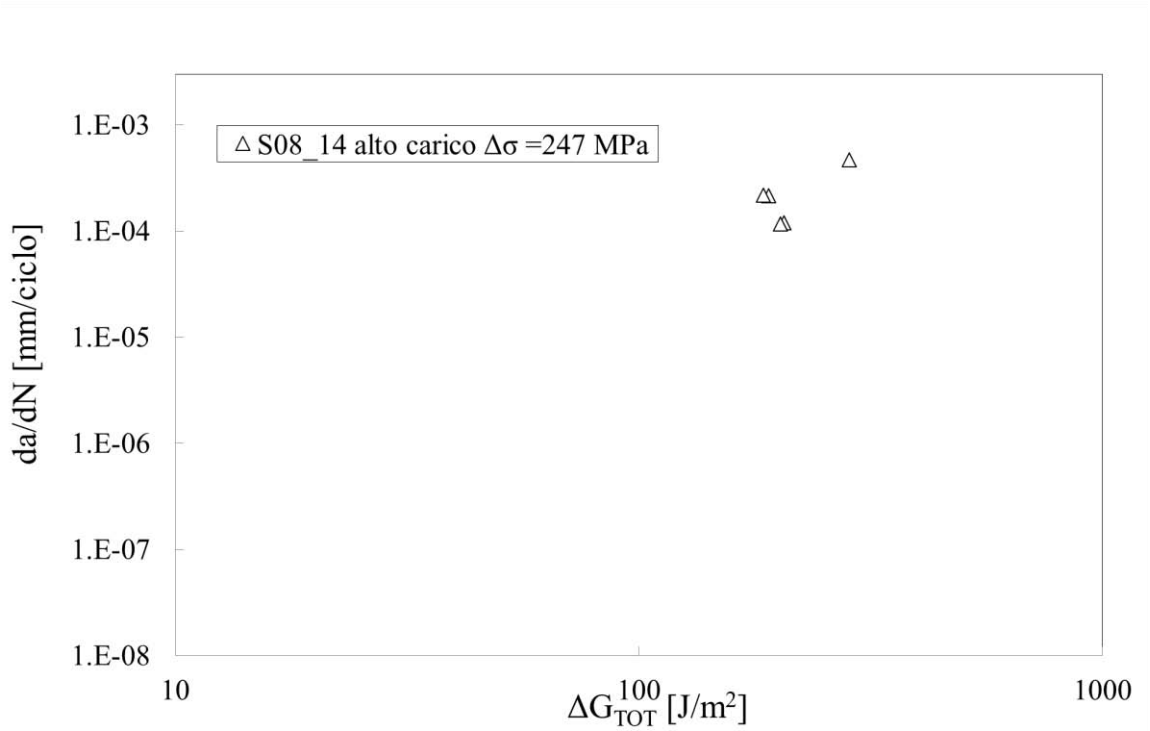


Fig.5.7 curva di Paris in ΔG_{TOT} per il provino S08_15.

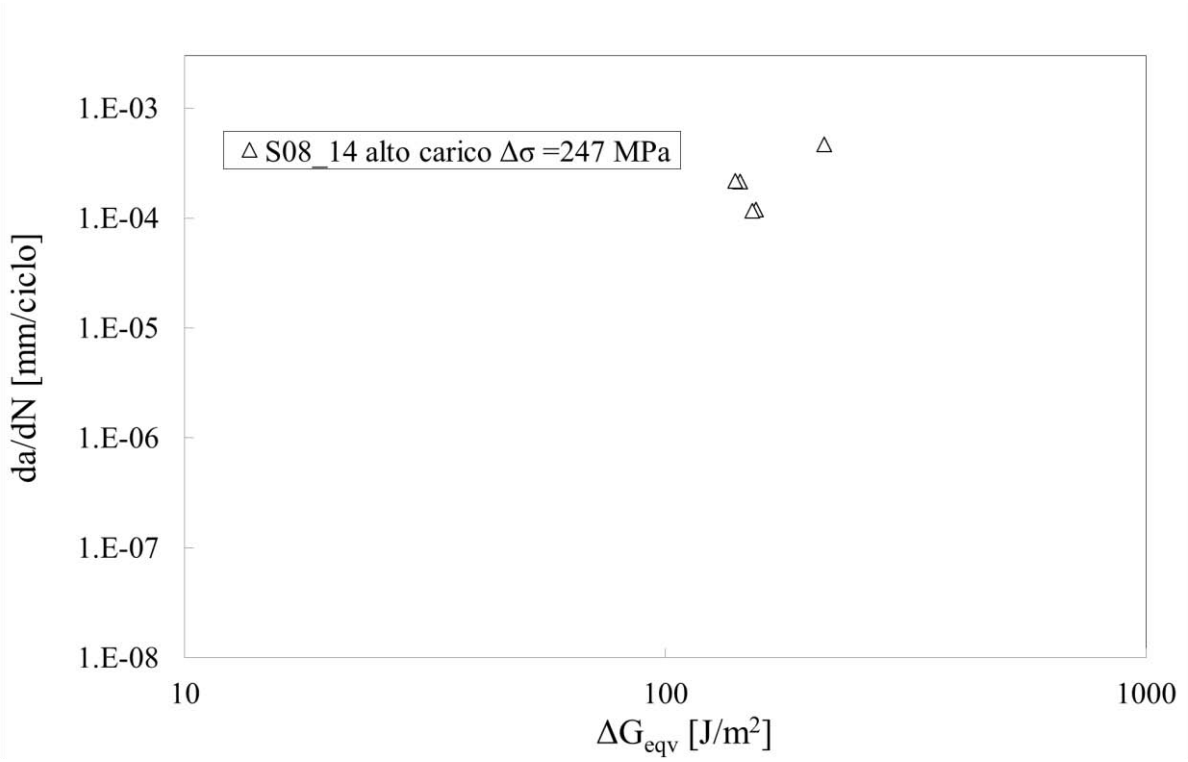


Fig.5.8curva di Paris in ΔG_{eqv} per il provino S08_15.

5.7.3 Provino S08_12

L'andamento del parametro media delle delaminazioni per il provino S08_12, sollecitato con una tensione massima σ_{max} di 200 MPa (basso carico), è riportato in *Fig.* 5.9

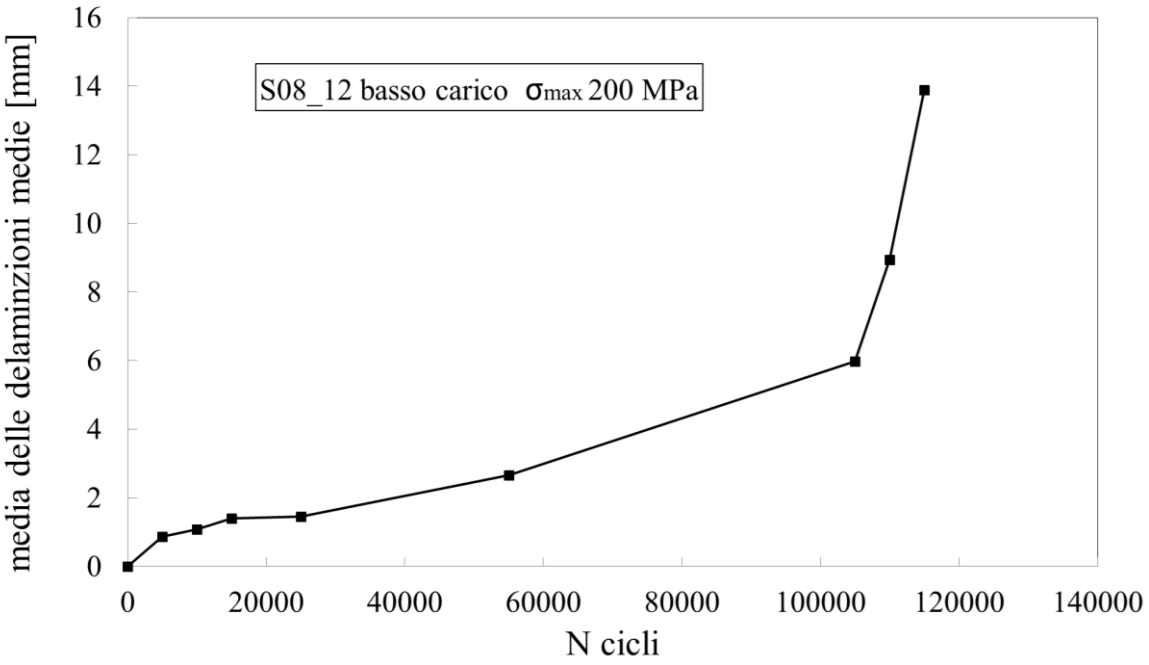


Fig.5.9 propagazione della media delle delaminazioni medie. Provino S08_12.

Il calcolo delle componenti del SERR richiede l'estrapolazione dalle linee di tendenza relative alla propagazione soggetta a basso carico. Si è deciso di usare le curve ottenute dalle analisi FEM di Michele Ferrari [6] calcolate ponendo $\Delta\sigma$=202.5 MPa a fronte di un $\Delta\sigma$=190 MPa realmente applicato. Questa decisione è stata presa ritenendo che le curve di ΔG_I, ΔG_{II}, ΔG_{TOT}, in funzione della lunghezza di delaminazione, non si discostano in maniera apprezzabile se calcolate per $\Delta\sigma$=202.5 MPa oppure se calcolate per $\Delta\sigma$=190 MPa.

Di seguito sono riportati gli andamenti delle componenti del SERR e le relative linee di tendenza (polinomiali di sesto grado) lungo la prima e la seconda interfaccia al propagare della delaminazione.

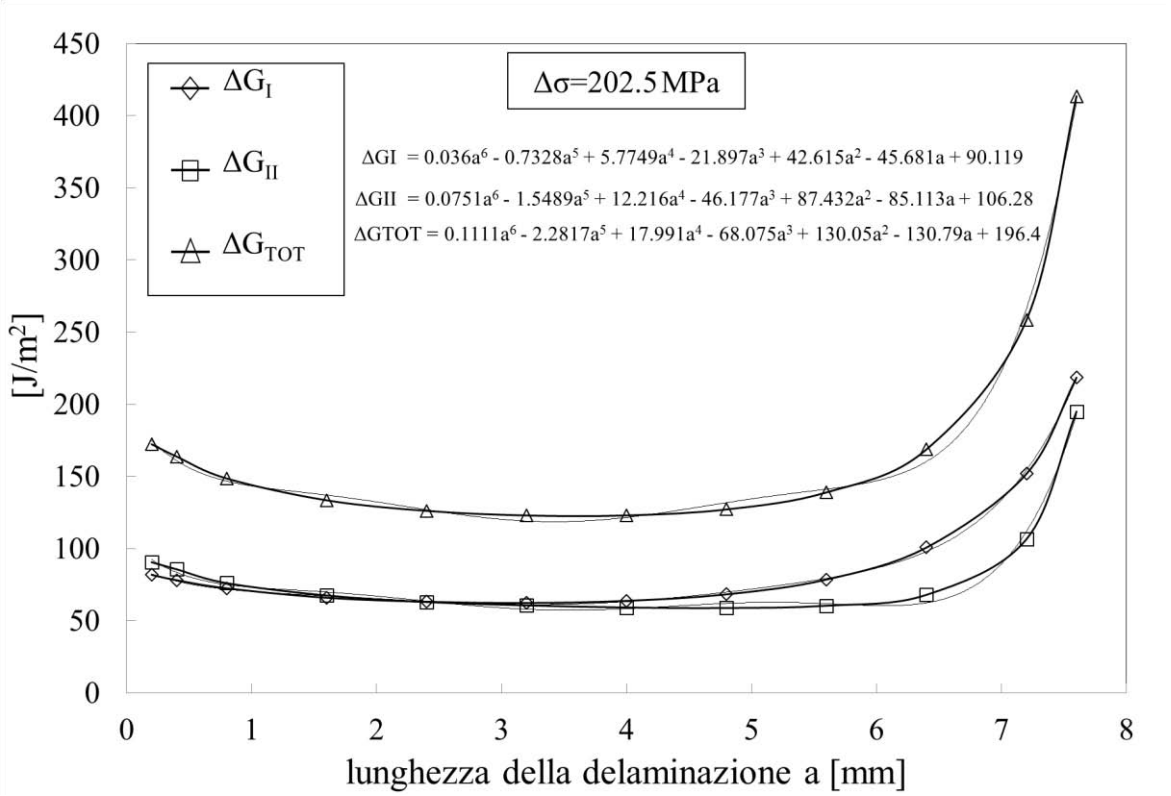


Fig. 5.10 andamento delle componenti del SERR e relative linee di tendenza (polinomiali) lungo la prima interfaccia al propagare della delaminazione, lunghezza di sovrapposizione w=8, Δσ=202.5 MPa (basso carico)

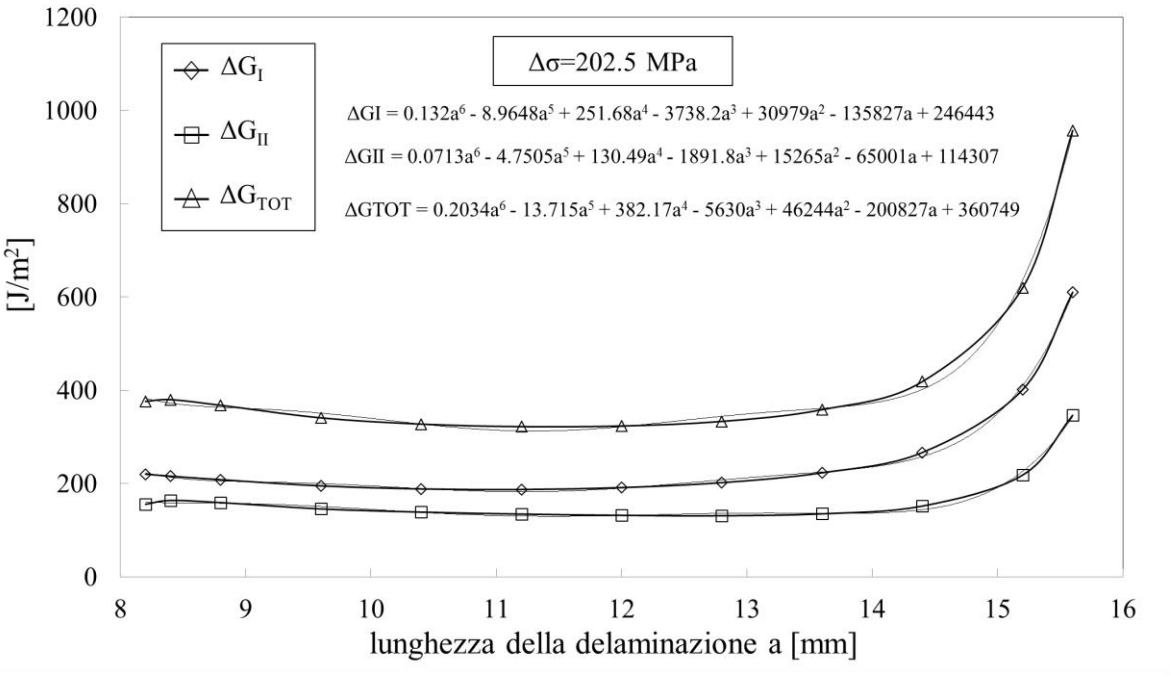


Fig. 5.11 andamento delle componenti del SERR e relative linee di tendenza (polinomiali) lungo la seconda interfaccia al propagare della delaminazione, lunghezza di sovrapposizione w=8, Δσ=202.5 MPa (basso carico)

N cicli	media delle delaminaz medie	da/dN	GI	GII	G_TOT	ΔGeqv
0	0	0.000172967	90.119	106.28	196.4	147.6317
5000	0.864835165	4.27473E-05	71.2130573	74.31168	145.5308498	109.16
10000	1.078571429	6.53297E-05	69.7511601	72.6408	142.3996477	106.8086
15000	1.40521978	4.6978E-06	68.0961608	70.91644	139.0227621	104.2738
25000	1.452197802	4.02747E-05	67.8792471	70.67499	138.5647572	103.9298
55000	2.66043956	6.61593E-05	62.2873711	61.32624	123.6326695	92.71208
105000	5.968406593	0.000593462	85.3907829	60.53107	145.9678794	110.5002
110000	8.935714286	0.000991868	212.209651	158.6237	370.8333508	280.0608
115000	13.89505495	0.000120826	239.37723	138.7652	378.1424302	290.2993

Tab.4 provino S08_12. Dati curva di Paris

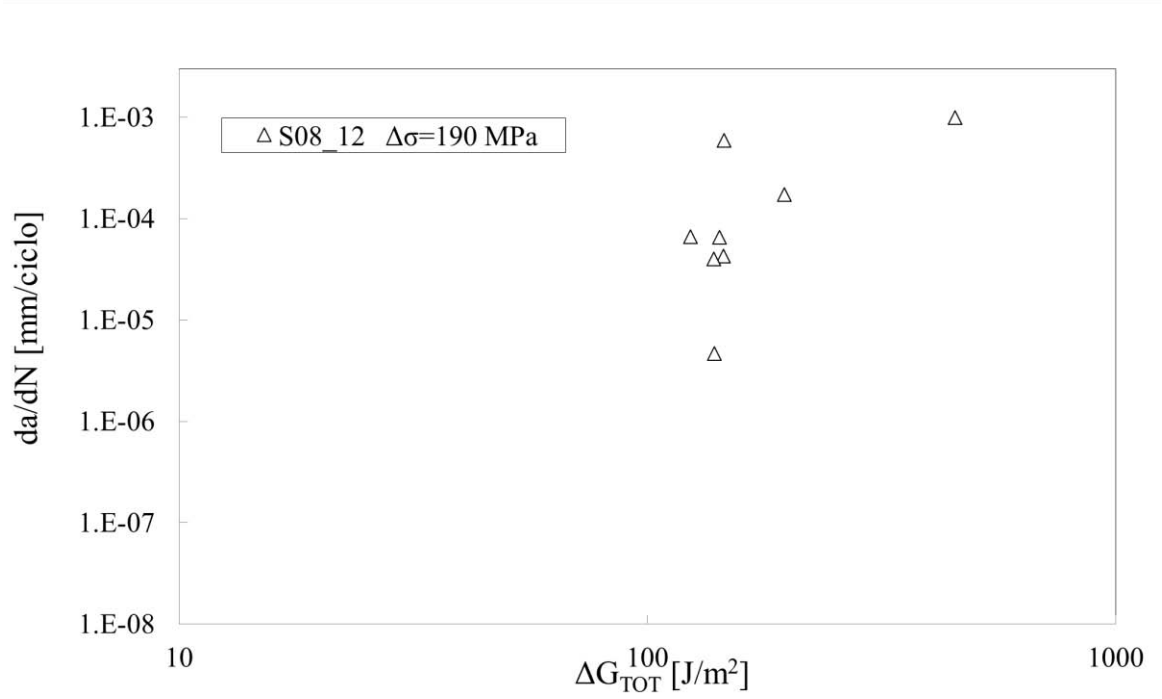


Fig.5.12 curva di Paris in ΔG_{TOT} per il provino S08_12.

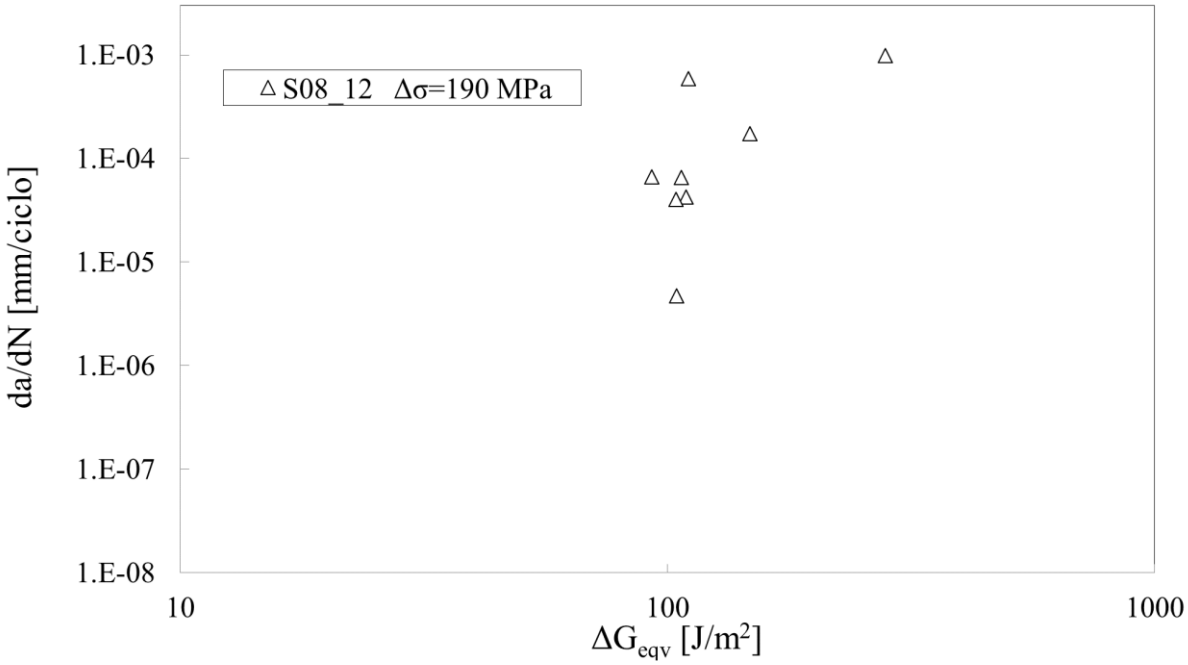


Fig.5.13 curva di Paris in ΔG_{eqv} per il provino S08_12

5.7.4 Provino S08_13

L'andamento del parametro media delle delaminazioni per il provino S08_13, sollecitato con una tensione massima σ_{max} di 200 MPa (basso carico), è riportato in *Fig. 5.14*

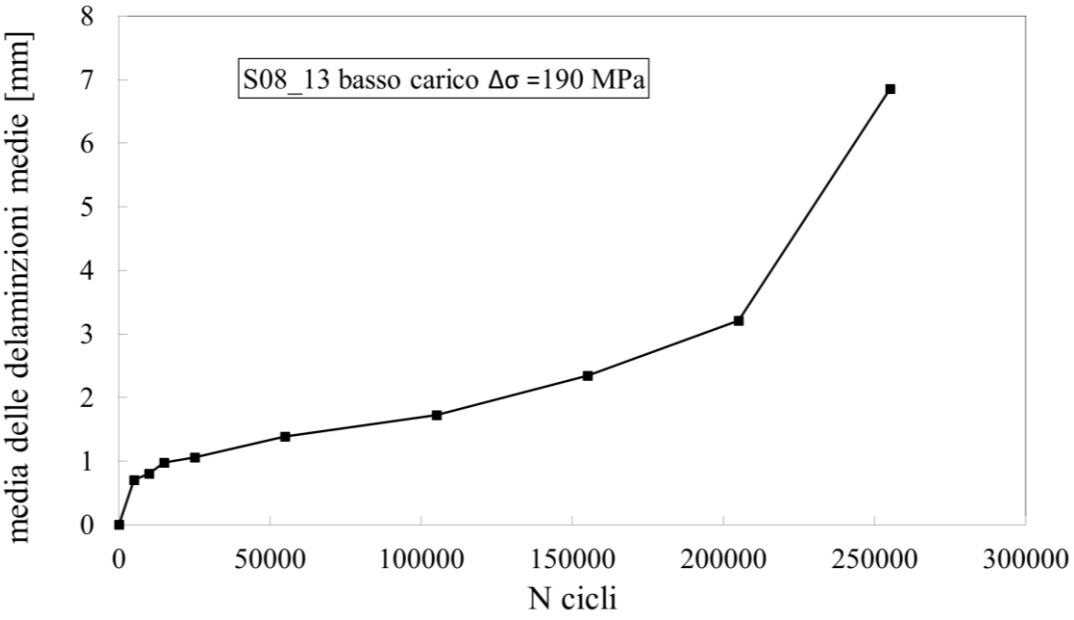


Fig.5.14 propagazione della media delle delaminazioni medie. Provino S08_13.

I valori delle componenti del SERR sono stati ricavati dalle curve di *Fig 5.15* e *5.16* al pari di quanto fatto per il provino S08_12. I risultati sono sintetizzati nella tabella seguente.

N cicli	media delle delaminaz medie	da/dN	GI	GII	G_TOT	ΔGeqv
0	0	0.000140385	90.119	106.28	196.4	147.6317
5000	0.701923077	1.98901E-05	72.759246	76.3555	149.1197	111.8577
10000	0.801373626	3.48352E-05	71.7587067	75.00297	146.7673	110.0892
15000	0.975549451	8.24176E-06	70.3957347	73.34534	143.748	107.8209
25000	1.057967033	1.10714E-05	69.8729273	72.77045	142.6509	106.9972
55000	1.39010989	6.68132E-06	68.16634	70.99297	139.1694	104.3838
105000	1.724175824	1.23516E-05	66.6219894	69.09179	135.7264	101.7966
155000	2.341758242	1.7478E-05	63.6380793	64.10446	127.7595	95.80733
205000	3.215659341	7.28681E-05	61.1009187	57.88973	119.013	89.26465
255000	6.859065934	0.000026898	121.292513	78.83123	200.192	152.3451

Tab.5 provino S08_13. Dati curva di Paris

In *Fig. 5.15* è riportata la curva di Paris che si ottiene in termini di ΔG_{TOT}.

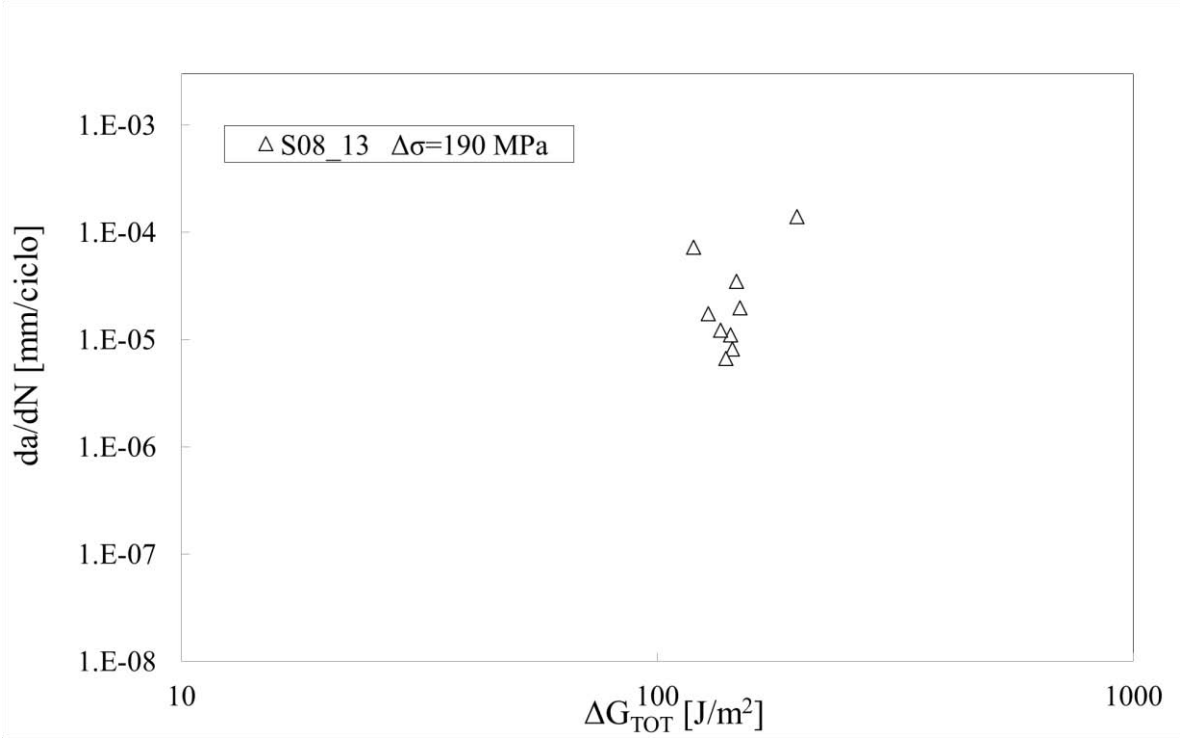


Fig.5.15 curva di Paris in ΔG_{TOT} per il provino S08_13

Un andamento analogo si riscontra considerando la curva di Paris in termini di ΔG_{eqv}.

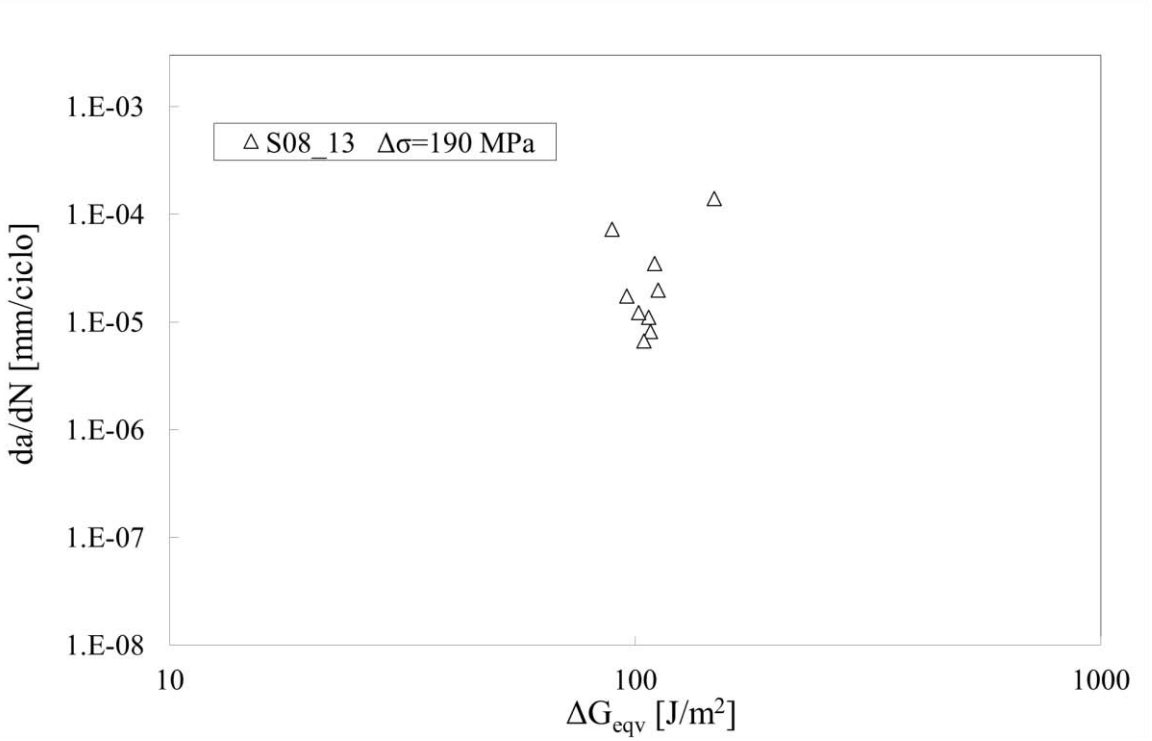


Fig.5.16 curva di Paris in ΔG_{eqv} per il provino S08_13

5.7.5 Provino S08_17

Il provino S08_17, come si è visto nel capitolo 4, ha terminato la prova in *run-out* senza giungere a rottura.

L'andamento del parametro *media delle delaminazioni medie* per il provino S08_17, sollecitato con una tensione massima σ_{max} di 150 MPa (basso carico), è riportato in *Fig. 5.17.*

Si può vedere come tale curva sia caratterizzata da un numero di punti superiore rispetto alle curve viste in precedenza, in quanto l'estensione della prova, che ha raggiunto i $2 \cdot 10^6$ cicli, ha permesso di monitorare con 20 misurazioni l'evoluzione del danneggiamento del provino. Come per le altre curve riportanti l'andamento della *media delle delaminazioni medie*, si può notare una fase iniziale in cui tale parametro cresce rapidamente, successivamente a $3 \cdot 10^5$ cicli, la velocità di propagazione inizia a calare di conseguenza si entra nella seconda fase della vita a fatica del provino quella in cui le delaminazioni tendono a rallentare il proprio avanzamento fino a stabilizzarsi. Da $1 \cdot 10^6$ a $1.6 \cdot 10^6$ si

osserva un appiattimento della curva che testimonia proprio questa stabilizzazione delle quattro delaminazioni critiche, ed il loro apparente arresto.

Le analisi ultrasoniche, con le quali si è in grado di valutare il danneggiamento lungo la larghezza del provino, hanno tuttavia evidenziato un continuo avanzare del fronte di delaminazione anche durante gli intervalli temporali in cui le osservazioni microscopiche effettuate sui bordi del provino esibivano un apparente arresto della propagazione.
A partire da $1.6 \cdot 10^6$ cicli si osserva un'ulteriore accelerazione dei fronti di cricca, non sufficiente però a provocare la rottura della giunzione prima di $2 \cdot 10^6$ cicli.

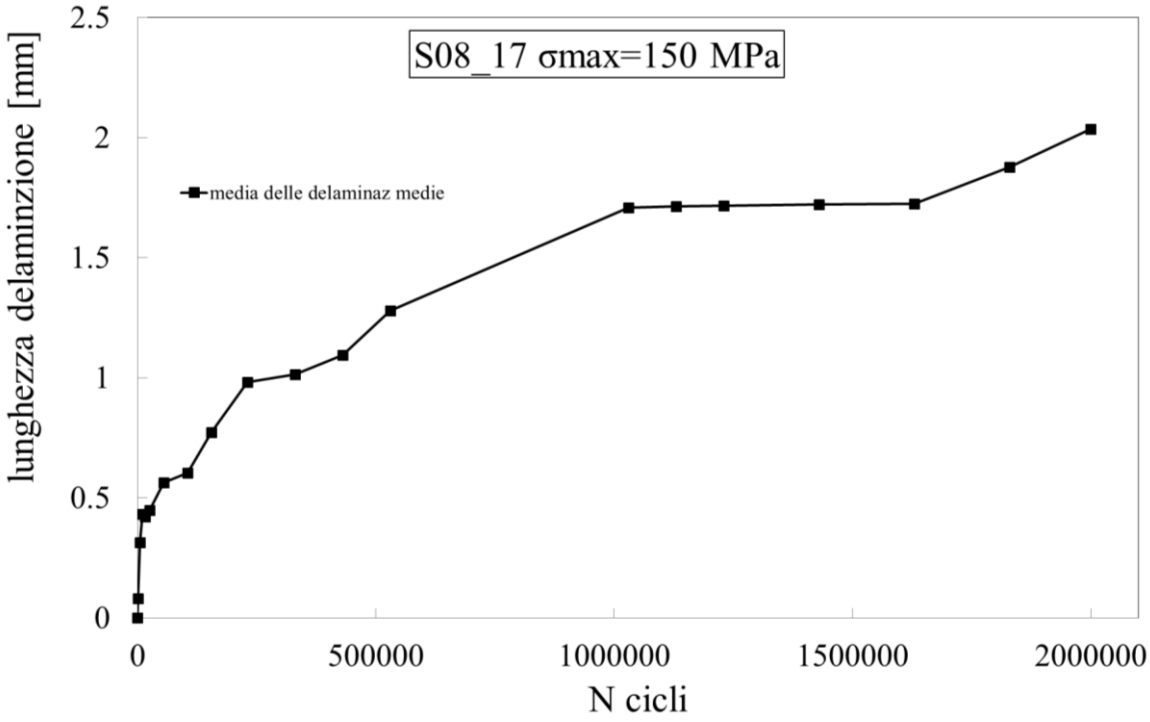


Fig.5.17 propagazione della media delle delaminazioni medie. Provino S08_17.

Di seguito sono riportati gli andamenti delle componenti del SERR e le relative linee di tendenza (polinomiali) lungo la prima interfaccia al propagare della delaminazione, calcolate per giunzioni di *lay-up* $[0]_8$, *overlap* 8 mm soggette ad una tensione $\Delta\sigma = 142.5$ MPa.

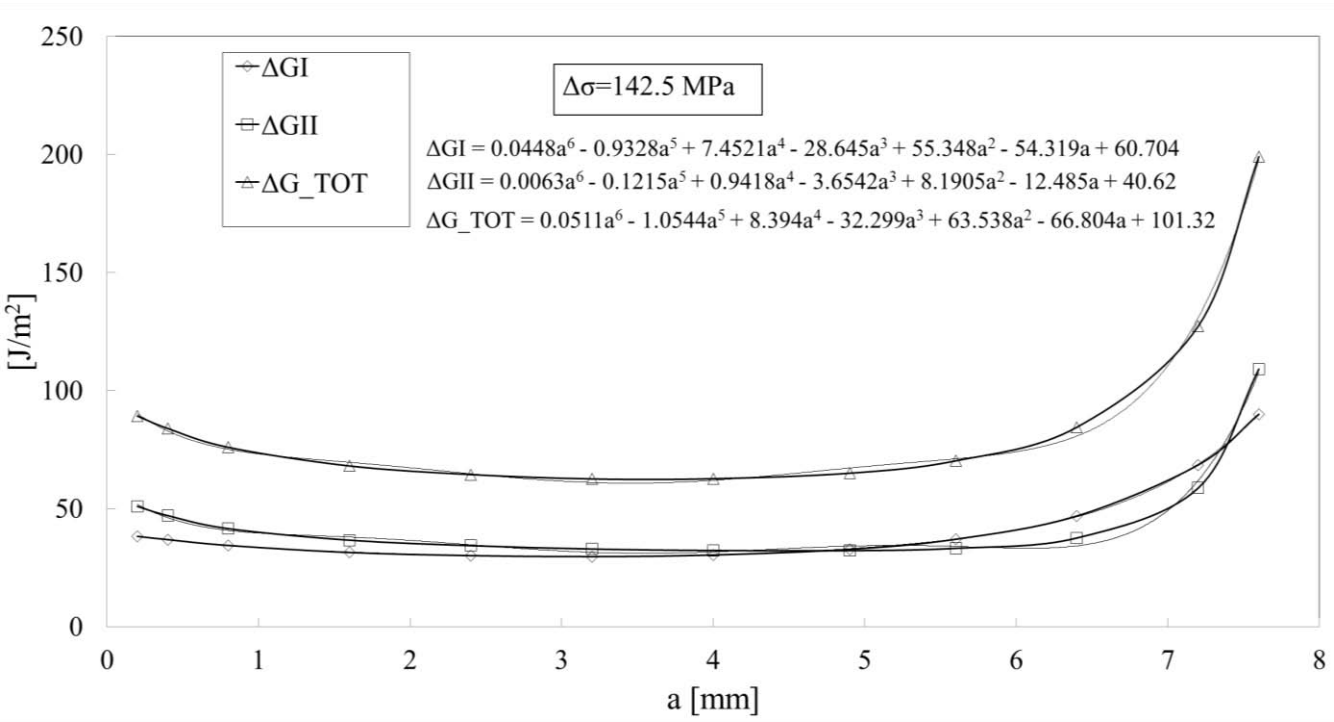


Fig. 5.18 andamento delle componenti del SERR e relative linee di tendenza (polinomiali) lungo la prima interfaccia al propagare della delaminazione, lunghezza di sovrapposizione w=8, Δσ=142.5 MPa (basso carico),

I risultati ottenuti relativi alla velocità di propagazione (calcolate come rapporto incrementale) e alle componenti del SERR sono riportati in *Tab.* 6

N cicli	media delle delaminaz medie	da/dN	ΔGI	ΔGII	ΔG_TOT	ΔGeqv
0	0	8.1593E-05	60.704	40.62	101.32	76.98824
1000	0.081593407	5.8242E-05	56.62517	39.65389	96.27506	72.95719
5000	0.31456044	2.3626E-05	48.27253	37.39826	85.66675	64.59817
10000	0.432692308	-2.143E-06	45.48983	36.48647	81.97221	61.72943
15000	0.421978022	2.7198E-06	45.70983	36.56375	82.2695	61.95937
25000	0.449175824	3.7912E-06	45.16289	36.36955	81.52834	61.38642
55000	0.562912088	8.1319E-07	43.25288	35.62346	78.87218	59.34175
105000	0.603571429	3.3516E-06	42.69983	35.38027	78.07591	58.73162
155000	0.771153846	2.8099E-06	40.98431	34.48833	75.46823	56.74426
230000	0.981897092	3.1112E-07	39.7297	33.56852	73.2932	55.10314
330000	1.013008898	8.1096E-07	39.59994	33.44786	73.04265	54.91539
430000	1.09410521	1.8419E-06	39.30595	33.14859	72.44894	54.47172
530000	1.278296703	8.5879E-07	38.78796	32.53871	71.31947	53.63189
1030000	1.707692308	4.3956E-08	37.64923	31.38789	69.02044	51.91981
1130000	1.712087912	2.7473E-08	37.63527	31.37763	68.99605	51.90152

N cicli	media delle delaminaz medie	da/dN	ΔGI	ΔGII	ΔG_TOT	ΔGeqv
1230000	1.714835165	2.8846E-08	37.62651	31.37123	68.98079	51.89007
1430000	1.720604396	1.2363E-08	37.60802	31.35782	68.94869	51.86599
1630000	1.723076923	7.6923E-07	37.60006	31.35209	68.93491	51.85565
1830000	1.876923077	9.3083E-07	37.06276	31.01191	68.05051	51.19046
2000000	2.035164835	1.0176E-06	36.42679	30.69478	67.08747	50.46355

Tab.6 provino S08_17. Dati curva di Paris

In *Fig. 5.19* è riportata la curva di Paris per il provino S08_17, che si ottiene in termini di ΔG_{TOT}.

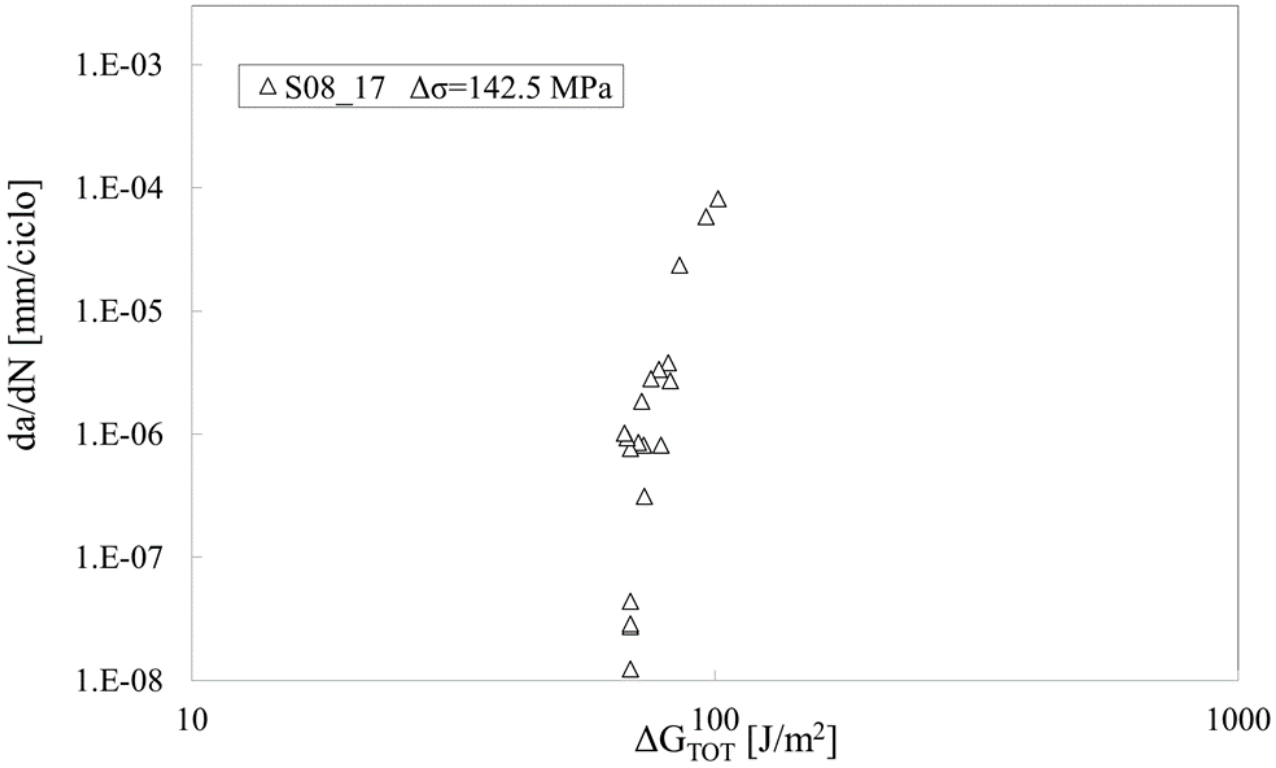


Fig.5.19 curva di Paris in ΔG_{TOT} per il provino S08_17

Dalla precedente curva di Paris relativa ad un provino con lunghezza di sovrapposizione pari a 8 mm caricato a basso carico, si può osservare come gli intervalli temporali caratterizzati da piccole variazioni per quanto riguarda la lunghezza di cricca si traducano in tratti a propagazione a ΔG quasi costante. Quindi si può dire che le continue variazioni della velocità di propagazione combinate con valori pressoché costanti di ΔG producono dei tratti tendenzialmente verticali nella curva di Paris.

Un andamento analogo, anche se traslato rispetto all'asse delle ascisse, si riscontra considerando la curva di Paris in termini di ΔG_{eqv}.

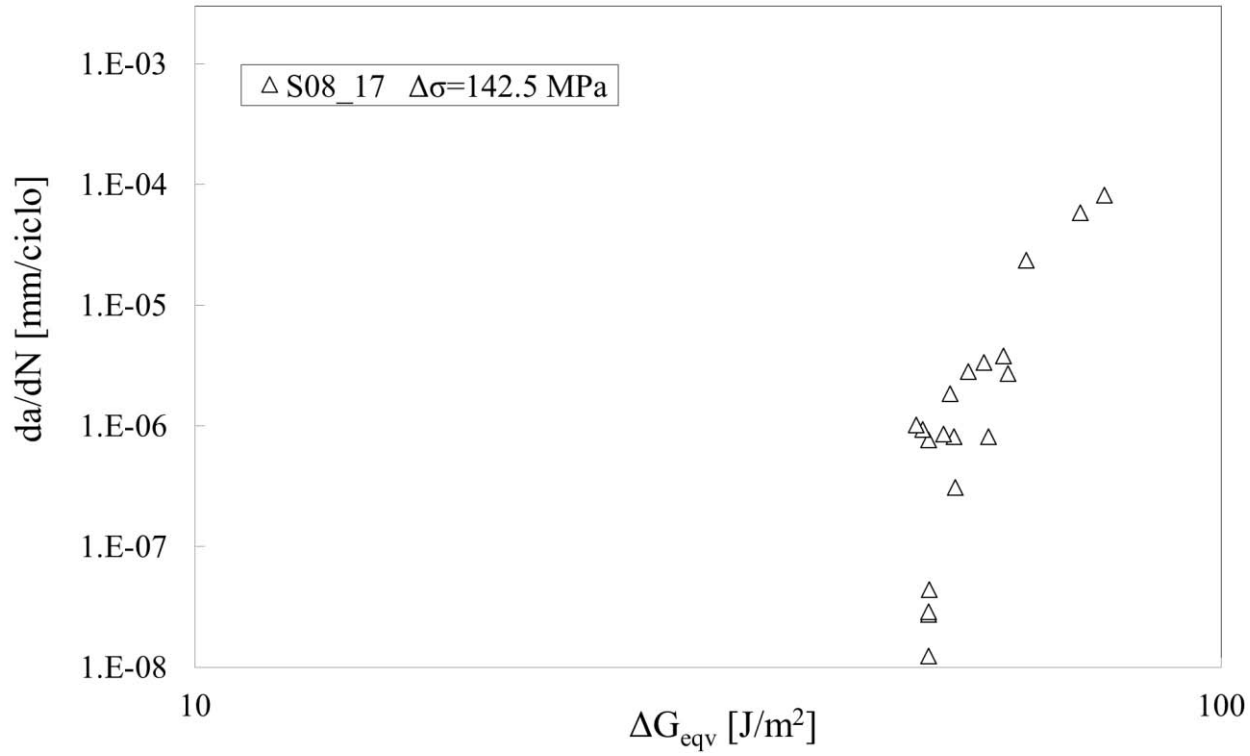


Fig.5.20 curva di Paris in ΔG_{eqv} per il provino S08_17

5.7.6 Provino S08_16

Dal momento che il provino S08_17 caricato con una tensione massima di 150 MPa ha terminato la prova in *run out*, come visto nel capitolo 4 relativo alle prove sperimentali, si è deciso per la prova successiva di incrementare il carico massimo a 160 MPa ipotizzando una rottura compresa tra $1 \cdot 10^6$ e $2 \cdot 10^6$. Confermando le ipotesi il provino S08_16 si è rotto dopo 1766376 cicli.

L'andamento del parametro media delle delaminazioni per il provino S08_16, sollecitato con una tensione massima σ_{max} di 160 MPa (basso carico), è riportato in *Fig 5.21*

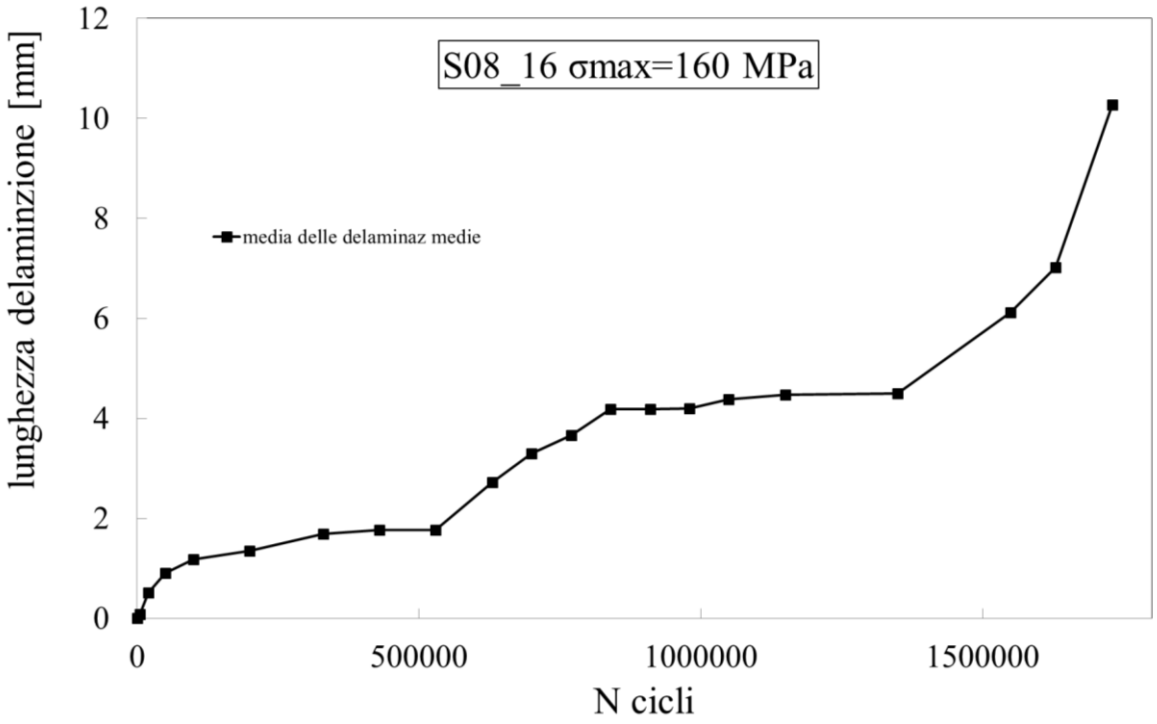


Fig.5.21 propagazione della media delle delaminazioni medie. Provino S08_16.

Si può vedere come la propagazione della *media delle delaminazioni medie* presenta un andamento atipico in quanto dopo una prima fase di rapido avanzamento e successivo assestamento, si osserva un'ulteriore accelerazione da $5 \cdot 10^5$ a $9 \cdot 10^5$ cicli la quale tuttavia non porta a rottura la giunzione. Si assiste infatti, nell'intervallo che va da $9 \cdot 10^5$ cicli a $1.4 \cdot 10^6$ cicli, ad un ulteriore rallentamento del parametro *media delle delaminazioni medie* e di conseguenza di tutte le 4 delaminazioni critiche che propagano dai bordi di giunzione verso l'interno. Solo a partire da $1.4 \cdot 10^6$ cicli si entra nella terza ed ultima fase della vita a fatica della giunzione che termina con la rottura del provino

Di seguito sono riportati gli andamenti delle componenti del SERR e le relative linee di tendenza (polinomiali) lungo la prima interfaccia al propagare della delaminazione, calcolate per giunzioni di *lay-up* $[0]_8$, *over-lap* 8 mm soggette ad una tensione $\Delta\sigma$ = 152 MPa.

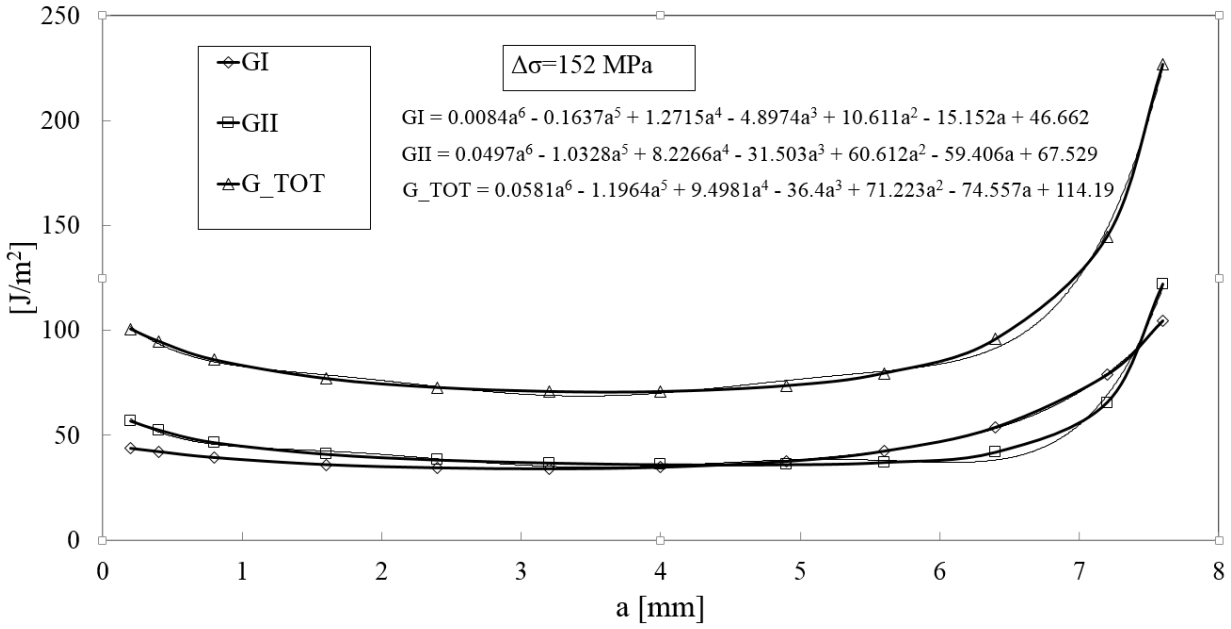


Fig. 5.22 andamento delle componenti del SERR e relative linee di tendenza (polinomiali) lungo la prima interfaccia al propagare della delaminazione, lunghezza di sovrapposizione w=8, $\Delta\sigma$=152 MPa (basso carico).

I risultati ottenuti relativi alla velocità di propagazione (calcolate come rapporto incrementale) e alle componenti del SERR sono riportati in *Tab.* 7

N cicli	media delle delaminaz medie	da/dN	GI	GII	G_TOT	ΔGeqv
0	0	1.61538E-05	46.662	67.529	114.19	86.59655
5000	0.080769	2.9011E-05	45.50488	63.10998	108.6139	82.17454
20000	0.515934	1.31136E-05	41.08077	49.23321	90.31356	67.91946
50000	0.909341	5.30769E-06	38.74776	44.9516	83.69963	62.88948
100000	1.174725	1.72802E-06	37.6436	43.8036	81.44825	61.20187
200000	1.347527	2.61412E-06	37.04408	43.28857	80.33442	60.37084
330000	1.687363	7.85714E-07	36.04044	42.22422	78.26864	58.82064
430000	1.765934	6.59341E-08	35.83366	41.92666	77.765	58.43959
530000	1.772527	9.50275E-06	35.81668	41.90059	77.72202	58.40702
630000	2.722802	8.18681E-06	34.02322	37.06159	71.10957	53.34607
700000	3.295879	5.20016E-06	33.7886	35.04311	68.88722	51.6295
770000	3.65989	7.46468E-06	34.07773	34.87549	69.04115	51.71722

N cicli	media delle delaminaz medie	da/dN	GI	GII	G_TOT	ΔGeqv
840000	4.182418	9.41915E-08	35.13278	36.05935	71.35256	53.39711
910000	4.189011	5.10204E-08	35.15096	36.08159	71.39413	53.42745
980000	4.192582	2.62951E-06	35.16086	36.09368	71.41675	53.44396
1050000	4.376648	8.81868E-07	35.71981	36.74692	72.66423	54.35369
1150000	4.464835	1.51099E-07	36.02193	37.06807	73.3065	54.82124
1350000	4.495055	8.11401E-06	36.13068	37.17719	73.53122	54.98464
1550000	6.117857	1.12706E-05	48.37913	37.95656	87.28943	65.06633
1630000	7.019505	3.24973E-05	71.3317	58.25854	131.4389	97.52238
1730000	10.26923	5.93597E-06				

Tab.7 provino S08_16. Dati curva di Paris

In *Fig. 5.23* è riportata la curva di Paris per il provino S08_16, che si ottiene in termini di ΔG_{TOT}.

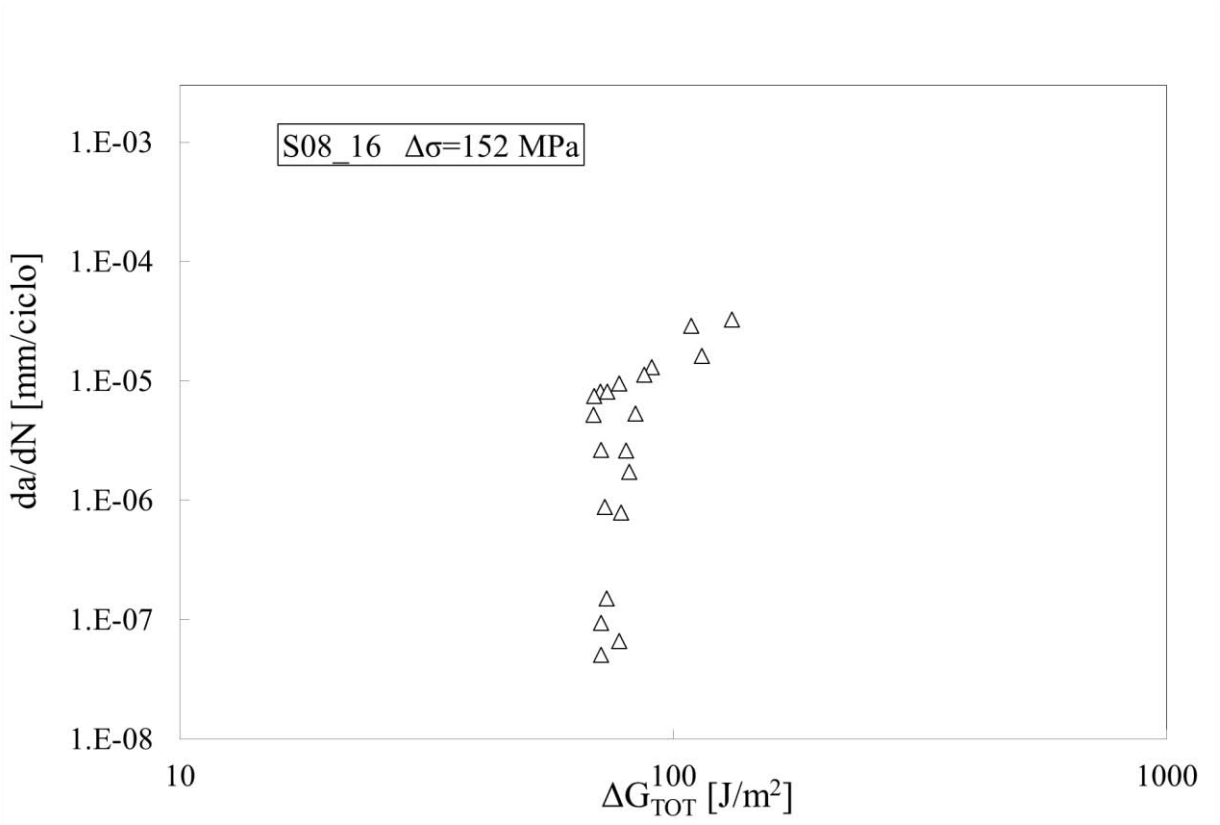


Fig.5.23 curva di Paris in ΔG_{TOT} per il provino S08_16

Le considerazioni fatte per la curva di Paris relativa al provino S08_17 sono valide anche in questo caso. Un andamento analogo, anche se traslato rispetto all'asse delle ascisse, si riscontra considerando la curva di Paris in termini di ΔG_{eqv}.

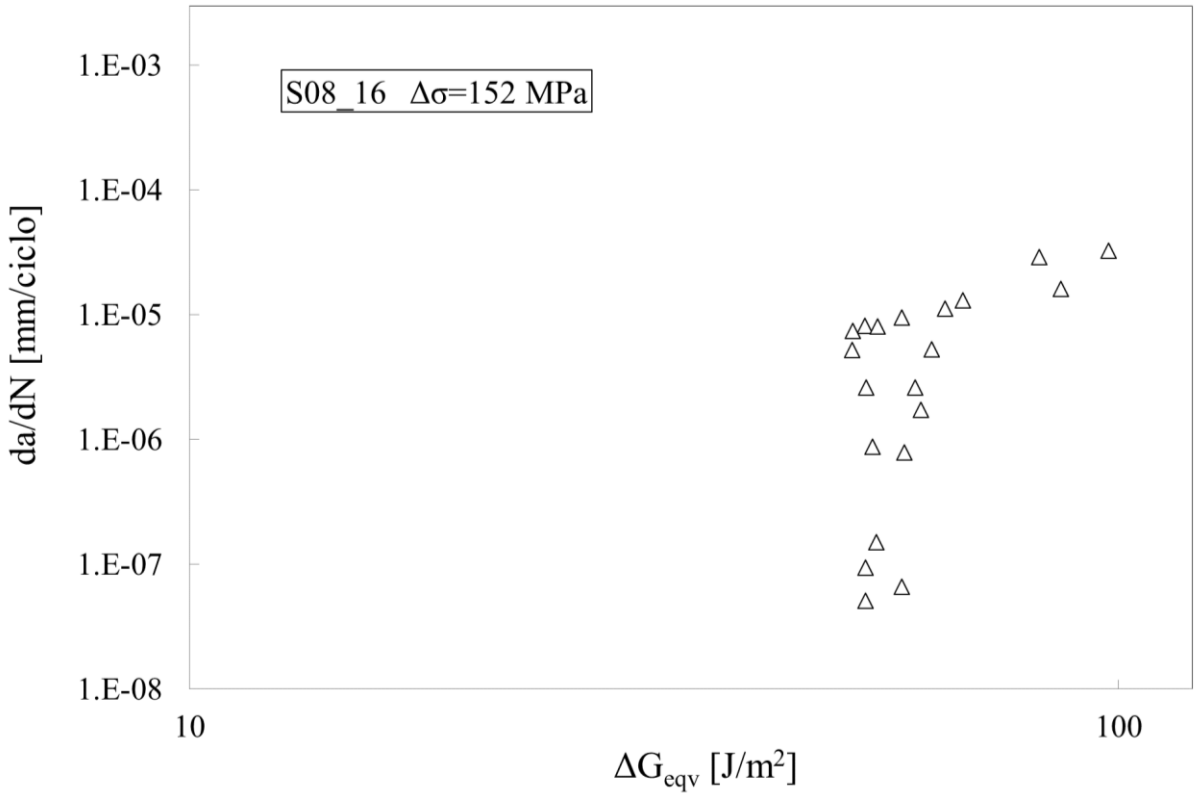


Fig.5.24 curva di Paris in ΔG_{eqv} per il provino S08_16

Se si uniscono in un unico grafico le cuve di Paris relative ai giunti con overlap pari a 8 mm si ottiene la *Fig 5.25* (in ΔG_{TOT}) e la *Fig 5.26* (in ΔG_{eqv})

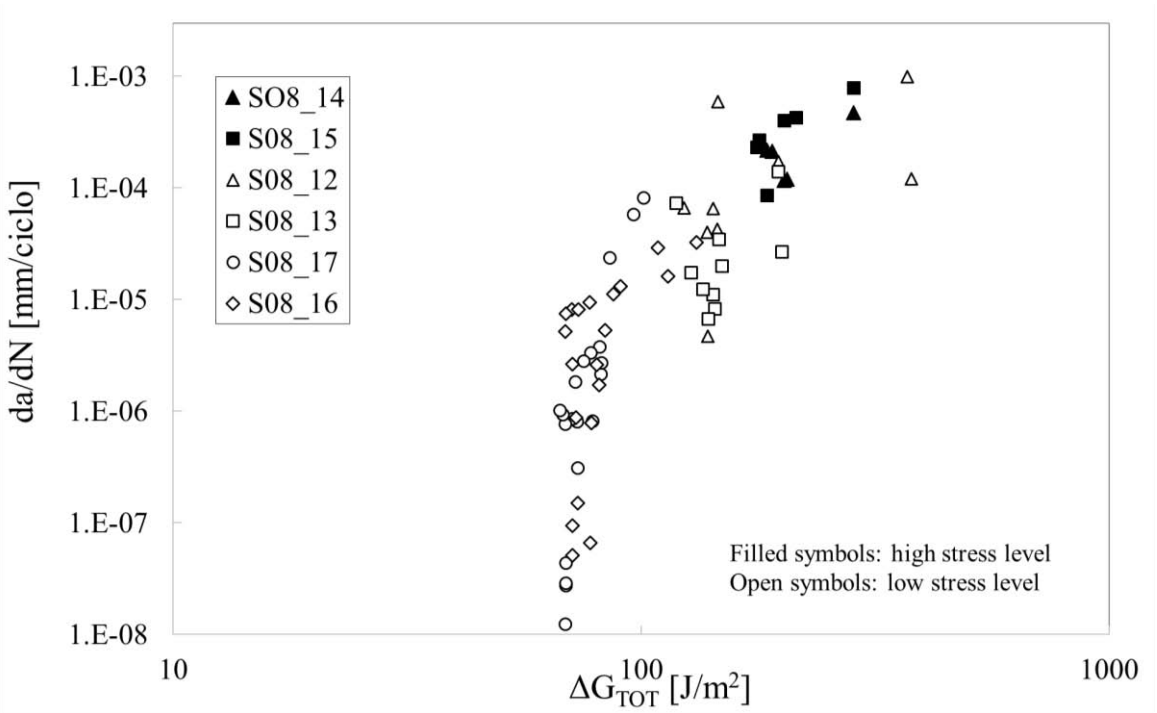


Fig.5.25 curve di Paris in ΔG_{TOT} relative ai provini $[0]_8$ testati

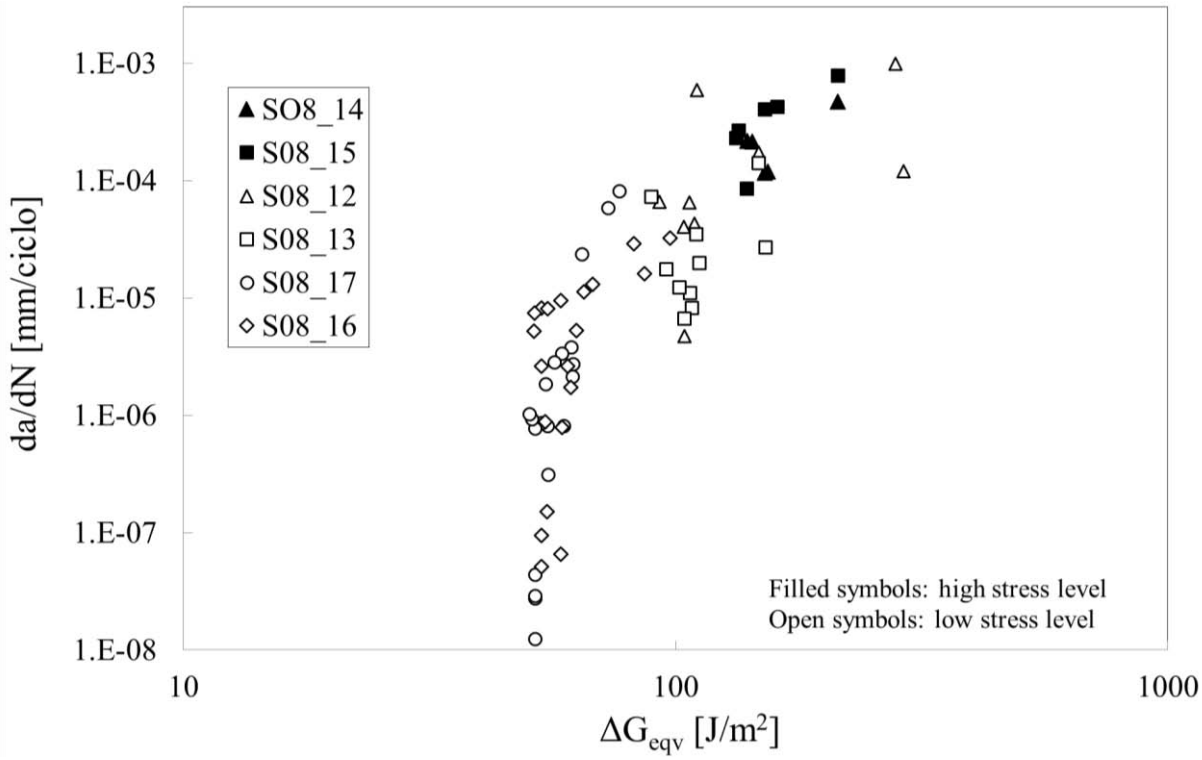


Fig.5.26 curve di Paris in ΔG_{eqv} relative ai provini $[0]_8$ testati

Come si può ben osservare dalle due figure precedenti i punti sperimentali dei giunti soggetti a basso carico si posizionano prevalentemente nella parte bassa e a sinistra del grafico, mentre la parte alta e a destra è popolata dai punti sperimentali relativi all'alto carico; le velocità di propagazione variano infatti di ordini di grandezza.

Altro fattore degno di nota è l'elevata dispersione ottenuta nella curva di Paris; dispersione che non diminuisce nel caso dell'utilizzo del ΔG_{eqv} come riferimento anziché del ΔG_{TOT}. Il risultato più evidente è una traslazione complessiva dei punti sperimentali verso sinistra e quindi a valori di ΔG inferiori. Molti evidenti sono inoltre i tratti tendenzialmente verticali dei provini S08 soggetti a basso carico i quali aumentano la dispersione.

Se si confrontano questi risultati con i dati raccolti dall'attività sperimentale condotta da Polloni Simone [7], dati rielaborati successivamente nel lavoro di tesi di Ferrari Michele [6] ,si ottiene

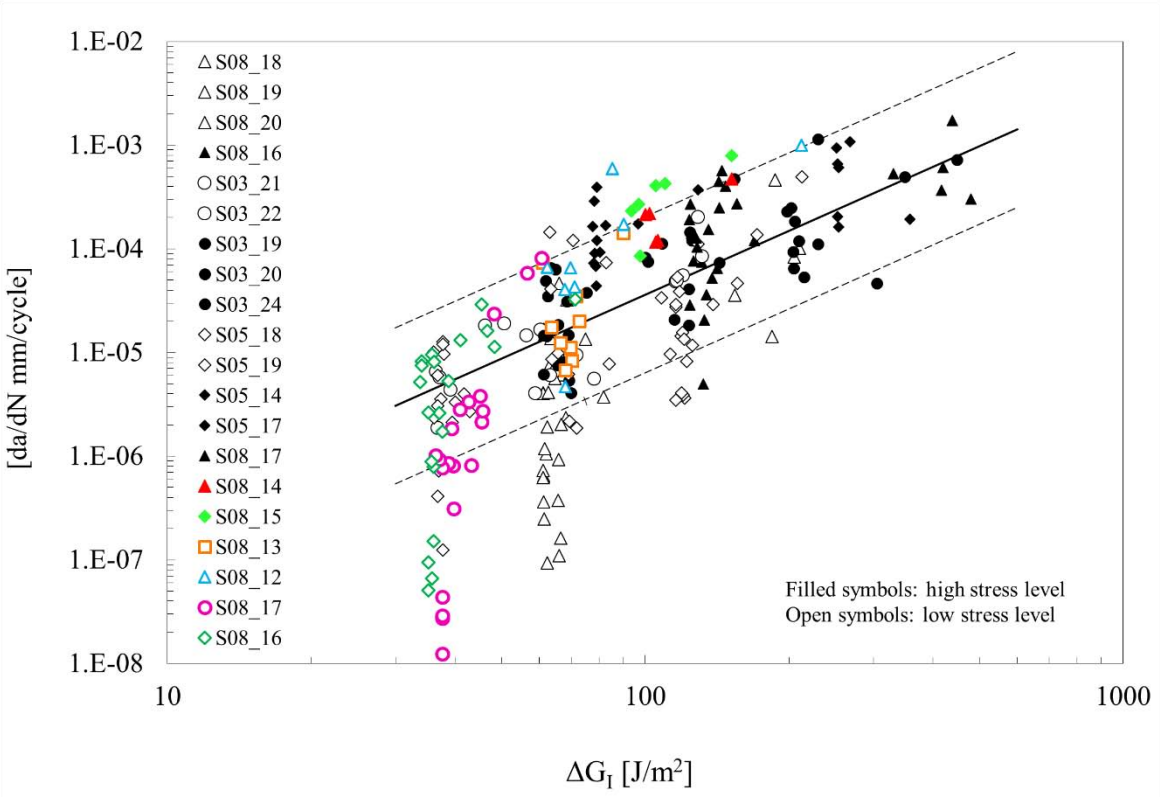


Fig.5.27 curve di Paris in ΔG_I provini con lay-up $[0]_8$ e over-lap 3,5,8 mm

I risultati di Polloni Simone [7] sono riportati in bianco e nero mentre quelli ottenuti nel presente lavoro di tesi sono riportati a colori. Si possono inoltre distinguere i dati relativi alle prove condotte ad alto da quelle condotte a basso carico: i simboli "pieni" fanno riferimento all'alto carico, mentre quelli "vuoti" si riferiscono al basso carico.

Come si può vedere la distribuzione dei valori risulta essere molto dispersiva e casuale, per tale motivo non è possibile ottenere una funzione univoca che possa interpolare i dati raffigurati e ricavare quindi una curva Paris che sia valida per i provini stepped con diversa lunghezza di sovrapposizione.

Inoltre come già descritto nel capitolo relativo alle simulazioni FEM, i valori di G calcolati decrescono con l'aumentare della lunghezza di delaminazione e si verifica un salto di energia durante il passaggio della delaminazione tra i diversi strati proprio perché è presente un punto di discontinuità dato dalla giunzione; a causa di ciò la serie dei punti nel grafico non è rappresentato da un unico andamento crescente ma vi sono più andamenti che avanzano da destra verso sinistra dati dai valori di G decrescenti e

posizionati in zone differenti per la presenza del punto di discontinuità, a causa della lunghezza di sovrapposizione differenti e in più per i differenti livelli di carico applicato. Si può notare anche una dipendenza delle curve dalla lunghezza di sovrapposizione; infatti nel passaggio di *overlap* da 3 a 8 mm i punti si muovono da sinistra a destra. Questo è conseguenza del fatto che per gli S03 si registrano valori di ΔG inferiori rispetto agli S05 e agli S08. Per ottenere durate di vite a fatica simili è necessario infatti applicare una forza ai provini crescente all'aumentare della lunghezza di sovrapposizione e questo implica che l'energia rilasciata sarà maggiore all'aumentare dell'*overlap*.

Se ci si focalizza esclusivamente sulle giunzioni con lunghezza di sovrapposizione pari ad 8 mm il grafico che si ottiene è il seguente

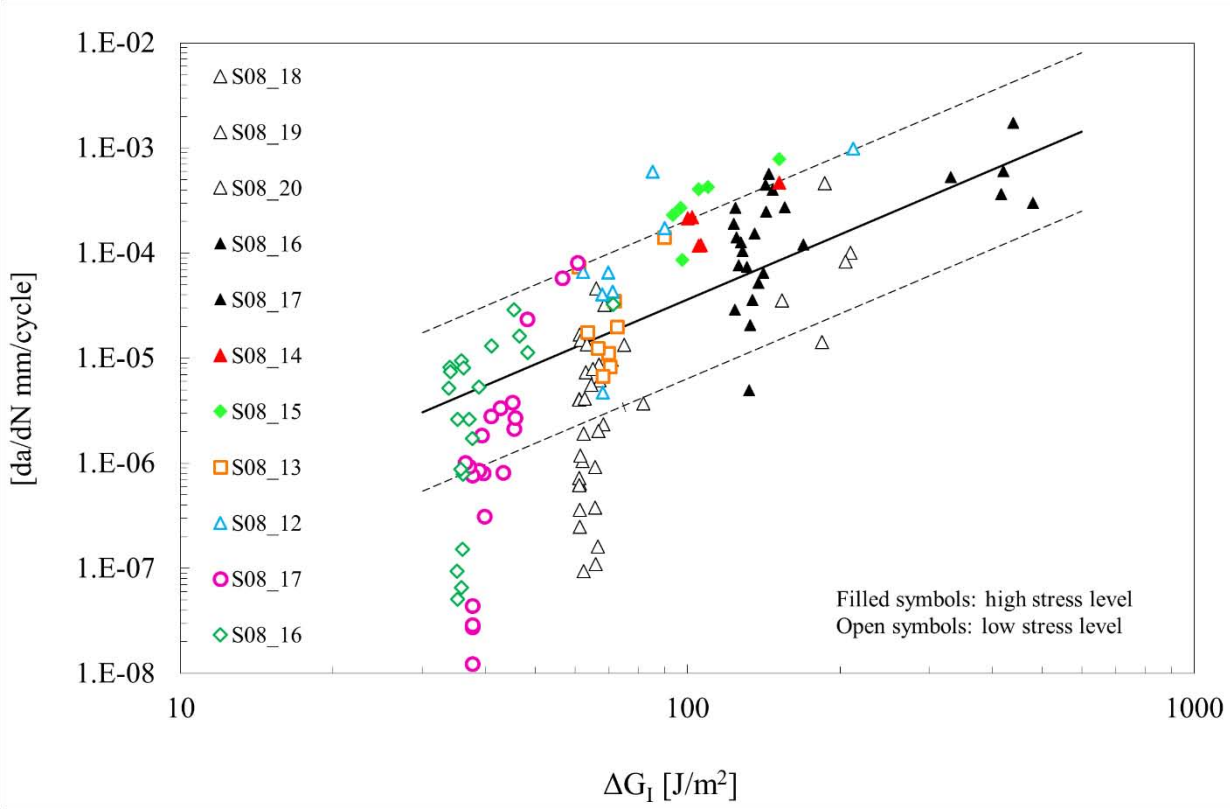


Fig.5.28 curve di Paris in ΔG_I provini con lay-up $[0]_8$ e overlap 8 mm

Si può osservare una certa corrispondenza dei risultati relativi all'alto carico, mentre per quanto riguarda il basso carico solamente i provini S08_12 e S08_13, testati con una tensione massima di 200 MPa, risultano sovrapposti ai risultati sperimentali di Polloni Simone [7]. I punti che costituiscono le curve di Paris delle giunzioni S08_17 e S08_16 (rappresentate rispettivamente in viola e verde) risultano traslati verso sinistra rispetto a quelli trovati per i provini S08_18, S08_19, S08_20, mentre risultano approssimativamente sovrapposti alle curve di Paris calcolate per provini con lunghezza

di sovrapposizione pari a 5 mm. Un analogia si può invece riscontrare osservando le curve di Paris relative al basso carico e *overlap* 8mm. Infatti sia le curve tracciate con i risultati di Simone Polloni [7] sia quelle ottenute con i dati della presente tesi, si caratterizzano per avere intervalli temporali contraddistinti da piccole variazioni per quanto riguarda la lunghezza di cricca, i quali si traducano in tratti a propagazione a ΔG quasi costante. Quindi le continue variazioni della velocità di propagazione combinate con valori pressoché costanti di ΔG producono dei tratti tendenzialmente verticali nelle curve di Paris.

Come osservato dalle simulazioni FEM, la propagazione della delaminazione avviene prevalentemente secondo il Modo I. Se si assume che ΔG_I sia la forza motrice per la propagazione della delaminazione, la legge di Paris può essere espressa nel seguente modo:

$$\frac{da}{dN} = D[\Delta G_I(a)]^n \tag{5.28}$$

dove *D* e *n* sono parametri che possono essere ricavati interpolando i dati sperimentali.

Si è deciso quindi di fittare i dati relativi alle prove effettuate in laboratorio in modo da ottenere le equazioni delle curve di Paris al variare della probabilità di sopravvivenza.

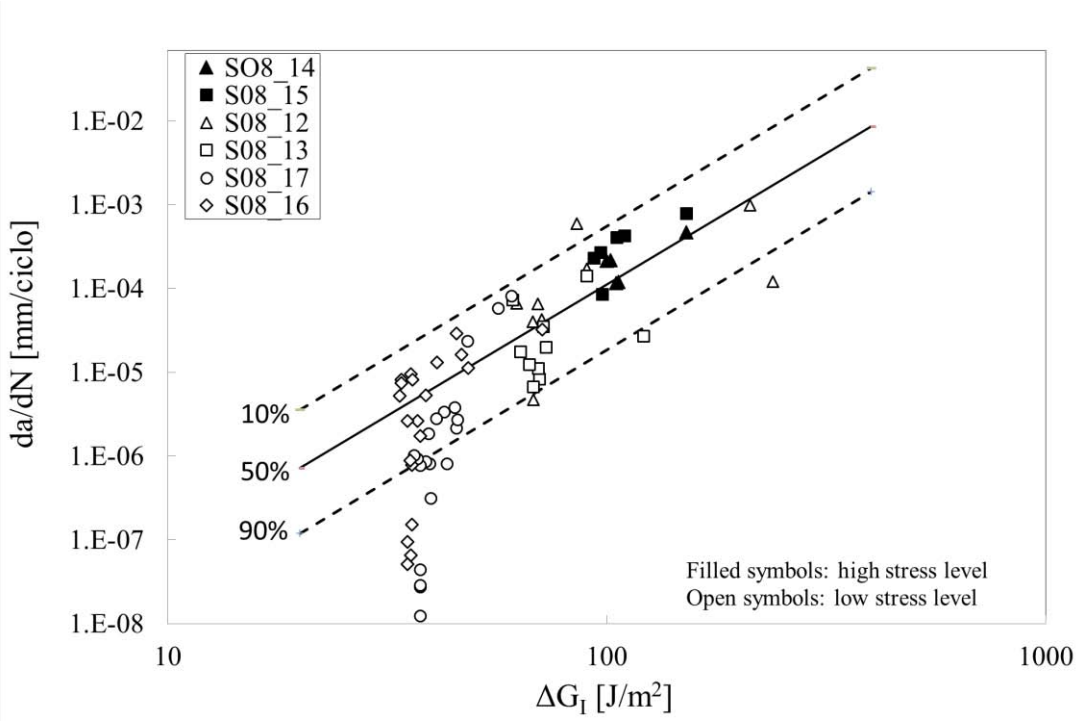


Fig.5.29 interpolazione dei dati con una legge di tipo Paris per 3 diverse probabilità di sopravvivenza.S08

Per effettuare tale interpolazione sono stati considerati solo i punti aventi velocità di propagazione superiore a $1 \cdot 10^{-6}$ mm/ciclo. I risultati sono riassunti in *Tab.8* dove sono anche riportati i valori delle costanti ricavati dall'interpolazione dei dati di S.Polloni.

Probabilità di sopravvivenza	**Presente lavoro**	**S.Polloni**
10%	$D=3 \cdot 10^{-10}$	
	$n=3.13$	
50%	$D=6 \cdot 10^{-11}$	$D=2.88 \cdot 10^{-9}$
	$n=3.13$	$n=2.05$
90%	$D=1 \cdot 10^{-11}$	$D=1.63 \cdot 10^{-8}$
	$n=3.13$	$n=2.05$

Tab.8 confronto coefficienti delle equazioni di Paris al variare della P.S

Dall'analisi di tali valori si può vedere che il valore di *n* risulta superiore rispetto a quello trovato in precedenza, ciò significa che la propagazione è avvenuta più rapidamente, la retta ha infatti una pendenza maggiore rispetto ai dati trovati in precedenza, ciò ha comportato come si è visto sperimentalmente la rottura anticipata del provino rispetto alle previsioni iniziali. Per esplicitare più chiaramente questo concetto si veda la *Fig.5.29.* In

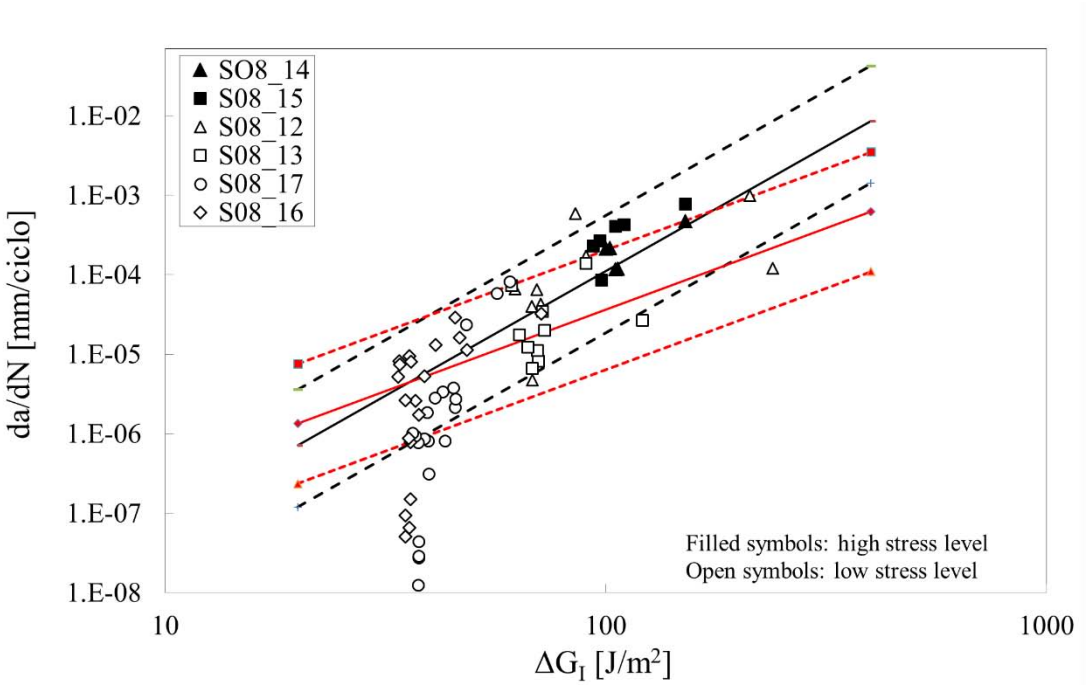


Fig.5.30 confronto rette interpolazione al variare della probabilità di sopravvivenza

nero si evidenziamo le rette relative ai provini S08 testati in questo lavoro di tesi, mentre in rosso le rette relative al precedente lavoro di tesi.

Nella seconda parte del capitolo si riportano le curve di Paris relative alle prove sperimentali condotte su provini con *lay-up* $[0_2/45_5/0]$. Anche in questo caso il procedimento seguito per la costruzione delle curve è il medesimo di quello seguito per le giunzioni con *lay-up* $[0]_8$ analizzate in precedenza. Dalla curva riportante l'andamento della lunghezza delle varie delaminazioni e delle cricche trasversali al variare del numero di cicli, sono state estrapolate le curve relative alle 4 delaminazioni critiche le quali partendo dai punti di giunzione esterni (1,8,9,10) delaminano verso l'interno del giunto fino a portare a cedimento il provino. A questo punto è stata calcolata la *media delle delaminazioni medie*, calcolando dapprima la media tra la lunghezza delle cricche *a1_int* e *a9_int* la media tra la lunghezza delle cricche *a8_int* e *a16_int* e infine è stata fatta una media complessiva delle due medie calcolate precedentemente trovando così il valore di tale parametro.
Determinato a questo punto l'andamento della media delle delaminazioni medie e quindi la velocità di propagazione della cricca tramite il rapporto incrementale è stato possibile calcolare i valori di ΔG_I, ΔG_{II}, ΔG_{TOT} per ogni lunghezza di cricca tramite l'estrapolazione dalle relative linee di tendenza per l'interfaccia di propagazione interessata.

5.7.7 Provino SQI5_01

Il primo provino con *lay-up* $[0_2/45_5/0]$ considerato è l'SQI5_01, soggetto ad alto carico. L'andamento della *media delle delaminazioni medie* è riportato in *Fig.5.31*. Dal momento che tale parametro deriva dalla media delle lunghezze delle singole delaminazioni critiche che propagano all'interno della giunzione, si può riscontrare che l'andamento è del tutto simile a quello di una delaminazione critica caratterizzato dai tre periodi di inizio diffusione durato circa per il 20% della vita, proseguendo con il periodo di stasi presente per il 30% della vita ed infine il terzo e ultimo periodo in cui la delaminazione avanza più velocemente.

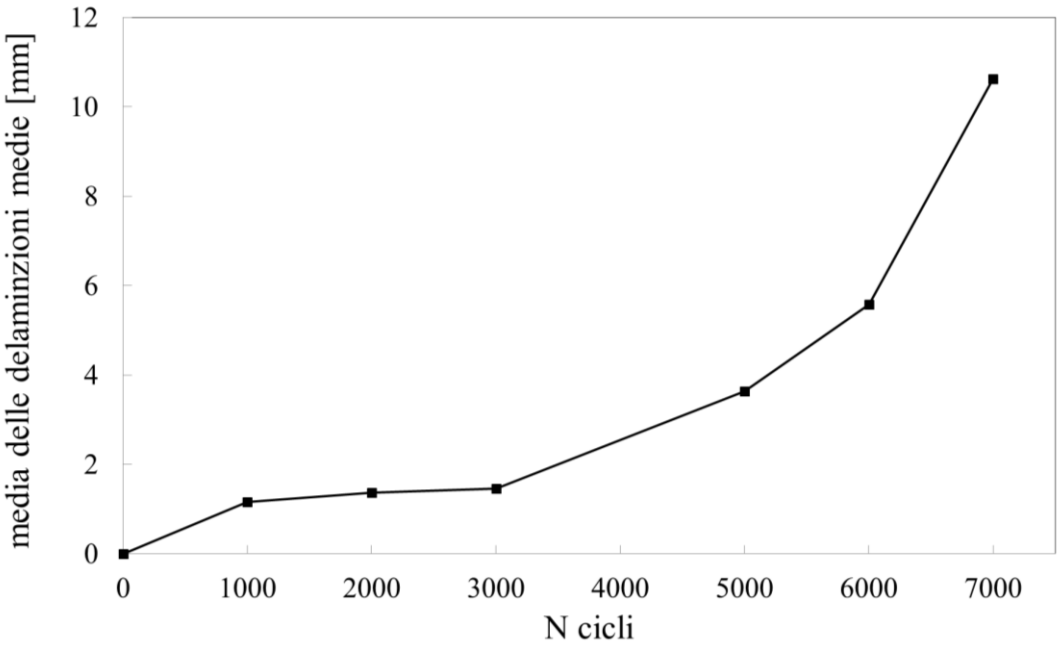


Fig.5.31 propagazione della media delle delaminazioni medie. Provino SQI5_01.

Di seguito sono riportati gli andamenti delle componenti del SERR e le relative linee di tendenza (polinomiali) lungo la prima, la seconda e la terza interfaccia al propagare della delaminazione. Per ottenere i valori di ΔG_I, ΔG_{II} e ΔG_{TOT} per un determinato valore di *a* è necessario sostituire alla variabile indipendente dei polinomi un certo valore del parametro *media delle delaminazioni medie*

Il provino SQI5_01 è stato testato con un'ampiezza di tensione di 137.55 MPa, le curve delle componenti del SERR che si ottengono mediante analisi FEM sono le seguenti

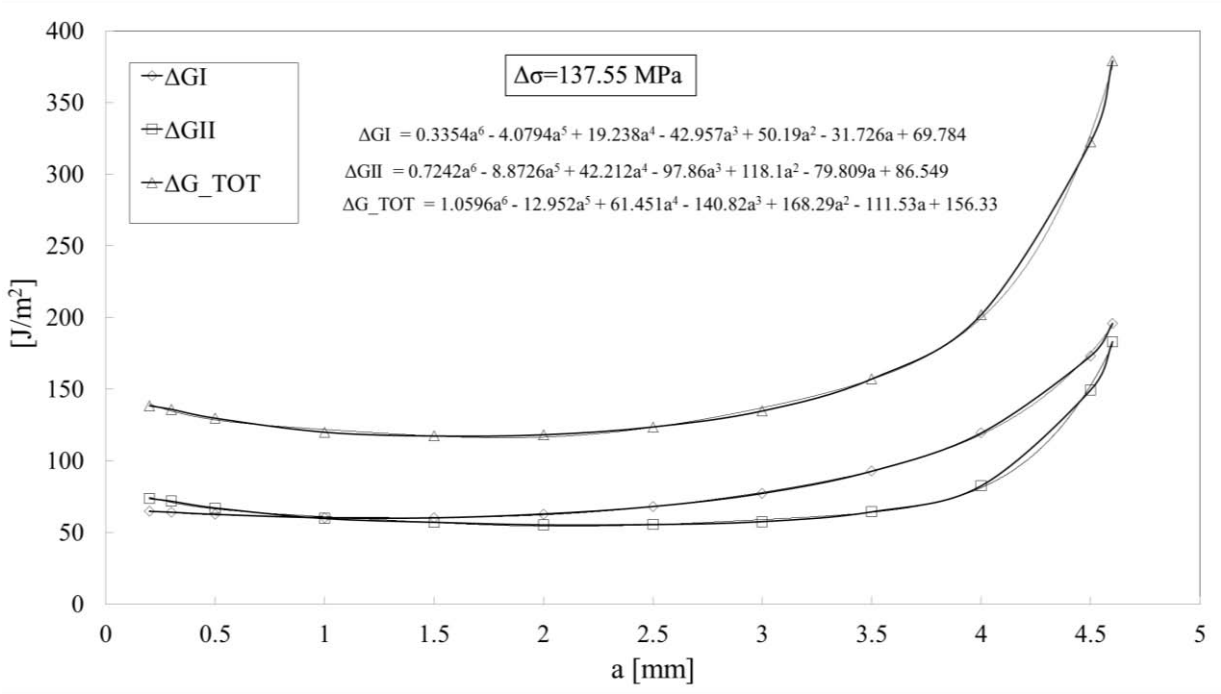


Fig. 5.32 andamento delle componenti del SERR e relative linee di tendenza (polinomiali) lungo la prima interfaccia al propagare della delaminazione, lunghezza di sovrapposizione w=5, Δσ=137.55 MPa (basso carico).

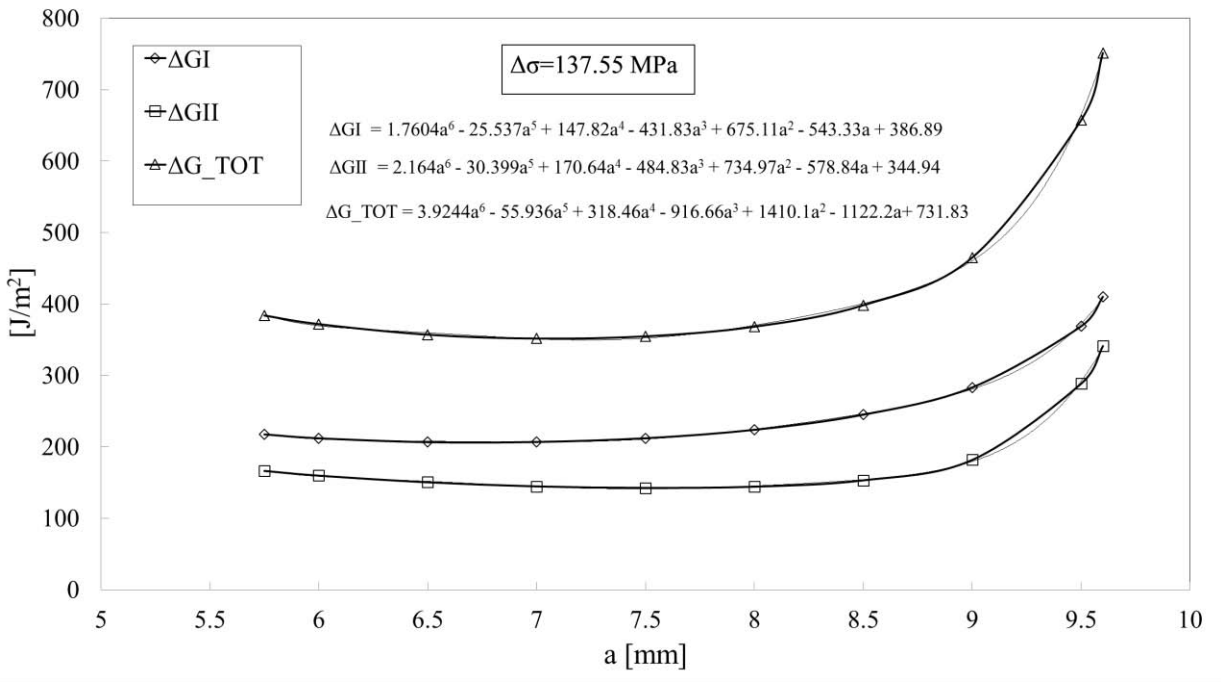


Fig. 5.33 andamento delle componenti del SERR e relative linee di tendenza (polinomiali) lungo la seconda interfaccia al propagare della delaminazione, lunghezza di sovrapposizione w=5, Δσ=137.55 MPa (basso carico).

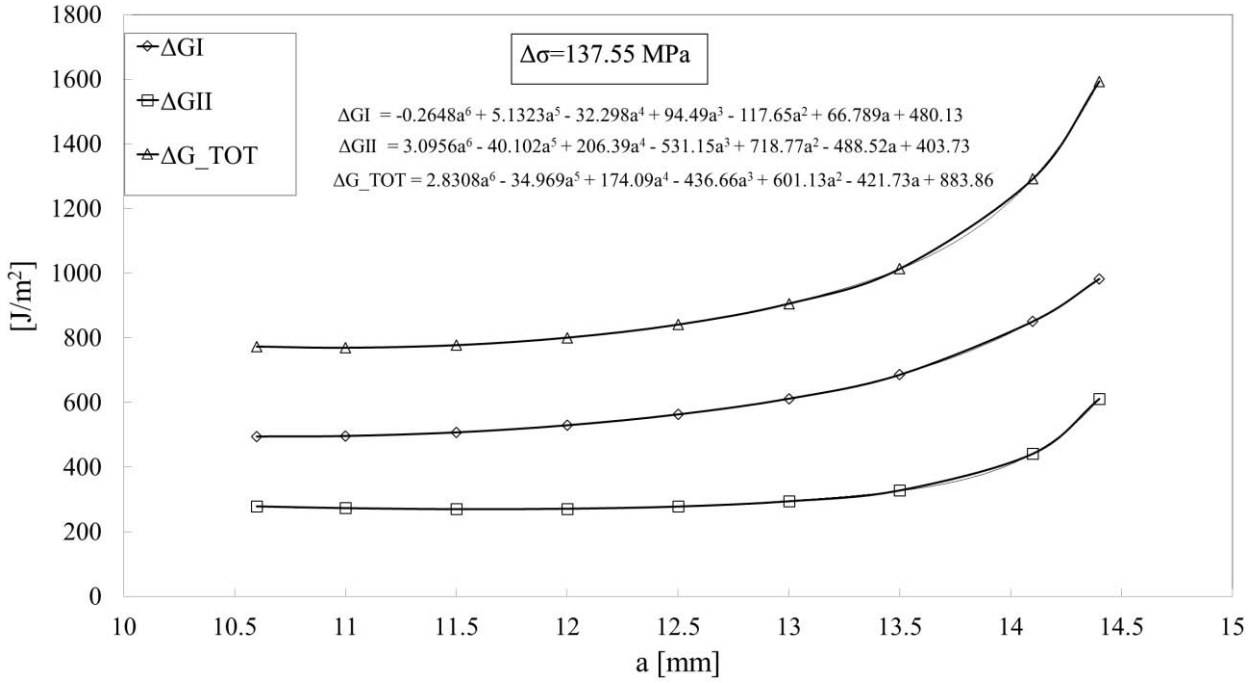


Fig. 5.34 andamento delle componenti del SERR e relative linee di tendenza (polinomiali) lungo la terza interfaccia al propagare della delaminazione, lunghezza di sovrapposizione w=5, Δσ=137.55 MPa (basso carico).

I risultati ottenuti relativi alla velocità di propagazione (calcolate come rapporto incrementale) e alle componenti del SERR sono riportati in *Tab.* 9

N cicli	media delle delaminaz medie	da/dN	ΔGI	ΔGII	ΔG_TOT	ΔGeqv
0	0	0.001165659	69.784	86.549	156.33	117.6992
1000	1.165659341	0.00020522	60.54098371	59.64816	120.1891	90.14351
2000	1.370879121	9.34066E-05	60.363534	57.90268	118.2659	88.71246
3000	1.464285714	0.001084203	60.36080437	57.13615	117.4965	88.14484
5000	3.632692308	0.00194164	97.86721498	66.22736	164.1401	124.5961
6000	5.574331952	0.005050119	230.2700109	179.8236	410.083	309.1216
7000	10.62445055	0.001517779	494.5288548	277.3738	771.907	594.1998

Tab.9 provino SQI5_01. Dati curva di Paris

In *Fig. 5.35* è riportata la curva di Paris per il provino SQI5_01, che si ottiene in termini di ΔG_{TOT}.

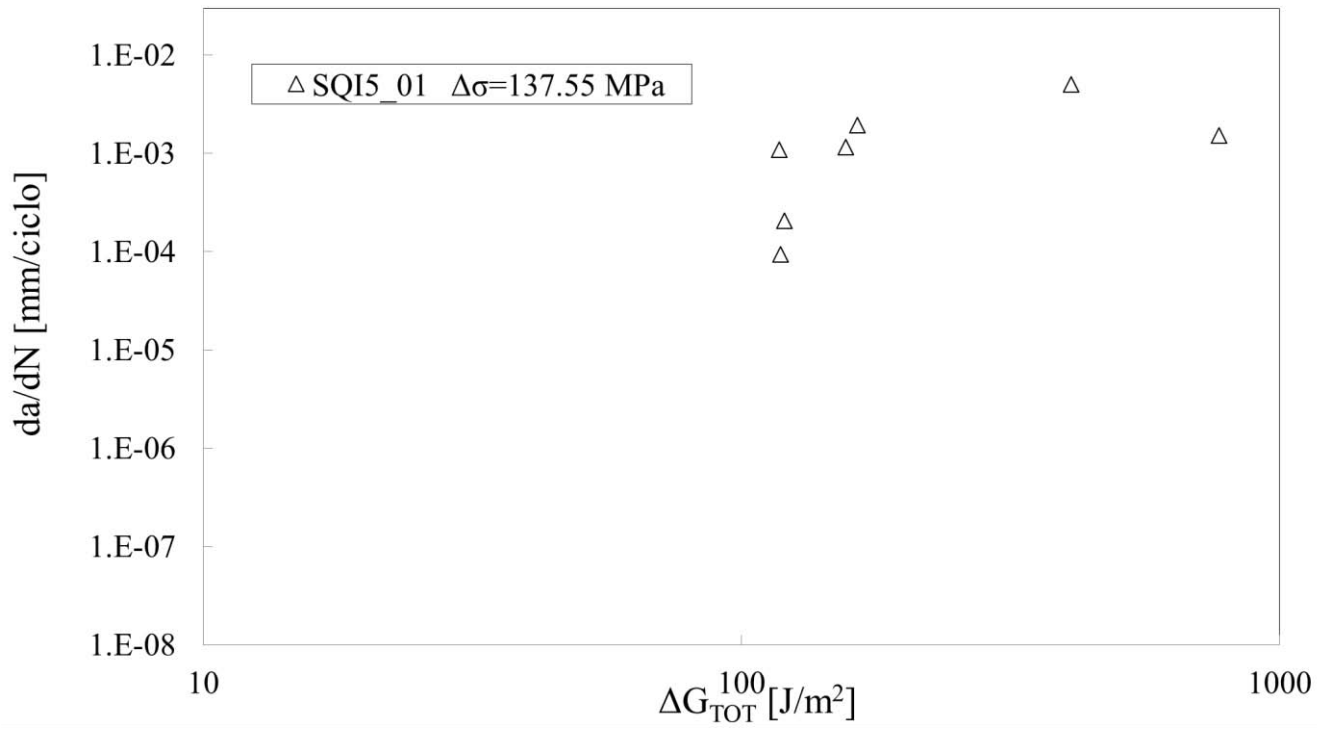


Fig.5.35 curva di Paris in ΔG_{TOT} per il provino SQI5_01

Un andamento analogo, anche se traslato rispetto all'asse delle ascisse, si riscontra considerando la curva di Paris in termini di ΔG_{eqv}.

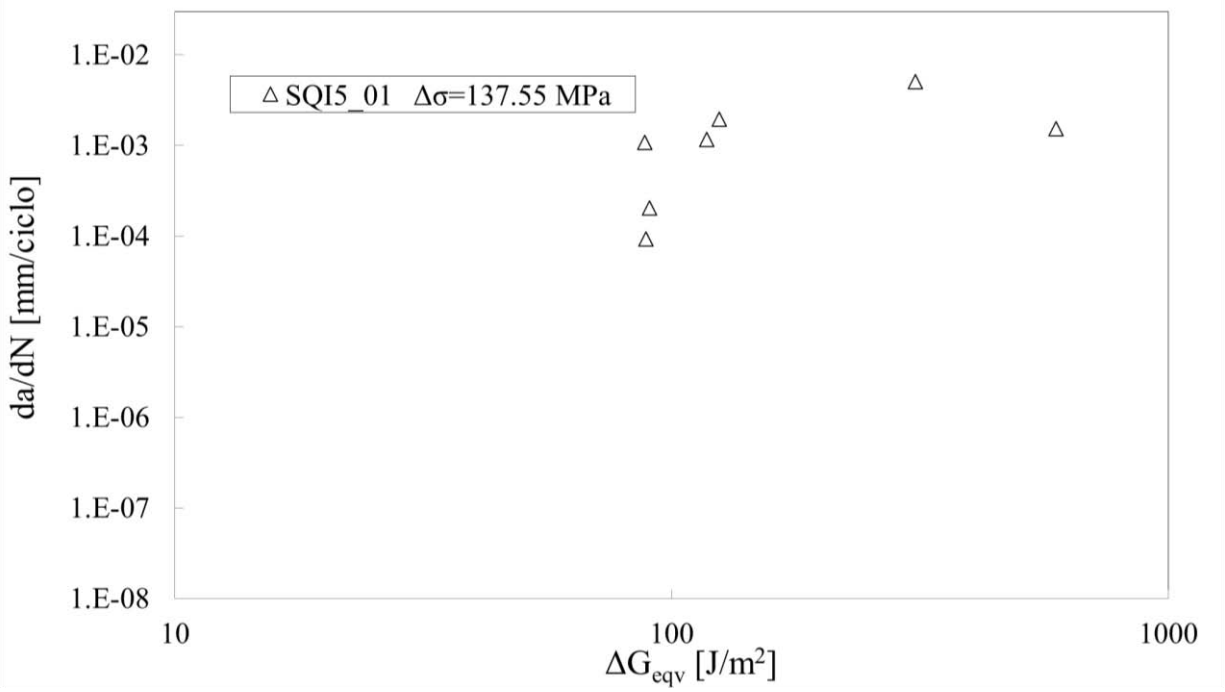


Fig.5.36 curva di Paris in ΔG_{eqv} per il provino SQI5_01

5.7.8 Provino SQI5_02

Il provino SQI5_02 è stato testato con la stessa ampiezza di tensione del provino SQI5_01 pari a 137.55 MPa. L'andamento del parametro media delle delaminazioni per il provino

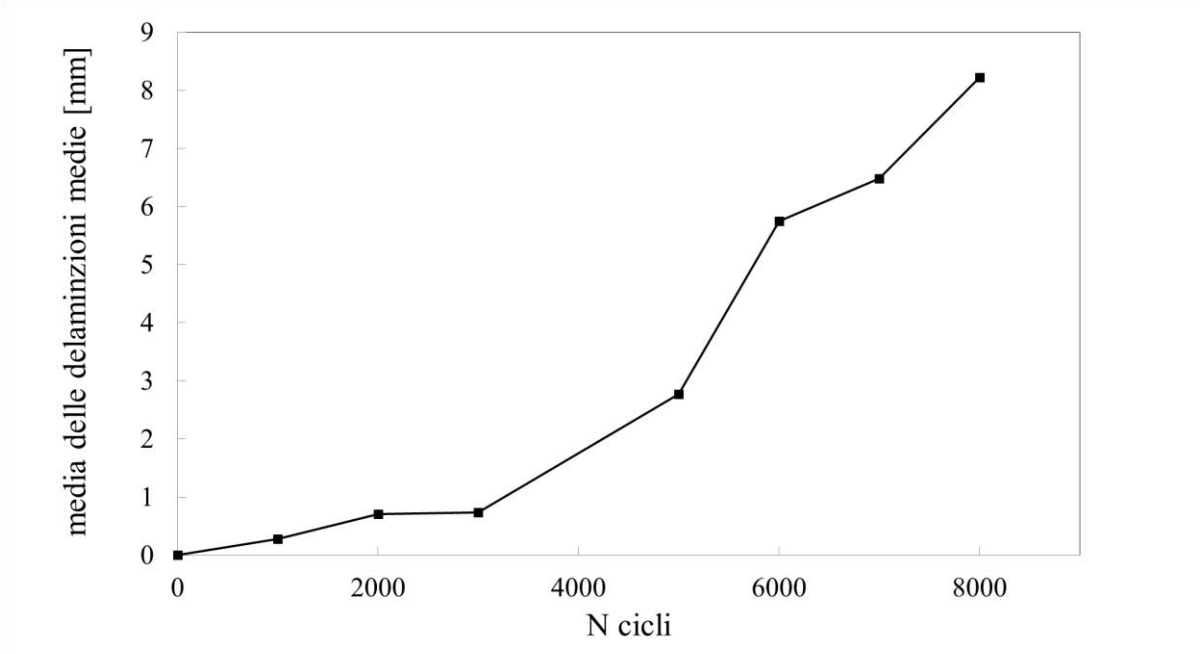


Fig.5.37 propagazione della media delle delaminazioni medie. Provino SQI5_02.

SQI5_02, sollecitato con una tensione massima σ_{max} di 144.8 MPa (alto carico), è riportato in *Fig.* 5.37

I valori delle componenti del SERR sono stati ricavati dalle curve di *Fig.* 5.30 e 5.31 al pari di quanto fatto per il provino SQI5_01. I risultati sono sintetizzati nella tabella seguente.

N cicli	media delle delaminaz medie	da/dN	ΔGI	ΔGII	ΔG_TOT	ΔGeqv
0	0	0.000276923	69.784	86.549	156.33	117.6992
1000	0.276923077	0.000426923	64.04162633	71.66065	135.7006	101.8836
2000	0.703846154	2.77473E-05	61.39692365	63.67521	125.0718	93.81447
3000	0.731593407	0.001018132	61.32351333	63.39676	124.72	93.54882
5000	2.767857143	0.002982692	72.80777127	57.09086	129.9046	97.89939
6000	5.750549451	0.000733242	217.9617824	166.8275	384.7781	290.2908
7000	6.483791209	0.00174011	207.9916697	151.9551	359.9463	272.141
8000	8.223901099	0.001027988	233.6368997	148.4882	382.2363	291.3372

Tab.10 provino SQI5_02. Dati curva di Paris

Nella figura seguente è riportata la curva di Paris per il provino SQI5_02, che si ottiene in termini di ΔG_{TOT}.

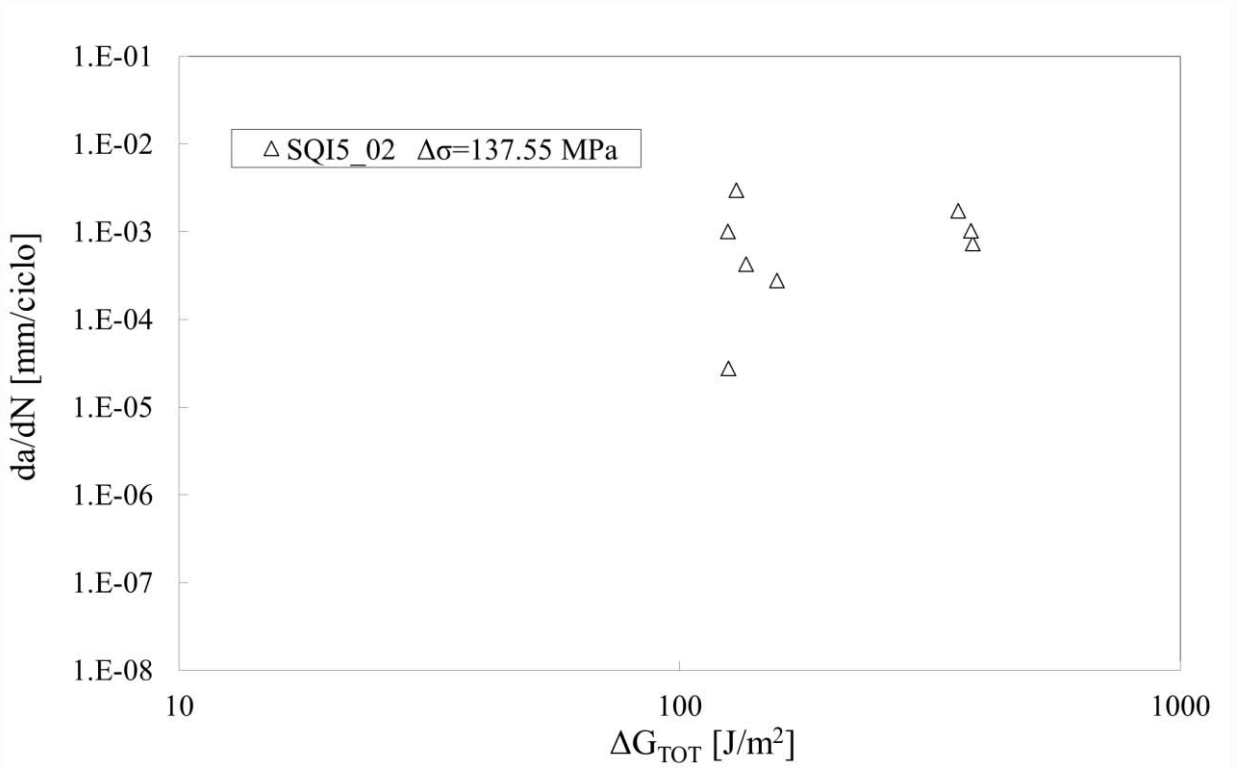


Fig.5.38 curva di Paris in ΔG_{TOT} per il provino SQI5_02

Un andamento analogo si riscontra considerando la curva di Paris in termini di ΔG_{eqv}

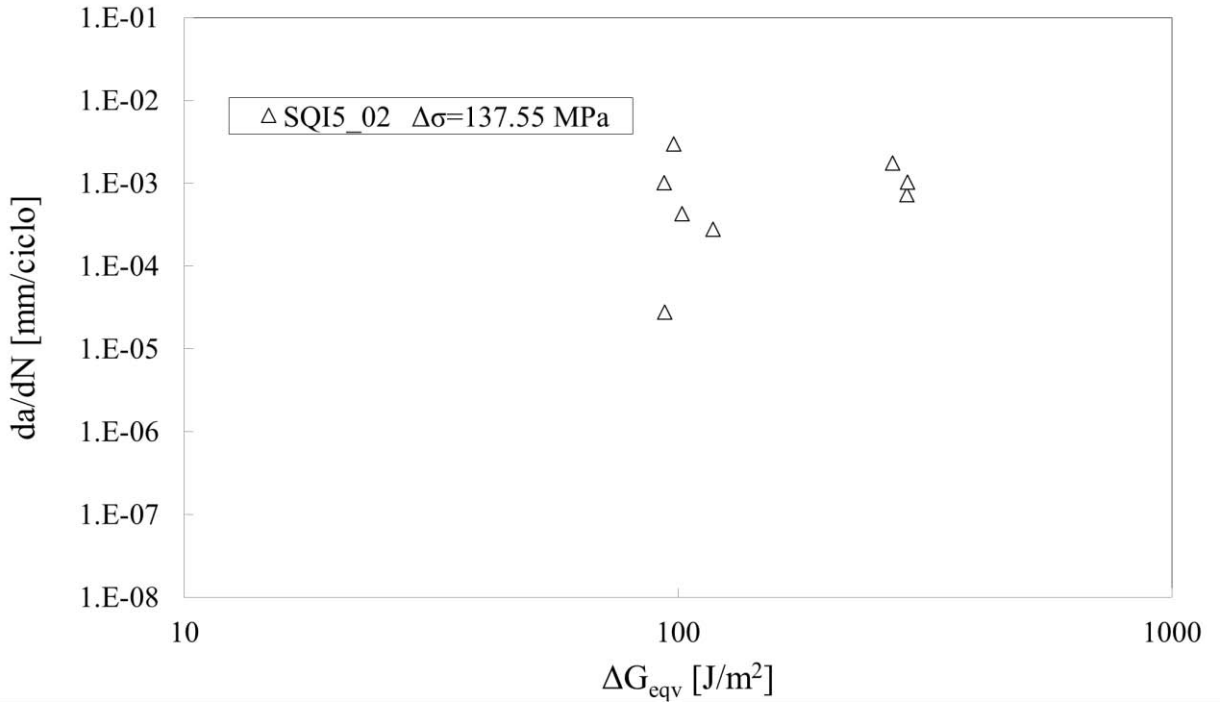


Fig.5.39 curva di Paris in ΔG_{eqv} per il provino SQI5_02

5.7.9 Provino SQI5_03

Vengono ora costruite le curve di Paris relative a due provini testati con una tensione massima di 109 MPa. La prima giunzione ad essere analizzata è l'SQI5_03.

L'andamento del parametro media delle delaminazioni per il provino SQI5_03, sollecitato con un'ampiezza di tensione di 103.58 MPa, è riportato in *Fig.*5.40

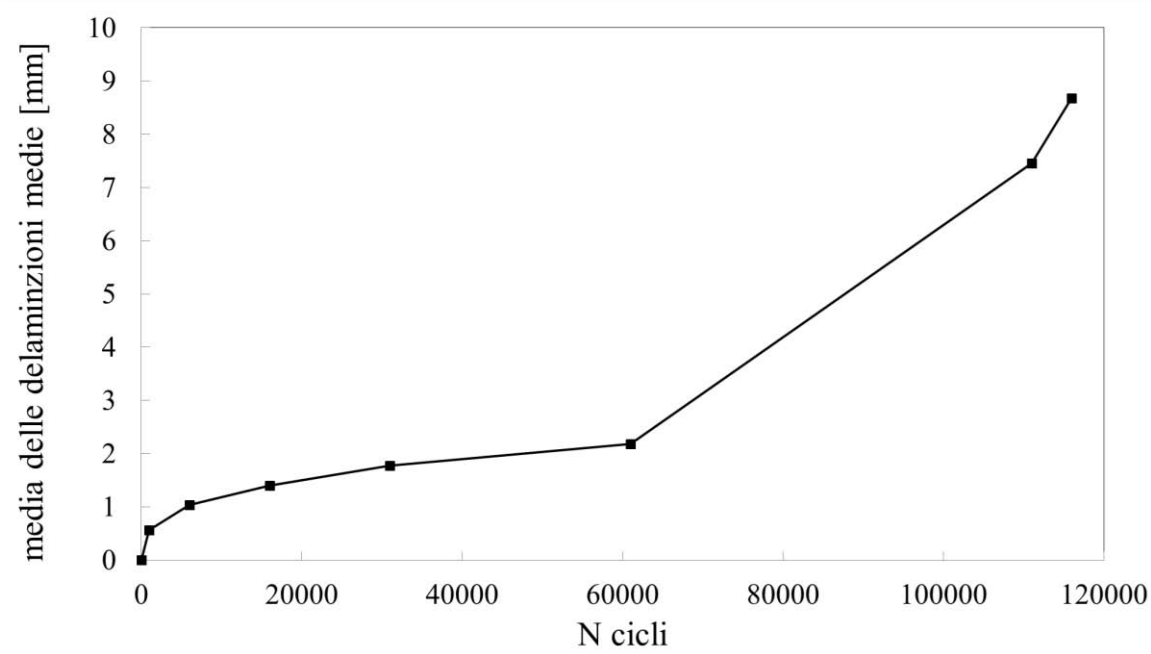


Fig.5.40 propagazione della media delle delaminazioni medie. Provino SQI5_03.

le curve delle componenti del SERR che si ottengono mediante la costruzione di un modello FEM di *lay-up* $[0_2/45_5/0]$ caricato con un ampiezza di tensione pari a 103.58 MPa, sono le seguenti

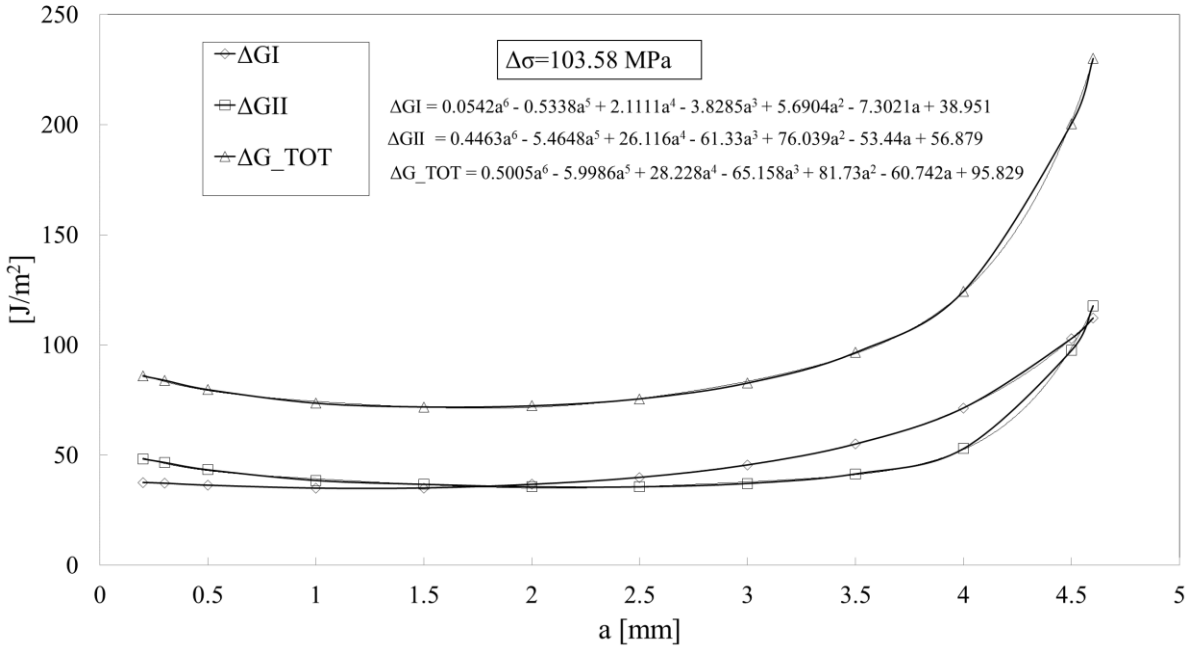


Fig. 5.41 andamento delle componenti del SERR e relative linee di tendenza (polinomiali) lungo la prima interfaccia al propagare della delaminazione, lunghezza di sovrapposizione w=5, Δσ=103.58 MPa .

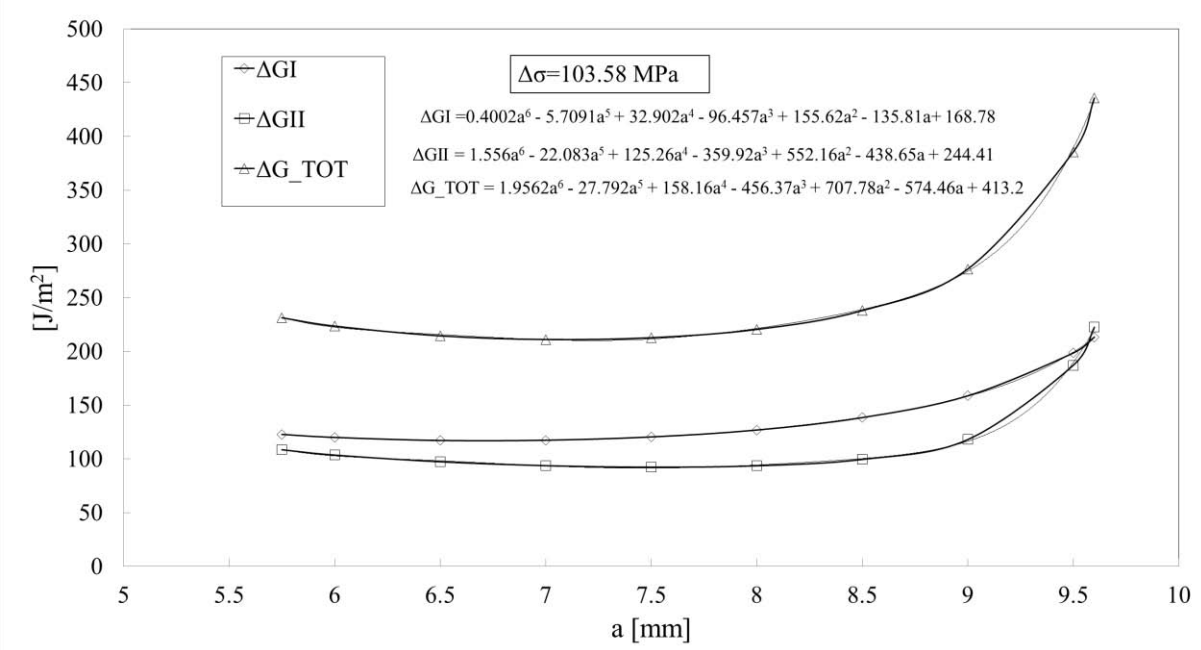


Fig. 5.42 andamento delle componenti del SERR e relative linee di tendenza (polinomiali) lungo la seconda interfaccia al propagare della delaminazione, lunghezza di sovrapposizione w=5, Δσ=103.58 MPa .

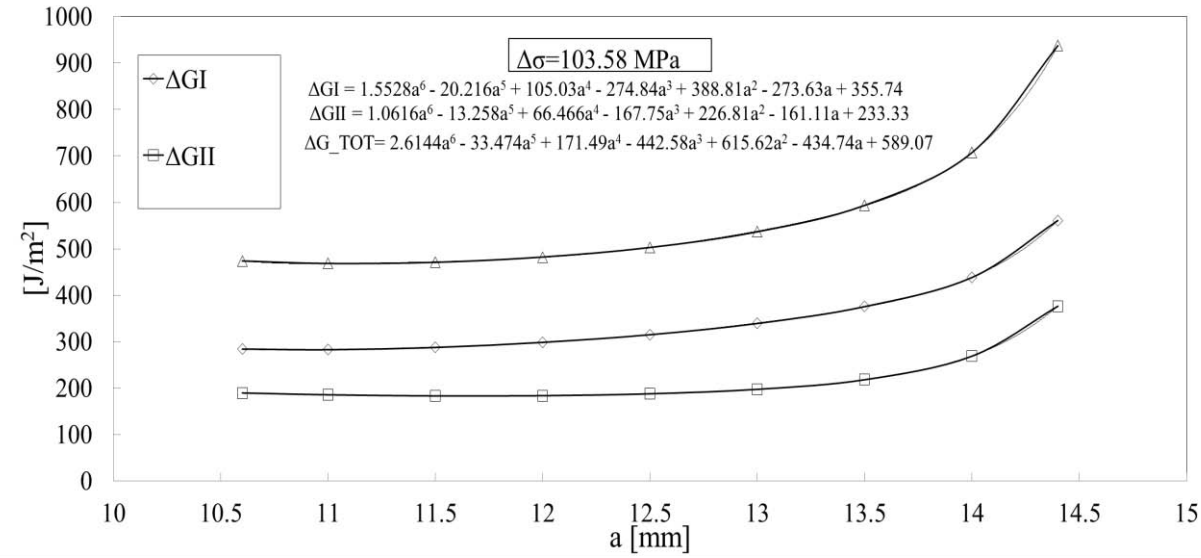


Fig. 5.43 andamento delle componenti del SERR e relative linee di tendenza (polinomiali) lungo la terza interfaccia al propagare della delaminazione, lunghezza di sovrapposizione w=5, Δσ=103.58 MPa .

I risultati ottenuti relativi alla velocità di propagazione (calcolate come rapporto incrementale) e alle componenti del SERR sono riportati in *Tab.* 11

N cicli	media delle delaminaz medie	da/dN	ΔGI	ΔGII	ΔG_TOT	ΔGeqv
0	0	0.000560989	38.951	56.879	95.829	72.711
1000	0.560989011	9.56593E-05	36.15062334	42.29903	78.44908	58.95771
6000	1.039285714	3.63187E-05	35.09462904	39.02916	74.12515	55.64506
16000	1.402472527	2.44505E-05	35.02500092	37.09405	72.12423	54.10413
31000	1.769230769	1.37454E-05	35.73508144	35.54162	71.28934	53.45765
61000	2.181593407	0.000105478	37.63633173	35.03211	72.69609	54.52466
111000	7.455494505	0.000244176	119.7420886	91.32002	211.112	159.2534
116000	8.676373626	7.47963E-05	144.3016259	103.6605	248.0218	187.6369

Tab.11 provino SQI5_03. Dati curva di Paris

Nella *Fig. 5.44* è riportata la curva di Paris per il provino SQI5_03, che si ottiene in termini di ΔG_{TOT}

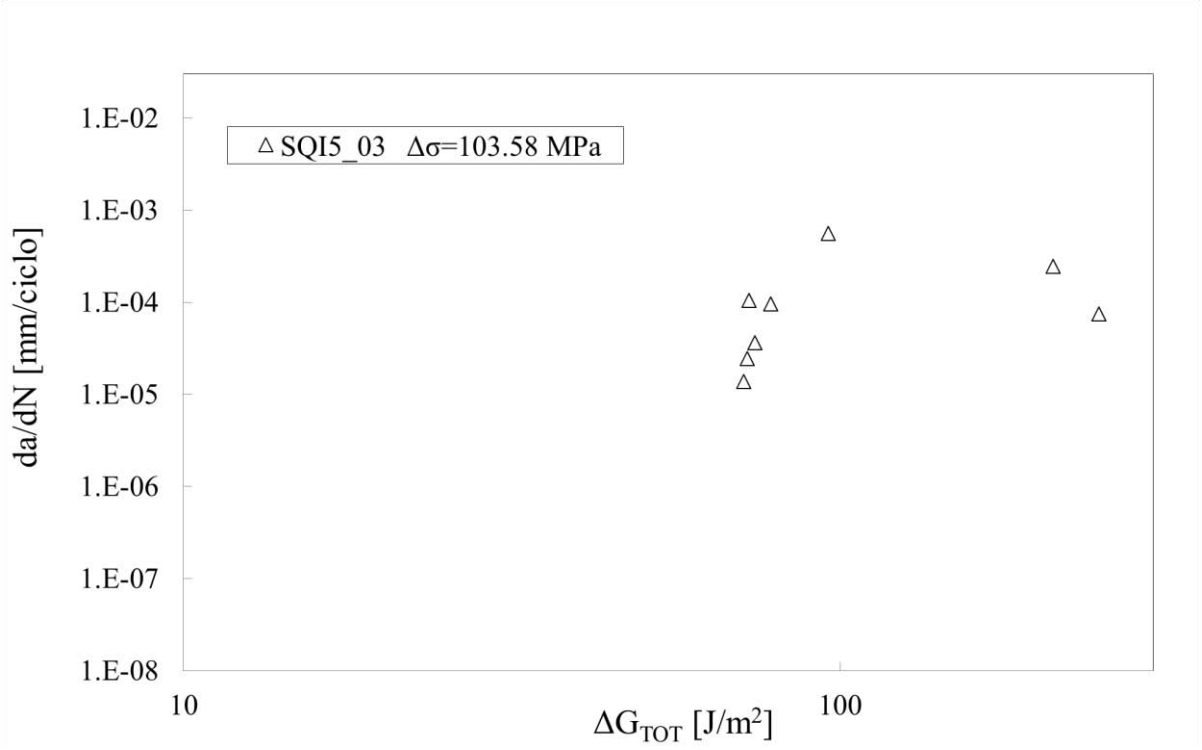


Fig.5.44 curva di Paris in ΔG_{TOT} per il provino SQI5_03

Un andamento analogo si riscontra considerando la curva di Paris in termini di ΔG_{eqv}

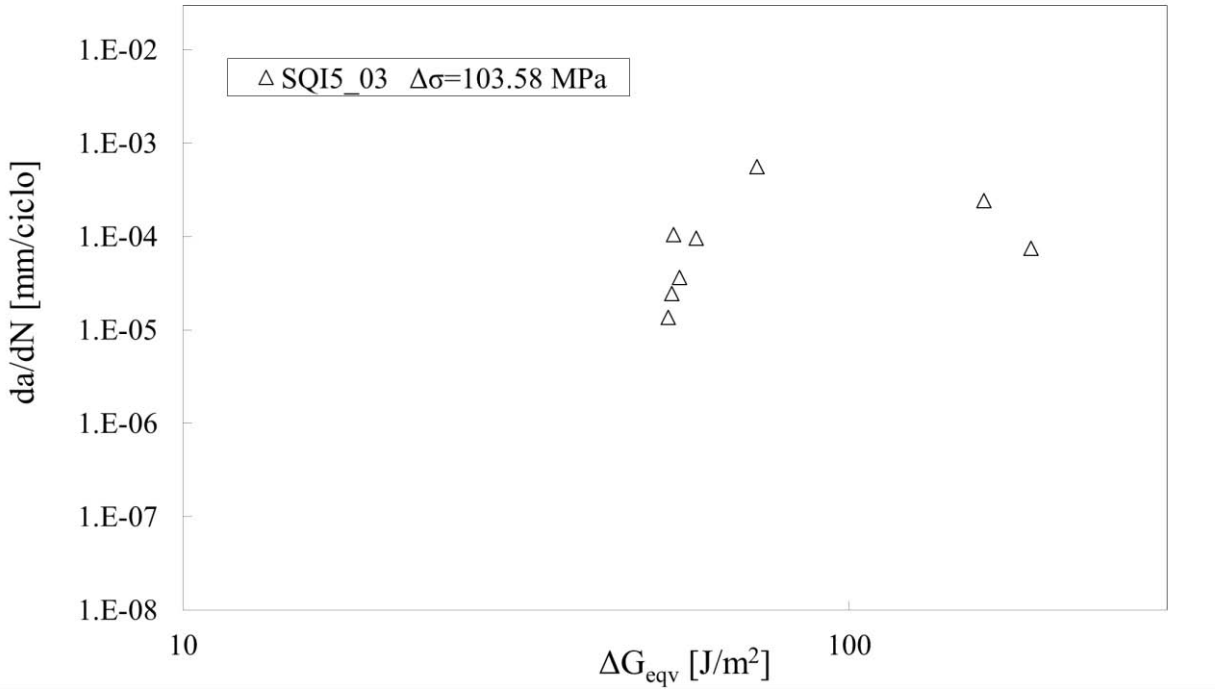


Fig.5.45 curva di Paris in ΔG_{eqv} per il provino SQI5_03

5.7.10 Provino SQI5_04

Il provino SQI5_04 è stato testato con la stessa ampiezza di tensione del provino SQI5_03 pari a 103.58 MPa. L'andamento del parametro media delle delaminazioni per il provino SQI5_04, sollecitato con una tensione massima σ_{max} di 109 MPa, è riportato in *Fig. 5.46*

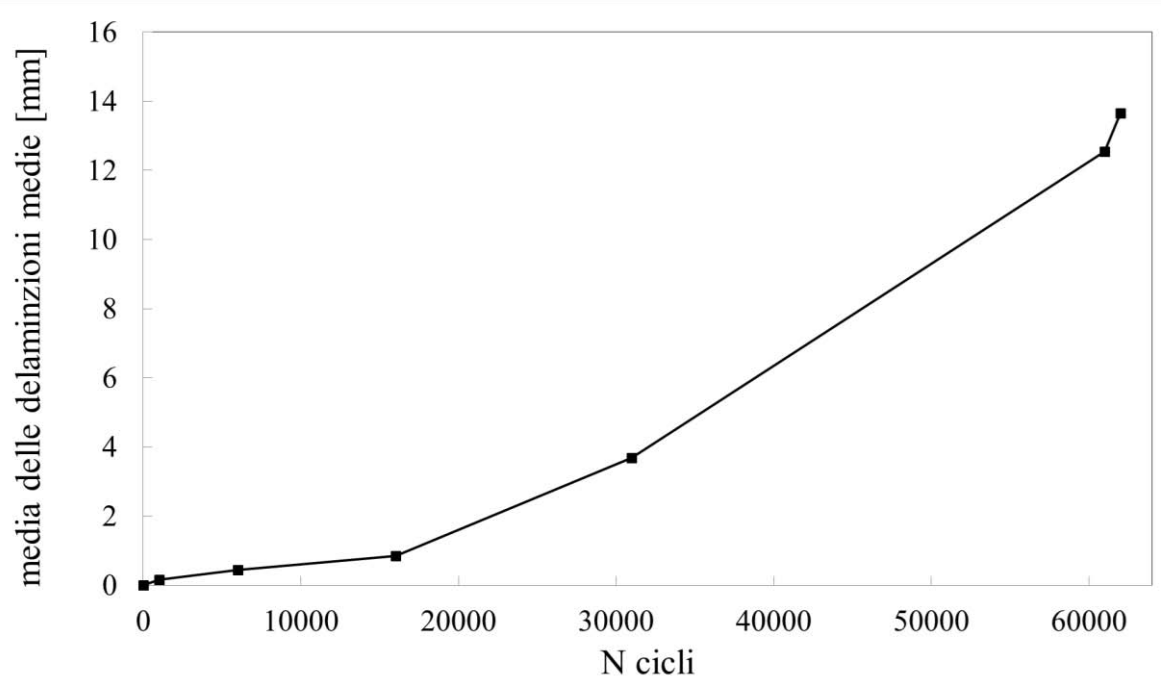


Fig.5.46 propagazione della media delle delaminazioni medie. Provino SQI5_04

I valori delle componenti del SERR sono stati ricavati dalle curve di *Fig. 5.41* e *5.43* al pari di quanto fatto per il provino SQI5_04. I risultati sono sintetizzati nella tabella 12

N cicli	media delle delaminaz medie	da/dN	ΔGI	ΔGII	ΔG_TOT	ΔGeqv
0	0	0.000167033	38.951	56.879	95.829	72.711
1000	0.167032967	5.65934E-05	37.87380422	49.80806	87.6809	66.16749
6000	0.45	3.91209E-05	36.54565718	43.61399	80.15889	60.27555
16000	0.841208791	0.000188974	35.40761437	40.15838	75.56625	56.74916
31000	3.675824176	0.000295549	59.7392644	43.29607	103.232	77.93253
61000	12.54230769	0.001106044	316.8174766	188.4321	505.1633	387.093
62000	13.64835165	0.000220135	388.8480143	227.8706	616.1412	473.0436

Tab.12 provino SQI5_04. Dati curva di Paris

Nella *Fig 5.47* è riportata la curva di Paris per il provino SQI5_04, che si ottiene in termini di ΔG_{TOT}

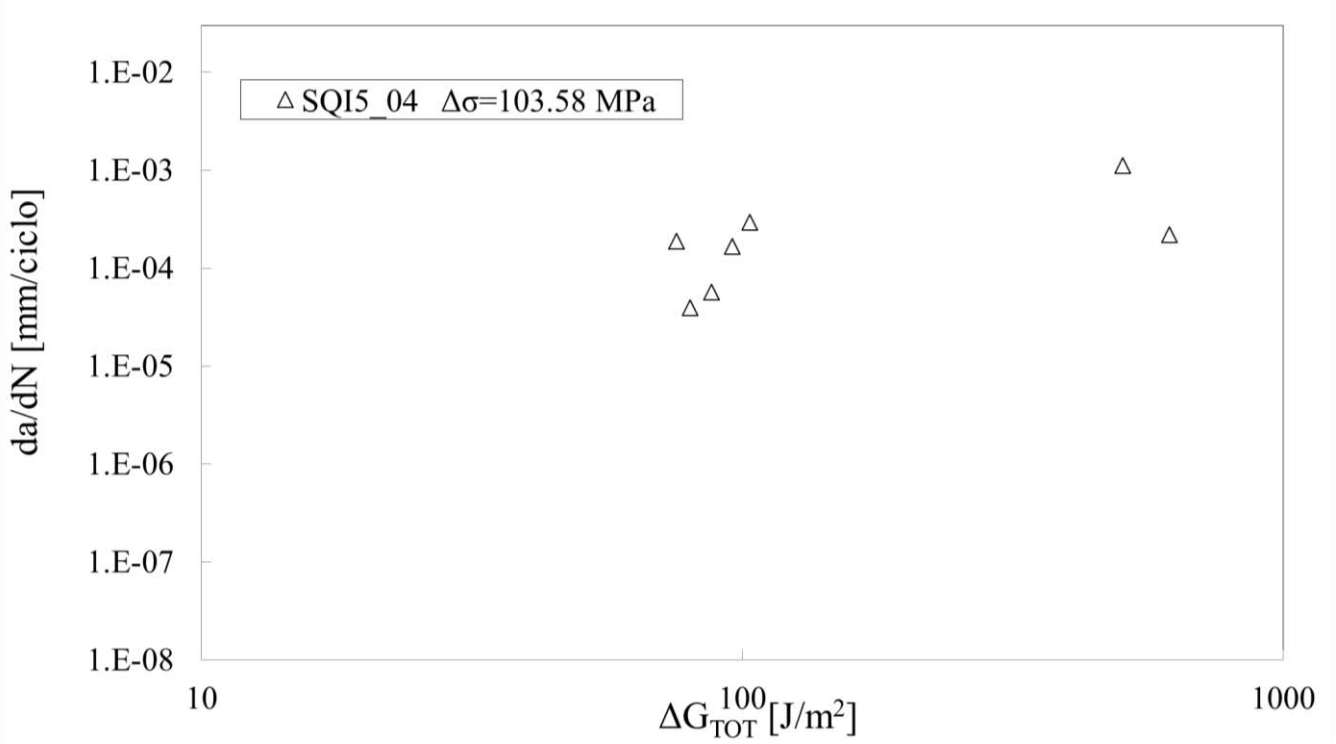


Fig.5.47curva di Paris in ΔG_{TOT} per il provino SQI5_04

Un andamento analogo si riscontra considerando la curva di Paris in termini di ΔG_{eq}

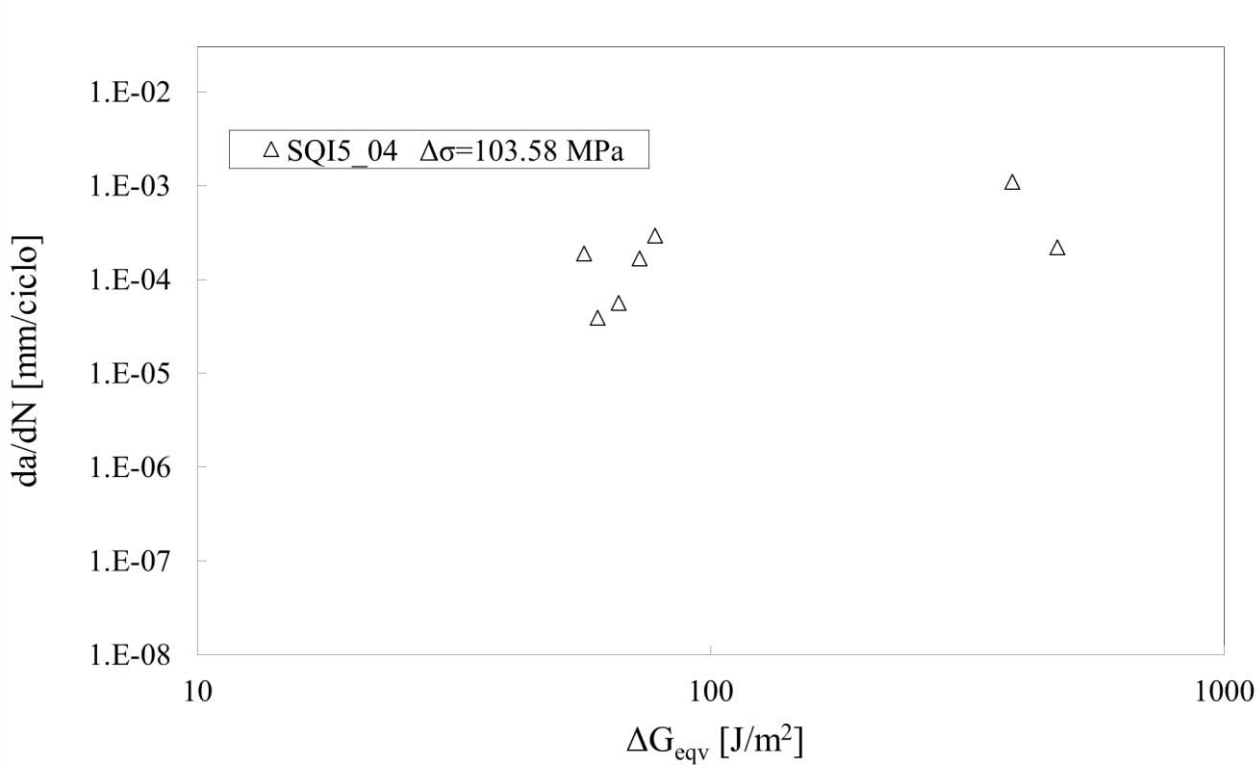


Fig.5.48 curva di Paris in ΔG_{eqv} per il provino SQI5_04

5.7.11 Provino SQI5_05

Il provino SQI5_05, come visto nel capitolo 4 relativo alle prove sperimentali, è stato testato applicando una tensione massima di 90 MPa a cui corrisponde un ampiezza di tensione di 85.5 MPa. L'andamento della *media delle delaminazioni medie* è riportato in *Fig. 5.49*

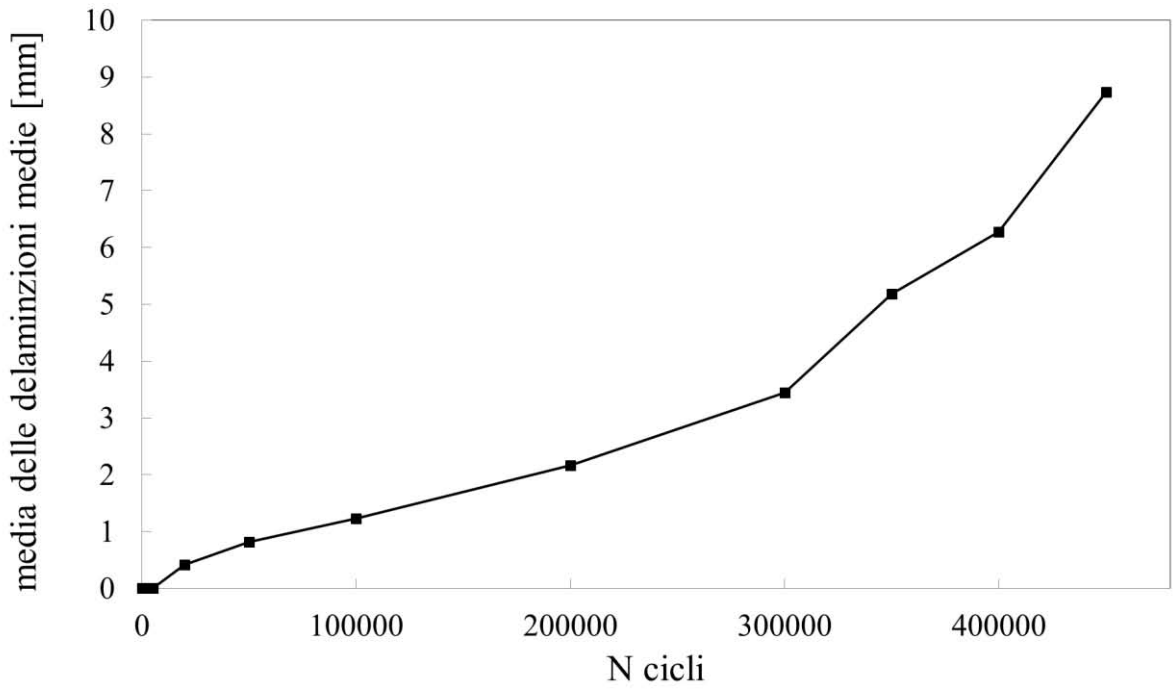


Fig.5.49 propagazione della media delle delaminazioni medie. Provino SQI5_05

Le curve delle componenti del SERR che si ottengono mediante la costruzione di un modello FEM di *lay-up* $[0_2/45_5/0]$ caricato con un ampiezza di tensione pari a 85.5 MPa, sono le seguenti

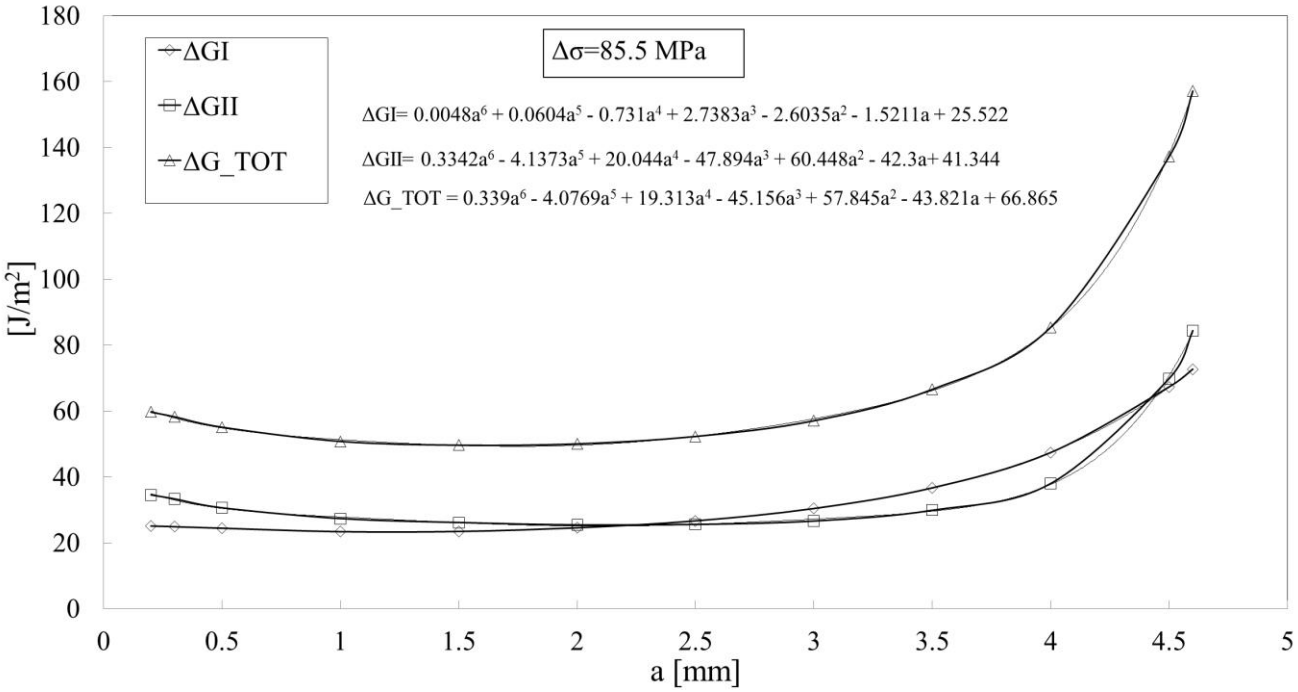


Fig. 5.50andamento delle componenti del SERR e relative linee di tendenza (polinomiali) lungo la prima interfaccia al propagare della delaminazione, lunghezza di sovrapposizione w=5, Δσ=85.5 MPa .

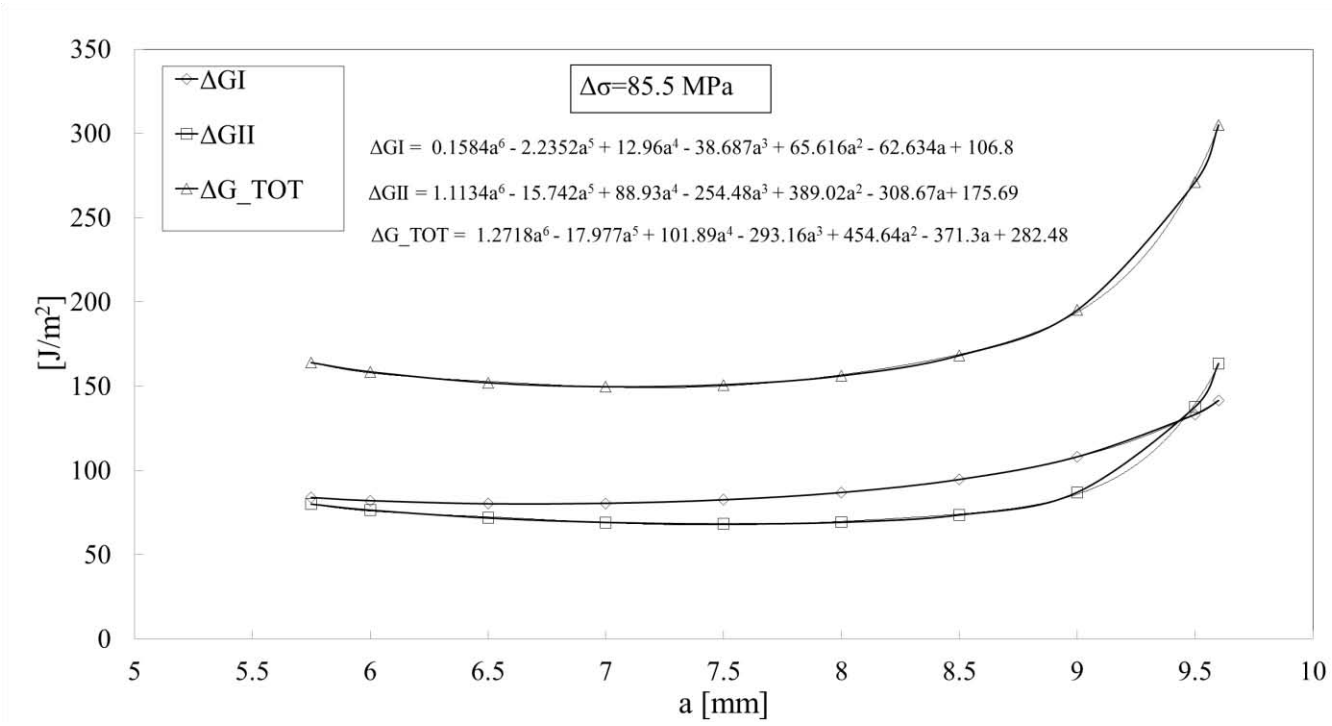


Fig. 5.51 andamento delle componenti del SERR e relative linee di tendenza (polinomiali) lungo la seconda interfaccia al propagare della delaminazione, lunghezza di sovrapposizione w=5, Δσ=85.5 MPa .

I valori delle componenti del SERR e la velocità di propagazione sono riportati in tabella *13*.

N cicli	media delle delaminaz medie	da/dN	ΔGI	ΔGII	ΔG_TOT	ΔGeqv
0	0	0	25.522	41.344	66.865	51.08546
1000	0	0	25.522	41.344	66.865	51.08546
5000	0	2.80403E-05	25.522	41.344	66.865	51.08546
20000	0.420604396	1.32143E-05	24.6033347	31.25716	55.8596	42.09351
50000	0.817032967	8.29121E-06	23.7324194	28.53851	52.27018	39.31367
100000	1.231593407	9.30495E-06	23.3210692	27.02442	50.34481	37.82722
200000	2.162087912	1.28626E-05	25.1088193	25.06791	50.17525	37.63256
300000	3.448351648	3.45989E-05	35.7602765	29.19246	64.94572	48.88058
350000	5.178296703	2.18407E-05	97.5118998	131.6667	229.1694	173.1565
400000	6.27032967	4.92363E-05	80.8347499	73.8643	154.7156	116.1028
450000	8.732142857	1.94048E-05	99.8705202	77.18667	177.6265	133.5194

Tab.13 provino SQI5_05. Dati curva di Paris

Con i valori di ΔG così calcolati e con i valori di *da/dN* rielaborati dalla curva sperimentale della propagazione della cricca è possibile costruire la curva di Paris in ΔG_{TOT} e in ΔG_{eqv} per il provino SQI5_05:

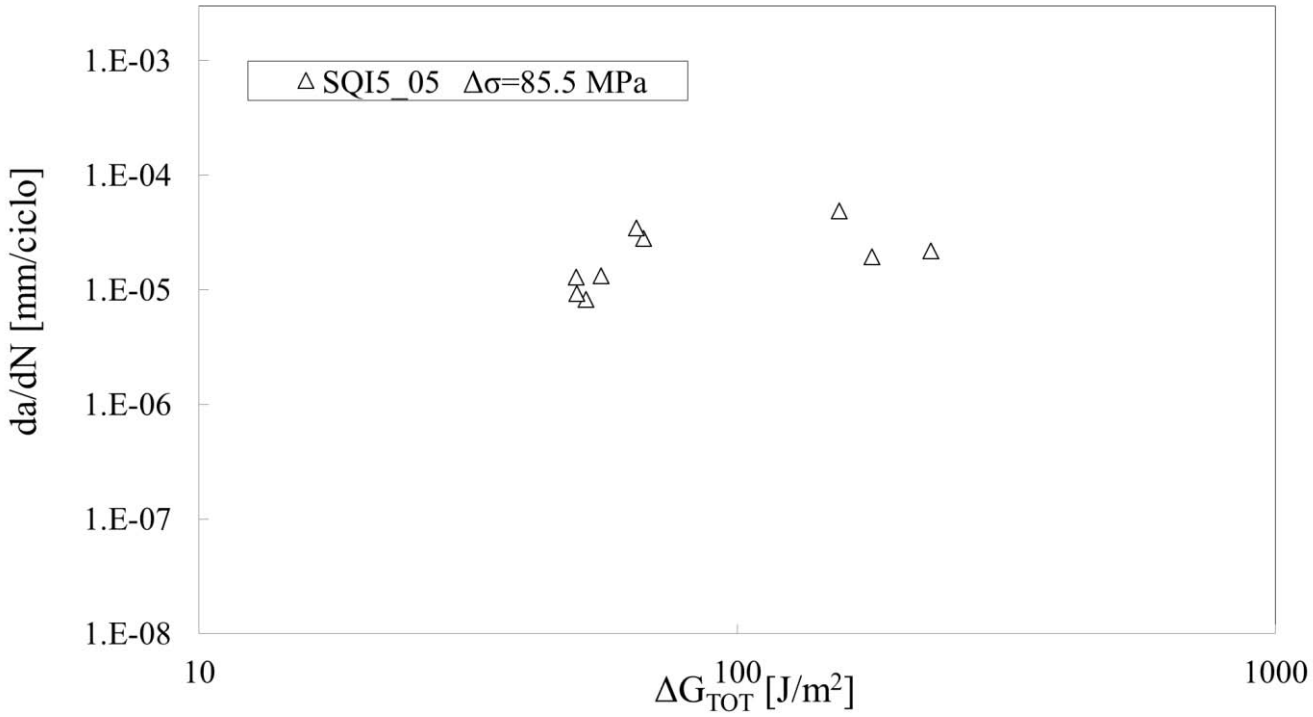


Fig.5.52 curva di Paris in ΔG_{TOT} per il provino SQI5_05

Un andamento analogo si riscontra considerando la curva di Paris in termini di ΔG_{eq}

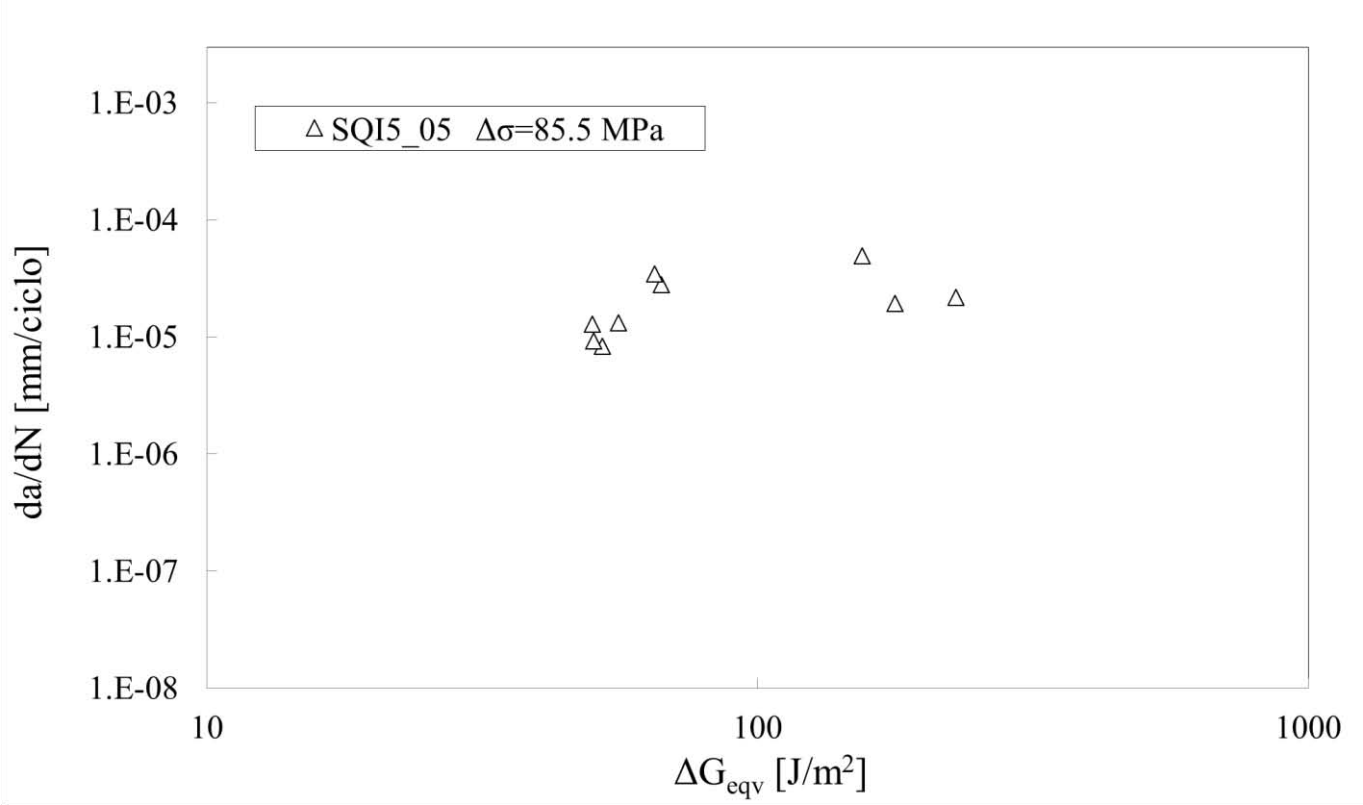


Fig.5.53 curva di Paris in ΔG_{eqv} per il provino SQI5_05

5.7.12 Provino SQI5_06

Il provino SQI5_06 è stato testato con un'ampiezza di tensione pari a 76 MPa. L'andamento del parametro media delle delaminazioni per tale giunzione sollecitata con una tensione massima σ_{max} di 80 MPa, è riportato in *Fig. 5.54*

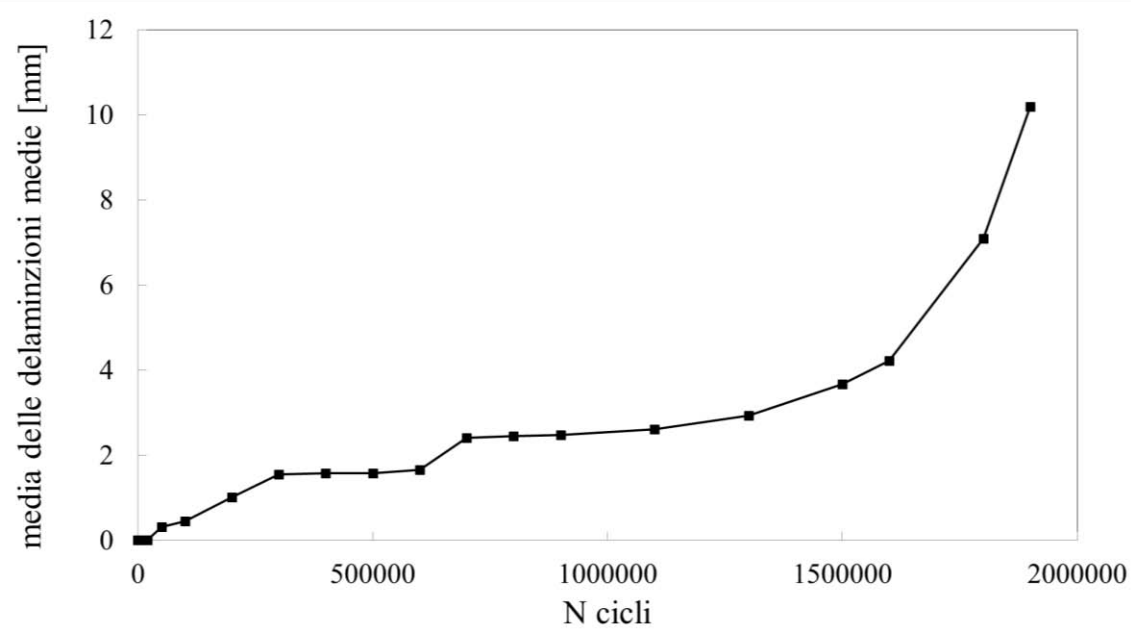


Fig.5.54propagazione della media delle delaminazioni medie. Provino SQI5_06

le curve delle componenti del SERR che si ottengono mediante la costruzione di un modello FEM di *lay-up* $[0_2/45_5/0]$ caricato con un ampiezza di tensione pari a 76 MPa, sono le seguenti

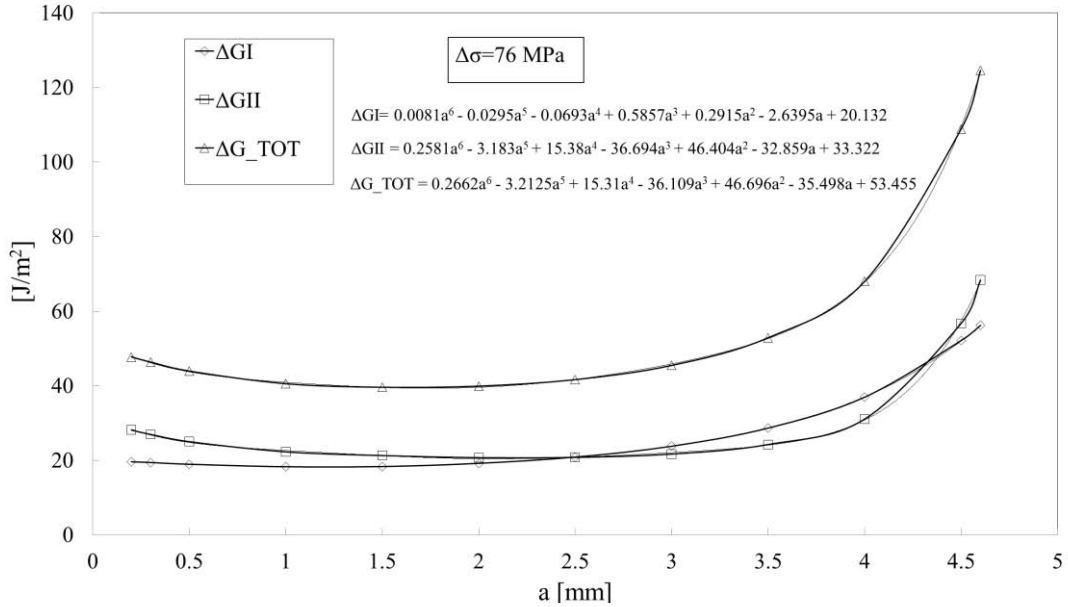


Fig. 5.55 andamento delle componenti del SERR e relative linee di tendenza (polinomiali) lungo la prima interfaccia al propagare della delaminazione, lunghezza di sovrapposizione w=5, Δσ=76 MPa.

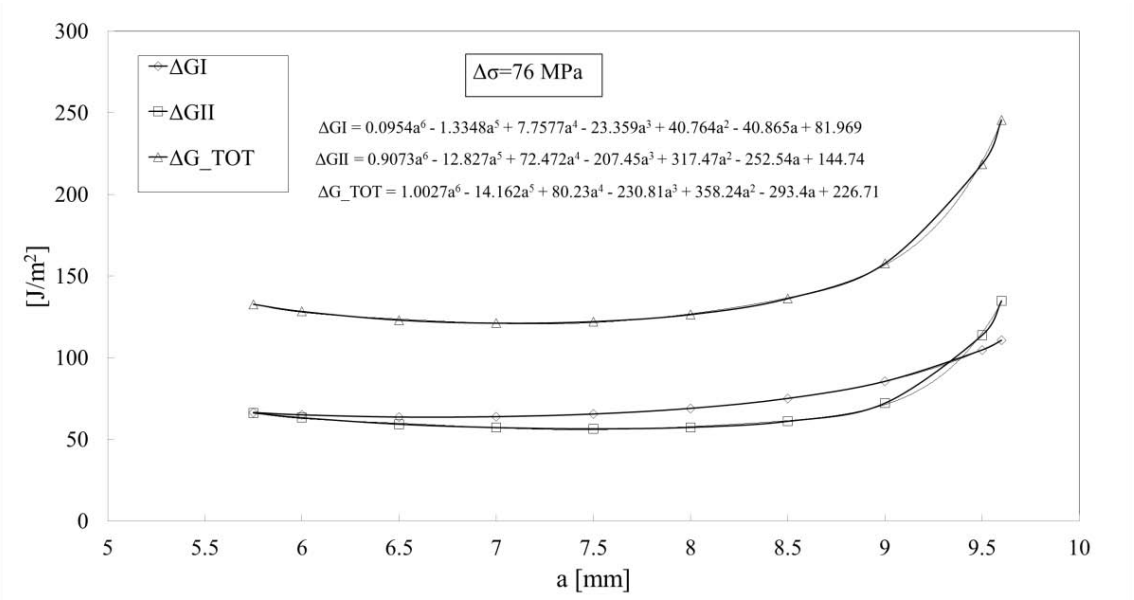


Fig. 5.56 andamento delle componenti del SERR e relative linee di tendenza (polinomiali) lungo la seconda interfaccia al propagare della delaminazione, lunghezza di sovrapposizione w=5, Δσ=76 MPa

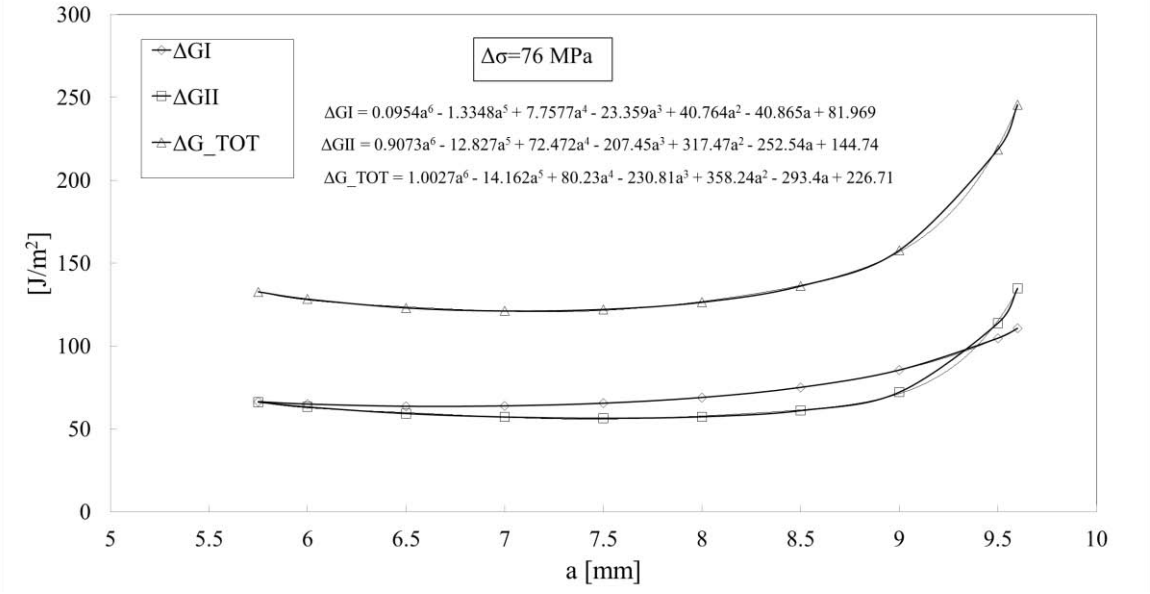


Fig. 5.57 andamento delle componenti del SERR e relative linee di tendenza (polinomiali) lungo la terza interfaccia al propagare della delaminazione, lunghezza di sovrapposizione w=5, Δσ=76 MPa .

I risultati relativi alla velocità di propagazione (calcolate come rapporto incrementale) e alle componenti del SERR sono riportati in *Tab.* 14

N cicli	media delle delaminaz medie	da/dN	ΔGI	ΔGII	ΔG_TOT	ΔGeqv
0	0	0	20.132	33.322	53.455	40.90417
1000	0	0	20.132	33.322	53.455	40.90417
5000	0	0	20.132	33.322	53.455	40.90417
20000	0	1.04487E-05	20.132	33.322	53.455	40.90417
50000	0.313461538	2.60989E-06	19.3505495	26.59046	45.94218	34.74099
100000	0.443956044	5.67582E-06	19.06574308	25.21387	44.28085	33.42313
200000	1.011538462	5.3544E-06	18.27140032	22.59381	40.86577	30.7632
300000	1.546978022	2.93956E-07	18.36745872	21.11507	39.47889	29.6597
400000	1.576373626	0	18.39904701	21.04565	39.44066	29.62792
500000	1.576373626	8.24176E-07	18.39904701	21.04565	39.44066	29.62792
600000	1.658791209	7.42857E-06	18.50259161	20.86467	39.36197	29.56088
700000	2.401648352	5.21978E-07	20.47934892	20.63699	41.08843	30.8374
800000	2.453846154	1.62088E-07	20.69549098	20.72391	41.38892	31.06456
900000	2.470054945	7.18407E-07	20.76496796	20.75316	41.48681	31.1386
1100000	2.613736264	1.57692E-06	21.43245918	21.05355	42.44656	31.86535
1300000	2.929120879	3.71566E-06	23.27455387	21.89599	45.10817	33.88842
1500000	3.672252747	5.44505E-06	30.93618325	25.52042	56.30422	42.47233
1600000	4.216758242	1.4353E-05	42.3966088	38.66536	80.80016	60.83941
1800000	7.087362637	3.10192E-05	64.10598953	56.69688	120.8291	90.71576
1900000	10.18928571	5.36278E-06	165.6799242	138.924	304.6049	229.0405

Tab.14 provino SQI5_06. Dati curva di Paris

Le curve di Paris in ΔG_{TOT} e in ΔG_{eqv} che si ottengono per il provino SQI5_06 sono riportate in seguito

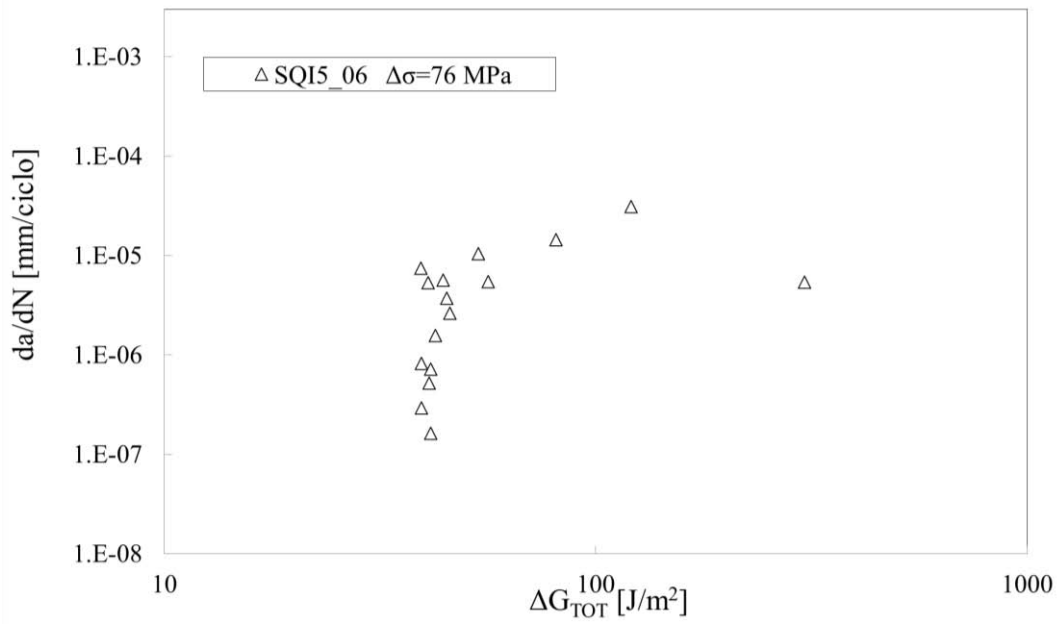


Fig.5.58 curva di Paris in ΔG_{TOT} per il provino SQI5_06

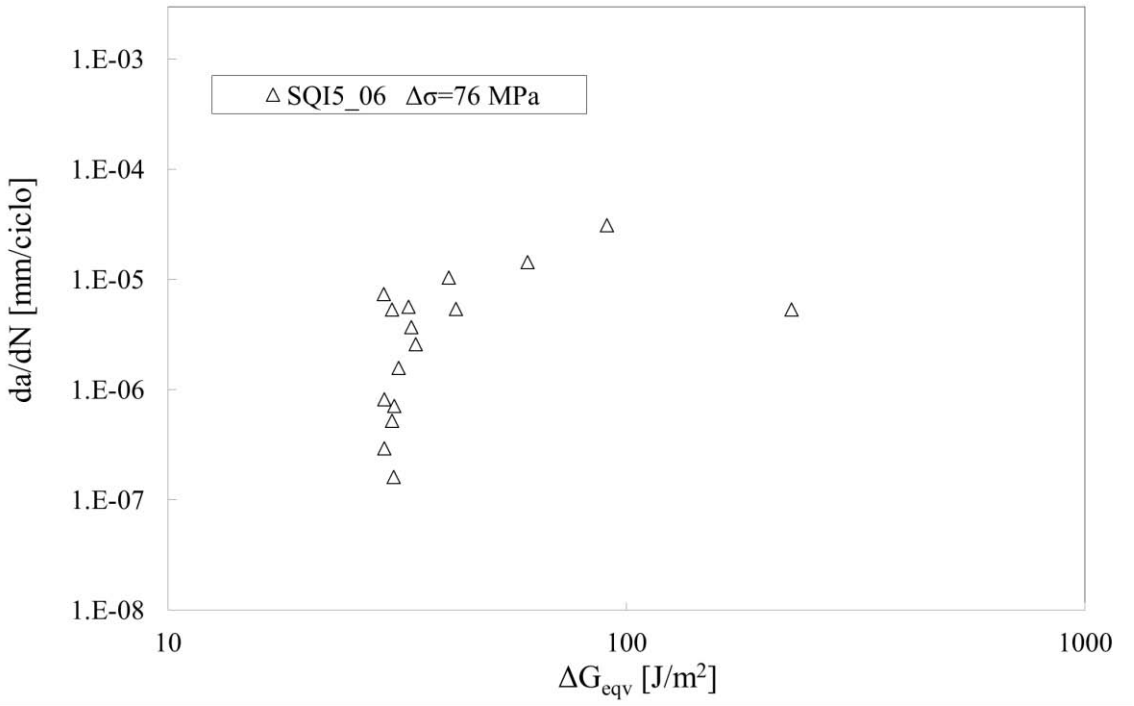


Fig.5.59 curva di Paris in ΔG_{eqv} per il provino SQI5_06

È possibile a questo punto riassumere in unico grafico (vedi *Fig.* 5.60) le curve di Paris ottenute per i provini con il *lay-up* $[0_2/45_5/0]$ in termini di ΔG_{TOT}.

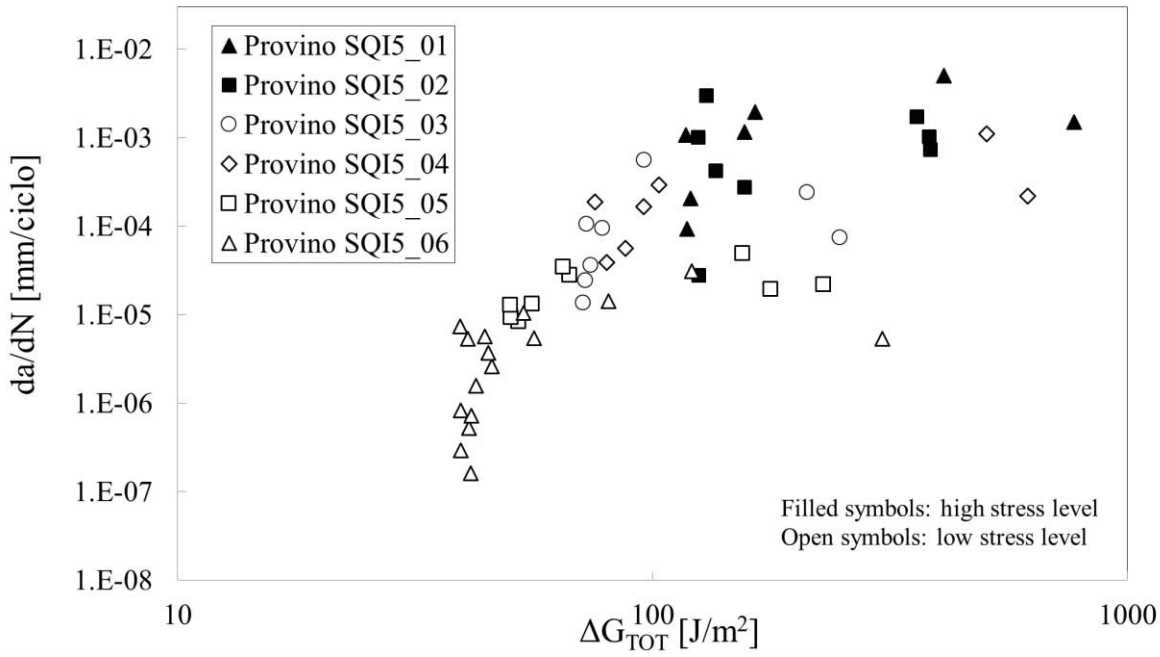


Fig.5.60 riepilogo curve di Paris in ΔG_{TOT} provini con lay-up $[0_2/45_2/0]$

Le curve di Paris relative alle prove condotte ad alto carico contraddistinte dai simboli "pieni" si concentrano nella parte alta e a destra di *Fig. 5.60,* mentre i punti relativi alle prove a basso carico carico si addensano nella parte bassa a sinistra.

Questo aspetto, in maniera analoga, è stato riscontrato anche nelle prove dei giunti con *lay-up* $[0]_8$, le velocità di propagazione variano infatti di ordini di grandezza a seconda che venga applicato un alto oppure un basso carico.

Dalle simulazioni FEM risulta che i valori di ΔG_{TOT} per prove ad alto carico sono compresi tra 100 J/m^2 e 800 J/m^2 mentre per prove a basso e medio carico i valori sono altrettento dispersi variano infatti tra 60 J/m^2 e 700 J/m^2.

Come riscontrato per il *lay-up* $[0]_8$ l'elevata dispersione ottenuta nelle curve di Paris non diminuisce nel caso dell'utilizzo del ΔG_{eqv} (vedi *Fig. 5.61*) come riferimento anziché del ΔG_{TOT}. Il risultato più evidente è una traslazione complessiva dei punti sperimentali verso sinistra e quindi a valori di ΔG inferiori. Evidente è inoltre il tratto tendenzialmente verticali ottenuto per il provino SQI5_06 soggetto a basso carico ($\Delta\sigma$=76 MPa) il quale aumenta la dispersione.

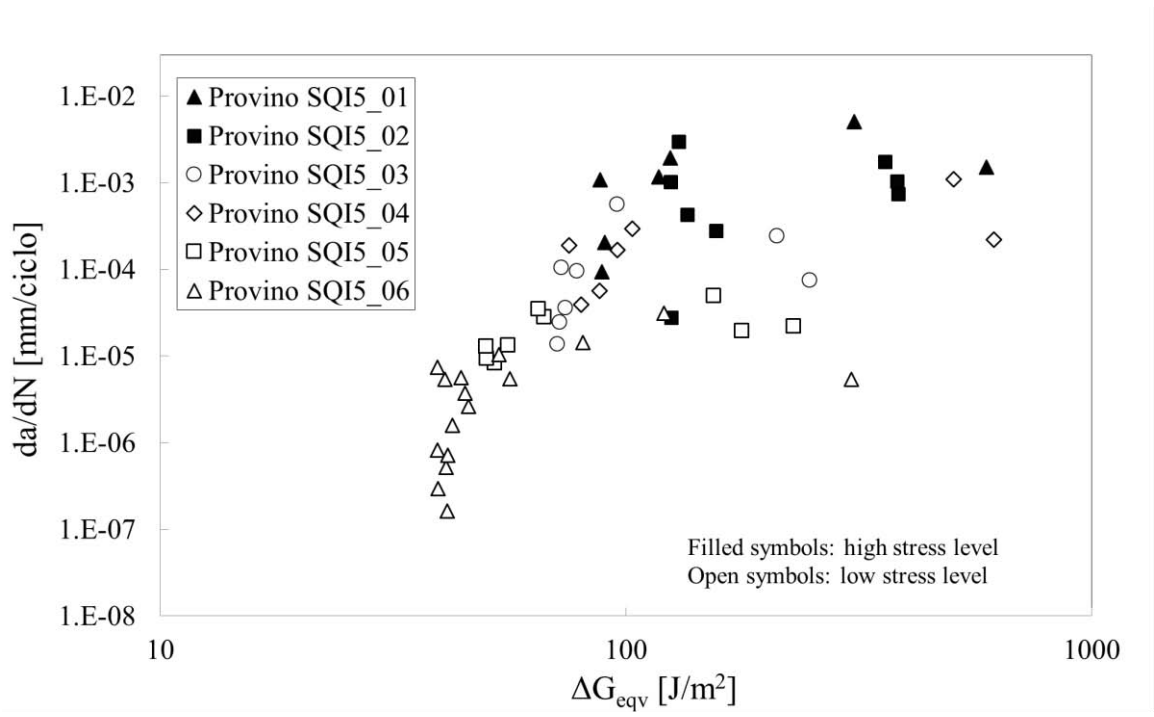


Fig.5.61 riepilogo curve di Paris in ΔG_{eqv} provini con lay-up $[0_2/45_2/0]$

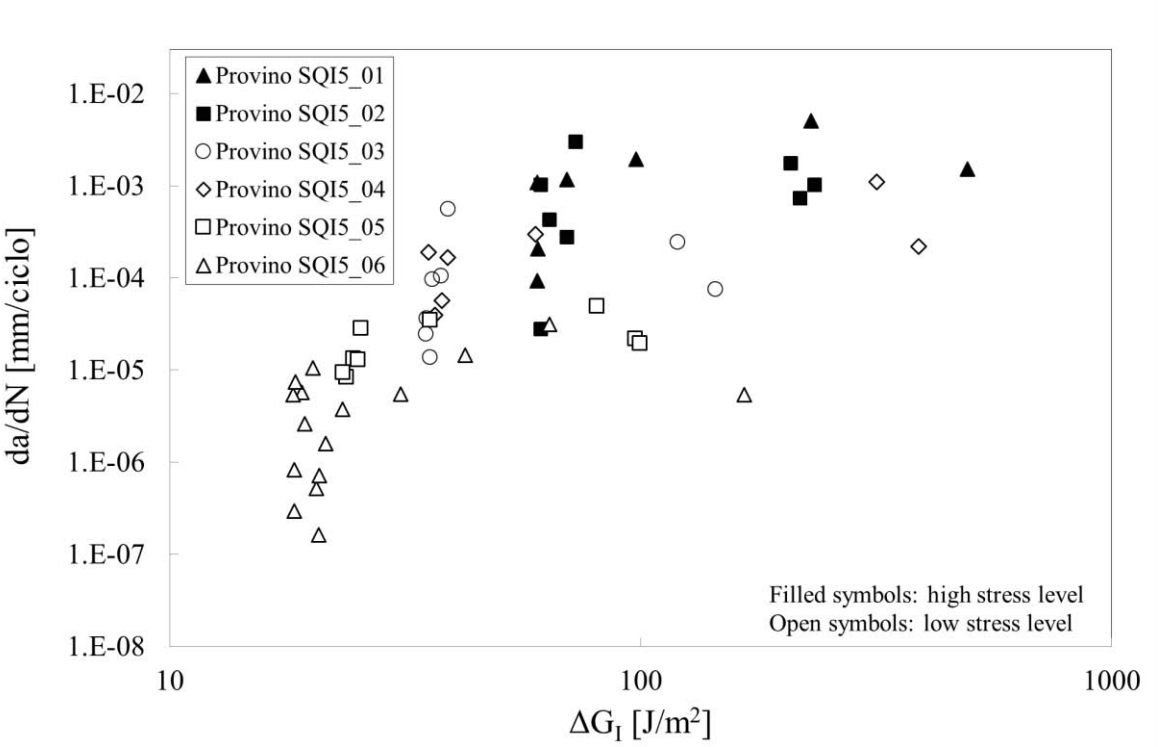


Fig.5.62 riepilogo curve di Paris in ΔG_I provini con lay-up $[0_2/45_2/0]$

Come fatto per i provini S08, anche per gli SQI5 si sono tracciate le rette di regressione per 3 diverse probabilità di sopravvivenza. In questo caso non si sono potuti confrontare i risultati in quanto si tratta dei primi test effettuati su questa tipologia di provini

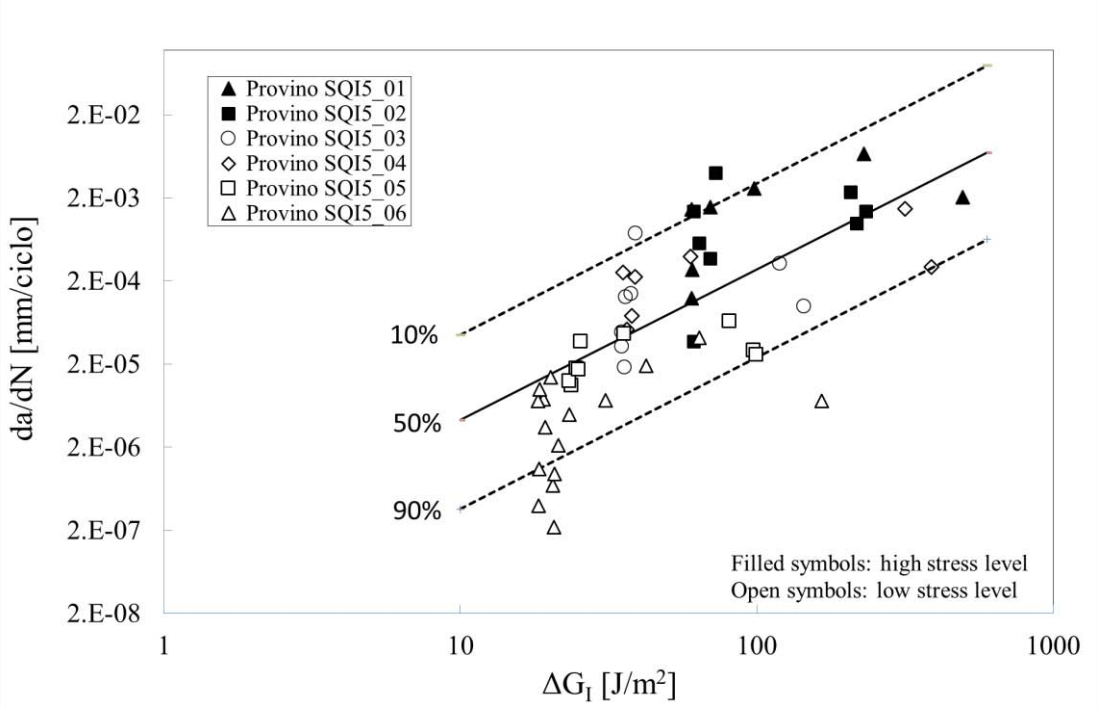


Fig.5.63 interpolazione dei dati con una legge di tipo Paris per 3 diverse probabilità di sopravvivenza.SQI5

Le equazioni delle curve di Paris per i provini con *lay-up* $[0_2/45_5/0]$, al variare della probabilità di sopravvivenza, sono elencate di seguito

$$SQI5(10\%\ PS): \quad \frac{da}{dN} = 5 \cdot 10^{-7}(\Delta G_I)^{1.83} \tag{5.29}$$

$$SQI5(50\%\ PS): \quad \frac{da}{dN} = 5 \cdot 10^{-8}(\Delta G_I)^{1.81} \tag{5.30}$$

$$SQI5(90\%\ PS): \quad \frac{da}{dN} = 4 \cdot 10^{-9}(\Delta G_I)^{1.83} \tag{5.31}$$

Si riporta infine un confronto tra le curve di Paris relative ai provini S08 (in nero) e SQI5 (in verde) calcolate per tre diverse probabilità di sopravvivenza 10,50 e 90%

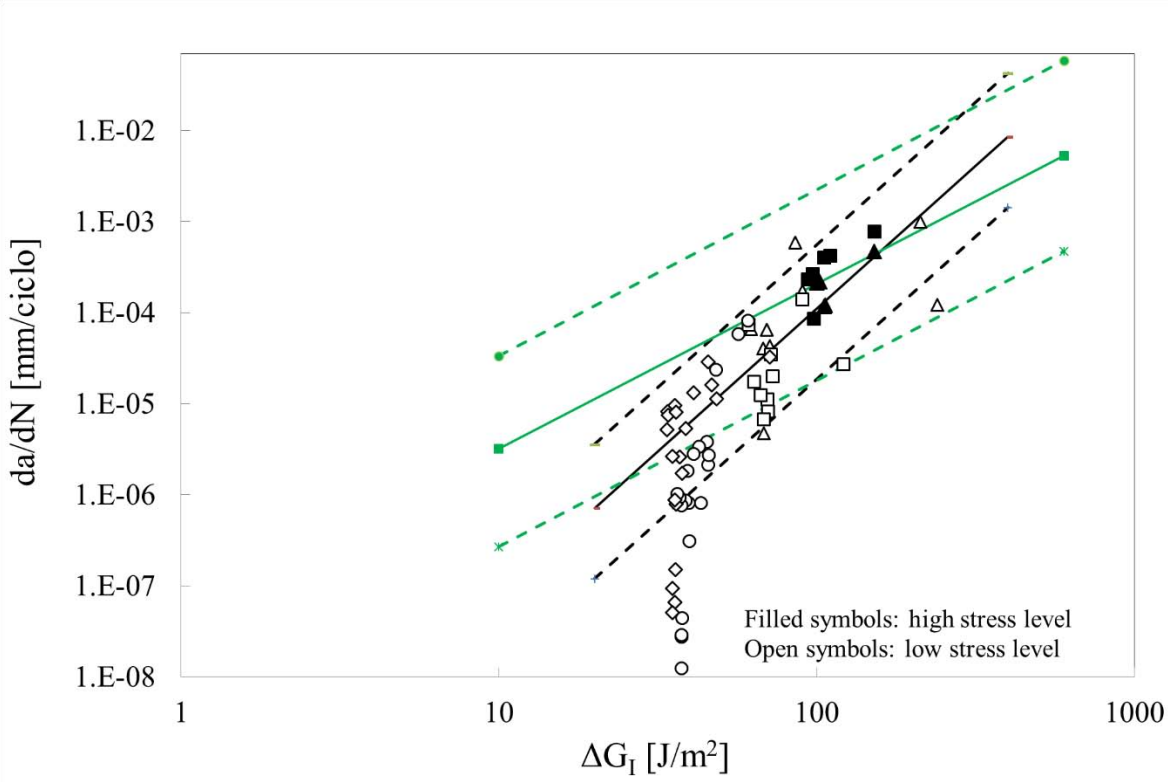


Fig.5.64 Confronto tra le curve di Paris calcolate per i provini SQI5 (in verde) e S08 (in nero) al variare della PS.

5.8 Integrazione della curva di Paris

Una volta calcolate le costanti *D* e *n* dell'equazione di Paris (5.28) al variare della probabilità di sopravvivenza, si è pensato di integrare tale espressione con l'obiettivo di ottenere, per ciascun provino, il numero di cicli a rottura sperimentale. Si richiama ora l'equazione *5.28*

$$\frac{da}{dN} = D[\Delta G_I(a)]^n \tag{5.28}$$

Per ottenere il numero *N* di cicli a rottura si è calcolato il seguente integrale definito

$$N_f = \int_{0.2}^{a_{fem,max}} \frac{1}{D[\Delta G_I(a)]^n} da \tag{5.32}$$

dove *D* e *n* sono le costanti dell'equazione di Paris calcolate per probabilità di sopravvivenza PS = 50%, $\Delta G_I(a)$ è il polinomio di interpolazione della curva di ΔG_I al variare della lunghezza di delaminazione, calcolata grazie alle simulazioni FEM, l'estremo superiore di integrazione, $a_{fem,max}$, rappresenta la lunghezza di delaminazione calcolata con il "*metodo FEM*" (vedere cap.6) al termine del penultimo blocco di carico, cioè in corrispondenza dell'ultima rilevazione prima che il provino ceda.

L'estremo di integrazione inferiore è stato posto pari a 0.2 mm in quanto questa misura rappresenta la minima lunghezza di cricca nel modello FEM

L'equazione 5.29, così come è stata scritta, è valida solo nel caso in cui $a_{fem,max}$è inferiore alla lunghezza di sovrapposizione del giunto. Qualora ciò non si verifichi, ovvero se il fronte di delaminazione si trova a propagare all'interfaccia tra la seconda e la terza lamina oppure tra la terza o la quarta, è necessario fare un integrazione per parti, integrando la funzione $\Delta G_I(a)$ lungo la lunghezza della prima, della seconda e talvolta anche della terza interfaccia, e sommando alla fine i diversi contributi.

Si considerano ora i provini con *lay-up* $[0]_8$. L'equazione della curva di Paris con probabilità di sopravvivenza del 50% è

$$\frac{da}{dN} = 6 \cdot 10^{-11}[\Delta G_I(a)]^{-3.13} \tag{5.33}$$

Si considera ora il provino S08_15. Sperimentalmente la rottura di tale provino è avvenuta dopo 19232 cicli. Per poter applicare l'equazione *5.32*, è necessario calcolare prima $a_{fem,max}$ (vedi metodo FEM *cap. 6*), che risulta essere pari a 7.54 mm. Essendo quest'ultima minore della lunghezza di sovrapposizione (*w*= 8mm), è stato possibile applicare direttamente l'*eq. 5.32*. Il polinomio $\Delta G_I(a)$ fa riferimento alla curva ottenuta per un'ampiezza di tensione di 247 MPa. Il numero di cicli N_f che si trova integrando la legge di Paris è

$$= \int_{0.2}^{7.54} \frac{da}{6 \cdot 10^{-11}[0.112a^6 - 2.3221a^5 + 18.444a^4 - 69.773a^3 + 130.67a^2 - 120.79a + 151.62]^{-3.13}} \qquad (5.34)$$

= 48832 cicli

Come si può vedere il risultato sperimentale e questo analitico differiscono di un fattore 2, tuttavia se posto sulla curva di Woheler relativa ai provini S08, si è visto che tale risultato rientra comunque nella banda di dispersione dei risultati sperimentali.

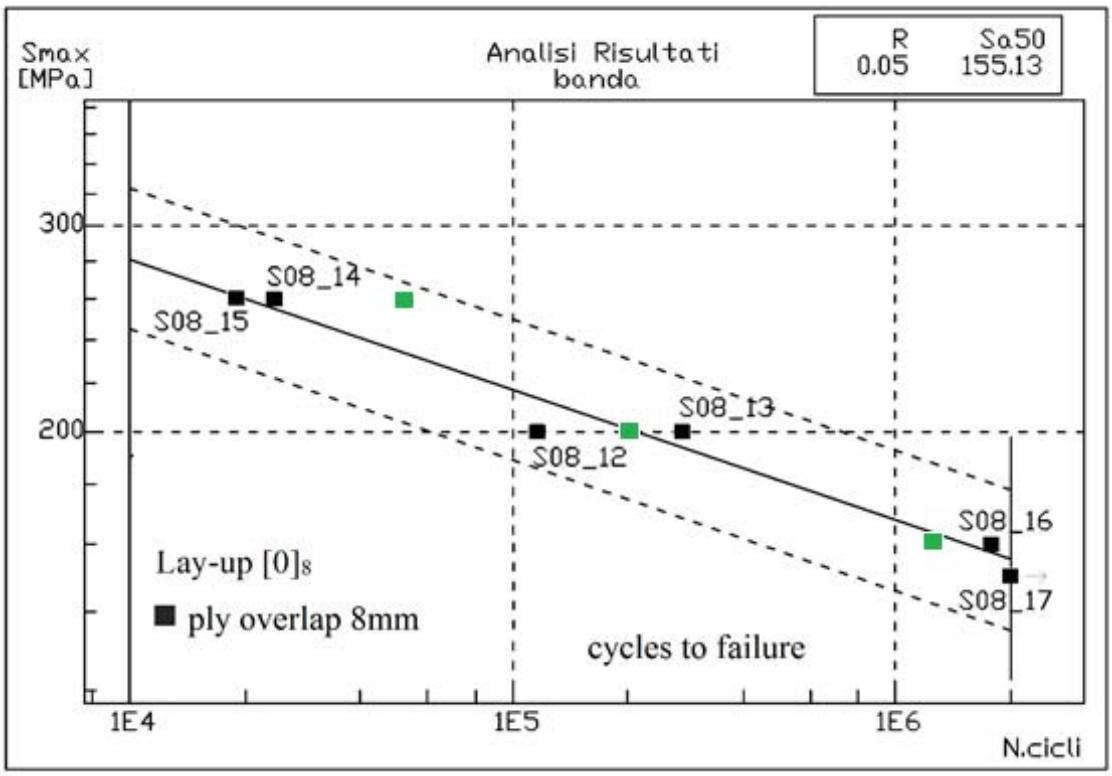
Questa operazione è stata ripetuta per tutti i provini S08 testati ad esclusione del provino S08_17, andato in *run-out* e per questo motivo non è stato possibile calcolare l'estremo di integrazione superiore della 5.32.

I risultati ottenuti sono sintetizzati nella seguente tabella

Provino	$a_{fem,max}$	$N_{f,\ sperimentale}$	$N_{f,\ analitico}$
S08_14	9.48	23867	49110
S08_15	7.54	19232	48832
S08_12	13.24	116620	195247
S08_13	11.09	192839	192839
S08_16	11.78	1766376	1286564

Tab.15 confronto $N_{f,\ sperimentale}$ e $N_{f,\ analitico}$. Provini S08

Vengono confrontati i risultati analitici e quelli sperimentali all'interno di una curva di Woheler.



Tab.5.65 confronto $N_{f,\ sperimentale}$ e $N_{f,\ analitico}$ nella curva di Woheler per provini S08

Si vede come i risultati ottenuti mediante integrazione (in verde) sono in buon accordo con quelli ottenuti sperimentalmente in quanto cadono all'interno della banda di dispersione ottenuta facendo variare la probabilità di sopravvivenza.

Per i provini con *lay-up* $[0_2/45_5/0]$ i risultati ottenuti sono sintetizzati in *Tab. 16*

Provino	$a_{fem,max}$	$N_{f,\ sperimentale}$	$N_{f,\ analitico}$
SQI5_01	9.96	7542	42460
SQI5_02	12.54	8961	42988
SQI5_03	11.21	120131	113112
SQI5_04	10.78	62149	114152
SQI5_05	11.04	484189	235979
SQI5_06	11.29	1948821	365135

Tab.16 confronto $N_{f,\ sperimentale}$ e $N_{f,\ analitico}$. Provini SQI5

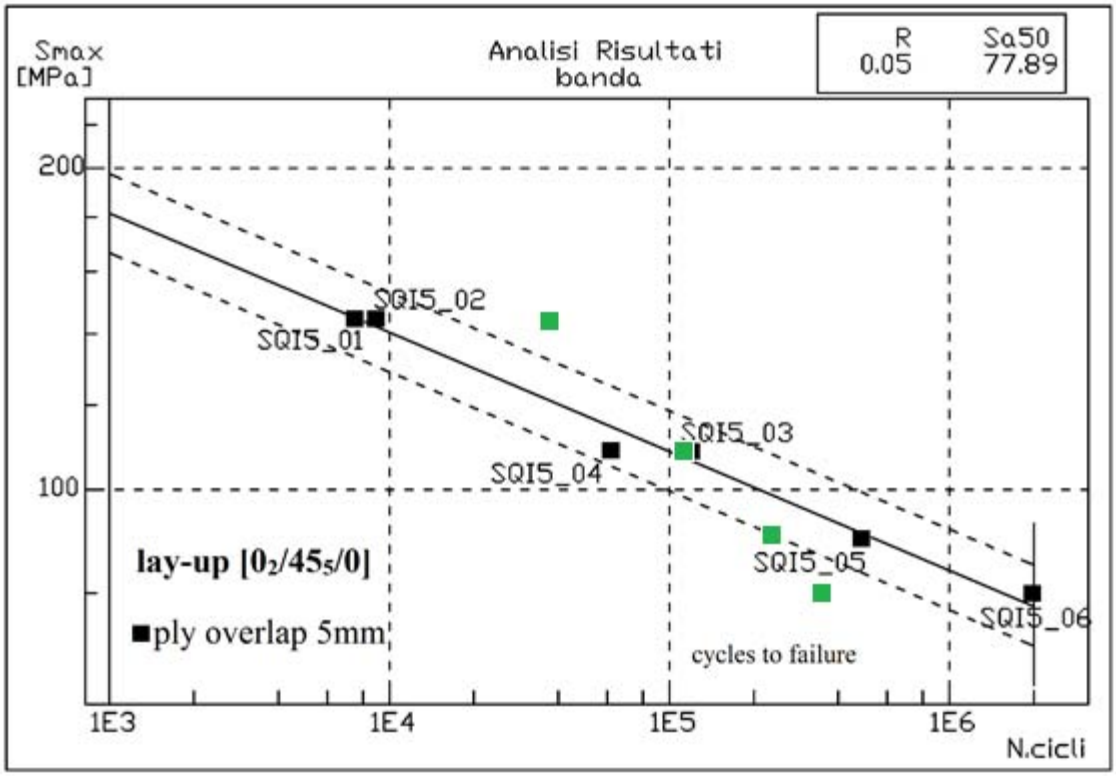


Fig.5.65 confronto $N_{f,\ sperimentale}$ e $N_{f,\ analitico}$ nella curva di Woheler per provini S08

Per questa tipologia di provini i risultati analitici ottenuti per l'alto e per il basso carico, si discostano notevolmente rispetto a quelli ottenuti sperimentalmente. Le motivazioni di questa incongruenza sono ancora oggetto di approfondimento.

Capitolo 6

ANALISI DELLA RIGIDEZZA DEI PROVINI e METODO FEM

6.1 Definizione di rigidezza

Nell'ultima parte di questo lavoro di tesi è stata analizzato l'andamento della rigidezza dei provini al variare del numero di cicli e della lunghezza di delaminazione.

La rigidezza è la capacità di un elemento di opporsi alle deformazioni generate da un carico. Questa grandezza è definita come

$$K = \frac{F}{\delta} \tag{6.1}$$

F è la forza applicata e δ è lo spostamento misurato.

Si possono distinguere diversi tipi di rigidezza: flessionale, torsionale e assiale.

Dal momento che tutte le prove sono state tutte condotte in regime assiale, applicando un carico parallelo all'asse longitudinale del provino, la rigidezza a cui si fa sempre riferimento è quella assiale.

Per chiarire il concetto di rigidezza si consideri la *Fig 6.1*, in cui è raffigurato schematicamente un provino *stepped-lap* e la forza su di esso applicata durante il corso di una prova.

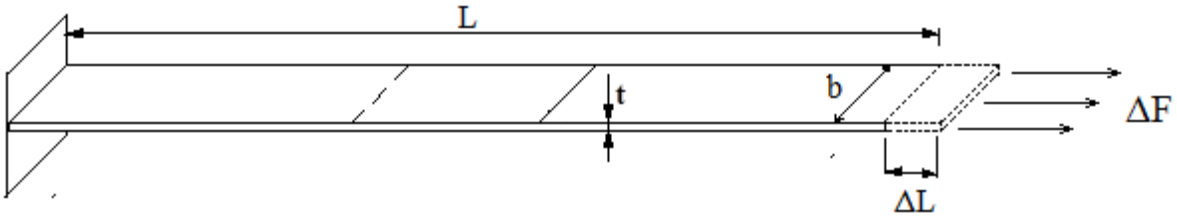


Fig. 6.1 provino incastrato ad una estremità e soggetto ad una forza variabile nel tempo

La ganascia inferiore della macchina di prova è fissa da qui la decisione di applicare un incastro all'estremo sinistro del modello di *Fig 6.1*.

L'ampiezza di tensione applicata si può esprimere come:

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta F}{A} \tag{6.2}$$

dove ΔF indica il range di forza entro cui la prova viene effettuata tenendo presente che il carico viene applicato con andamento sinusoidale, invece A indica l'area della sezione del provino data dal prodotto $A = b \cdot t$.

La deformazione massima del provino si può esprimere come

$$\varepsilon_{max} = \frac{F_{max}}{A} \tag{6.3}$$

L'allungamento ΔL del provino è dato dalla seguente relazione

$$\Delta \mathrm{L} = \int_0^L \varepsilon dL = \frac{\Delta F}{EA} \mathrm{L} \tag{6.4}$$

La rigidezza assiale è definita come

$$K = \frac{F}{\Delta L} = \frac{F}{\frac{F}{EA} L} = \frac{EA}{L} \tag{6.5}$$

Nel presente lavoro, la rigidezza di ogni singolo provino è stata calcolata utilizzando l'equazione (6.1).

Sono stati utilizzati le forze e gli spostamenti contenuti nei file *.dat* creati durante l'esecuzione di ogni blocco di carico. Il carico come già specificato in precedenza è stato applicato utilizzando una forma d'onda sinusoidale con una frequenza variabile dai 5 ai 10 Hz in funzione del livello di tensione applicato. Per descrivere un singolo ciclo di carico si sono utilizzati 50 punti ciclo (vedi *Fig. 6.2*), lo stesso è stato fatto per campionare lo spostamento.

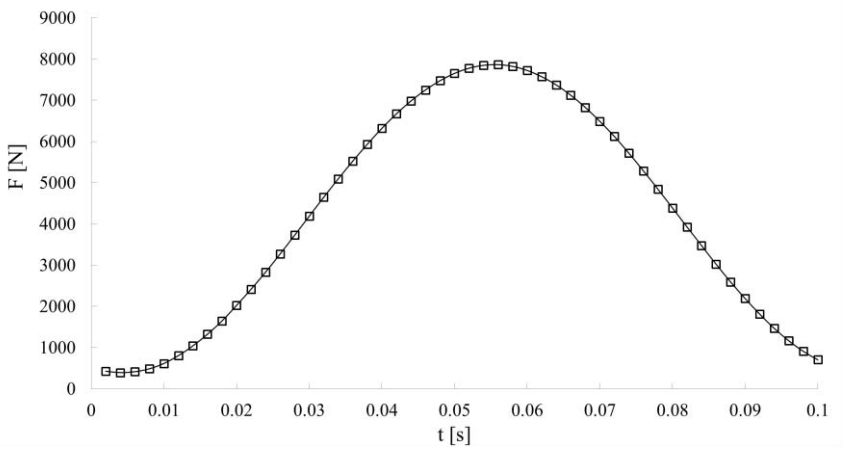


Fig. 6.2 singolo ciclo di forza applicato al provino S08_17. Frequenza di carico 10 Hz

Per ciascun blocco di carico sono state effettuate 10 acquisizioni a intervalli regolari, composte da 100 dati ciascuna in quanto il software MTS campiona ogni volta 2 cicli di forza e carico consecutivi. È stato così necessario selezionare un solo singolo ciclo dei due registrati, per essere certi che il massimo della forza e il massimo dello spostamento venissero presi sempre al ciclo *n-ennismo*.

La rigidezza è stata ricavata attraverso la (6.6)

$$K = \frac{\Delta F}{\Delta s} = \frac{F_{max} - F_{min}}{s_{max} - s_{min}} \tag{6.6}$$

Nei grafici realizzati ci si è riferiti alla rigidezza normalizzata rispetto al valore di rigidezza iniziale K_i. Nei paragrafi successivi si analizzano le curve ottenute per provini con *lay-up* $[0]_8$.

6.2 Rigidezza sperimentale provini con *lay-up* $[0]_8$

Provino S08_12 (Δσ = 190 MPa)

La Fig. 6.2 mostra come varia la rigidezza normalizzata all'aumentare del numero di cicli per il provino S08_12 testato con un'ampiezza di tensione Δσ = 190 MPa.

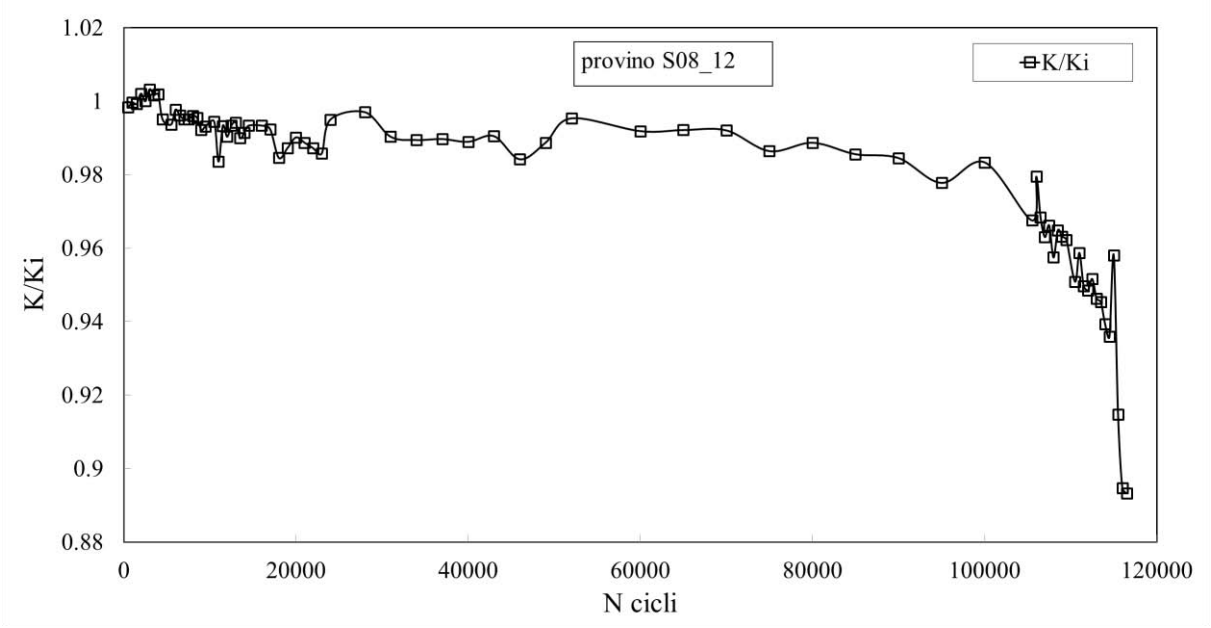


Fig. 6.3 andamento della rigidezza normalizzata per il provino S08_12

Come si può vedere, l'andamento rispetta le previsioni iniziali, secondo cui la rigidezza rimane pressoché invariata nelle fasi iniziali della prova, si ha poi una piccola variazione percentuale (1-2%) nella fase intermedia ed infine nella fase finale il calo di rigidezza si fa più accentuato diminuendo in questo caso anche dell'10% prima di rompersi.

Provino S08_13 (Δσ = 190 MPa)

L'andamento della rigidezza normalizzata del provino S08_13 è riportato in *Fig.6.4*

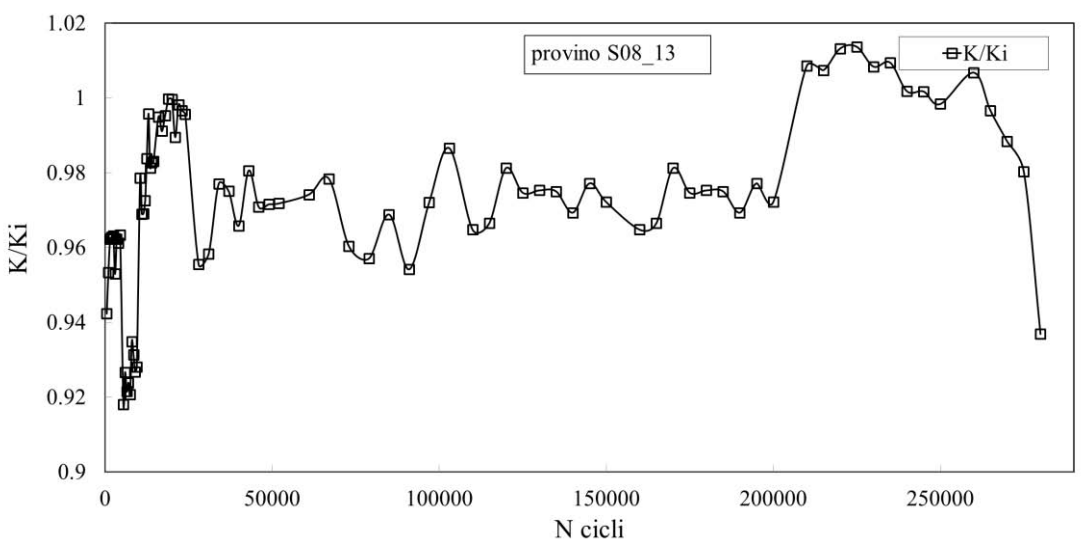


Fig. 6.4 andamento della rigidezza normalizzata per il provino S08_13

Come si può facilmente vedere questo andamento, così come è stato rappresentato, risulta essere anomalo con una rigidezza che nelle fasi iniziali cala del 10% per poi aumentare nuovamente in una sorta di altalena che non si può spiegare dal punto di vista fisico.

È stato così necessario apportare delle modifiche al grafico precedente considerando il fatto che non vi possono essere cambiamenti di rigidezza dall'ultima acquisizione relativa al blocco di carico *n* alla prima acquisizione del blocco *n+1*. Sono dunque stati traslati rigidamente i punti appartenenti ad uno stesso blocco di carico, in modo da rispettare la suddetta condizione. Il risultato è riportato di seguito.

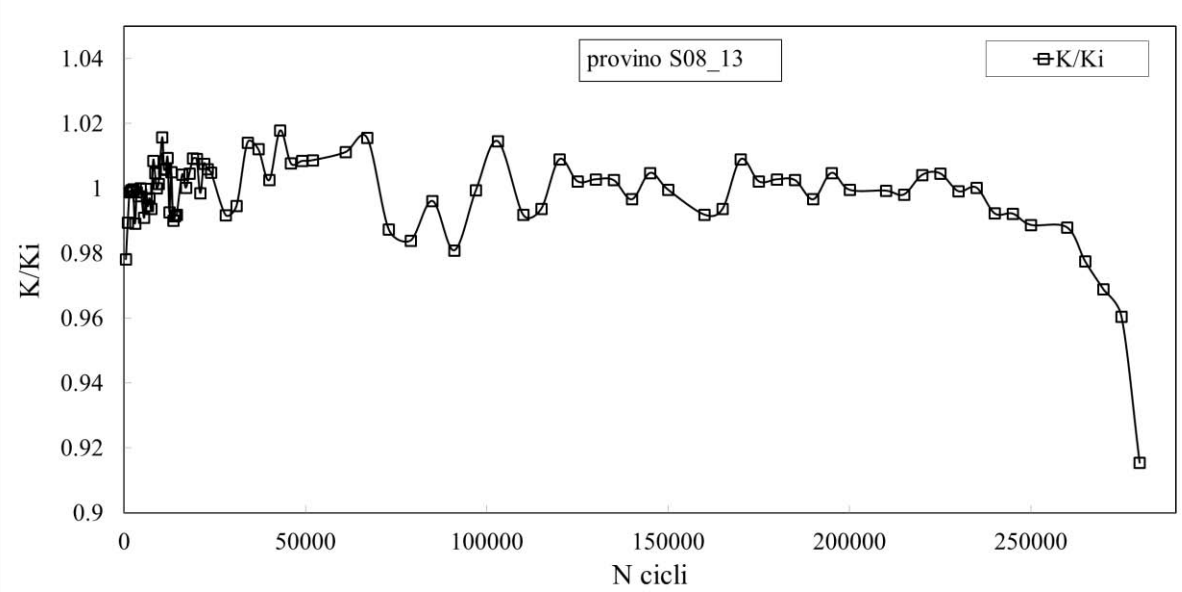


Fig. 6.5 andamento della rigidezza normalizzata opportunamente rielaborata; provino S08_13.

Provino S08_14 (Δσ = 247 MPa)

L'andamento della rigidezza normalizzata del provino S08_14 è riportato in *Fig.6.6*

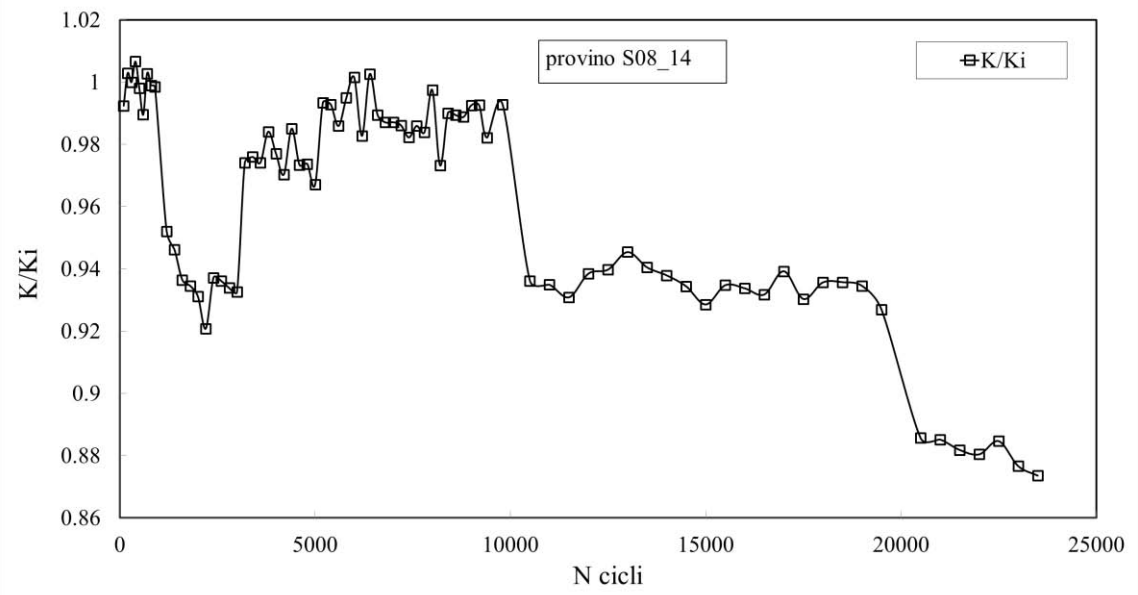


Fig. 6.6 andamento della rigidezza normalizzata per il provino S08_14

In questo caso risulta ancor più evidente la differenza di rigidezza che si ottiene tra un blocco di carico e il successivo, non spiegabile fisicamente. La causa di tale discrepanza può essere ricondotta a delle differenze di allineamento del provino nella macchina di prova. Come fatto in precedenza per il provino S08_13, è stata dunque modificata la

curva, traslando rigidamente i suoi punti in modo opportuno. La curva che si ottiene è riportata in *Fig. 6.6*.

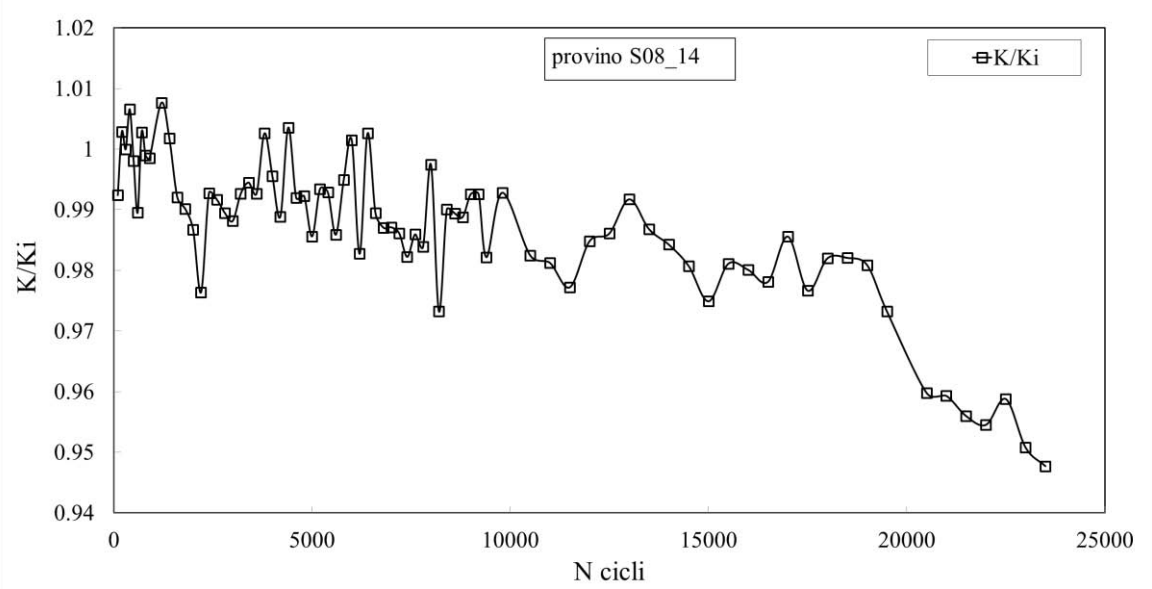


Fig. 6.7 andamento della rigidezza normalizzata opportunamente rielaborata; provino S08_14.

È necessario dire che tale elaborazione non è stata fatta su tutte le curve di rigidezza dei provini testati; in alcune curve, specialmente quelle relative ai provini con *lay-up* $[0_2/45_5/0]$, non si sono riscontrate evidenti discontinuità di rigidezza tra un blocco di carico e il successivo, di conseguenza non si è resa opportuna tale operazione.

Nei casi trattati successivamente viene direttamente mostrata la curva di rigidezza rielaborata, qualora si sia resa necessaria tale operazione, mentre per i casi in cui tale intervento non è stato apportato, si visualizza la curva con andamento originario.

Provino S08_15 (Δσ = 247 MPa)

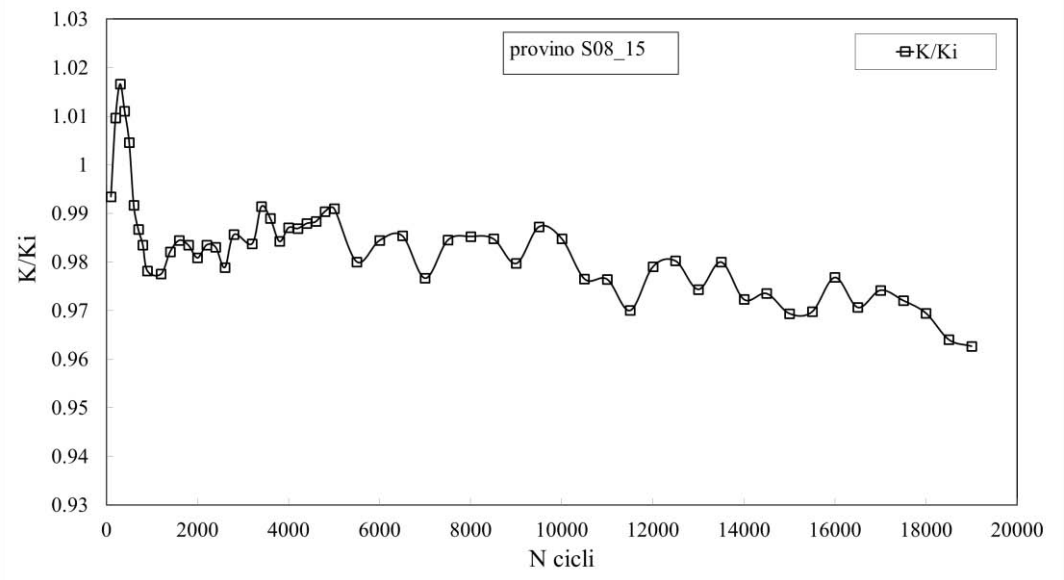


Fig. 6.8 andamento della rigidezza normalizzata opportunamente rielaborata; provino S08_15.

Provino S08_16 (Δσ = 152 MPa)

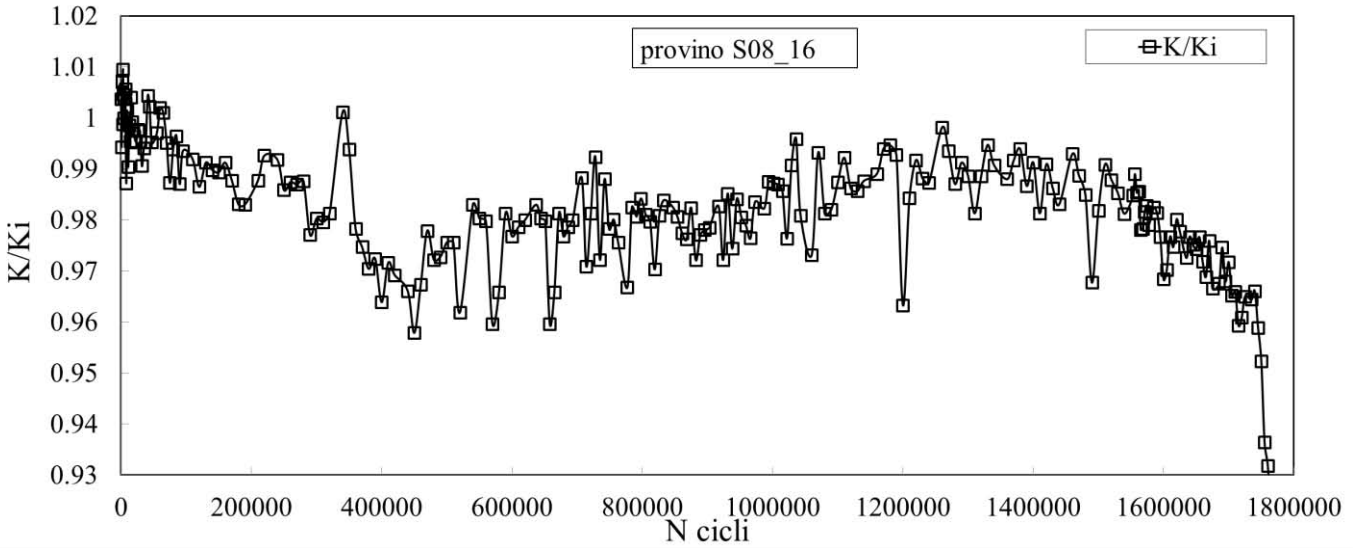


Fig. 6.9 andamento della rigidezza normalizzata opportunamente modificata; provino S08_16.

Provino S08_17 (Δσ = 142.5 MPa)

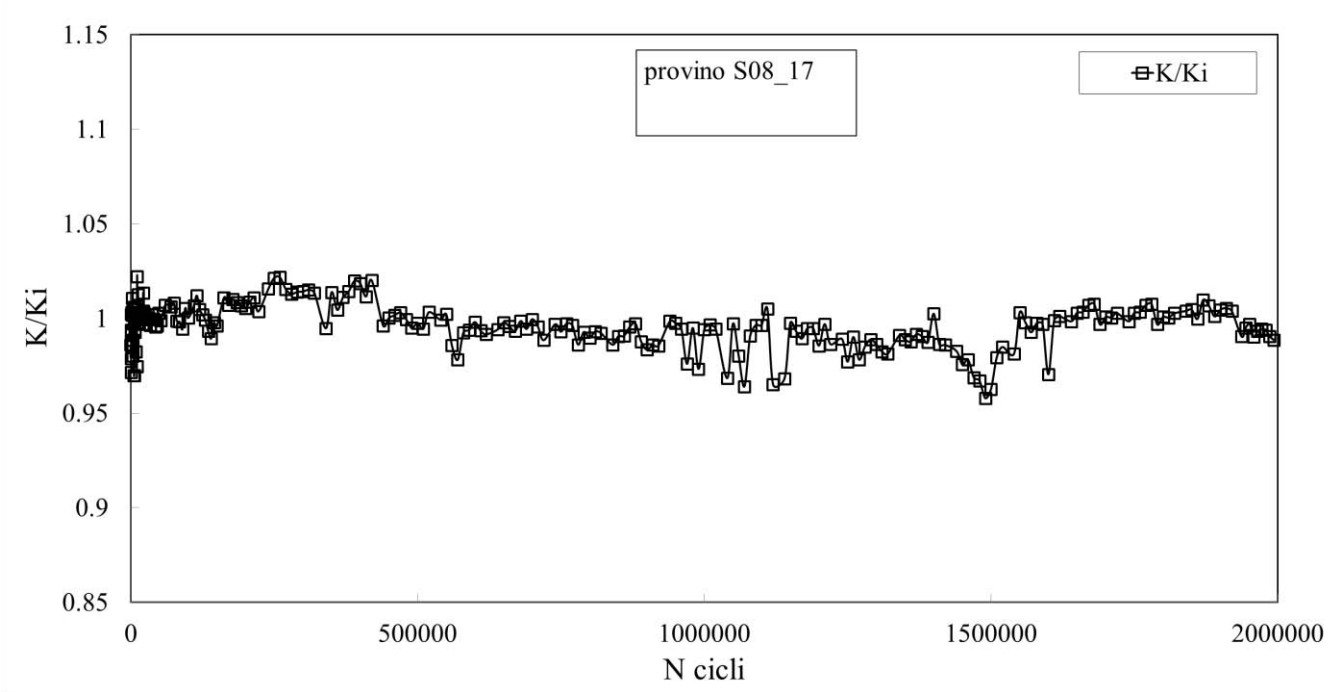


Fig. 6.10 andamento della rigidezza normalizzata; provino S08_17.

Il provino S08_17, sollecitato con un'ampiezza di tensione di 142.5 MPa, ha terminato la prova in *run-out,* come si è visto nel capitolo 4 relativo alle prove sperimentali. Il fatto che il provino non si sia rotto nel corso della prova è testimoniato anche dall'andamento della rigidezza (vedi *Fig. 6.10*) che rimane circa costante durante tutta la prova. Non si nota infatti il caratteristico calo di rigidezza dell'8-10% che contraddistingue la parte destra (corrispondente alla fase finale della vita a fatica della giunzione) delle altre curve.

6.3 Rigidezza sperimentale provini con *lay-up* [$0_2/45_5/0$]

Provino SQI5_01 ($\Delta\sigma$ = 137.55 MPa)

Vengono ora presentate le curve di rigidezza relative alle giunzioni con *lay-up* [$0_2/45_5/0$]. La curva ottenuta per il provino SQI5_01 soggetto ad alto carico con una tensione massima di 144.8 MPa è riportata i *Fig. 6.11*

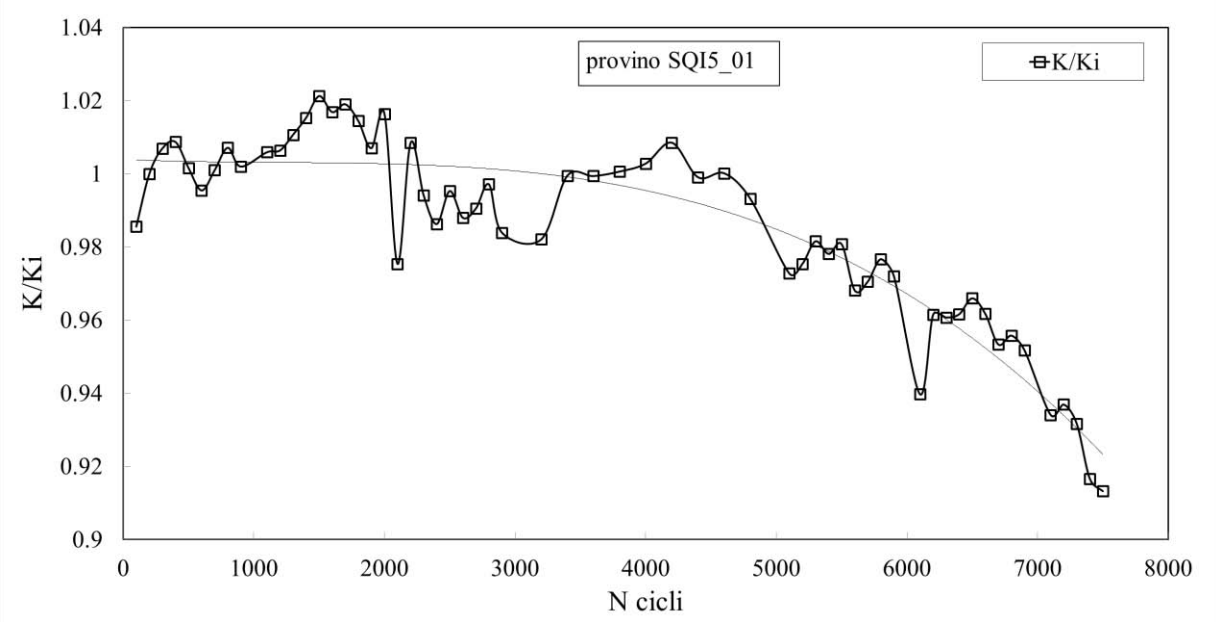


Fig. 6.11 andamento della rigidezza normalizzata; provino SQI5_01.

Provino SQI5_02 (Δσ = 137.55 MPa)

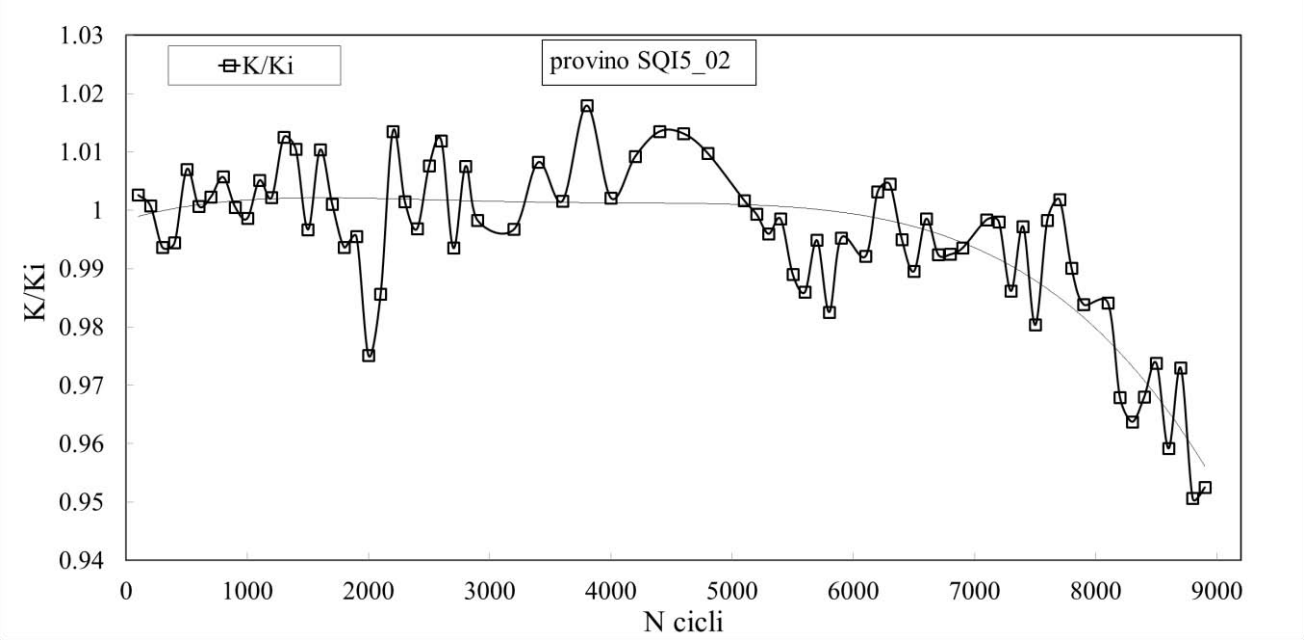


Fig. 6.12 andamento della rigidezza normalizzata; provino SQI5_02.

Provino SQI5_03 (Δσ = 103.55 MPa)

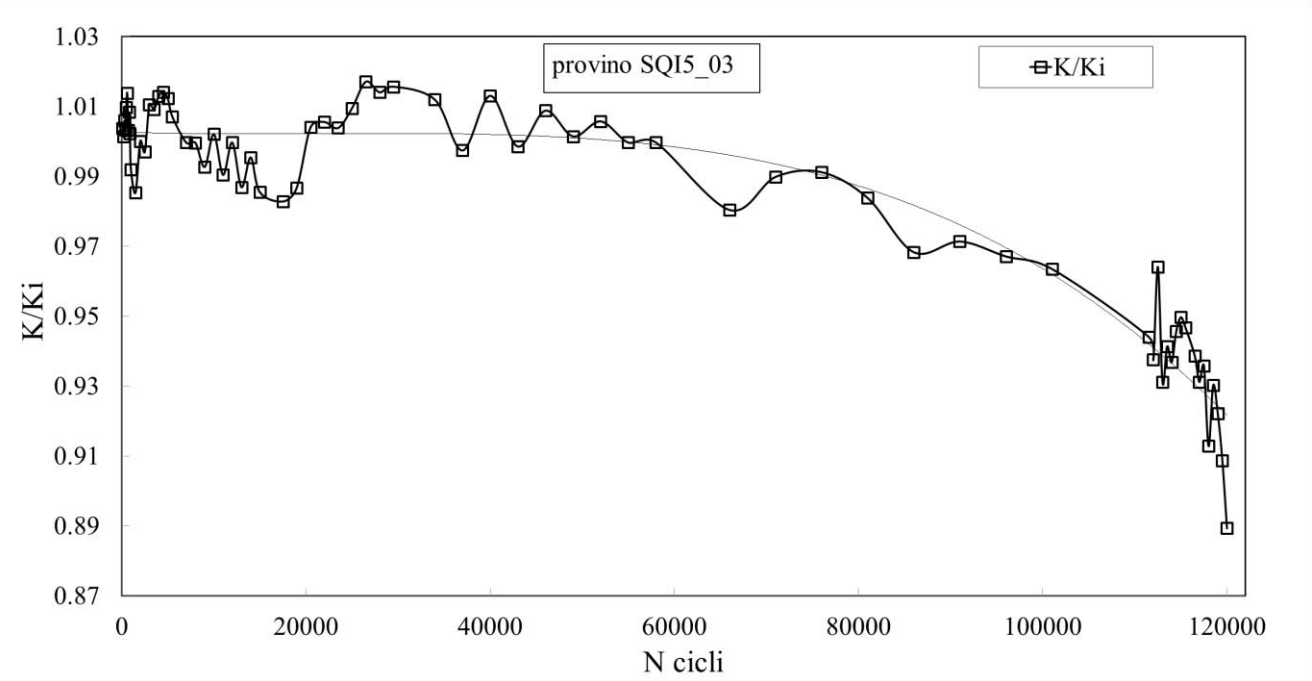


Fig. 6.13 andamento della rigidezza normalizzata; provino SQI5_03.

Provino SQI5_04 (Δσ = 103.55 MPa)

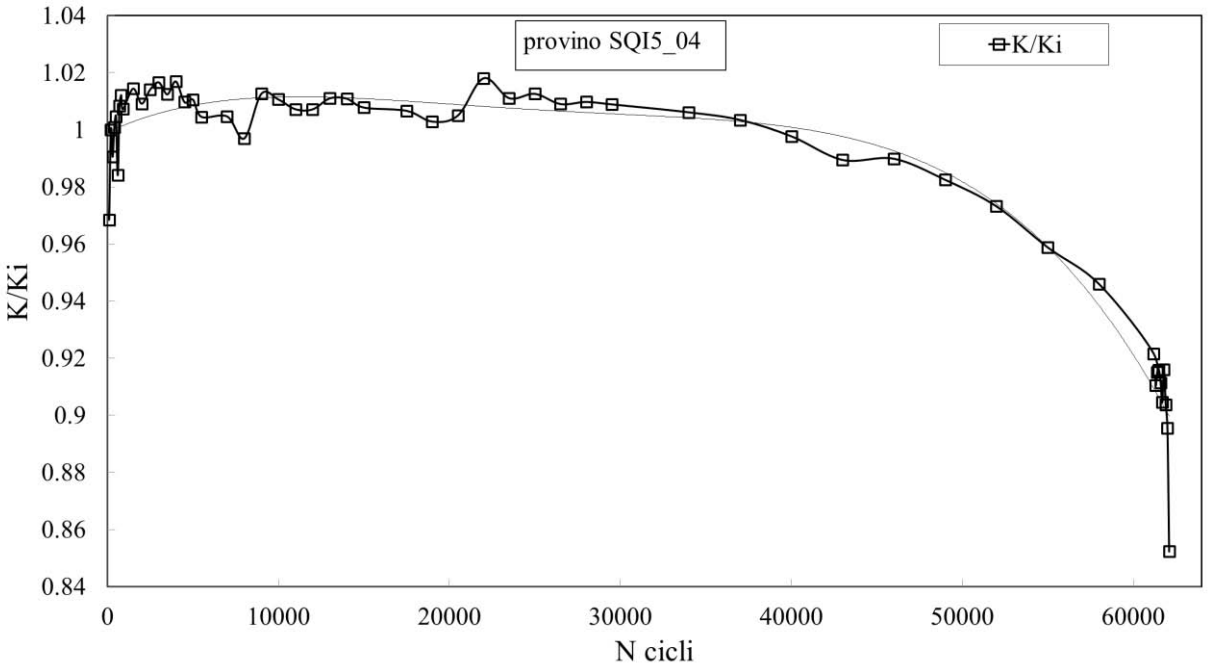


Fig. 6.14 andamento della rigidezza normalizzata; provino SQI5_04.

Provino SQI5_05 (Δσ = 85.5 MPa)

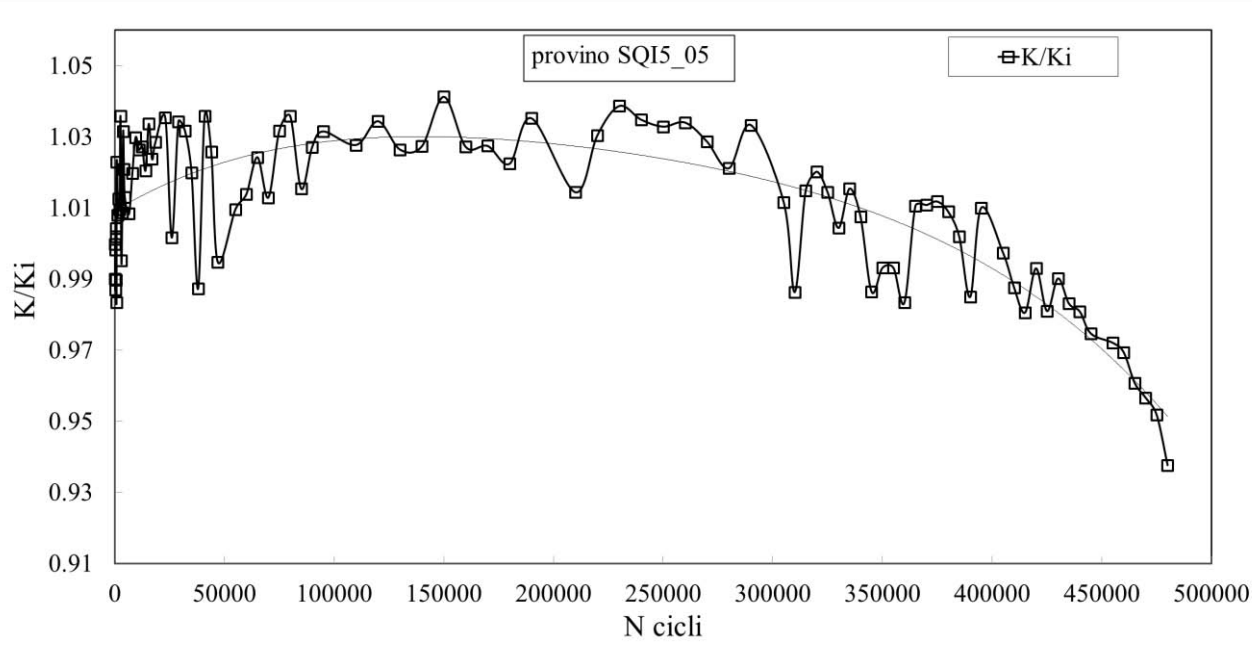


Fig. 6.15 andamento della rigidezza normalizzata; provino SQI5_05.

Provino SQI5_06 (Δσ = 76 MPa)

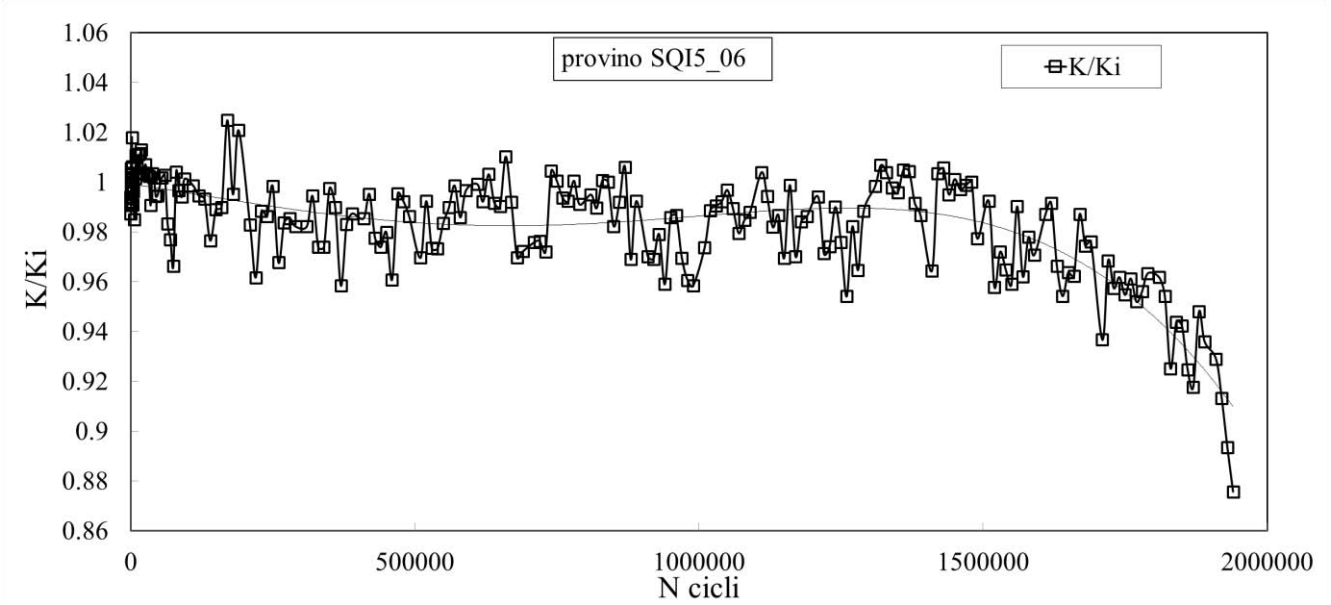


Fig. 6.16 andamento della rigidezza normalizzata; provino SQI5_06.

6.4 Riepilogo rigidezze ricavate sperimentalmente

Vengono ora riassunti i risultati sperimentali ottenuti per i due diversi *lay-up*. Per ottenere delle curve confrontabili, si è deciso di sostituire il numero di cicli in ascissa con la percentuale della vita a fatica.

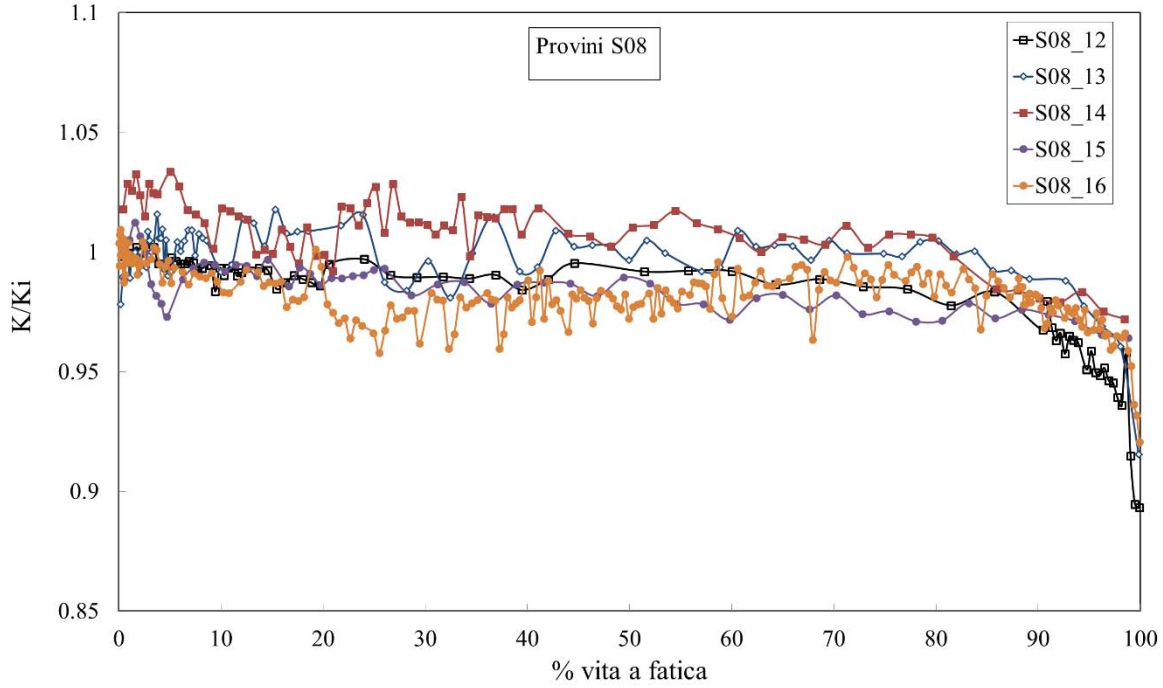


Fig. 6.17 riepilogo rigidezza provini con lay-up $[0]_8$

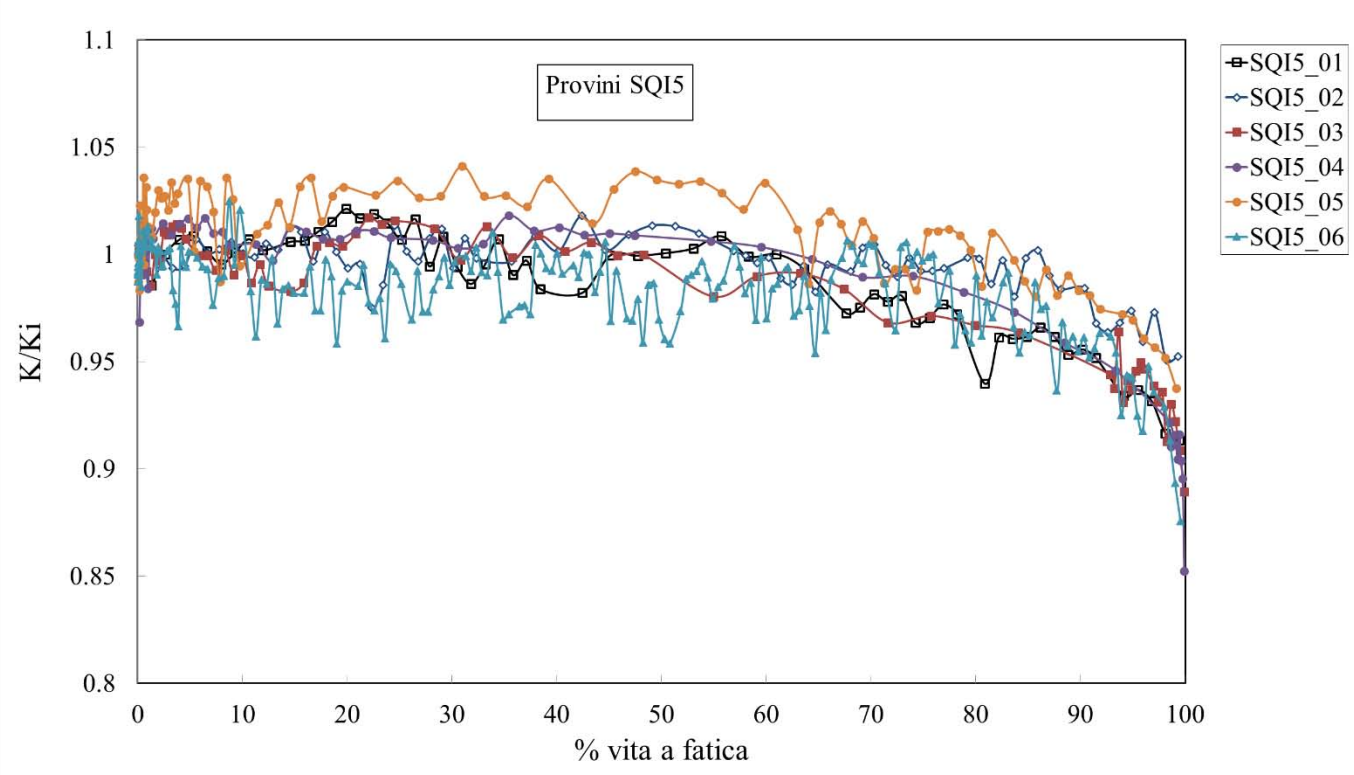


Fig. 6.18 riepilogo rigidezza provini con lay-up $[0_2/45_5/0]$

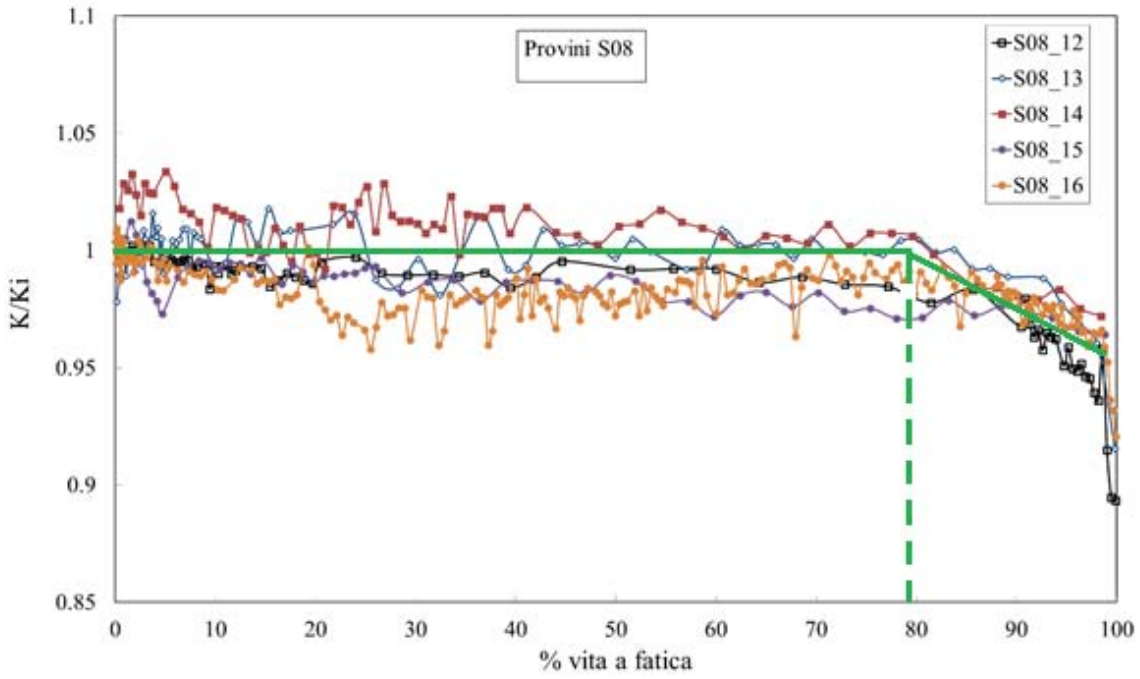


Fig. 6.19 Calo di rigidezza per provini con lay-up $[0]_8$

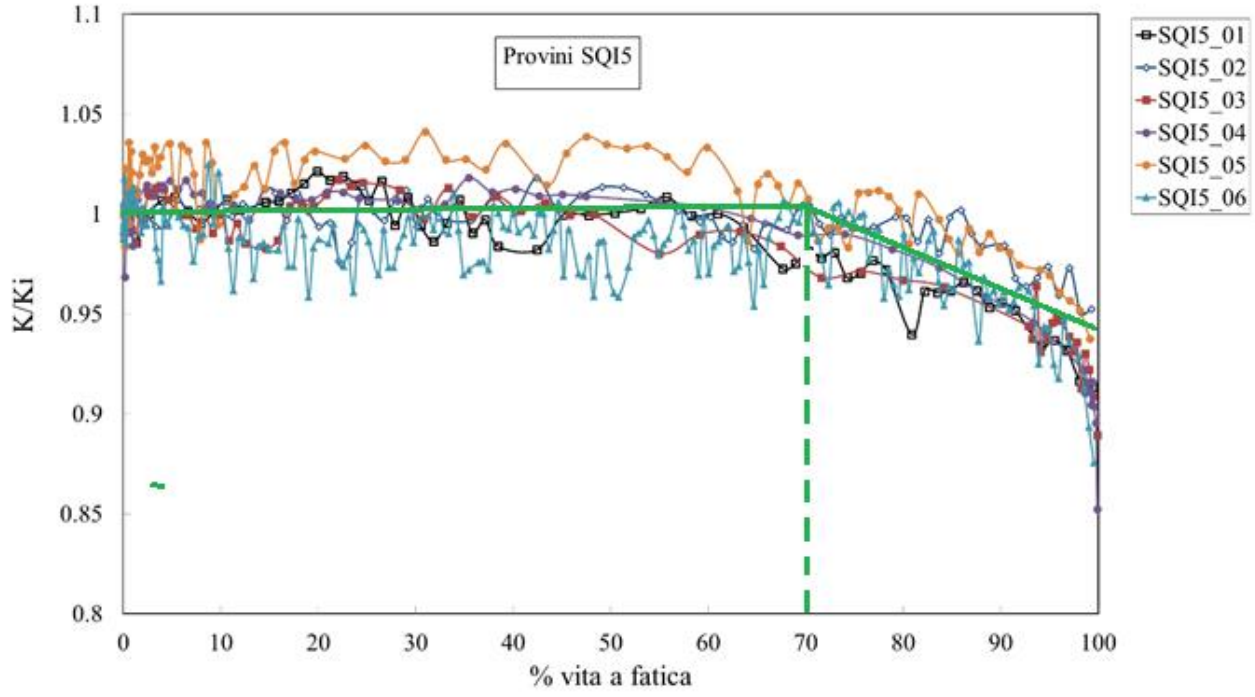


Fig. 6.20 Calo di rigidezza per provini con lay-up $[0_2/45_5/0]$

Si può vedere come per entrambi i *lay-up* la dispersione dei risultati oscilla tra ±5%. Per quanto riguarda il *lay-up* $[0_2/45_5/0]$, la massima dispersione si ha considerando le curve ottenute per i provini SQI5_05 e SQI5_06 entrambi soggetti a basso carico. Si può quindi affermare che il livello di carico non influisce sull'andamento della rigidezza all'aumentare del numero di cicli.

Le *Fig. 6.19* e *6.20* mostrano inoltre come il calo di rigidezza nella fase finale della vita a fatica per i provini S08 avvenga a all'interno di una banda compresa tra il 75 e l'85% della vita del provino mentre per i provini SQI5 tale calo si osserva all'interno di una banda compresa tra il 65% e il 75%.

Si è infine deciso di confrontare tra di loro le curve ottenute per i *lay-up* $[0]_8$ (in nero) e $[0_2/45_5/0]$ (in arancione).

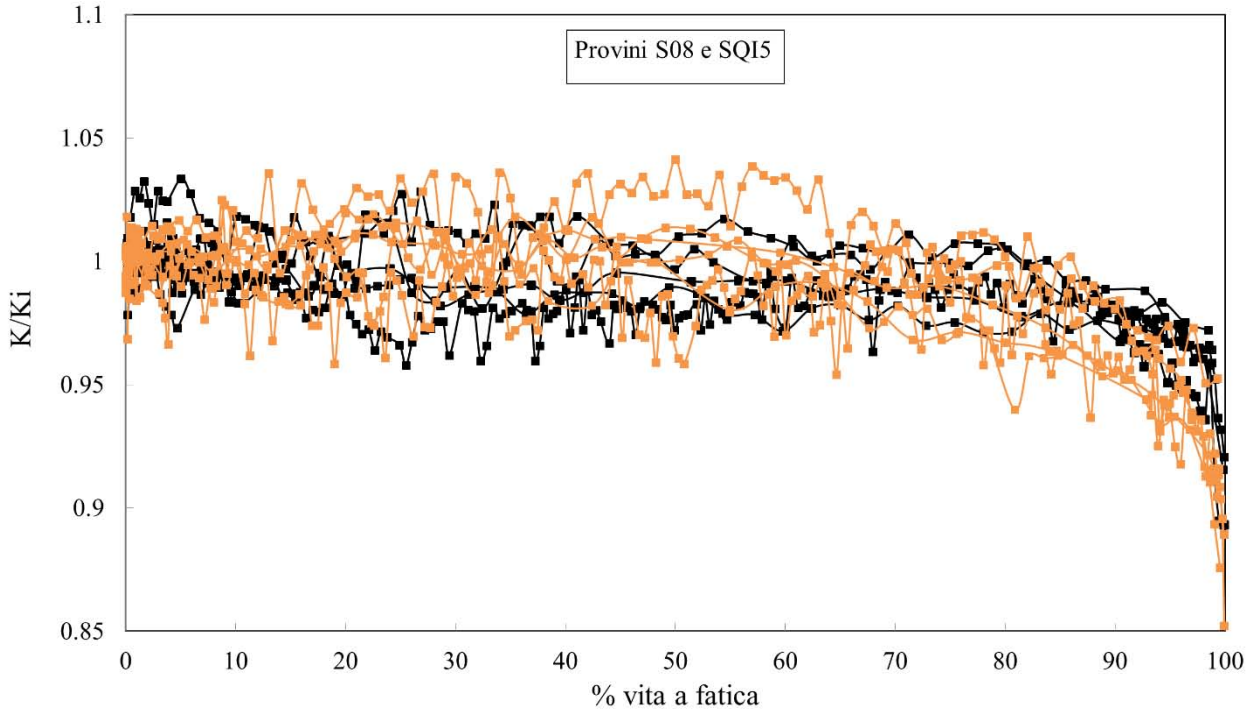


Fig. 6.21 confronto rigidezza provini con lay-up $[0_2/45_5/0]$ e lay-up $[0]_8$

Osservando la *Fig. 6.21* si nota che le curve risultano essere pressocché sovrapposte di conseguenza si può dire che la tipologia del *lay-up* non influisce sull'andamento della rigidezza al variare del numero di cicli.

Per percentuali di vita a fatica fino al 65-70% si può vedere una maggiore dispersione attorno al valore unitario della rigidezza adimensionalizzata dei provini con *lay-up* $[0_2/45_5/0]$. Dall'analisi microscopica fatta grazie alle foto acquisite nel corso delle varie prove, si è riscontrato che in tale periodo le delaminazioni formatesi aumentano considerevolmente la propria velocità di propagazione, delaminando verso gli strati interni della giunzione fino a portare a cedimento la giunzione. Mentre per le giunzioni S08 generalmente la delaminazione media, in questa fase, non propaga oltre le interfacce *a* e *g* (*Fig 4.2*), per le giunzioni SQI5 essa interessa anche le interfacce *b* ed *f*, e nel caso del provino SQI5_04 anche *c* ed *e*.

6.5 Rigidezza sperimentale al variare della lunghezza di delaminazione

Sono stati inoltre realizzati dei grafici che correlano l'andamento della rigidezza, calcolata sperimentalmente con la lunghezza della delaminazione misurata sperimentalmente e normalizzata rispetto l'*overlap*. Tale lunghezza è la media delle delaminazioni medie, riassuntiva dello stato complessivo del danneggiamento del provino, calcolata al termine di ogni blocco di carico.

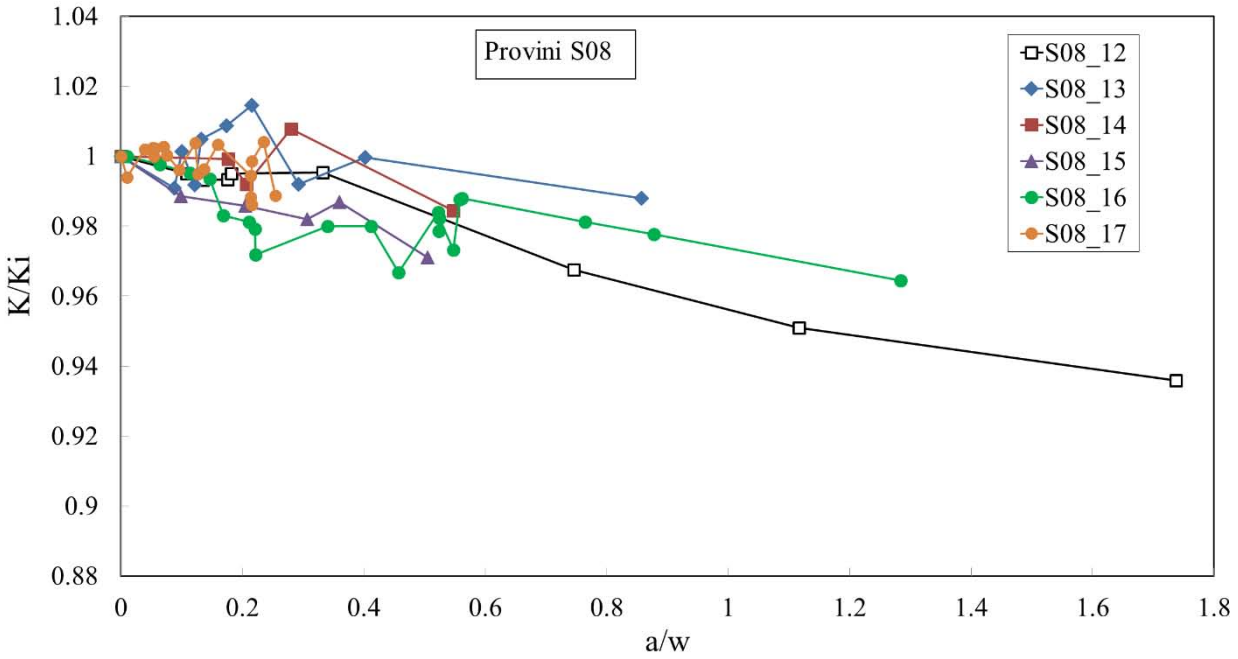


Fig. 6.22 rigidezza al variare della lunghezza di delaminazione normalizzata rispetto w; lay-up $[0]_8$

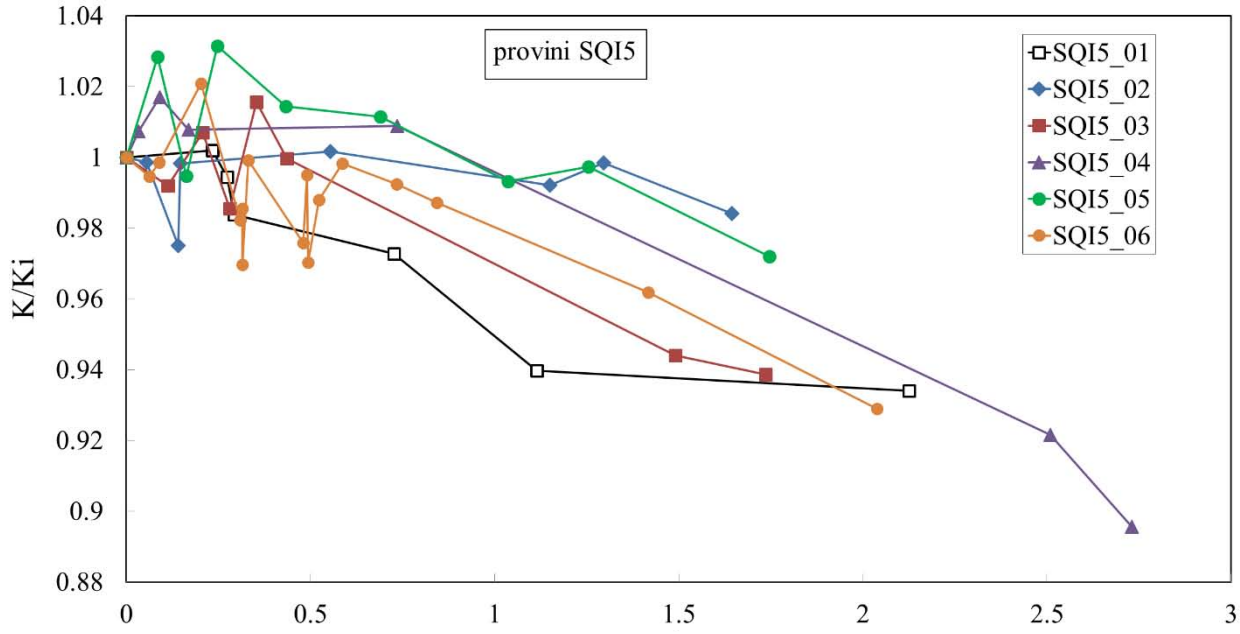


Fig. 6.23 rigidezza al variare della lunghezza di delaminazione normalizzata rispetto w; lay-up $[0_2/45_5/0]$

Dalle *Fig. 6.22* e *6.23* si può vedere come per piccoli valori di lunghezza di cricca la rigidezza complessiva del provino sembra non risentire del danneggiamento oscillando tra ±2-3% rispetto al valore iniziale. Un calo di rigidezza inizia ad osservarsi nel momento in cui la media delle delaminazioni medie raggiunge una lunghezza pari a metà della lunghezza di sovrapposizione del giunto. In corrispondenza del cambio di interfaccia del fronte di cricca, per i provini con *lay-up* $[0]_8$ non si nota un calo netto di rigidezza come osservato nelle simulazioni FEM, si nota tuttavia una diminuzione di rigidezza apparentemente lineare a partire da $a/w = 0{,}6$.

Per i provini con *lay-up* $[0_2/45_5/0]$ invece questa discontinuità nell'andamento della rigidezza si può riscontrare nelle curve ottenute per i provini SQI5_01 e SQI5_05 in corrispondenza del rapporto $a/w=1$. Si nota anche in questo caso l'andamento decrescente della rigidezza all'aumentare della lunghezza di cricca per tutti i provini testati.

Si possono anche in questo caso raggruppare in un unico grafico le figure *6.22 e 6.23* per valutare l'influenza del *lay-up* sull'andamento della rigidezza. Come fatto nel confronto di *Fig. 6.21* le curve relative al *lay-up* $[0]_8$ sono di colore nero, mentre quelle arancioni si riferiscono al *lay-up* $[0_2/45_5/0]$.

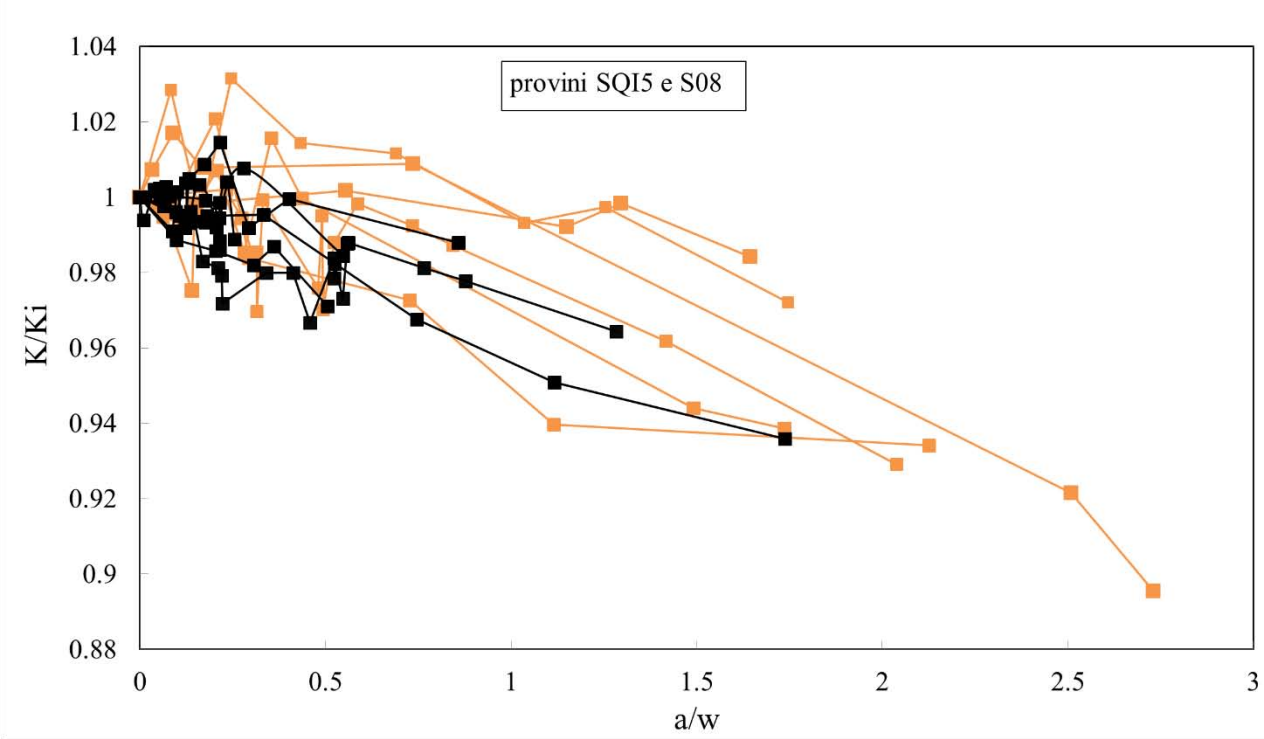


Fig. 6.24 rigidezza al variare della lunghezza di delaminazione normalizzata rispetto w; lay-up$[0]_8$ e $[0_2/45_5/0]$

Dall'analisi della *Fig. 6.24* si può vedere come si abbia una diminuzione di rigidezza confrontabile nel caso dei due *lay-up*, all'aumentare del rapporto *a/w*. Nonostante i provini SQI5 abbiano una rigidezza inferiore di circa il 20% rispetto agli S08, la riduzione *K/Ki* che si osserva all'aumentare di *a/w* è la medesima di conseguenza si può dire che tale variazione non dipende dal tipo di *lay-up*.

I provini S08, come si può vedere, si rompono dopo essersi danneggiati in misura minore rispetto a quanto accade per i provini SQI5. Le curve arancioni *(Fig. 6.24)* presentano infatti un'estensione mediamente maggiore rispetto a quelle nere relative agli S08.

6.6 Calcolo della rigidezza con analisi FEM

Una volta costruite le curve di rigidezza con i dati ottenuti in output dalla macchina di prova, si è deciso di costruire delle ulteriori curve di rigidezza questa volta utilizzando i risultati ottenuti dalle simulazioni FEM.

La relazione utilizzata per il calcolo della rigidezza è la (6.6). Il ΔF è stato ricavato a partire dall'ampiezza di tensione applicata, mentre gli spostamenti sono stati ricavati dai file di testo generati dal codice di calcolo al termine di ogni simulazione.

Per ciascun file di testo sono stati registrati 3 spostamenti in corrispondenza dell'estremità destra della giunzione; tali spostamenti sono chiamati u_{xalto},u_{xbasso}, u_{xvcct}.

Lo spostamento u_{xvcct} viene misurato all'altezza della lamina dove si trova l'apice della cricca (vedi *Fig. 6.25*). È stato scelto tale parametro per descrivere lo spostamento complessivo dell'estremità della giunzione.

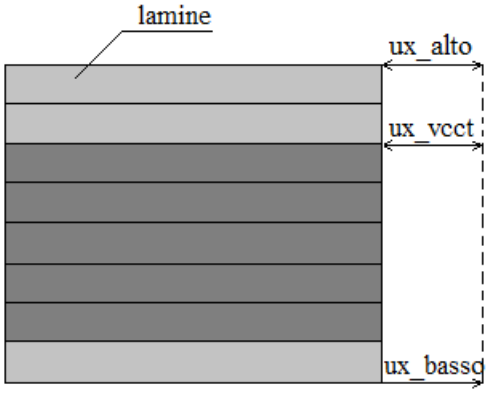


Fig. 6.25 spostamenti registrati nelle analisi FEM

È stata plottata la rigidezza in funzione della lunghezza di cricca per ciascun modello FEM creato.

6.7 Rigidezza FEM provini con *lay-up* $[0]_8$

Provini S08_12 e S08_13

In *Fig. 6.26* è riportata la curva di rigidezza valida per i provini S08_12 e S08_13, ricavata dalle analisi FEM di modelli con *lay-up* $[0]_8$, overlap 8mm, caricati con un'ampiezza di tensione $\Delta\sigma = 202.5$ MPa facendo variare di volta in volta la lunghezza di delaminazione *a*.

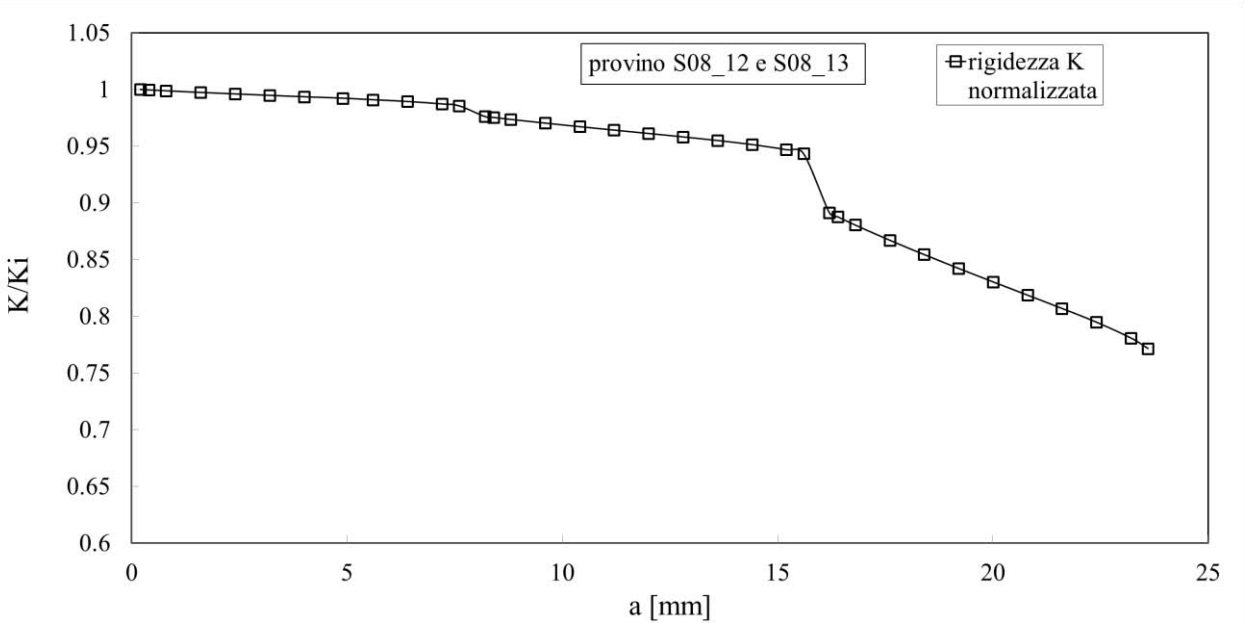


Fig. 6.26 andamento della rigidezza normalizzata calcolata con metodo FEM; provini S08_12 e S08_13.

Appare subito evidente la regolarità dell'andamento della curva rispetto a quella ricavata con i dati sperimentali. Si possono osservare l'andamento decrescente della curva all'aumentare della lunghezza di delaminazione e le due discontinuità in corrispondenza del cambiamento di interfaccia dell'apice della cricca (*a*=8, 16 mm).

A parità di lunghezza di cricca considerata, la riduzione percentuale di rigidezza che si osserva nella curva FEM è superiore rispetto a quanto osservato sperimentalmente in quanto il modello ad elementi finiti presuppone che le cricche propaghino

simultaneamente e in egual misura a partire da tutti e 4 i punti di giunzione più esterni, situazione che nella realtà difficilmente si verifica.

Provini S08_14 e S08_15

La *Fig. 6.27* riporta l'andamento normalizzato della rigidezza calcolata a partire dagli spostamenti ricavati con modelli FEM di *lay-up* $[0]_8$, overlap 8mm, caricati con un'ampiezza di tensione $\Delta\sigma = 247$ MPa, facendo variare la lunghezza di delaminazione.

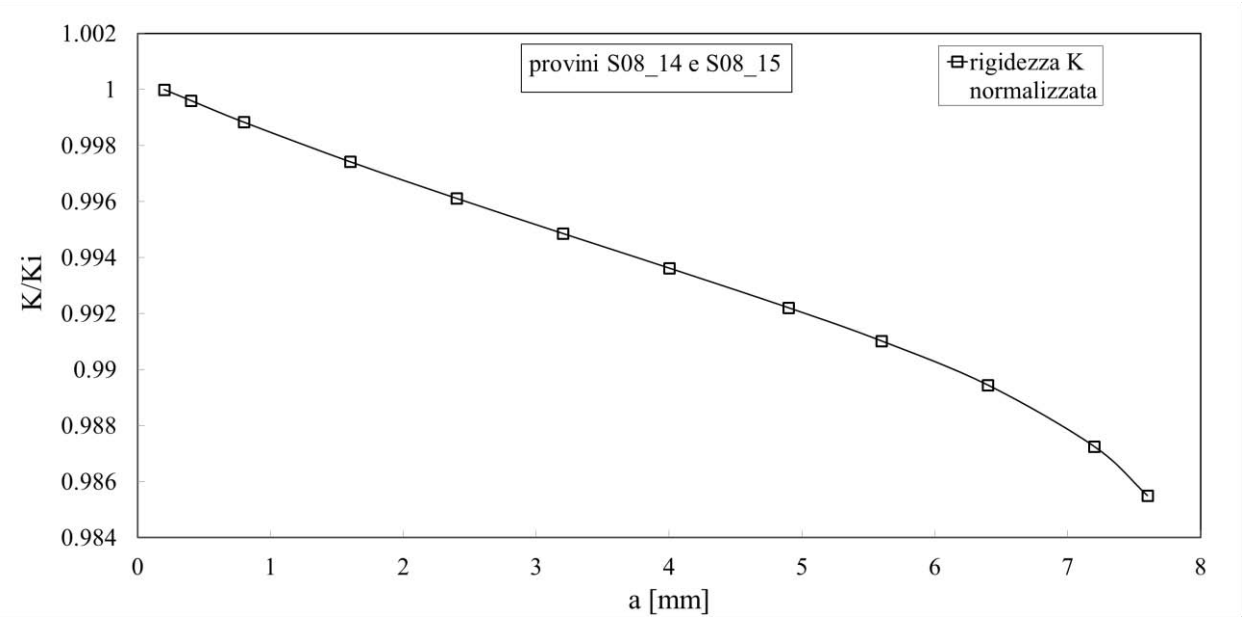


Fig. 6.27 andamento della rigidezza normalizzata calcolata con metodo FEM; provini S08_14 e S08_15.

A differenza del caso precedente, questa volta si è studiato il comportamento della rigidezza esclusivamente per una cricca propagante lungo la prima interfaccia. Il parametro *media delle delaminazioni medie*, attraverso cui si descrive lo stato di danneggiamento complessivo del provino, infatti non risulta essere superiore agli 8mm per entrambe le prove effettuate, di conseguenza sono state sufficienti analisi FEM eseguite per valori di cricca compresi tra 0.2 mm e 7.6mm.

Provino S08_16

La *Fig. 6.28* riporta l'andamento normalizzato della rigidezza calcolata a partire dagli spostamenti ricavati con modelli FEM di *lay-up* $[0]_8$, overlap 8mm, caricati con un'ampiezza di tensione $\Delta\sigma = 152$ MPa, facendo variare la lunghezza di delaminazione.

Anche in questo caso è stata analizzata la variazione di rigidezza per cricca propagante esclusivamente lungo la prima interfaccia.

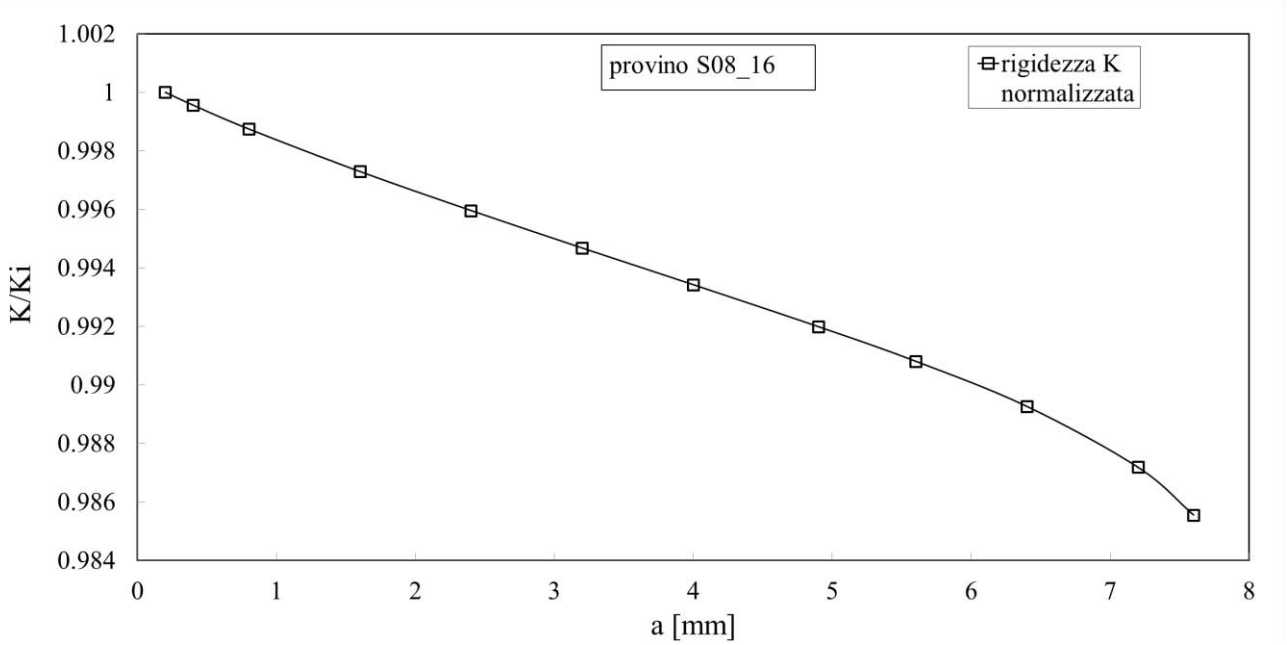


Fig. 6.28 andamento della rigidezza normalizzata calcolata con metodo FEM; provino S08_16.

Provino S08_17

La *Fig. 6.29* riporta l'andamento normalizzato della rigidezza calcolata a partire dagli spostamenti ricavati da modelli FEM di *lay-up* $[0]_8$, overlap 8mm, caricati con un'ampiezza di tensione $\Delta\sigma = 142.5$ MPa, facendo variare la lunghezza di delaminazione.

Il provino testato con la medesima ampiezza di tensione è l'S08_17

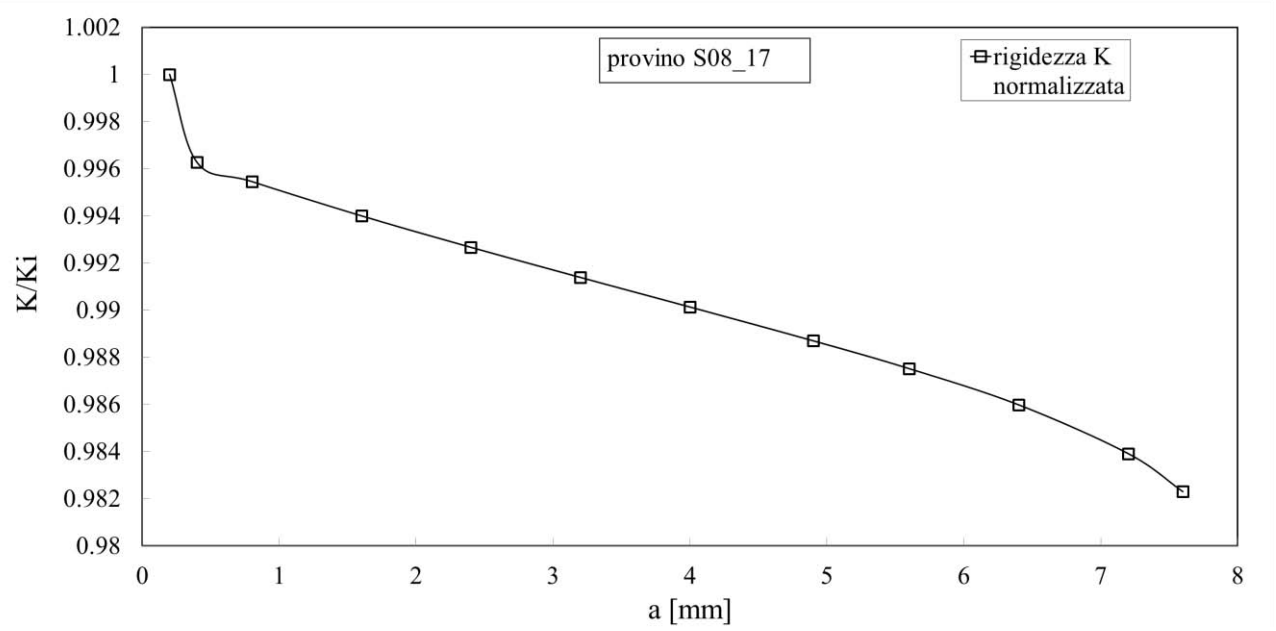


Fig. 6.29 andamento della rigidezza normalizzata calcolata con metodo FEM; provino S08_16.

6.8 Rigidezza FEM provini con *lay-up* $[0_2/45_5/0]$

Provini SQI5_01 e SQI5_02 ($\Delta\sigma$ = 137.55 MPa)

Si riportano ora gli andamenti della rigidezza ottenuti a partire dai risultati delle simulazioni FEM fatte su provini con lay-up $[0_2/45_5/0]$. In questo caso la lunghezza di sovrapposizione è stata posta pari a 5mm e l'ampiezza di tensione $\Delta\sigma$ = 137.55 MPa.

La *Fig. 6.30* riporta l'andamento della rigidezza con fronte di cricca propagante oltre che lungo la prima interfaccia, anche lungo la seconda e la terza interfaccia.

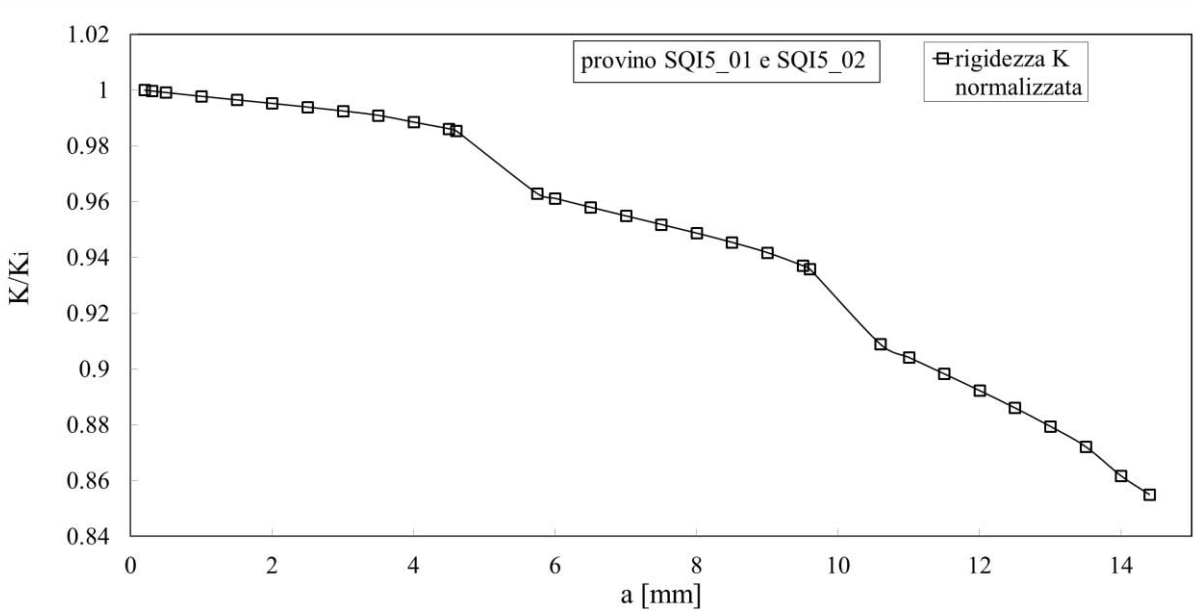


Fig. 6.30 andamento della rigidezza normalizzata calcolata con metodo FEM; provini SQI5_01 e SQI5_02.

Provini SQI5_03 e SQI5_04 (Δσ = 103.55 MPa)

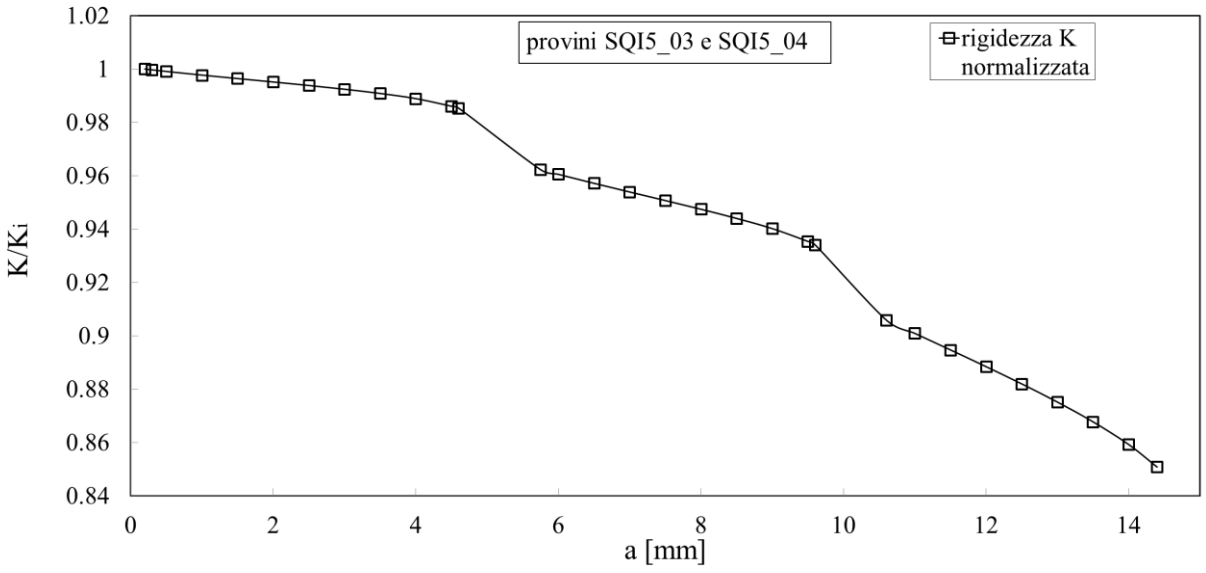


Fig. 6.31 andamento della rigidezza normalizzata calcolata con metodo FEM; provini SQI5_03 e SQI5_04.

Provino SQI5_05 (Δσ = 85.5 MPa)

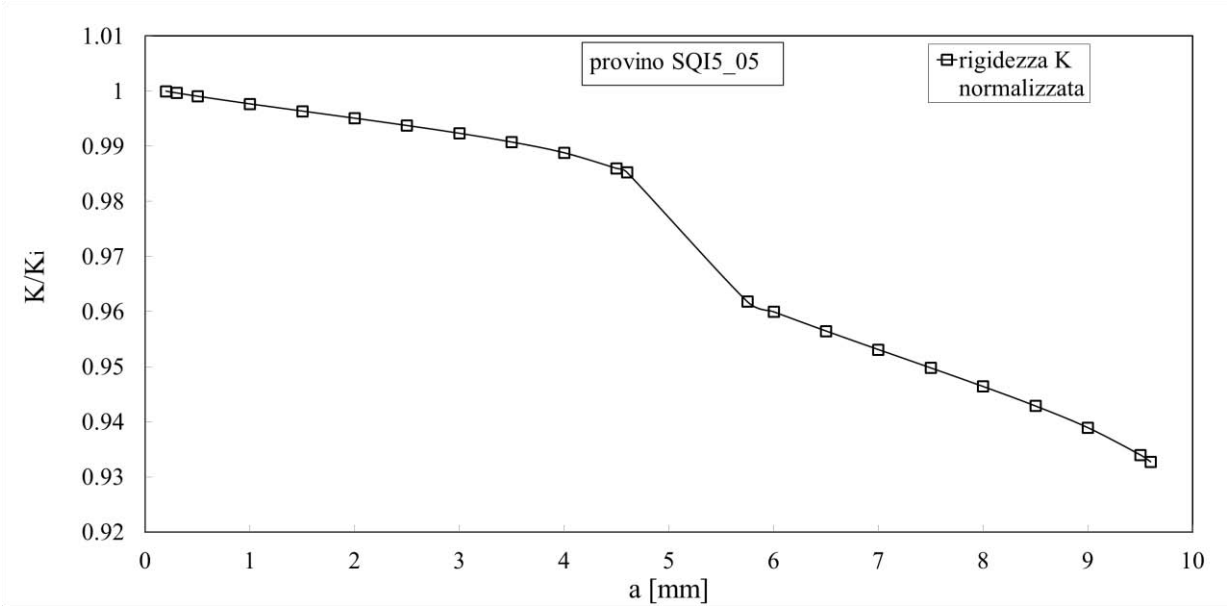


Fig. 6.32 andamento della rigidezza normalizzata calcolata con metodo FEM; provino SQI5_05.

Provini SQI5_06 (Δσ = 76 MPa)

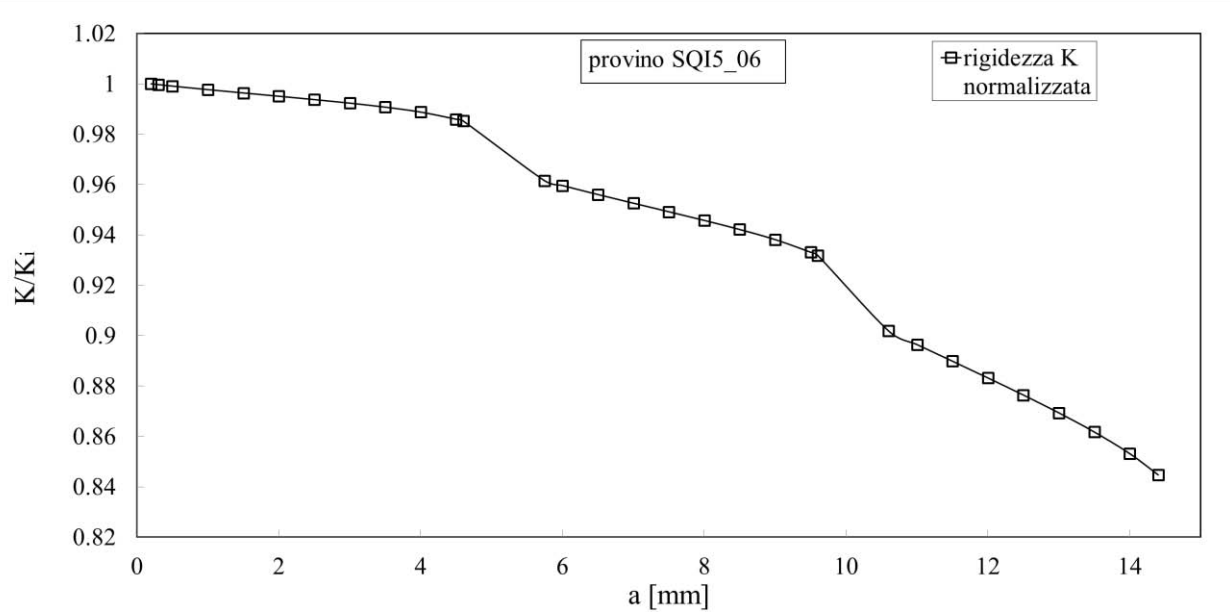


Fig. 6.33 andamento della rigidezza normalizzata calcolata con metodo FEM; provino SQI5_06

6.9 Il metodo "FEM"

I dati di spostamento della ganascia superiore della macchina di prova, salvati durante l'esecuzione di ogni blocco di carico sono stati necessari per implementare un altro metodo per il monitoraggio del danneggiamento, denominato metodo *FEM*.

Il principio che sta alla base di tale metodo si basa sull'ipotesi che lo spostamento adimensionalizzato rilevato dal sensore di spostamento della macchina di prova, $\Delta S_{spe}/\Delta S_{spe,in}$, sia uguale allo spostamento adimensionalizzato che si rileva dalle simulazioni agli elementi finiti, $\Delta S_{fem}/\Delta S_{fem,in}$, per un dato valore di cricca. In questo modo si può ricavare indirettamente una cricca equivalente, a_{FEM}, tramite gli spostamenti salvati in output dal software di gestione della macchina, corrispettiva della cricca nominale media del singolo provino con la quale si andrà poi a confrontare per la validazione del metodo.

Si è diagrammato successivamente l'andamento di a_{FEM} in funzione del numero di cicli, ed è stata calcolata la velocità di propagazione da_{FEM}/dN mediante il calcolo del rapporto incrementale tra due punti successivi, al pari di quanto fatto per le prove sperimentali con la media delle delaminazioni medie.

È stato possibile calcolare i valori di ΔG_I, ΔG_{II}, ΔG_{TOT} per ogni lunghezza di cricca tramite l'estrapolazione dalle relative linee di tendenza per l'interfaccia di propagazione interessata. Con i valori di ΔG così calcolati e con i valori di da/dN rielaborati dalla curva sperimentale della propagazione di a_{FEM} è possibile costruire la curva di Paris in ΔG_{TOT} e in ΔG_{eqv}.

Dopo aver calcolato, con questo nuovo metodo, le curve di Paris per ciascun provino, è stato fatto un confronto tra queste e quelle ricavate a partire dall'osservazione sperimentale del danneggiamento.

6.10 Esecuzione del metodo "FEM"

6.10.1 Provini SQI5

Come già introdotto nel paragrafo precedente, l'ipotesi alla base di tale metodo si riassume con la seguente uguaglianza

$$\Delta S_{spe}/\Delta S_{spe,in} = \Delta S_{fem}/\Delta S_{fem,in} \tag{6.7}$$

ΔS_{spe}: spostamento della ganascia superiore di afferraggio della macchina di prova (MTS MiniBionix 858) che è solidale con un estremità del provino.

ΔS_{fem}: spostamento, rilevato dal modello FEM, dell'estremità non incastrata del provino corrispondente a $u_{x,vcct}$ (vedi *Fig.6.25*).

L'uguaglianza 6.7 può anche essere espressa in termini di rigidezza dal momento che K è inversamente proporzionale allo spostamento. Si otterrebbe così

$$K_{spe}/ K_{spe,in}= K_{fem}/ K_{fem,in} \tag{6.8}$$

Dagli spostamenti acquisiti sperimentalmente si ricava una curva $\Delta S_{spe}/ \Delta S_{spe,in}$ su N di cicli. Per il provino SQI5_01 tale curva è riportata in *Fig. 6.34*.

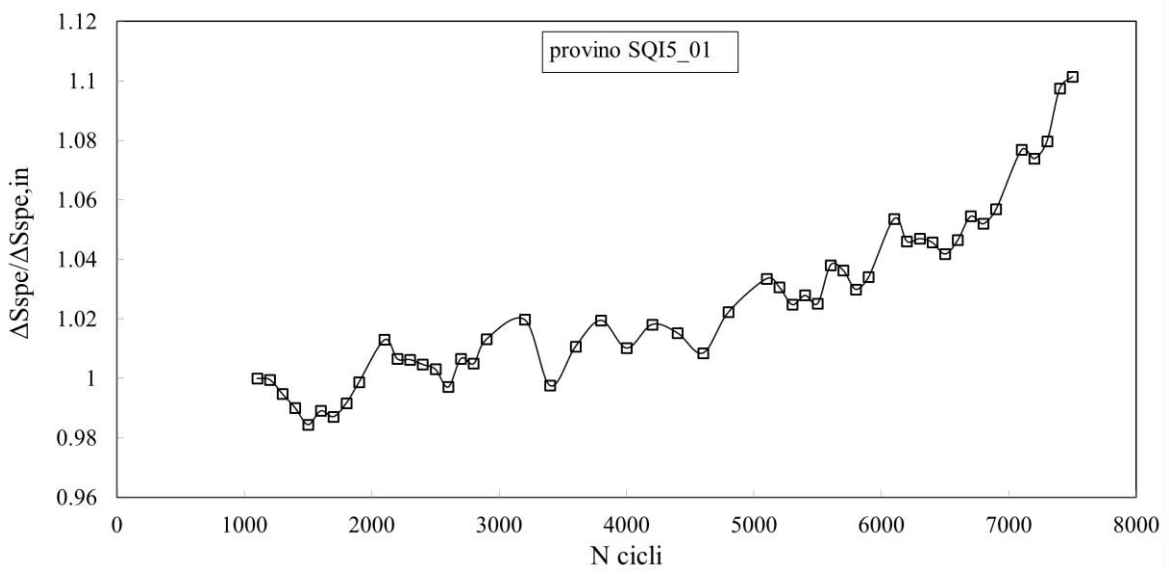


Fig. 6.34 esempio di andamento adimensionalizzato acquisito sperimentalmente durante la vita a fatica del provino SQI5_01

Come si può vedere non sono stati presi in considerazione gli spostamenti rilevati durante il primo blocco di carico, corrispondente ai primi 1000 cicli effettuati, questo per far aderire maggiormente la condizione di danneggiamento del provino reale a quella simulata nel modello ad elementi finiti. All'inizio delle prove sperimentali i provini sono vergini, non presentano alcun tipo di cricca trasversale lungo la giunzione a gradini, così come non presentano delle delaminazioni lungo le interfacce tra i vari strati che compongono il laminato. Nelle simulazioni FEM per simulare l'evoluzione del danneggiamento in questo tipo di giunzioni, si è scelto invece un modello pre-criccato, con cricche trasversali lungo i bordi di giunzione facendo poi variare la lunghezza di

delaminazione a partire dagli strati più esterni (vedi *Cap. 3*). Nelle prove di laboratorio si è visto che tali cricche trasversali si originano generalmente già a partire dal primo blocco di carico, quindi per rendere ancor più compatibili il modello reale con quello FEM, si è deciso di confrontare i dati delle simulazioni con quelli ottenuti sperimentalmente a partire dal secondo blocco di carico.

Per interpolare tale curva si è deciso di fare una media tra gli spostamenti adimensionalizzati ricavati per tutti i provini SQI5, in modo da ricavare una curva *master* che riassume il comportamento complessivo di tutte le giunzioni con *lay-up* $[0_2/45_5/0]$.

Basandosi sull'osservazione della curva di *Fig.6.35* e sulle considerazioni fatte per la *Fig. 6.20* si è deciso di interpolare questa curva master, per % di vita a fatica compresa tra 0 e 70%, con una funzione lineare mentre per % di vita a fatica compresa tra 70 e 100% si è deciso di utilizzare un polinomio di grado 2.

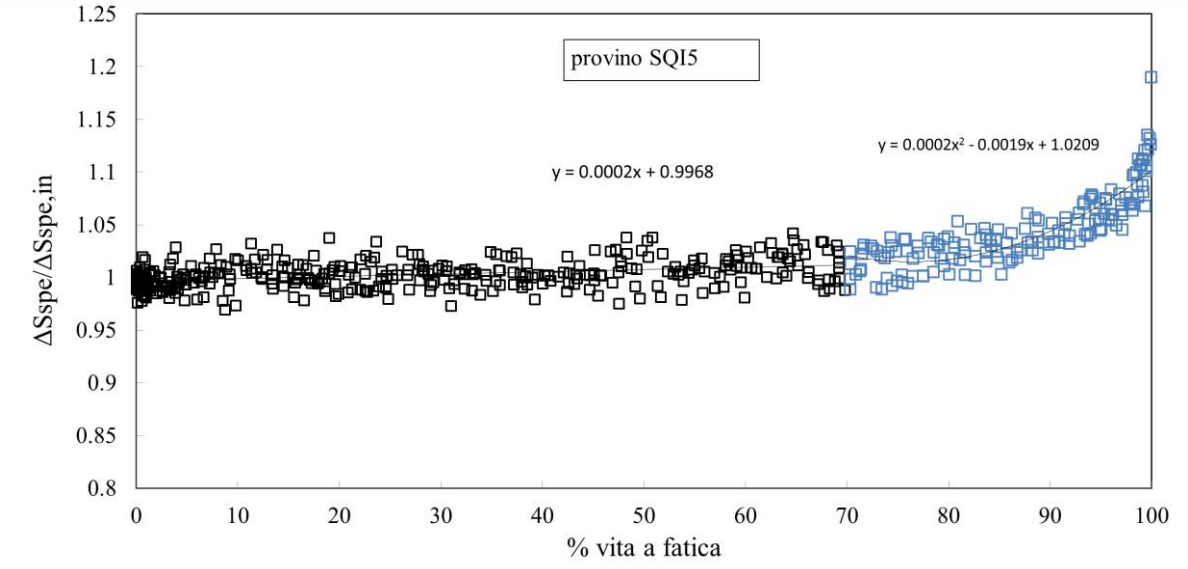


Fig. 6.35 curva master riassuntiva dell'andamento adimensionalizzato dello spostamento misurato sperimentalmente per tutti i provini SQI5 testati

Dal modello FEM, per ogni singolo provino, si ricava una curva ($\Delta S_{fem}/\Delta S_{fem,in}$) /$a_{FEM}$ che è stata interpolata con funzioni lineari a tratti (vedi *Fig. 6.35*)

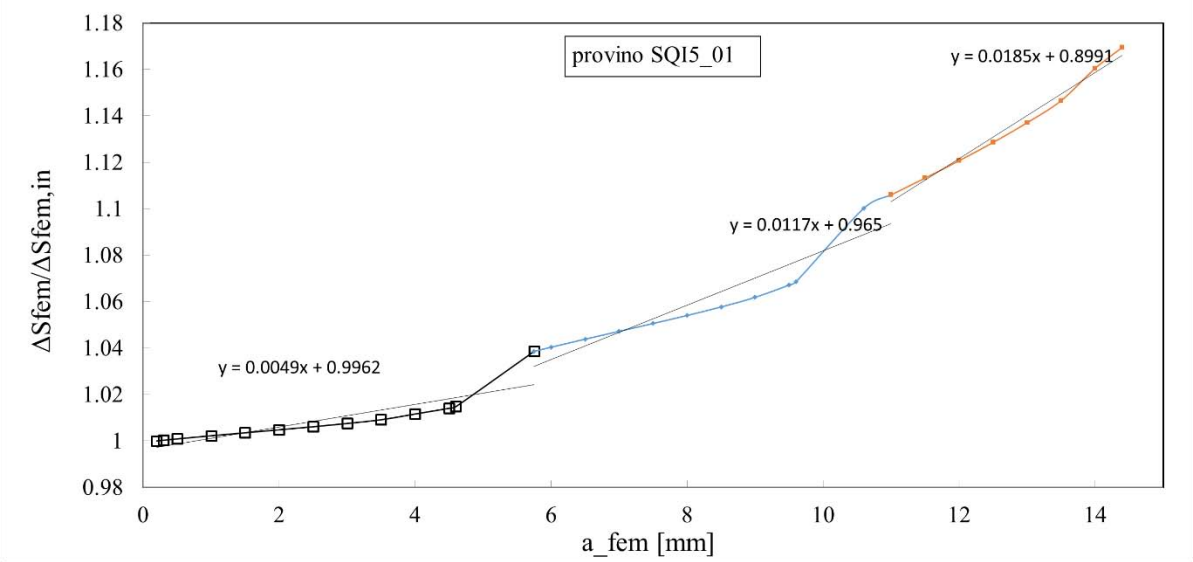


Fig. 6.36 esempio dell'andamento adimensionalizzato dello spostamento ricavato dal modellizzazione FEM di un provino con *lay-up* $[0_2/45_5/0]$ per le stesse condizioni di carico con cui il provino SQI5_01 è stato testato.

A questo punto per ricavare la curva a_{FEM} / n di cicli è necessario applicare l'ipotesi $\Delta S_{spe}/\Delta S_{spe,in} = \Delta S_{fem}/\Delta S_{fem,in}$. Si sono utilizzate a tal fine, le equazioni delle linee di tendenza delle curve riportate nelle *Fig. 6.34* e *6.35* per risalire, in questo caso, alla cricca a_{FEM} riferita al provino SQI5_01.

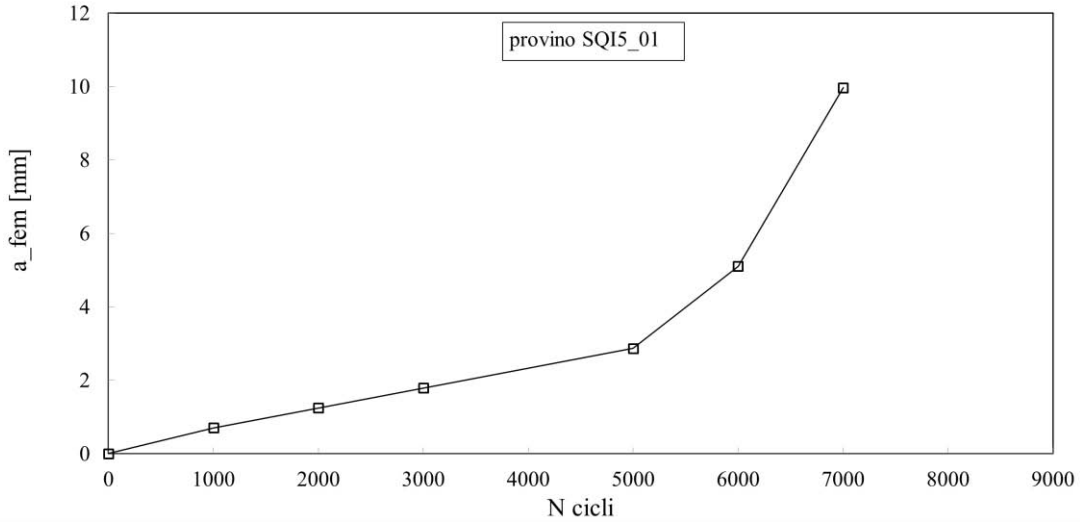


Fig. 6.37 andamento della cricca a_{FEM} al variare del numero di cicli della prova.

A questo punto si è in grado di determinare un valore della cricca $a_{FEM,}$ da poter inserire nel modello ad elementi finiti, che descriva lo stato complessivo di danneggiamento del provino osservato sperimentalmente, per un determinato numero di cicli.

Tale operazione è stata ripetuta per ciascun provino utilizzando di volta in volta le curve $\Delta S_{fem}/\Delta S_{fem,in}) / a_{FEM}$ ottenute a partire dai risultati dalle diverse analisi FEM per i diversi livelli di carico. Gli andamenti di a_{FEM} riferiti ai provini con *lay-up* $[0_2/45_5/0]$, sono riassunti in *Fig.6.38*.

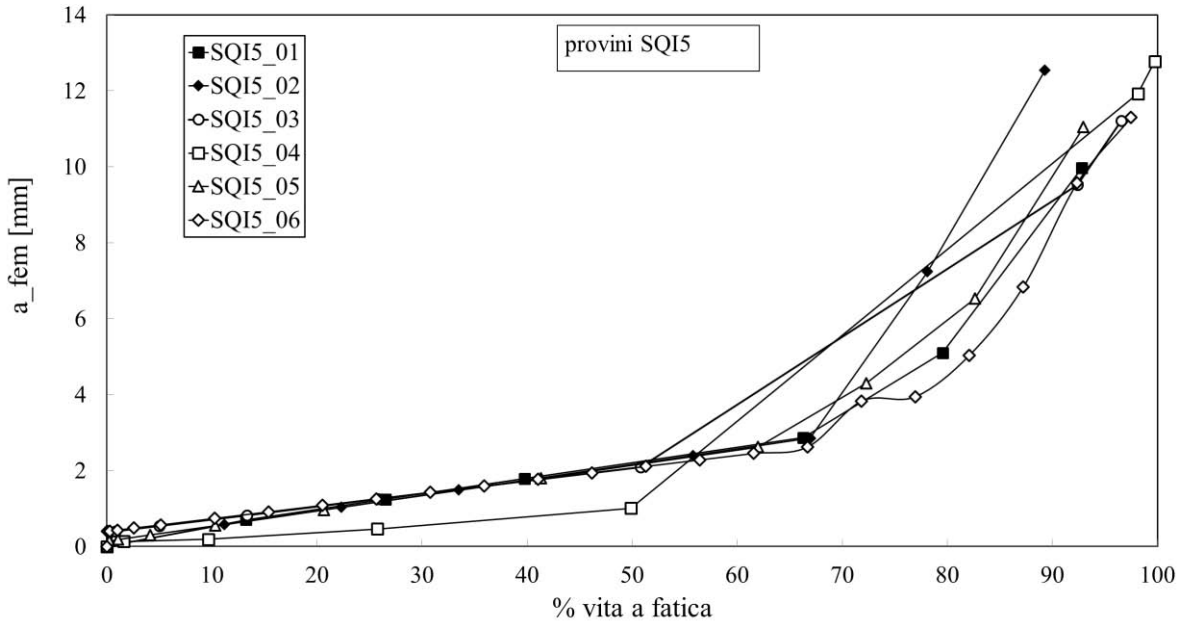


Fig. 6.38 andamento della cricca a_{FEM} al variare della percentuale della vita a fatica per i provini SQI5 testati sperimentalmente

Si può osservare a partire dal 60-70% della vita a fatica un incremento repentino della lunghezza di delaminazione (in questo caso di a_{FEM}), che trova corrispondenza con un brusco calo della rigidezza dei provini (vedi *Fig. 6.20*) calcolato a partire dalle osservazioni sperimentali del danneggiamento.

Una volta ottenuto l'andamento di a_{FEM} in funzione della percentuale di vita a fatica, è stato possibile ricavare le curve di Paris, con il medesimo procedimento già descritto nel capitolo 5. Tali curve sono poi state confrontate con quelle ottenute attraverso l'applicazione del "metodo classico" ricavate a partire dal calcolo della media delle delaminazioni medie. In *Fig. 6.38* è riportato questo raffronto: in nero sono evidenziate le curve di Paris, ricavate nel precedente capitolo, mentre in arancione si riportano le curve ottenute attraverso l'applicazione del metodo FEM.

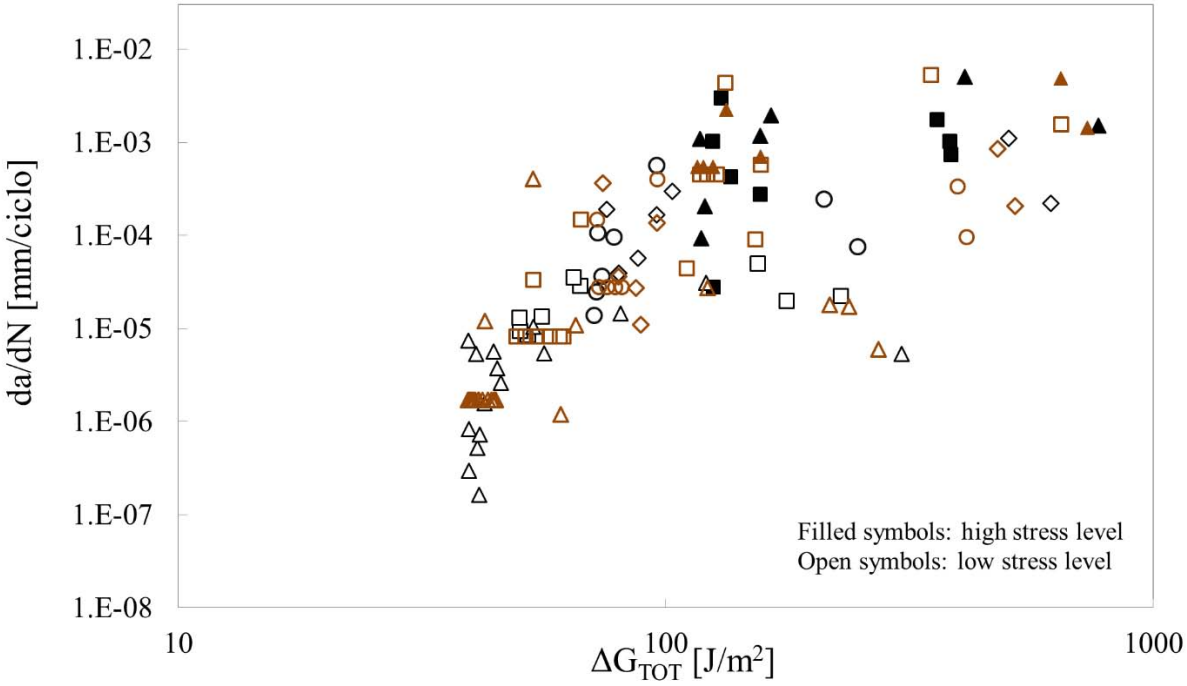


Fig. 6.39 confronto tra le curve di Paris ottenute con il metodo "FEM" e quelle ottenute con il metodo classico, per provini SQI5

Si può chiaramente osservare come l'utilizzo dei due metodi porta ad ottenere dei risultati simili sia dal punto di vista numerico sia dal punto di vista della dispersione degli stessi. Si può dunque validare questo nuovo metodo che consente di ricavare, a partire dalla sola conoscenza del numero di cicli, una cricca "virtuale" da inserire nelle simulazioni FEM, senza dover ricorrere all'osservazione microscopica del danneggiamento.

Si può vedere come la disposizione dei punti delle curve di Paris ricavate tramite approccio FEM, in alcuni casi risulti orizzontale, ciò equivale a dire che si ha un incremento di ΔG con velocità di propagazione del fronte di delaminazione costante. Tale risultato, non riscontrato sperimentalmente è conseguenza della doppia interpolazione lineare che viene fatta per percentuali di vita a fatica comprese tra 0 e 70% che si traduce in una crescita a velocità costante della cricca a_{FEM} in tale intervallo.

È stato fatto un ulteriore confronto tra i due metodi comparando gli andamenti di a_{FEM} e della media delle delaminazioni medie al variare della % di vita a fatica. In *Fig.6.40* la media delle delaminazioni medie per i diversi provini SQI5 è riportata in giallo, mentre l'andamento di a_{FEM} è riportato in nero.

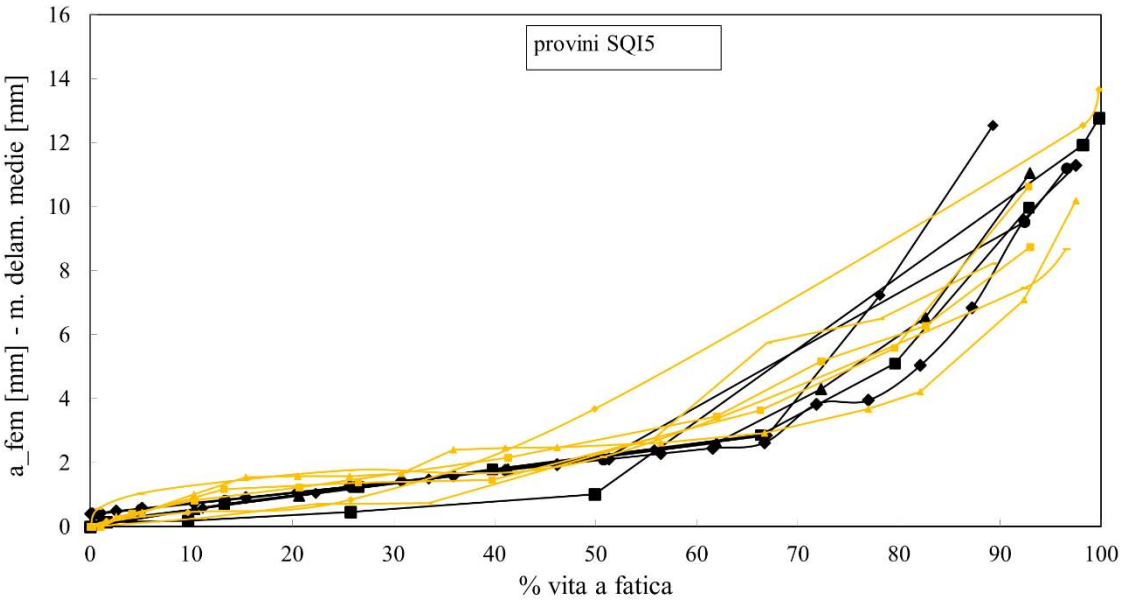


Fig. 6.40 confronto tra a_{FEM} e la media delle delaminazioni medie. Provini SQI5

Come si può vedere anche in questo caso si può trovare una certa corrispondenza tra l'andamento della media delle delaminazioni medie e a_{FEM} calcolata con il metodo FEM.

Anche la lunghezza finale della cricca ricavata per percentuali di vita a fatica superiori al 90% risulta paragonabile nel caso si utilizzi uno oppure l'altro metodo.

6.10.2 Provini S08

Al pari di quanto fatto per i provini con *lay-up* $[0_2/45_5/0]$, il metodo FEM è stato applicato anche per monitorare il danneggimento e costruire le curve di Paris dei provini con *lay-up* $[0]_8$.

Anche in questo caso si è proceduto con la costruzione di una curva *master* degli spostamenti adimensionalizzati, unendo tutte le curve degli spostamenti adimensionalizzati ottenute per ciascun provino S08 testato. Tale curva è riportata in *Fig. 6.41*.

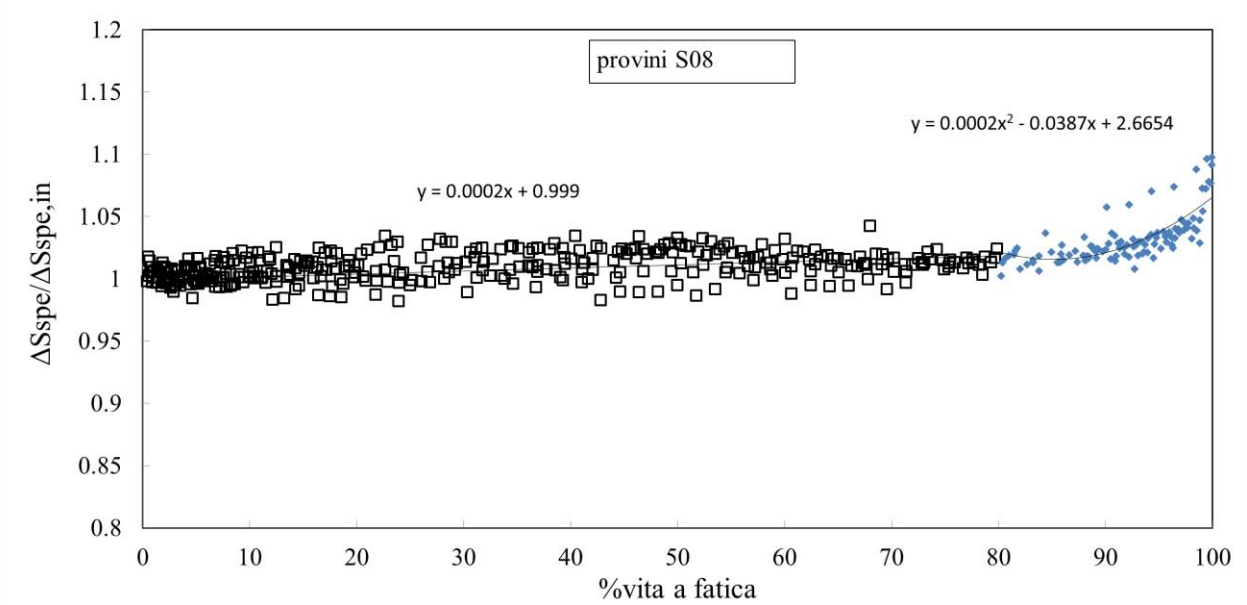


Fig. 6.41 curva master riassuntiva dell'andamento adimensionalizzato dello spostamento misurato sperimentalmente per tutti i provini S08 testati

A differenza di quanto fatto per i provini SQI5, per i provini S08 si è deciso di interpolare con una funzione lineare i punti compresi nell'intervallo 0-80% di vita a fatica, questa decisione è motivata dal fatto che per i provini S08, il calo di rigidezza (visibile in *Fig. 6.19*) a cui corrisponde un aumento dello spostamento normalizzato è riscontrabile solo a partire dall'80% della vita a fatica considerata. Il restante 20% è stato interpolato con una funzione polinomiale di ordine 2. Le equazioni delle funzioni interpolatrici sono riportate in *Fig. 6.41*.

Dal modello FEM, per ogni singolo provino S08, si ricava una curva $(\Delta S_{fem}/\ \Delta S_{fem,in})$ $/a_{FEM}$ che è stata interpolata con funzioni lineari a tratti. In *Fig. 6.42* si può vedere tale curva riferita al provino S08_12. Le curve costruite per le altre condizioni di carico presentano un andamento analogo,

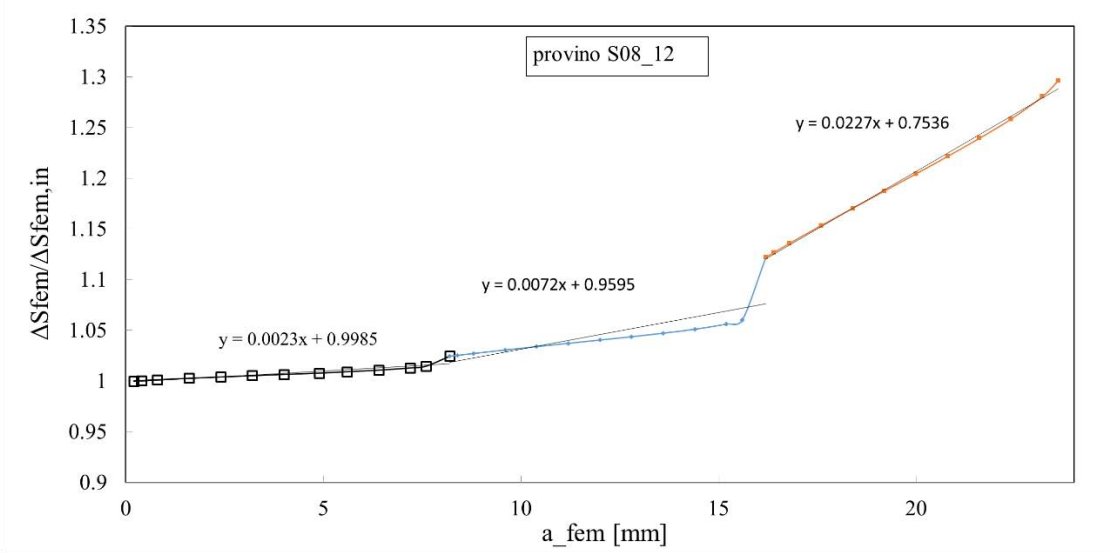


Fig. 6.42 esempio dell'andamento adimensionalizzato dello spostamento ricavato dal modellizzazione FEM di un provino con *lay-up* $[0]_8$ per le stesse condizioni di carico con cui il provino S08_12 è stato testato.

A questo punto per ricavare la curva a_{FEM} / n di cicli è necessario applicare l'ipotesi $\Delta S_{spe}/\Delta S_{spe,in} = \Delta S_{fem}/\Delta S_{fem,in}$. Il procedimento è analogo a quello spiegato per il *lay-up* $[0_2/45_5/0]$. Gli andamenti di a_{FEM} riferiti ai provini con *lay-up* $[0]_8$, sono riassunti in *Fig.6.43*. Non è rappresentato l'andamento per il provino S08_17 in quanto essendo andato in *run-out* non è stato possibile definire il numero di cicli a rottura

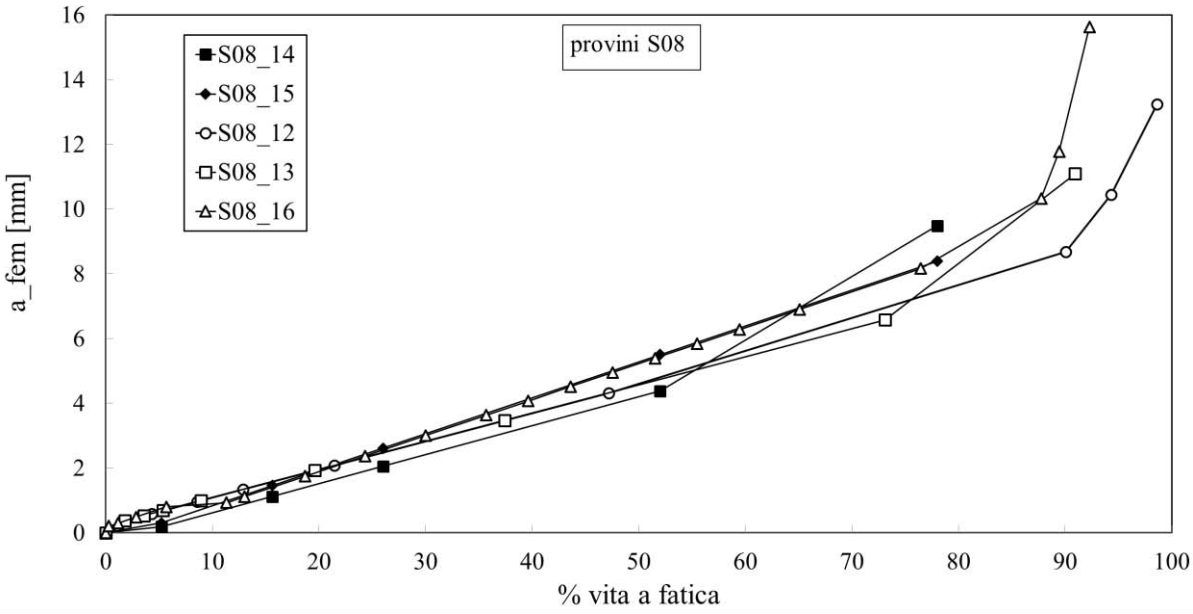


Fig. 6.43 andamento della cricca a_{FEM} al variare della percentuale della vita a fatica per i provini S08 testati sperimentalmente

In Fig. 6.44 è riportato il confronto tra la medie delle delaminazioni medie (in giallo) e a_{FEM} per i diversi provini S08 testati.

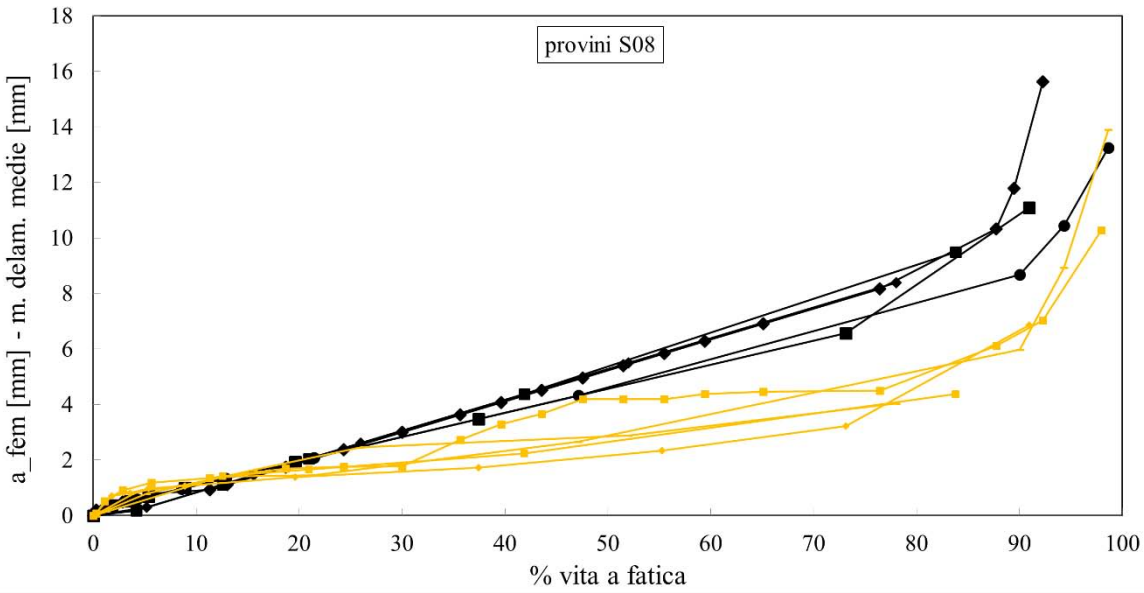


Fig. 6.44 confronto tra a_{FEM} e la media delle delaminazioni medie. Provini S08

Anche in questo caso si può vedere una buona compatibilità tra le lunghezze a_{FEM} e le medie delle delaminazioni medie dei vari provini. Si vede come a_{FEM} cresce linearmente per buona parte della vita a fatica, questo fatto è da imputarsi all'interpolazione lineare della curva master degli spostamenti adimensionalizzati fatta per una percentuale di vita a fatica compresa tra 0 e 80% e alla linearità della curva di Fig. 6.42 per lunghezze di cricca comprese tra 0 e 16 mm.

Una volta determinata a_{FEM} e quindi la velocità di propagazione della cricca tramite il rapporto incrementale, è stato possibile calcolare i valori di ΔG_I, ΔG_{II}, ΔG_{TOT} per ogni lunghezza di cricca tramite l'estrapolazione dalle linee di tendenza degli andamenti delle componenti del SERR, per l'interfaccia di propagazione interessata.

A questo punto conoscendo la velocità di propagazione e il rispettivo valore di ΔG_{TOT} è stato possibile costruire le curve di Paris che sono state confrontate con quelle ottenute a partire dall'osservazione sperimentale del danneggiamento (vedi *Fig. 6.45*). In nero sono evidenziate le curve di Paris, ricavate nel precedente capitolo, mentre in arancione si riportano le curve ottenute attraverso l'applicazione del metodo FEM.

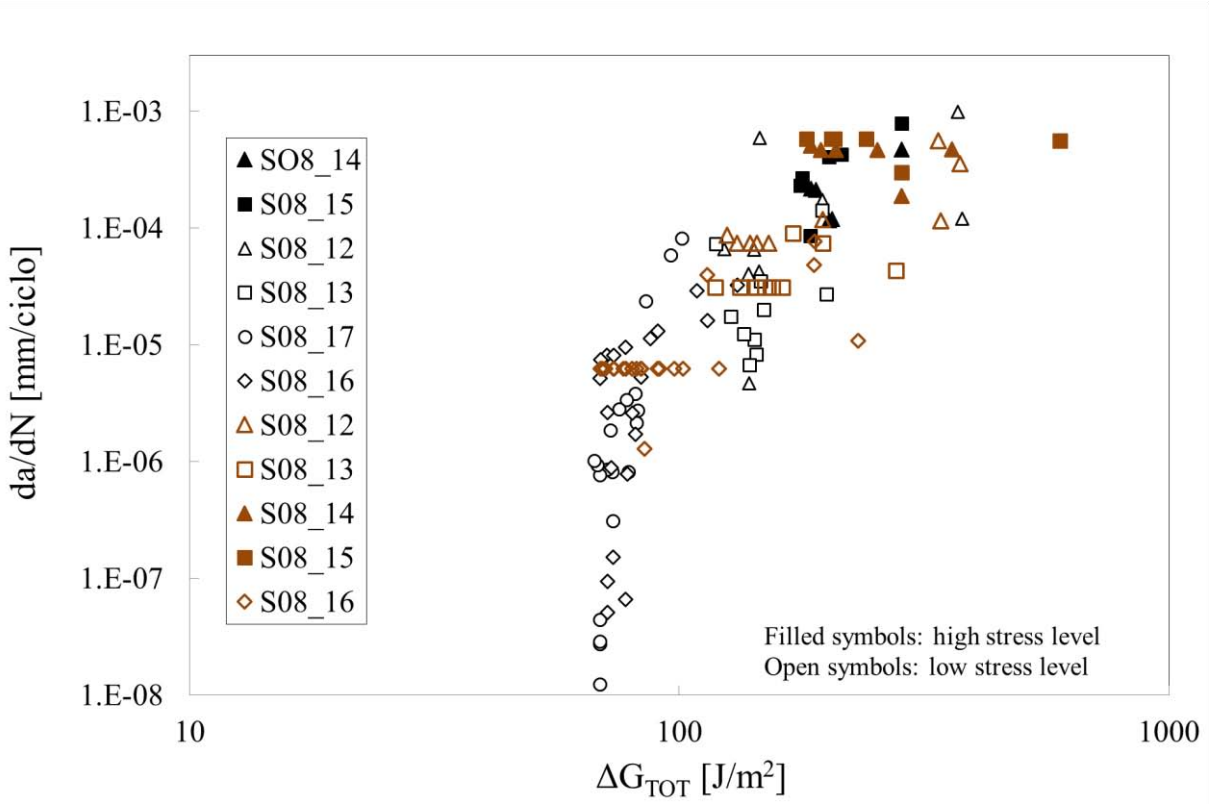


Fig. 6.45 confronto tra le curve di Paris ottenute con il metodo "FEM" e quelle ottenute con il metodo classico, provini S08

Anche in questo caso, come nel caso dei provini SQI5, si può vedere una buona compatibilità tra i risultati ottenuti con i due metodi. La dispersione dei risultati in ΔG_{TOT} si può vedere che non diminuisce, ciò che cala è la dispersione in termini di *da/dN*. I tratti a pendenza costante di *Fig. 6.44* si traducono in tratti orizzontali nella curva di Paris a velocità costante, diminuendo così la dispersione dei risultati lungo l'asse delle ordinate.

Conclusioni

In questo lavoro di tesi è stato analizzato il comportamento a fatica di giunzioni stampate, realizzate con resina epossidica rinforzata con tessuto in fibra di carbonio.
La caratterizzazione del comportamento di tali giunti è stata condotta sia sperimentalmente attraverso delle prove in laboratorio e successive analisi microscopiche, sia attraverso la realizzazione di modelli ad elementi finiti con lo scopo di definire un modello previsionale per la vita di queste giunzioni.
Sono stati testati 6 provini con *lay-up* $[0]_8$ e 6 con *lay-up* $[0_2/45_5/0]$. Le conclusioni relative alla parte sperimentale di analisi del danneggiamento sono riassunte di seguito:

- Per entrambi i *lay-up* analizzati, si è notato che nel caso di basso carico, la lunghezza di delaminazione misurata prima del cedimento della giunzione è superiore rispetto a quanto rilevato nelle prove ad alto carico.
- Le delaminazioni nei giunti SQI5 si presentano a partire da basse percentuali di vita a fatica e continuano ad incrementare la loro lunghezza lungo il corso della vita a fatica del campione, dapprima più velocemente, fino a circa il 20% della vita a fatica, poi si assiste ad una fase intermedia in cui le cricche non incrementano significativamente, fino a circa il 70 % della vita a fatica, infine gli incrementi di lunghezza si fanno più consistenti, ma sempre graduali, portando a rottura il campione.
- I provini S08 presentano lunghezze di delaminazione contenute che incrementano di poco con il procedere del caricamento; nelle fasi finali, a partire generalmente dall'80% della vita a fatica, tali delaminazioni aumentano considerevolmente la loro lunghezza portando talvolta a cedimento improvviso. Questo fenomeno è causato dall'unione delle delaminazioni già presenti in corrispondenza di molti punti di giunzione lungo il percorso a gradini della struttura, sede del danneggiamento.
- L'osservazione microscopica del danneggiamento ha evidenziato che i provini S08 registrano una rapida accelerazione del danneggiamento verso la fine della vita a fatica, intorno al 75%, mentre le giunzioni SQI5 mantengono un incremento più lineare della velocità di propagazione del danneggiamento nel corso della prova a fatica, in ogni caso, anche per questo *lay-up*, si assiste ad un incremento

della velocità di propagazione nelle fasi finali della prova. Si può quindi dire che nelle fasi iniziali, la crescita della delaminazione sia minore negli S08 rispetto agli SQI5, situazione che si inverte qualora si consideri l'ultima parte della prova a fatica in cui è stata osservata una più rapida propagazione per il *lay-up* $[0]_8$

- Per definire i livelli di carico delle diverse prove, ci si è riferiti ai risultati ottenuti da E.Balzarini, S.Cristanini e S.Polloni. Si è visto come la vita a fatica ottenuta sperimentalmente si discosta notevolmente da quella prevista inizialmente, a causa dell'invecchiamento dei provini.
- L'iniziale lieve calo di rigidezza dei giunti, indipendentemente dal *lay-up*, sintetizza l'innesco del danneggiamento che si presenta sotto forma di criccature trasversali in corrispondenza delle aree di giunzione degli strati superficiali e di piccole delaminazioni, che si originano dalle stesse, lungo gli orditi degli strati adiacenti a quelli superficiali
- All'aumentare della vita a fatica le curve di rigidezza entrano in una banda in cui si manifesta una prima variazione di rigidezza. Per i provini S08 questa banda è compresa tra il 75 e l'85 % della vita a fatica del provino, mentre per i provini SQI5 questa variazione di rigidezza si osserva tra il 65 e il 75%. Questo calo di rigidezza si manifesta attraverso la propagazione rapida di una o più delaminazioni che propagandosi lungo gli strati a 0° vicini alla superficie, tende ad unire il danneggiamento delle aree di giunzione degli strati vicini alla superficie e ad estendersi agli strati centrali.

Conclusioni riguardanti la parte di simulazioni FEM

- Per tutti i *lay-up* analizzati $[0]_8$, $[0_2/45_2]_s$ e $[0_2/45_5/0]_s$ la propagazione avviene a Modo Misto
- Il confronto tra i modelli FEM di *lay-up* $[0]_8$ e $[0_2/45_2]_s$ ha evidenziato una maggiore quota di rilascio dell'energia di deformazione per i provini con *lay-up* $[0_2/45_2]_s$ dell'ordine del 5% nelle simulazioni ad alto carico, differenza che aumenta all'aumentare della lunghezza di delaminazione. Il confronto tra le simulazioni a basso carico invece ha evidenziato la situazione opposta evidenziando valori minori di ΔG_I, ΔG_{II} e ΔG_{TOT} per il *lay-up* $[0_2/45_2]_s$. Queste considerazioni sono valide per tutti gli *overlap* analizzati 3,5,8mm

- Il confronto tra i modelli FEM di *lay-up* $[0_2/45_2]_s$ e $[0_2/45_5/0]$ a parità di lunghezza di sovrapposizione non ha messo in luce delle differenze ragguardevoli tra i valori assunti dalle componenti del SERR al variare della lunghezza di delaminazione.
- Diagrammando le curve di Paris in ΔG_{eqv} attraverso la relazione ottenuta da M. Quaresimin e M. Ricotta, si nota che la dispersione non si riduce rispetto a quanto ottenuto plottando le curve in termini di ΔG_{TOT}.
- Gli andamenti delle rigidezze ottenute a partire dagli spostamenti alle estremità dei modelli FEM, mostrano un calo costante della rigidezza all'aumentare della lunghezza di delaminazione. Si notano inoltre delle discontinuità, in corrispondenza di ogni cambiamento di interfaccia dell'apice della cricca. La riduzione di rigidezza normalizzata calcolata con le analisi FEM è superiore rispetto a quanto ricavato sperimentalmente dalle prove in laboratorio. Questo fatto può essere giustificato sapendo che la propagazione della delaminazione, nel modello ad elementi finiti, avviene in maniera contemporanea e simmetrica a partire da tutti e 4 i punti di giunzione più esterni, mentre nelle prove sperimentali si è osservato che molto spesso è solamente una delaminazione a propagare con continuità.
- È stato sviluppato e validato il metodo FEM grazie al quale è possibile definire la lunghezza di una cricca virtuale denominata a_{FEM}, da inserire nelle simulazioni ad elementi finiti, che approssima lo stato di danneggiamento complessivo del provino ad un determinato numero di cicli, senza necessità di dover ricorrere alla misurazione microscopica della delaminazione. I risultati di tale metodo sono confrontabili con quelli ottenuti a partire dalla definizione della media delle delaminazioni medie.

Appendice A: APDL per la costruzione dei giunti stepped con lay-up [$0_2/45_2$]$_s$

Il linguaggio di programmazione del software agli elementi finiti ANSYS prende il nome di APDL (*Ansys Parametric Design Language*). Modellare in APDL significa creare, in un semplice foglio di testo, una successione di istruzioni necessarie per realizzare il modello ad elementi finiti (geometria,vincoli,mesh,carichi,ecc.). Il programma andrà poi a svolgere in sequenza le istruzioni una volta ricevuto il codice come input. Questa procedura di modellazione si presenta come alternativa a quella standard che prevede di realizzare il componente direttamente nell'interfaccia grafica di ANSYS. Il principale vantaggio nell'utilizzo del codice APDL risiede nella possibilità di realizzare modelli FEM parametrici, dove la variazione di una certa dimensione (ad esempio la lunghezza di cricca o il carico) si traduce solo nella semplice modifica di un valore da dare in input una volta che il codice è stato lanciato, a differenza di quanto accade nella procedura classica dove sarebbe stato necessario rivedere l'intero modello.
Scrivere un codice APDL può sembrare inizialmente complesso e oneroso, tuttavia ci si può accorgere ben presto delle potenzialità di tale strumento potendo realizzare con un unico modello FEM un'intera famiglia di componenti, consentendo quindi di risparmiare molto tempo a valle, nelle fasi di verifica e/o ottimizzazione.
Di seguito viene riportato il codice APDL utilizzato per la costruzione dei giunti stepped con lay-up [$0_2/45_2$]$_s$

```
/PREP7
/TITLE, APDL - stepped-lap - [0_2/45_2]s
/PNUM,KP,1
/PNUM,LINE,1
/PNUM,ELEM,0

*ASK,w,inserisci la lunghezza di sovrapposizione del giunto,
*ASK,a1,inserisci la lunghezza di propagazione della cricca all'interfaccia primo/secondo strato,
*ASK,a2,inserisci la lunghezza di propagazione della cricca all'interfaccia secondo/terzo strato,
*ASK,a3,inserisci la lunghezza di propagazione della cricca all'interfaccia terzo/quarto strato,
*ASK,sigma,inserisci l'intensità del carico [MPa],

!parametri geometrici [mm]

t=0.25                  !spessore singola lamina
h=2                     !spessore giunto
Lt=260                  !lunghezza totale
L=220                   !lunghezza tra le tab
b=(l-7*w)/2             !distanza del primo step dal bordo
z=20                    !lunghezza tab di afferraggio
```

```
!proprietà lamine a 0 gradi

Ex_0=58050      !modulo elastico lungo la
direzione x
Ey_0=6000       !modulo elastico lungo lo
spessore
Ez_0=58650      !modulo elastico lungo la
larghezza
Gxy_0=500
Gxz_0=3300
Gyz_0=500       !moldulo elastico tangenziale
nxy_0=0.3               !coefficiente di Poisson
nyz_0=0.3
nxz_0=0.06

!proprietà lamine a 45 gradi

Ex_45=11930     !modulo elastico lungo la
direzione x
Ey_45=6000      !modulo elastico lungo lo
spessore
Ez_45=11930     !modulo lungo la larghezza
Gxy_45=500
Gyz_45=500
Gxz_45=27516    !moldulo elastico tangenziale
nxy_45=0.27
nyz_45=0.27
nxz_45=0.81             !coefficiente Poisson

d=0.010         !dimensioni elemento in mm

!================================
================================

!displacement scaling off.\1
!si imposta la deformata su true scale
/DSCALE,1,1

!================================
================================

!DEFINIZIONE DEL TIPO DI ELEMENTO

ET,1,PLANE183
KEYOPT,1,1,0
!forma quadrilatero
KEYOPT,1,3,2
!plane strain
KEYOPT,1,6,0
!pure displacement

!================================
================================

!DEFINIZIONE DELLE PROPRIETA' DEL
MATERIALE (ortotropo)

!1-laminato in composito (lamine a 0 gradi)

MP,EX,1,Ex_0
MP,EY,1,Ey_0
MP,EZ,1,Ez_0
MP,NUXY,1,nxy_0
MP,NUYZ,1,nyz_0
MP,NUXZ,1,nxz_0
MP,GXY,1,Gxy_0
MP,GYZ,1,Gyz_0
MP,GXZ,1,Gxz_0

!2-laminato in composito (lamine a 45 gradi)

MP,EX,2,Ex_45
MP,EY,2,Ey_45
MP,EZ,2,Ez_45
MP,NUXY,2,nxy_45
MP,NUYZ,2,nyz_45
MP,NUXZ,2,nxz_45
MP,GXY,2,Gxy_45
MP,GYZ,2,Gyz_45
MP,GXZ,2,Gxz_45
```

```
!================================
================================

!COSTRUZIONE DELLA GEOMETRIA
KEYPOINTS

!geometria scalino del giunto di sx

k,1,0,h,0
k,2,0,h-t,0
k,3,w,h-t,0
k,4,w,h-2*t,0
k,5,2*w,h-2*t,0
k,6,2*w,h-3*t,0
k,7,3*w,h-3*t,0
k,8,3*w,h-4*t,0
k,9,4*w,h-4*t,0
k,10,4*w,h-5*t,0
k,11,5*w,h-5*t,0
k,12,5*w,h-6*t,0
k,13,6*w,h-6*t,0
k,14,6*w,h-7*t,0
k,15,7*w,h-7*t,0
k,16,7*w,h-8*t,0

!geometria scalino del giunto di dx

k,17,0,h,0
k,18,0,h-t,0
k,19,w,h-t,0
k,20,w,h-2*t,0
k,21,2*w,h-2*t,0
k,22,2*w,h-3*t,0
k,23,3*w,h-3*t,0
k,24,3*w,h-4*t,0
k,25,4*w,h-4*t,0
k,26,4*w,h-5*t,0
k,27,5*w,h-5*t,0
k,28,5*w,h-6*t,0
k,29,6*w,h-6*t,0
k,30,6*w,h-7*t,0
k,31,7*w,h-7*t,0
k,32,7*w,h-8*t,0

!geometria del resto

k,33,0,h-8*t,0
k,34,7*w,h,0
k,35,b+7*w,h,0
k,36,b+7*w,h-8*t,0
k,37,-b,h,0
k,38,-b,h-8*t,0
k,156,0,h-2*t,0
k,181,7*w,h-6*t,0
k,183,-b,h-6*t,0
k,184,-b,h-2*t,0
k,185,b+7*w,h-6*t,0
k,186,b+7*w,h-2*t,0
k,188,0,h-6*t,0
k,190,w,h-6*t,0
k,191,2*w,h-6*t,0
k,192,3*w,h-6*t,0
k,193,4*w,h-6*t,0
k,196,3*w,h-2*t,0
k,197,4*w,h-2*t,0
k,198,5*w,h-2*t,0
k,199,6*w,h-2*t,0
k,202,7*w,h-2*t,0

!-----------------------------------------------

*IF,a1,GT,0,AND,a1,LT,w,THEN
!se c'è la cricca a1 ed è minore di w

!vcct alto all'interfaccia primo-secondo strato

k,39,a1,h-t,0
k,40,a1+5*d,h-t,0
k,41,a1+5*d,h-t+5*d,0
```

```
k,42,a1,h-t+5*d,0
k,43,a1-5*d,h-t+5*d,0
k,44,a1-5*d,h-t,0
k,45,a1-5*d,h-t,0
k,46,a1-5*d,h-t-5*d,0
k,47,a1,h-t-5*d,0
k,48,a1+5*d,h-t-5*d,0
k,49,a1+t,h-2*t,0
k,50,a1+t,h,0
k,51,a1-5*d,h,0
k,52,a1-5*d,h-2*t,0
k,53,a1+t,h-t,0

!vcct basso all'interfaccia settimo-ottavo strato

k,84,7*w-a1,h-7*t,0
k,85,7*w-a1-5*d,h-7*t,0
k,86,7*w-a1-5*d,h-7*t-5*d,0
k,87,7*w-a1,h-7*t-5*d,0
k,88,7*w-a1+5*d,h-7*t-5*d,0
k,89,7*w-a1+5*d,h-7*t,0
k,90,7*w-a1+5*d,h-7*t,0
k,91,7*w-a1+5*d,h-7*t+5*d,0
k,92,7*w-a1,h-7*t+5*d,0
k,93,7*w-a1-5*d,h-7*t+5*d,0
k,94,7*w-a1-t,h-8*t,0
k,95,7*w-a1-t,h-6*t,0
k,96,7*w-a1+5*d,h-6*t,0
k,97,7*w-a1+5*d,h-8*t,0
k,98,7*w-a1-t,h-7*t,0

!altri kp di completamento

k,129,a1-5*d,h-8*t,0
k,130,a1+t,h-8*t,0
k,194,a1-5*d,h-6*t,0
k,195,a1+t,h-6*t,0
k,147,7*w-a1-t,h,0
k,148,7*w-a1+5*d,h,0
k,200,7*w-a1-t,h-2*t,0
k,201,7*w-a1+5*d,h-2*t,0
k,155,0,h-t-5*d,0

k,165,7*w,h-7*t-5*d,0
k,172,0,h-t+5*d,0

k,182,7*w,h-7*t+5*d,0

*ENDIF

!-----------------------------------------------

*IF,a2,GT,0,AND,a2,LT,w,THEN
!se c'è la cricca a2 ed è minore di w

!vcct alto all'interfaccia secondo-terzo strato

k,54,w+a2,h-2*t,0
k,55,w+a2+5*d,h-2*t,0
k,56,w+a2+5*d,h-2*t+5*d,0
k,57,w+a2,h-2*t+5*d,0
k,58,w+a2-5*d,h-2*t+5*d,0
k,59,w+a2-5*d,h-2*t,0
k,60,w+a2-5*d,h-2*t,0
k,61,w+a2-5*d,h-2*t-5*d,0
k,62,w+a2,h-2*t-5*d,0
k,63,w+a2+5*d,h-2*t-5*d,0
k,64,w+a2+t,h-3*t,0
k,65,w+a2+t,h-t,0
k,66,w+a2-5*d,h-t,0
k,67,w+a2-5*d,h-3*t,0
k,68,w+a2+t,h-2*t,0

!vcct basso all'interfaccia sesto-settimo strato

k,99,6*w-a2,h-6*t,0
k,100,6*w-a2-5*d,h-6*t,0
k,101,6*w-a2-5*d,h-6*t-5*d,0
k,102,6*w-a2,h-6*t-5*d,0
k,103,6*w-a2+5*d,h-6*t-5*d,0
k,104,6*w-a2+5*d,h-6*t,0
k,105,6*w-a2+5*d,h-6*t,0
```

```
k,106,6*w-a2+5*d,h-6*t+5*d,0
k,107,6*w-a2,h-6*t+5*d,0
k,108,6*w-a2-5*d,h-6*t+5*d,0
k,109,6*w-a2-t,h-7*t,0
k,110,6*w-a2-t,h-5*t,0
k,111,6*w-a2+5*d,h-5*t,0
k,112,6*w-a2+5*d,h-7*t,0
k,113,6*w-a2-t,h-6*t,0

!altri kp di completamento

k,131,w+a2-5*d,h-8*t,0
k,132,w+a2+t,h-8*t,0
k,203,w+a2-5*d,h-6*t,0
k,204,w+a2+t,h-6*t,0
k,137,6*w-a2-t,h-8*t,0
k,138,6*w-a2+5*d,h-8*t,0
k,139,w+a2-5*d,h,0
k,140,w+a2+t,h,0
k,145,6*w-a2-t,h,0
k,146,6*w-a2+5*d,h,0
k,205,6*w-a2-t,h-2*t,0
k,206,6*w-a2+5*d,h-2*t,0

k,157,w,h-2*t-5*d,0
k,158,w,h-3*t,0
k,163,5*w,h-7*t,0
k,164,6*w,h-6*t-5*d,0
k,173,w,h-2*t+5*d,0
k,174,2*w,h-t,0
k,179,6*w,h-5*t,0
k,180,6*w,h-6*t+5*d,0

*ENDIF

!-----------------------------------------------

*IF,a3,GT,0,AND,a3,LT,w,THEN
!se c'è la cricca a3 ed è minore di w

!vcct alto all'interfaccia terzo-quarto strato

k,69,2*w+a3,h-3*t,0
k,70,2*w+a3+5*d,h-3*t,0
k,71,2*w+a3+5*d,h-3*t+5*d,0
k,72,2*w+a3,h-3*t+5*d,0
k,73,2*w+a3-5*d,h-3*t+5*d,0
k,74,2*w+a3-5*d,h-3*t,0
k,75,2*w+a3-5*d,h-3*t,0
k,76,2*w+a3-5*d,h-3*t-5*d,0
k,77,2*w+a3,h-3*t-5*d,0
k,78,2*w+a3+5*d,h-3*t-5*d,0
k,79,2*w+a3+t,h-4*t,0
k,80,2*w+a3+t,h-2*t,0
k,81,2*w+a3-5*d,h-2*t,0
k,82,2*w+a3-5*d,h-4*t,0
k,83,2*w+a3+t,h-3*t,0

!vcct basso all'interfaccia quinto-sesto strato

k,114,5*w-a3,h-5*t,0
k,115,5*w-a3-5*d,h-5*t,0
k,116,5*w-a3-5*d,h-5*t-5*d,0
k,117,5*w-a3,h-5*t-5*d,0
k,118,5*w-a3+5*d,h-5*t-5*d,0
k,119,5*w-a3+5*d,h-5*t,0
k,120,5*w-a3+5*d,h-5*t,0
k,121,5*w-a3+5*d,h-5*t+5*d,0
k,122,5*w-a3,h-5*t+5*d,0
k,123,5*w-a3-5*d,h-5*t+5*d,0
k,124,5*w-a3-t,h-6*t,0
k,125,5*w-a3-t,h-4*t,0
k,126,5*w-a3+5*d,h-4*t,0
k,127,5*w-a3+5*d,h-6*t,0
k,128,5*w-a3-t,h-5*t,0

!altri kp di completamento

k,133,2*w+a3-5*d,h-8*t,0
k,134,2*w+a3+t,h-8*t,0
k,207,2*w+a3-5*d,h-6*t,0
k,208,2*w+a3+t,h-6*t,0
```

```
k,135,5*w-a3-t,h-8*t,0
k,136,5*w-a3+5*d,h-8*t,0
k,141,2*w+a3-5*d,h,0
k,142,2*w+a3+t,h,0
k,143,5*w-a3-t,h,0
k,144,5*w-a3+5*d,h,0
k,209,5*w-a3-t,h-2*t,0
k,210,5*w-a3+5*d,h-2*t,0

k,159,2*w,h-3*t-5*d,0
k,160,2*w,h-4*t,0

k,162,5*w,h-5*t-5*d,0
k,175,2*w,h-3*t+5*d,0

k,177,5*w,h-4*t,0
k,178,5*w,h-5*t+5*d,0

*ENDIF

!-----------------------------------------------

!keypoint di completamento giunto sx

k,149,w,h-8*t,0
k,150,2*w,h-8*t,0
k,151,3*w,h-8*t,0
k,152,4*w,h-8*t,0
k,153,5*w,h-8*t,0
k,154,6*w,h-8*t,0

!keypoint di completamento giunto dx

k,166,w,h,0
k,167,2*w,h,0
k,168,3*w,h,0
k,169,4*w,h,0
k,170,5*w,h,0
k,171,6*w,h,0
```

```
!================================
================================

!COSTRUZIONE DELLA GEOMETRIA
LINES

!GIUNTO DI SINISTRA

l,1,2

!-----------------------------------------------

*IF,a1,GT,0,AND,a1,LT,w,THEN
        l,2,44
!linee del vcct alto (giunto sx)
        l,155,46
        l,44,39
        l,39,40
        l,40,53
        l,2,155,
        l,155,156
        l,156,188
        l,188,33
        l,156,52
        l,44,46
        l,46,47
        l,39,47
        l,47,48
        l,40,48
        l,46,52
        l,48,49
        l,52,49
        l,53,49
        l,52,194
        l,194,129
        l,49,195
        l,195,130
        l,33,129
        l,129,130
        l,130,149
        l,53,3
```

```
        l,49,4
        l,188,194
        l,194,195
        l,195,190

        l,14,98
        !linee del vcct basso (giunto sx)
        l,85,98
        l,154,94
        l,98,94
        l,85,84
        l,84,89
        l,85,86
        l,86,87
        l,84,87
        l,87,88
        l,89,88
        l,86,94
        l,94,97
        l,88,97
        l,15,89
        l,165,88
        l,97,16
        l,15,165
        l,165,16
*ELSE
        l,2,3
        l,156,4
        l,188,190
!linee parte alta senza vcct (giunto sx)
        l,2,156
        l,156,188
        l,188,33
        l,33,149

        l,14,15
!linee bassa senza vcct (giunto sx)
        l,154,16
        l,15,16
*ENDIF
!-----------------------------------------------

l,3,4
l,14,154

!-----------------------------------------------

*IF,a2,GT,0,AND,a2,LT,w,THEN
        l,4,157
!linee del vcct alto (giunto sx)
        l,157,158
        l,158,190
        l,190,149
        l,4,59
        l,157,61
        l,158,67
        l,149,131
        l,59,54
        l,54,55
        l,59,61
        l,61,62
        l,54,62
        l,55,63
        l,62,63
        l,55,68
        l,61,67
        l,63,64
        l,67,64
        l,68,64
        l,67,203
        l,203,131
        l,64,204
        l,204,132
        l,131,132
        l,68,5
        l,64,6
        l,132,150
        l,190,203
        l,203,204
        l,204,191
```

```
l,12,113
!linee del vcct basso (giunto sx)
l,100,113
l,100,99
l,99,104
l,113,109
l,12,163
l,163,153
l,163,109
l,153,137
l,100,101
l,101,102
l,99,102
l,102,103
l,104,103
l,101,109
l,103,112
l,109,112
l,109,137
l,112,138
l,137,138
l,13,104
l,164,103
l,112,14
l,138,154
l,13,164
l,164,14
*ELSE
l,4,5
l,190,191
!linee parte alta senza vcct (giunto sx)
l,4,190
l,190,149
l,149,150

l,12,13
!linee parte bassa senza vcct (giunto sx)
l,12,153
l,153,154
l,13,14

*ENDIF

!-----------------------------------------------

l,5,6

!-----------------------------------------------

*IF,a3,GT,0,AND,a3,LT,w,THEN
l,6,74
!linee del vcct alto (giunto sx)
l,74,69
l,69,70
l,6,159
l,159,160
l,160,191
l,191,150
l,159,76
l,160,82
l,150,133
l,74,76
l,69,77
l,76,77
l,70,78
l,77,78
l,70,83
l,76,82
l,78,79
l,82,79
l,83,79
l,82,207
l,207,133
l,79,208
l,208,134
l,133,134
l,83,7
l,79,8
l,134,151
l,191,207
```

```
l,207,208
l,208,192

l,10,128
!linee del vcct basso (giunto sx)
l,10,193
l,193,152
l,193,124
l,152,135
l,115,128
l,115,114
l,114,119
l,115,116
l,114,117
l,116,117
l,119,118
l,117,118
l,128,124
l,116,124
l,124,127
l,118,127
l,124,135
l,135,136
l,127,136
l,11,119
l,162,118
l,127,12
l,136,153
l,11,162
l,162,12
*ELSE
l,6,7
l,191,192
!linee parte alta senza vcct (giunto sx)
l,6,191
l,191,150
l,150,151
l,10,11
!linee parte bassa senza vcct (giunto sx)
l,11,12
l,10,193
l,193,152
l,193,12
l,152,153
*ENDIF

!-----------------------------------------------

!linee di completamento

l,7,8
l,8,9
l,192,193
l,8,192
l,192,151
l,151,152
l,9,10
l,37,1
l,37,184
l,184,183
l,183,38
l,184,156
l,183,188
l,38,33

!.....
.....

!AREA TROUGH KPS


A,37,38,16,34
!si costruisce un'area tra i kp esterni
ASBL,ALL,ALL
!si divide l'area create per tutte le linee del giunto sx
```

```
ASEL,S,AREA,,ALL
!si crea un nuovo set con tutte le aree fatte
finora
*GET,num_aree,AREA,,COUNT
!si effettua il conteggio delle aree fatte finora

ADELE,num_aree+1,,,0
!si cancella l'ultima area

LSEL,S,LINE,,ALL
!si crea un nuovo set con tutte le linee fatte
finora
*GET,num_linee,LINE,,COUNT
!si effettua il conteggio delle linee fatte finora

LDELE,num_linee+3,,,0
!si cancellano le seguenti linee
LDELE,num_linee+4,,,0

*GET,num_linee,LINE,,COUNT
!si effettua il conteggio delle linee rimaste

ALLSEL,ALL,ALL
!si seleziona tutto

!.....
.....

!GIUNTO DI DESTRA

*IF,a1,GT,0,AND,a1,LT,w,THEN
        l,172,17
        !linee del vcct alto (giunto dx)
        l,172,18
        l,18,45
        l,172,43
        l,45,39
        l,17,51
        l,43,45
        l,43,42
        l,42,39
        l,42,41
        l,41,40
        l,43,51
        l,41,50
        l,51,50
        l,50,53
        l,50,166
        l,53,19

        l,171,147
!linee del vcct basso (giunto dx)
        l,29,95
        l,30,98
        l,147,200
        l,200,95
        l,95,98
        l,147,148
        l,199,200
        l,200,201
        l,201,202
        l,95,96
        l,148,201
        l,201,96
        l,93,95
        l,93,85
        l,93,92
        l,92,84
        l,92,91
        l,91,96
        l,91,90
        l,84,90
        l,148,34
        l,96,181
        l,182,91
        l,31,90
        l,34,202
        l,202,181
        l,182,181
        l,182,31
        l,31,32
*ELSE
```

```
l,17,18
!linee parte alta senza vcct (giunto dx)
l,18,19
l,17,166

l,171,34
l,199,202
l,29,181
!linee parte bassa senza vcct (giunto dx)
l,30,31
l,34,202
l,202,181
l,181,31
l,31,32
*ENDIF

!-----------------------------------------------

l,166,19

!-----------------------------------------------

*IF,a2,GT,0,AND,a2,LT,w,THEN
l,19,173
!linee del vcct alto (giunto dx)
l,173,20
l,166,139
l,19,66
l,173,58
l,20,60
l,60,54
l,58,60
l,58,57
l,57,54
l,57,56
l,56,55
l,58,66
l,56,65
l,66,65
l,65,68
l,139,66
l,139,140
l,140,65
l,140,167
l,65,174
l,68,21
l,167,174
l,174,21

l,170,27
!linee del vcct basso (giunto dx)
l,27,28
l,170,145
l,198,205
l,205,206
l,206,199
l,27,110
l,28,113
l,145,205
l,205,110
l,110,113
l,145,146
l,146,206
l,206,111
l,110,111
l,108,110
l,108,100
l,108,107
l,107,99
l,107,106
l,106,111
l,106,105
l,99,105
l,146,171
l,111,179
l,180,106
l,29,105
l,171,199
l,199,179
l,179,180
l,180,29
l,29,30
```

```
*ELSE
        l,19,20
!linee parte alta senza vcct (giunto dx)
        l,20,21
        l,166,167
        l,167,21

        l,27,28
!linee parte bassa senza vcct (giunto dx)
        l,28,29
        l,198,199
        l,170,171
        l,171,199
        l,199,29
        l,29,30
*ENDIF

!-----------------------------------------------

*IF,a3,GT,0,AND,a3,LT,w,THEN
        l,21,175
!linee del vcct alto (giunto dx)
        l,175,22
        l,167,141
        l,21,81
        l,175,73
        l,22,75
        l,75,69
        l,73,75
        l,73,72
        l,72,69
        l,72,71
        l,71,70
        l,73,81
        l,71,80
        l,81,80
        l,80,83
        l,141,81
        l,141,142
        l,142,80
        l,142,168
        l,80,196
        l,83,23
        l,168,196
        l,196,23

        l,169,143
!linee del vcct basso (giunto dx)
        l,25,125
        l,26,128
        l,143,144
        l,143,209
        l,209,125
        l,144,210
        l,210,126
        l,125,126
        l,125,128
        l,123,125
        l,123,115
        l,123,122
        l,122,114
        l,122,121
        l,121,120
        l,114,120
        l,121,126
        l,144,170
        l,197,209
        l,209,210
        l,210,198
        l,126,177
        l,178,121
        l,27,120
        l,170,177
        l,177,178
        l,178,27
        l,27,28
*ELSE
        l,21,22
!linee parte alta senza vcct (giunto dx)
        l,22,23
        l,167,168
        l,21,196
```

```
l,168,196
l,196,23

l,169,170
l,197,198
!linee parte bassa senza vcct (giunto dx)
l,26,27
l,170,198
l,198,27
l,27,28
*ENDIF

!-----------------------------------------------

!linee di completamento

l,23,24
l,24,25
l,168,169
l,196,197
l,169,197
l,197,25
l,25,26
l,34,35
l,202,186
l,181,185
l,32,36
l,35,186
l,186,185
l,185,36

!.....
.....

*GET,num_totale_linee,LINE,,COUNT
!si effettua il conteggio delle linee totali

LSEL,S,LINE,,num_linee+1,num_totale_linee,
!si crea un nuovo set con tutte le aree fatte
finora
```

```
KSEL,S,,,39,40,1
!si crea un nuovo set con questi kp
KSEL,A,,,53

!si aggiungono i seguenti kp al set appena creato
KSEL,A,,,54,55,1
KSEL,A,,,68
KSEL,A,,,69,70,1
KSEL,A,,,83
KSEL,A,,,114,115,1
KSEL,A,,,128
KSEL,A,,,99,100,1
KSEL,A,,,113
KSEL,A,,,84,85,1
KSEL,A,,,98

LSLK,A,1
!si selezionano le linee costruite su questi kp e
le si aggiungono al set di linee precedentemente
creato

KSEL,ALL
!si selezionano tutti i kp costruiti

A,17,33,36,35
!si crea l'area tra i kp
ASBL,1,ALL
!si divide tale area per tutte le linee del set
precedente(linee del giunto dx)

ASEL,S,AREA,,ALL
!si crea un un nuovo set con tutte le aree fatte
finora

*GET,num_aree,AREA,,COUNT
!si effettua il conteggio delle aree fatte finora

ADELE,num_aree+1,,,1                !si
cancella l'ultima area

ALLSEL,ALL,ALL
```

```
!si seleziona tutto

!================================
================================

!MESH

!------------------------------------------------

*IF,a1,GT,0,AND,a1,LT,w,THEN

KSEL,S,,,172
KSEL,A,,,43
KSEL,A,,,155
KSEL,A,,,46

LSLK,S,1

LESIZE,ALL,0.0128125,,,0.64
!si assegna la lunghezza media dell'elemento e
lo spacing ratio

ALLSEL,ALL,ALL

KSEL,S,,,91
KSEL,A,,,182
KSEL,A,,,88
KSEL,A,,,165

LSLK,S,1

LESIZE,ALL,0.0128125,,,0.64

ALLSEL,ALL,ALL

KSEL,S,,,2
KSEL,A,,,44
KSEL,A,,,18
KSEL,A,,,45

LSLK,S,1

LESIZE,ALL,0.0128125,,,0.64

ALLSEL,ALL,ALL

KSEL,S,,,90
KSEL,A,,,31
KSEL,A,,,89
KSEL,A,,,15

LSLK,S,1

LESIZE,ALL,0.0128125,,,0.64

ALLSEL,ALL,ALL

*ENDIF

!-----------------------------------------------

*IF,a2,GT,0,AND,a2,LT,w,THEN

KSEL,S,,,173
KSEL,A,,,58
KSEL,A,,,157
KSEL,A,,,61

LSLK,S,1

LESIZE,ALL,0.0128125,,,0.64

ALLSEL,ALL,ALL

KSEL,S,,,106
KSEL,A,,,180
KSEL,A,,,103
KSEL,A,,,164

LSLK,S,1

LESIZE,ALL,0.0128125,,,0.64
```

```
ALLSEL,ALL,ALL

KSEL,S,,4
KSEL,A,,59
KSEL,A,,20
KSEL,A,,60

LSLK,S,1

LESIZE,ALL,0.0128125,,,0.64

ALLSEL,ALL,ALL

KSEL,S,,105
KSEL,A,,29
KSEL,A,,104
KSEL,A,,13

LSLK,S,1

LESIZE,ALL,0.0128125,,,0.64

ALLSEL,ALL,ALL

*ENDIF

!-------------------------------------

*IF,a3,GT,0,AND,a3,LT,w,THEN

KSEL,S,,175
KSEL,A,,73
KSEL,A,,159
KSEL,A,,76

LSLK,S,1

LESIZE,ALL,0.0128125,,,0.64

ALLSEL,ALL,ALL

KSEL,S,,121
KSEL,A,,178
KSEL,A,,118
KSEL,A,,162

LSLK,S,1

LESIZE,ALL,0.0128125,,,0.64

ALLSEL,ALL,ALL

KSEL,S,,6
KSEL,A,,74
KSEL,A,,22
KSEL,A,,75

LSLK,S,1

LESIZE,ALL,0.0128125,,,0.64

ALLSEL,ALL,ALL

KSEL,S,,120
KSEL,A,,27
KSEL,A,,119
KSEL,A,,11

LSLK,S,1

LESIZE,ALL,0.0128125,,,0.64

ALLSEL,ALL,ALL

*ENDIF

!-----------------------------------------------

!mesh dei vcct

LSEL,S,LENGH,,0.05
```

```
!si crea un unovo set con tutte le linee che
hanno questa lunghezza

*DO,i,0,3
LSEL,U,LOC,X,i*w,i*w+0.025
!si deselezionano dal precedente set le linee
comprese in quest'intervallo
*ENDDO

*DO,i,4,7
LSEL,U,LOC,X,(i+1)*w-0.025,(i+1)*w
*ENDDO

LESIZE,ALL,0.01

ALLSEL,ALL,ALL

!------------------------------------------------

LSEL,S,LENGH,,0.282842712
!si crea un unovo set con tutte le linee che
hanno questa lunghezza

LESIZE,ALL,0.0128125,,,1.5625

ALLSEL,ALL,ALL

!------------------------------------------------

LSEL,S,LENGH,,0.25
!si crea un unovo set con tutte le linee che
hanno questa lunghezza

*DO,i,0,7
!si deselezionano dal precedente set le linee
comprese in quest'intervallo
LSEL,U,LOC,X,i*w
*ENDDO

KSEL,S,,,139
KSEL,A,,,140
KSEL,A,,,65
KSEL,A,,,66
KSEL,A,,,109
KSEL,A,,,137
KSEL,A,,,112
KSEL,A,,,138

LSLK,U,1
!si deselezionano dal precedente set le linee
costruite su questi kp

LESIZE,ALL,,,16

ALLSEL,ALL,ALL

!------------------------------------------------

LSEL,S,LENGH,,0.3

LESIZE,ALL,0.015625,,

ALLSEL,ALL,ALL

!------------------------------------------------

LSEL,S,LENGH,,0.20

*DO,i,0,3
LSEL,U,LOC,X,i*w
*ENDDO

*DO,i,4,7
LSEL,U,LOC,X,(i+1)*w-0.01,(i+1)*w
*ENDDO

LESIZE,ALL,0.0128125,,,1.5625

ALLSEL,ALL,ALL

!------------------------------------------------
```

```
!parte a sx della zona di giunzione

KSEL,S,,,37
KSEL,A,,,1
LSLK,S,1

LESIZE,ALL,0.15,,,0.025

ALLSEL,ALL,ALL

KSEL,S,,,184
KSEL,A,,,156
LSLK,S,1

LESIZE,ALL,0.15,,,0.025

ALLSEL,ALL,ALL

KSEL,S,,,183
KSEL,A,,,188
LSLK,S,1

LESIZE,ALL,0.15,,,0.025

ALLSEL,ALL,ALL

KSEL,S,,,38
KSEL,A,,,33
LSLK,S,1

LESIZE,ALL,0.15,,,0.025

ALLSEL,ALL,ALL

!-----------------------------------------------

!linee terminali verticali a sx e dx del giunto

KSEL,S,,,186
KSEL,A,,,185
LSLK,S,1

LESIZE,ALL,,,2

ALLSEL,ALL,ALL

KSEL,S,,,35
KSEL,A,,,186

LSLK,S,1

LESIZE,ALL,,,1

ALLSEL,ALL,ALL

KSEL,S,,,185
KSEL,A,,,36

LSLK,S,1

LESIZE,ALL,,,1

ALLSEL,ALL,ALL

KSEL,s,,,184
KSEL,A,,,183

LSLK,S,1

LESIZE,ALL,,,2

ALLSEL,ALL,ALL

KSEL,S,,,37
KSEL,A,,,184

LSLK,S,1

LESIZE,ALL,,,1

ALLSEL,ALL,ALL
```

```
KSEL,S,,,183
KSEL,A,,,38

LSLK,S,1

LESIZE,ALL,,,1

ALLSEL,ALL,ALL

!-----------------------------------------------

!parte a dx della zona di giunzione

KSEL,S,,,34
KSEL,A,,,35
LSLK,S,1

LESIZE,ALL,0.15,,,40

KSEL,S,,,202
KSEL,A,,,186
LSLK,S,1

LESIZE,ALL,0.15,,,40

KSEL,S,,,181
KSEL,A,,,185
LSLK,S,1

LESIZE,ALL,0.15,,,40


ALLSEL,ALL,ALL

KSEL,S,,,32
KSEL,A,,,36
LSLK,S,1

LESIZE,ALL,0.15,,,40


ALLSEL,ALL,ALL

!-----------------------------------------------

ESIZE,0.015625
!si definisce un element size globale

MSHKEY,0
!si imposta mesh di tipo free

AMESH,ALL
!si avvia la meshatura

!=================================
=================================

!definizione delle lamine a 45

ASEL,S,LOC,Y,0.5,1.5
 !si selezionano le aree comprese tra il 3° e 6°
strato
ESLA,S
!si selezionano gli elementi attaccati alle aree
precedentemente selezionate
MPCHG,2,ALL
!attribuzione a questi elementi delle proprietà
delle lamine a 45 gradi
ALLSEL,ALL                    !
si seleziona nuovamente tutto

!=================================
=================================

!DEFINIZIONE VINCOLI

!estremo sinistro

KSEL,S,,,37
KSEL,A,,,184
KSEL,A,,,183
KSEL,A,,,38
```

```
LSLK,S,1

DL,ALL,,UX,,1
DL,ALL,,UY,,1

ALLSEL,ALL,ALL

!-----------------------------------------------

!estremo destro

KSEL,S,,,35
KSEL,A,,,186
KSEL,A,,,185
KSEL,A,,,36

LSLK,S,1

DL,ALL,,UY,,1

ALLSEL,ALL,ALL

!================================
================================

!DEFINIZIONE DEL CARICO

KSEL,S,,,35
KSEL,A,,,186
kSEL,A,,,185
kSEL,A,,,36

LSLK,S,1

SFL,ALL,PRES,-sigma,-sigma,,
!assegnazione di una distribuzione di sigma
all'estremo destro

ALLSEL,ALL,ALL

!================================
================================
====================

!CICLI PER ASSEGNARE LE COUPLING
EQUATION

*IF,a1,GT,0,AND,a1,LT,w,THEN

!--------SX ORIZZONTALE--------

KSEL,S,,,53
!si crea un nuovo set con questi kp
KSEL,A,,,3
KSEL,A,,,19

LSLK,S,1
!si selezionano le linee costruite su questi kp

NSLL,S,1
!si selezionano tutti i nodi giacenti su queste
linee

*GET,numero_linea,LINE,,NUM,MAX
!si identifica il numero maggiore di queste
linee(una vale l'altra, sono uguali)
*GET,lunghezza,LINE,numero_linea,LENG
!si identifica la lunghezza di tale linea
*GET,numdiv,LINE,numero_linea,ATTR,NDI
V
!si identificano il numero di divisioni di questa
linea

incr=lunghezza/numdiv/2
!si definisce la varibile incr

x1=a1+t+incr/2
!si definisce il punto di partenza per il ciclo
delle coupling equation
x2=w+incr
```

```
!si definisce il punto finale per il ciclo delle
coupling equation

*DO,j,x1,x2,incr
NSEL,R,LOC,X,j,j+incr
!si seleziona lungo l'asse x i nodi compresi in
tale intervallo

*GET,nnodisel,NODE,,COUNT
!si identifica il numero di nodi(2, uno di una
linea,uno dell'altra)
*IF,nnodisel,EQ,2,THEN

CP,,ALL,ALL
!si creano i set di coupled degrees of freedom
*ELSE
*ENDIF
NSLL,S,1
!si selezionano tutti i nodi delle linee e si passa
all'intervallo successivo
*ENDDO

ALLSEL,ALL,ALL

!--------DX ORIZZONTALE--------

KSEL,S,,,14
KSEL,A,,,30
KSEL,A,,,98

LSLK,S,1

NSLL,S,1

*GET,numero_linea,LINE,,NUM,MAX
*GET,lunghezza,LINE,numero_linea,LENG
*GET,numdiv,LINE,numero_linea,ATTR,NDI
V

incr=lunghezza/numdiv/2

x1=6*w-incr/2
x2=7*w-a1-t

*DO,j,x1,x2,incr
NSEL,R,LOC,X,j,j+incr
*GET,nnodisel,NODE,,COUNT
*IF,nnodisel,EQ,2,THEN
CP,,ALL,ALL
*ELSE
*ENDIF
NSLL,S,1
*ENDDO

ALLSEL,ALL,ALL

*ELSEIF,a1,EQ,w,THEN

*ELSEIF,a1,EQ,0,THEN

!---------SX_ORIZZONTALE--------

KSEL,S,,,2
KSEL,A,,,3
KSEL,A,,,18
KSEL,A,,,19

LSLK,S,1

NSLL,S,1

*GET,numero_linea,LINE,,NUM,MAX
*GET,lunghezza,LINE,numero_linea,LENG
*GET,numdiv,LINE,numero_linea,ATTR,NDI
V

incr=lunghezza/numdiv/2

x1=-incr/2
x2=w+incr

*DO,j,x1,x2,incr
```

```
NSEL,R,LOC,X,j,j+incr
*GET,nnodisel,NODE,,COUNT
*IF,nnodisel,EQ,2,THEN
CP,,ALL,ALL
*ELSE
*ENDIF
NSLL,S,1
*ENDDO

ALLSEL,ALL,ALL

!---------SX_VERTICALE--------

KSEL,S,,,1
KSEL,A,,,2
KSEL,A,,,17
KSEL,A,,,18

LSLK,S,1

NSLL,S,1

*GET,numero_linea,LINE,,NUM,MAX
*GET,lunghezza,LINE,numero_linea,LENG
*GET,numdiv,LINE,numero_linea,ATTR,NDI
V

incr=lunghezza/numdiv/2

y1=h-t+incr/2
y2=h+incr/2

*DO,j,y1,y2,incr
NSEL,R,LOC,Y,j,j+incr
*GET,nnodisel,NODE,,COUNT
*IF,nnodisel,EQ,2,THEN
CP,,ALL,ALL
*ELSE
*ENDIF
NSLL,S,1
*ENDDO

ALLSEL,ALL,ALL

!---------DX_ORIZZONTALE--------

KSEL,S,,,14
KSEL,A,,,15
KSEL,A,,,30
KSEL,A,,,31

LSLK,S,1

NSLL,S,1

*GET,numero_linea,LINE,,NUM,MAX
*GET,lunghezza,LINE,numero_linea,LENG
*GET,numdiv,LINE,numero_linea,ATTR,NDI
V

incr=lunghezza/numdiv/2

x1=6*w-incr/2    !0.03125/2
x2=7*w+incr

*DO,j,x1,x2,incr
NSEL,R,LOC,X,j,j+incr
*GET,nnodisel,NODE,,COUNT
*IF,nnodisel,EQ,2,THEN
CP,,ALL,ALL
*ELSE
*ENDIF
NSLL,S,1
*ENDDO

ALLSEL,ALL,ALL

!---------DX_VERTICALE--------

KSEL,S,,,15
KSEL,A,,,16
KSEL,A,,,31
```

```
KSEL,A,,,32

LSLK,S,1

NSLL,S,1

*GET,numero_linea,LINE,,NUM,MAX
*GET,lunghezza,LINE,numero_linea,LENG
*GET,numdiv,LINE,numero_linea,ATTR,NDI
V

incr=lunghezza/numdiv/2

y1=h-8*t-incr/2
y2=h-7*t-incr

*DO,j,y1,y2,incr
NSEL,R,LOC,Y,j,j+incr
*GET,nnodisel,NODE,,COUNT
*IF,nnodisel,EQ,2,THEN
CP,,ALL,ALL
*ELSE
*ENDIF
NSLL,S,1
*ENDDO

*ENDIF

ALLSEL,ALL,ALL

!-----------------------------------------------

*IF,a2,GT,0,AND,a2,LT,w,THEN

!--------SX ORIZZONTALE--------

KSEL,S,,,68
KSEL,A,,,5
KSEL,A,,,21

LSLK,S,1

NSLL,S,1

*GET,numero_linea,LINE,,NUM,MAX
*GET,lunghezza,LINE,numero_linea,LENG
*GET,numdiv,LINE,numero_linea,ATTR,NDI
V

incr=lunghezza/numdiv/2

x1=w+a2+t+incr/2
x2=2*w+incr

*DO,j,x1,x2,incr
NSEL,R,LOC,X,j,j+incr
*GET,nnodisel,NODE,,COUNT
*IF,nnodisel,EQ,2,THEN
CP,,ALL,ALL
*ELSE
*ENDIF
NSLL,S,1
*ENDDO

ALLSEL,ALL,ALL

!--------DX ORIZZONTALE--------

KSEL,S,,,12
KSEL,A,,,28
KSEL,A,,,113

LSLK,S,1

NSLL,S,1

*GET,numero_linea,LINE,,NUM,MAX
*GET,lunghezza,LINE,numero_linea,LENG
*GET,numdiv,LINE,numero_linea,ATTR,NDI
V

incr=lunghezza/numdiv/2
```

```
x1=5*w-incr/2
x2=6*w-a2-t

*DO,j,x1,x2,incr
NSEL,R,LOC,X,j,j+incr
*GET,nnodisel,NODE,,COUNT
*IF,nnodisel,EQ,2,THEN
CP,,ALL,ALL
*ELSE
*ENDIF
NSLL,S,1
*ENDDO

ALLSEL,ALL,ALL

*ELSEIF,a2,EQ,w,THEN

*ELSEIF,a2,EQ,0,THEN

!--------SX_ORIZZONTALE--------

KSEL,S,,,4
KSEL,A,,,5
KSEL,A,,,20
KSEL,A,,,21

LSLK,S,1

NSLL,S,1

*GET,numero_linea,LINE,,NUM,MAX
*GET,lunghezza,LINE,numero_linea,LENG
*GET,numdiv,LINE,numero_linea,ATTR,NDI
V

incr=lunghezza/numdiv/2

x1=w-incr/2
x2=2*w+incr

*DO,j,x1,x2,incr
NSEL,R,LOC,X,j,j+incr
*GET,nnodisel,NODE,,COUNT
*IF,nnodisel,EQ,2,THEN
CP,,ALL,ALL
*ELSE
*ENDIF
NSLL,S,1
*ENDDO

ALLSEL,ALL,ALL

!!--------SX_VERTICALE--------
!
!commentato per creare le cricche verticali nella
zona di giunzione
!eliminare ! per ricreare l'accoppiamento
!
!KSEL,S,,,3
!KSEL,A,,,4
!KSEL,A,,,19
!KSEL,A,,,20
!
!LSLK,S,1
!
!NSLL,S,1
!
!*GET,numero_linea,LINE,,NUM,MAX
!*GET,lunghezza,LINE,numero_linea,LENG
!*GET,numdiv,LINE,numero_linea,ATTR,NDI
V
!
!incr=lunghezza/numdiv/2
!
!*IF,a1,GE,0,AND,a1,LT,w,THEN
!
!y1=h-2*t+incr/2
!y2=h-t-incr
!
!*DO,j,y1,y2,incr
!NSEL,R,LOC,Y,j,j+incr
```

```
!*GET,nnodisel,NODE,,COUNT
!*IF,nnodisel,EQ,2,THEN
!CP,,ALL,ALL
!*ELSE
!*ENDIF
!NSLL,S,1
!*ENDDO
!
!*ELSE
!
!y1=h-2*t+incr/2
!y2=h-t+incr
!
!*DO,j,y1,y2,incr
!NSEL,R,LOC,Y,j,j+incr
!*GET,nnodisel,NODE,,COUNT
!*IF,nnodisel,EQ,2,THEN
!CP,,ALL,ALL
!*ELSE
!*ENDIF
!NSLL,S,1
!*ENDDO
!
!*ENDIF
!
!ALLSEL,ALL,ALL

!---------DX_ORIZZONTALE--------

KSEL,S,,,12
KSEL,A,,,13
KSEL,A,,,28
KSEL,A,,,29

LSLK,S,1

NSLL,S,1

*GET,numero_linea,LINE,,NUM,MAX
*GET,lunghezza,LINE,numero_linea,LENG
*GET,numdiv,LINE,numero_linea,ATTR,NDI
V

incr=lunghezza/numdiv/2

x1=5*w-incr/2
x2=6*w+incr

*DO,j,x1,x2,incr
NSEL,R,LOC,X,j,j+incr
*GET,nnodisel,NODE,,COUNT
*IF,nnodisel,EQ,2,THEN
CP,,ALL,ALL
*ELSE
*ENDIF
NSLL,S,1
*ENDDO

ALLSEL,ALL,ALL

!!---------DX_VERTICALE--------
!
!commentato per creare le cricche verticali nella
zona di giunzione
!eliminare ! per ricreare l'accoppiamento
!
!KSEL,S,,,13
!KSEL,A,,,14
!KSEL,A,,,29
!KSEL,A,,,30
!
!LSLK,S,1
!
!NSLL,S,1
!
!*GET,numero_linea,LINE,,NUM,MAX
!*GET,lunghezza,LINE,numero_linea,LENG
!*GET,numdiv,LINE,numero_linea,ATTR,NDI
V
!
!incr=lunghezza/numdiv/2
```

```
!
!*IF,a1,GE,0,AND,a1,LT,w,THEN
!
!y1=h-7*t+incr/2
!y2=h-6*t-incr
!
!*DO,j,y1,y2,incr
!NSEL,R,LOC,Y,j,j+incr
!*GET,nnodisel,NODE,,COUNT
!*IF,nnodisel,EQ,2,THEN
!CP,,ALL,ALL
!*ELSE
!*ENDIF
!NSLL,S,1
!*ENDDO
!
!*ELSE
!
!y1=h-7*t-incr/2
!y2=h-6*t-incr
!
!*DO,j,y1,y2,incr
!NSEL,R,LOC,Y,j,j+incr
!*GET,nnodisel,NODE,,COUNT
!*IF,nnodisel,EQ,2,THEN
!CP,,ALL,ALL
!*ELSE
!*ENDIF
!NSLL,S,1
!*ENDDO
!
!*ENDIF

*ENDIF

ALLSEL,ALL,ALL

!-----------------------------------------------

*IF,a3,GT,0,AND,a3,LT,w,THEN

!--------SX ORIZZONTALE--------

KSEL,S,,,83
KSEL,A,,,7
KSEL,A,,,23

LSLK,S,1

NSLL,S,1

*GET,numero_linea,LINE,,NUM,MAX
*GET,lunghezza,LINE,numero_linea,LENG
*GET,numdiv,LINE,numero_linea,ATTR,NDI
V

incr=lunghezza/numdiv/2

x1=2*w+a3+t+incr/2
x2=3*w+incr

*DO,j,x1,x2,incr
NSEL,R,LOC,X,j,j+incr
*GET,nnodisel,NODE,,COUNT
*IF,nnodisel,EQ,2,THEN
CP,,ALL,ALL
*ELSE
*ENDIF
NSLL,S,1
*ENDDO

ALLSEL,ALL,ALL

!--------DX ORIZZONTALE--------

KSEL,S,,,10
KSEL,A,,,26
KSEL,A,,,128

LSLK,S,1

NSLL,S,1
```

```
*GET,numero_linea,LINE,,NUM,MAX
*GET,lunghezza,LINE,numero_linea,LENG
*GET,numdiv,LINE,numero_linea,ATTR,NDI
V

incr=lunghezza/numdiv/2

x1=4*w-incr/2
x2=5*w-a3-t

*DO,j,x1,x2,incr
NSEL,R,LOC,X,j,j+incr
*GET,nnodisel,NODE,,COUNT
*IF,nnodisel,EQ,2,THEN
CP,,ALL,ALL
*ELSE
*ENDIF
NSLL,S,1
*ENDDO

ALLSEL,ALL,ALL

*ELSEIF,a3,EQ,w,THEN

*ELSEIF,a3,EQ,0,THEN

!--------SX_ORIZZONTALE--------

KSEL,S,,,6
KSEL,A,,,7
KSEL,A,,,22
KSEL,A,,,23

LSLK,S,1

NSLL,S,1

*GET,numero_linea,LINE,,NUM,MAX
*GET,lunghezza,LINE,numero_linea,LENG
*GET,numdiv,LINE,numero_linea,ATTR,NDI
V

incr=lunghezza/numdiv/2

x1=2*w-incr/2
x2=3*w+incr

*DO,j,x1,x2,incr
NSEL,R,LOC,X,j,j+incr
*GET,nnodisel,NODE,,COUNT
*IF,nnodisel,EQ,2,THEN
CP,,ALL,ALL
*ELSE
*ENDIF
NSLL,S,1
*ENDDO

ALLSEL,ALL,ALL

!!--------SX_VERTICALE--------
!
!commentato per creare le cricche verticali nella
zona di giunzione
!eliminare ! per ricreare l'accoppiamento
!
!KSEL,S,,,5
!KSEL,A,,,6
!KSEL,A,,,21
!KSEL,A,,,22
!
!LSLK,S,1
!
!NSLL,S,1
!
!*GET,numero_linea,LINE,,NUM,MAX
!*GET,lunghezza,LINE,numero_linea,LENG
!*GET,numdiv,LINE,numero_linea,ATTR,NDI
V
!
!incr=lunghezza/numdiv/2
```

```
!
!*IF,a2,GE,0,AND,a2,LT,w,THEN
!
!y1=h-3*t+incr/2
!y2=h-2*t-incr
!
!*DO,j,y1,y2,incr
!NSEL,R,LOC,Y,j,j+incr
!*GET,nnodisel,NODE,,COUNT
!*IF,nnodisel,EQ,2,THEN
!CP,,ALL,ALL
!*ELSE
!*ENDIF
!NSLL,S,1
!*ENDDO
!
!*ELSE
!
!y1=h-3*t+incr/2
!y2=h-2*t+incr
!
!*DO,j,y1,y2,incr
!NSEL,R,LOC,Y,j,j+incr
!*GET,nnodisel,NODE,,COUNT
!*IF,nnodisel,EQ,2,THEN
!CP,,ALL,ALL
!*ELSE
!*ENDIF
!NSLL,S,1
!*ENDDO
!
!*ENDIF
!
!ALLSEL,ALL,ALL

!--------DX_ORIZZONTALE--------

KSEL,S,,,10
KSEL,A,,,11
KSEL,A,,,26
KSEL,A,,,27
LSLK,S,1

NSLL,S,1

*GET,numero_linea,LINE,,NUM,MAX
*GET,lunghezza,LINE,numero_linea,LENG
*GET,numdiv,LINE,numero_linea,ATTR,NDI
V

incr=lunghezza/numdiv/2

x1=4*w-incr/2
x2=5*w+incr

*DO,j,x1,x2,incr
NSEL,R,LOC,X,j,j+incr
*GET,nnodisel,NODE,,COUNT
*IF,nnodisel,EQ,2,THEN
CP,,ALL,ALL
*ELSE
*ENDIF
NSLL,S,1
*ENDDO

ALLSEL,ALL,ALL

!!---------DX_VERTICALE--------
!
!
!KSEL,S,,,11
!KSEL,A,,,12
!KSEL,A,,,27
!KSEL,A,,,28
!
!LSLK,S,1
!
!NSLL,S,1
!
!*GET,numero_linea,LINE,,NUM,MAX
!*GET,lunghezza,LINE,numero_linea,LENG
```

```
!*GET,numdiv,LINE,numero_linea,ATTR,NDI
V
!
!incr=lunghezza/numdiv/2
!
!*IF,a2,GE,0,AND,a2,LT,w,THEN
!
!y1=h-6*t+incr/2
!y2=h-5*t-incr
!
!*DO,j,y1,y2,incr
!NSEL,R,LOC,Y,j,j+incr
!*GET,nnodisel,NODE,,COUNT
!*IF,nnodisel,EQ,2,THEN
!CP,,ALL,ALL
!*ELSE
!*ENDIF
!NSLL,S,1
!*ENDDO
!
!*ELSE
!
!y1=h-6*t-incr/2
!y2=h-5*t-incr
!
!*DO,j,y1,y2,incr
!NSEL,R,LOC,Y,j,j+incr
!*GET,nnodisel,NODE,,COUNT
!*IF,nnodisel,EQ,2,THEN
!CP,,ALL,ALL
!*ELSE
!*ENDIF
!NSLL,S,1
!*ENDDO
!
!*ENDIF

*ENDIF

ALLSEL,ALL,ALL

!----------------------------------------------

!--------CENTRO ORIZZONTALE--------

KSEL,S,,,8
KSEL,A,,,9
KSEL,A,,,24
KSEL,A,,,25

LSLK,S,1

NSLL,S,1

*GET,numero_linea,LINE,,NUM,MAX
*GET,lunghezza,LINE,numero_linea,LENG
*GET,numdiv,LINE,numero_linea,ATTR,NDI
V

incr=lunghezza/numdiv/2

!x1=3*w+0.2-incr/2
!x2=4*w-0.2-incr/2

x1=3*w-incr/2
x2=4*w+incr

*DO,j,x1,x2,incr
NSEL,R,LOC,X,j,j+incr
*GET,nnodisel,NODE,,COUNT
*IF,nnodisel,EQ,2,THEN
CP,,ALL,ALL
*ELSE
*ENDIF
NSLL,S,1
*ENDDO

ALLSEL,ALL,ALL

!!--------CENTRO SX VERTICALE--------
!
```

```
!commentato per creare le cricche verticali nella
zona di giunzione
!eliminare ! per ricreare l'accoppiamento
!
!KSEL,S,,,7
!KSEL,A,,,8
!KSEL,A,,,23
!KSEL,A,,,24
!
!LSLK,S,1
!
!NSLL,S,1
!
!*GET,numero_linea,LINE,,NUM,MAX
!*GET,lunghezza,LINE,numero_linea,LENG
!*GET,numdiv,LINE,numero_linea,ATTR,NDI
V
!
!incr=lunghezza/numdiv/2
!
!y1=h-4*t+incr/2
!y2=h-3*t-incr
!
!*DO,j,y1,y2,incr
!NSEL,R,LOC,Y,j,j+incr
!*GET,nnodisel,NODE,,COUNT
!*IF,nnodisel,EQ,2,THEN
!CP,,ALL,ALL
!*ELSE
!*ENDIF
!NSLL,S,1
!*ENDDO
!
!ALLSEL,ALL,ALL
!
!!---------CENTRO DX VERTICALE--------
!
!commentato per creare le cricche verticali nella
zona di giunzione
!eliminare ! per ricreare l'accoppiamento
!
!KSEL,S,,,9
!KSEL,A,,,10
!KSEL,A,,,25
!KSEL,A,,,26
!
!LSLK,S,1
!
!NSLL,S,1
!
!*GET,numero_linea,LINE,,NUM,MAX
!*GET,lunghezza,LINE,numero_linea,LENG
!*GET,numdiv,LINE,numero_linea,ATTR,NDI
V
!
!incr=lunghezza/numdiv/2
!
!y1=h-5*t+incr/2
!y2=h-4*t-incr
!
!*DO,j,y1,y2,incr
!NSEL,R,LOC,Y,j,j+incr
!*GET,nnodisel,NODE,,COUNT
!*IF,nnodisel,EQ,2,THEN
!CP,,ALL,ALL
!*ELSE
!*ENDIF
!NSLL,S,1
!*ENDDO

ALLSEL,ALL,ALL

!================================
================================

!LANCIO DELLA SOLUZIONE

/SOL
ANTYPE,0
NLGEOM,1
DELTIM,0.05,0.00001,0.1
!time step
```

```
OUTRES,ERASE
OUTRES,NSOL,LAST
OUTRES,RSOL,LAST
OUTRES,ESOL,LAST
OUTRES,NLOA,LAST
OUTRES,STRS,LAST
AUTOTS,1
TIME,1

SOLVE
FINISH

!================================
================================



!POSTPROCESSING
/POST1

!---------------------------------------
!SPOSTAMENTI VCCT

*CFOPEN,'RESULTS w=3(prima
interfaccia_cricche trasversali aperte_basso
carico_NL)',txt,,APPEND
*VWRITE,'----------------------------------------'
%/%c%/
*VWRITE,'LUNGHEZZA DI
SOVRAPPOSIZIONE W=',w
%c%f
*VWRITE,'LUNGHEZZA CRICCA A1=',a1
%c%f
*VWRITE,'LUNGHEZZA CRICCA A2=',a2
%c%f
*VWRITE,'LUNGHEZZA CRICCA A3=',a3
%c%f%/
*VWRITE,'SPOSTAMENTI VCCT:'
%c
*VWRITE,'UX','UY'
('        'A2,'            'A2)


!------------m,m*------------

KSEL,S,,,45
KSEL,A,,,39

LSLK,S,1

NSLL,S,1

NSEL,R,LOC,X,a1-0.0125,a1-0.0075
!seleziono il punto m

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX
*GET,u_m1,NODE,num_nodo,U,X
!spostamento di m lungo X
*GET,v_m1,NODE,num_nodo,U,Y
!spostamento di m lungo Y

*VWRITE,'m',u_m1,'m',v_m1
('  ',A1,'  'F10.6'   ',A1,'  'F10.6'  ')

ALLSEL,ALL,ALL

KSEL,S,,,44
KSEL,A,,,39

LSLK,S,1

NSLL,S,1

NSEL,R,LOC,X,a1-0.0125,a1-0.0075
!seleziono il punto m*

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX
*GET,u_m2,NODE,num_nodo,U,X
!spostamento di m* lungo X
*GET,v_m2,NODE,num_nodo,U,Y
!spostamento di m* lungo Y

*VWRITE,'m*',u_m2,'m*',v_m2
('  ',A2,' 'F10.6'   ',A2,' 'F10.6'  ')
```

```
ALLSEL,ALL,ALL

!------------l,l*------------

KSEL,S,,,45
KSEL,A,,,39

LSLK,S,1

NSLL,S,1

NSEL,R,LOC,X,a1-0.0075,a1-0.0025
!seleziono il punto l

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX
*GET,u_l1,NODE,num_nodo,U,X
!spostamento di l lungo X
*GET,v_l1,NODE,num_nodo,U,Y
!spostamento di l lungo Y

*VWRITE,'l',u_l1,'l',v_l1
('  ',A1,'  'F10.6'   ',A1,'  'F10.6'  ')


KSEL,S,,,44
KSEL,A,,,39

LSLK,S,1

NSLL,S,1

NSEL,R,LOC,X,a1-0.0075,a1-0.0025
!seleziono il punto l*

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX
*GET,u_l2,NODE,num_nodo,U,X
!spostamento di l* lungo X
*GET,v_l2,NODE,num_nodo,U,Y
!spostamento di l* lungo Y

*VWRITE,'l*',u_l2,'l*',v_l2
('  ',A2,' 'F10.6'   ',A2,' 'F10.6'  ')

ALLSEL,ALL,ALL

!-------------------------------------
!SPOSTAMENTI PER ROTAZIONE

*VWRITE,'SPOSTAMENTI PER
ROTAZIONI:'
%/%c
*VWRITE,'U','V'
('          'A2,'          'A2)

KSEL,S,,,39
KSEL,A,,,40

LSLK,S,1
!seleziono la linea lungo la direzione di
propagazione della cricca

NSLL,S,1

NSEL,R,LOC,X,a1+0.001,a1-0.001
!seleziono il nodo esattamente sull'apice della
cricca nodo_i

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX
*GET,u_a,NODE,num_nodo,U,X
!spostamenti lungo X e Y del nodo sull'apice
della cricca
*GET,v_a,NODE,num_nodo,U,Y

*VWRITE,'a',u_a,'a',v_a
('  ',A1,'  'F10.6'   ',A1,'  'F10.6'  ')


ALLSEL,ALL,ALL

KSEL,S,,,39
KSEL,A,,,40
```

```
LSLK,S,1

NSLL,S,1
!seleziono la linea lungo la direzione di
propagazione della cricca

NSEL,R,LOC,X,a1+0.0025,a1+0.0075
!seleziono il nodo immediatamente a destra
dell'apice della cricca nodo_j


*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX
*GET,u_b,NODE,num_nodo,U,X
!spostamenti lungo X e Y del nodo
precedentemente selezionato
*GET,v_b,NODE,num_nodo,U,Y

*VWRITE,'b',u_b,'b',v_b
('  ',A1,'  'F10.6'   ',A1,'  'F10.6'  ')

ALLSEL,ALL,ALL

!---------------------------------------
!FORZE Xi,Xj,Yi,Yj

*VWRITE,'FORZE VCCT:'
%/%c
*VWRITE,'X','Y'
('         'A2,'            'A2)

NSEL,S,LOC,X,a1-0.001,a1+0.001
!seleziono il nodo all'apice della cricca
NSEL,R,LOC,Y,h-t-0.001,h-t+0.001

ESLN,S,0,ALL
!seleziono gli elementi attaccati a quel nodo

ESEL,R,CENT,Y,h-t,h-t+0.01
 !seleziono gli elementi superiori

NSLE,S,ALL
!seleziono i nodi di questi elementi

NSEL,R,LOC,X,a1-0.001,a1+0.001
!seleziono il nodo dell'apice
NSEL,R,LOC,Y,h-t-0.001,h-t+0.001

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX
 !forze sul nodo all'apice dell'elemento di destra
*GET,num_elem,ELEM,0,NUM,MIN
*GET,X_idx,ELEM,num_elem,EFOR,num_nod
o,FX
*GET,Y_idx,ELEM,num_elem,EFOR,num_nod
o,FY

*GET,num_elem,ELEM,0,NUM,MAX
!forze sul nodo all'apice dell'elemento di sinistra

*GET,X_isx,ELEM,num_elem,EFOR,num_nod
o,FX
*GET,Y_isx,ELEM,num_elem,EFOR,num_nod
o,FY

X_i=X_idx+X_isx
Y_i=Y_idx+Y_isx

*VWRITE,'i',X_i,'i',Y_i
('  ',A1,'  'F10.6'   ',A1,'  'F10.6'  ')


ALLSEL,ALL,ALL

NSEL,S,LOC,X,a1-0.001,a1+0.001
!seleziono il nodo all'apice della cricca
NSEL,R,LOC,Y,h-t-0.001,h-t+0.001

ESLN,S,0,ALL
!seleziono gli elementi attaccati a quel nodo

ESEL,R,CENT,Y,h-t,h-t+0.01
!seleziono gli elementi superiori
```

```
NSLE,S,ALL

!seleziono i nodi di questi elementi

NSEL,R,LOC,X,a1+0.0025,a1+0.0075
!seleziono il nodo successivo all'apice
NSEL,R,LOC,Y,h-t-0.001,h-t+0.001

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX
*GET,num_elem,ELEM,0,NUM,MIN
*GET,X_j,ELEM,num_elem,EFOR,num_nodo,
FX
*GET,Y_j,ELEM,num_elem,EFOR,num_nodo,
FY

*VWRITE,'j',X_j,'j',Y_j
('  ',A1,'  'F10.6'   ',A1,'  'F10.6'  ')

ALLSEL,ALL,ALL

!---------------------------------------
!SPOSTAMENTI AGLI ESTREMI

*VWRITE,'SPOSTAMENTI AGLI ESTREMI:'
%/%c%/

!------------ux,alto------------

KSEL,S,,,35
KSEL,A,,,186

LSLK,S,1

NSLL,S,1

NSEL,R,LOC,Y,h

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX
*GET,ux_alto,NODE,num_nodo,U,X

*VWRITE,'ux_alto',ux_alto
('  ',A7,'  'F10.6)

ALLSEL,ALL,ALL

!------------ux,basso------------

KSEL,S,,,185
KSEL,A,,,36

LSLK,S,1

NSLL,S,1

NSEL,R,LOC,Y,0

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX
*GET,ux_basso,NODE,num_nodo,U,X

*VWRITE,'ux_basso',ux_basso
('  ',A7,'  'F10.6)

ALLSEL,ALL,ALL

!------------ux,vcct------------

KSEL,S,,,35
KSEL,A,,,186

LSLK,S,1

NSLL,S,1

NSEL,R,LOC,Y,h-t
 !seleziono il nodo all'estremo destro situato ad
Y=h-t

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX
*GET,ux_vcct,NODE,num_nodo,U,X

*VWRITE,'ux_vcct',ux_vcct
```

(' ',A7,' 'F10.6)

ALLSEL,ALL,ALL

*CFCLOS

ALLSEL,ALL,ALL

/PREP7

CPDELE,ALL,,,ALL

ACLEAR,ALL
ADELE,ALL
LCLEAR,ALL
LDELE,ALL
KDELE,ALL

FINISH

!_____

Appendice B: APDL per la costruzione dei giunti stepped con lay-up [$0_2/45_5/0$]

```
/PREP7
/TITLE, APDL - stepped-lap - [0_2/45_5/0]
/PNUM,KP,1
/PNUM,LINE,1
/PNUM,ELEM,0

*ASK,w,inserisci la lunghezza di sovrapposizione del giunto,
*ASK,a1,inserisci la lunghezza di propagazione della cricca all'interfaccia primo/secondo strato,
*ASK,a2,inserisci la lunghezza di propagazione della cricca all'interfaccia secondo/terzo strato,
*ASK,a3,inserisci la lunghezza di propagazione della cricca all'interfaccia terzo/quarto strato,
*ASK,sigma,inserisci l'intensità del carico [MPa],

!parametri geometrici [mm]

t=0.25                    !spessore singola lamina
h=2                       !spessore giunto
Lt=260                    !lunghezza totale
L=220                     !lunghezza tra le tab
b=(l-7*w)/2               !distanza del primo step dal bordo
z=20                      !lunghezza tab di afferraggio

!proprietà lamine a 0 gradi

Ex_0=58050        !modulo elastico lungo la direzione x
Ey_0=6000         !modulo elastico lungo lo spessore
Ez_0=58650        !modulo elastico lungo la larghezza
Gxy_0=500
Gxz_0=3300
Gyz_0=500         !moldulo elastico tangenziale
nxy_0=0.3         !coefficiente di Poisson
nyz_0=0.3
nxz_0=0.06

!proprietà lamine a 45 gradi

Ex_45=11930       !modulo elastico lungo la direzione x
Ey_45=6000        !modulo elastico lungo lo spessore
Ez_45=11930       !modulo lungo la larghezza
Gxy_45=500
Gyz_45=500
Gxz_45=27516      !moldulo elastico tangenziale
nxy_45=0.27
nyz_45=0.27
nxz_45=0.81       !coefficiente Poisson

d=0.010           !dimensioni elemento in mm

!================================
================================

!displacement scaling off.\1      !si imposta la deformata su true scale
/DSCALE,1,1
```

```
!================================
================================

!DEFINIZIONE DEL TIPO DI ELEMENTO

ET,1,PLANE183
KEYOPT,1,1,0          !forma quadrilatero
KEYOPT,1,3,2          !plane strain
KEYOPT,1,6,0          !pure displacement

!================================
================================

!DEFINIZIONE DELLE PROPRIETA' DEL
MATERIALE (ortotropo)

!1-laminato in composito (lamine a 0 gradi)

MP,EX,1,Ex_0
MP,EY,1,Ey_0
MP,EZ,1,Ez_0
MP,NUXY,1,nxy_0
MP,NUYZ,1,nyz_0
MP,NUXZ,1,nxz_0
MP,GXY,1,Gxy_0
MP,GYZ,1,Gyz_0
MP,GXZ,1,Gxz_0

!2-laminato in composito (lamine a 45 gradi)

MP,EX,2,Ex_45
MP,EY,2,Ey_45
MP,EZ,2,Ez_45
MP,NUXY,2,nxy_45
MP,NUYZ,2,nyz_45
MP,NUXZ,2,nxz_45
MP,GXY,2,Gxy_45
MP,GYZ,2,Gyz_45
MP,GXZ,2,Gxz_45

!================================
================================

!COSTRUZIONE DELLA GEOMETRIA
KEYPOINTS

!geometria scalino del giunto di sx

k,1,0,h,0
k,2,0,h-t,0
k,3,w,h-t,0
k,4,w,h-2*t,0
k,5,2*w,h-2*t,0
k,6,2*w,h-3*t,0
k,7,3*w,h-3*t,0
k,8,3*w,h-4*t,0
k,9,4*w,h-4*t,0
k,10,4*w,h-5*t,0
k,11,5*w,h-5*t,0
k,12,5*w,h-6*t,0
k,13,6*w,h-6*t,0
k,14,6*w,h-7*t,0
k,15,7*w,h-7*t,0
k,16,7*w,h-8*t,0

!geometria scalino del giunto di dx

k,17,0,h,0
k,18,0,h-t,0
k,19,w,h-t,0
k,20,w,h-2*t,0
k,21,2*w,h-2*t,0
k,22,2*w,h-3*t,0
k,23,3*w,h-3*t,0
```

```
k,24,3*w,h-4*t,0
k,25,4*w,h-4*t,0
k,26,4*w,h-5*t,0
k,27,5*w,h-5*t,0
k,28,5*w,h-6*t,0
k,29,6*w,h-6*t,0
k,30,6*w,h-7*t,0
k,31,7*w,h-7*t,0
k,32,7*w,h-8*t,0

!geometria del resto

k,33,0,h-8*t,0
k,34,7*w,h,0
k,35,b+7*w,h,0
k,36,b+7*w,h-8*t,0
k,37,-b,h,0
k,38,-b,h-8*t,0
k,156,0,h-2*t,0
k,181,7*w,h-6*t,0
k,183,-b,h-6*t,0
k,184,-b,h-2*t,0
k,185,b+7*w,h-6*t,0
k,186,b+7*w,h-2*t,0
k,188,0,h-6*t,0
k,190,w,h-6*t,0
k,191,2*w,h-6*t,0
k,192,3*w,h-6*t,0
k,193,4*w,h-6*t,0
k,196,3*w,h-2*t,0
k,197,4*w,h-2*t,0
k,198,5*w,h-2*t,0
k,199,6*w,h-2*t,0
k,202,7*w,h-2*t,0
k,211,7*w,h-t,0
k,212,6*w,h-t,0
k,213,5*w,h-t,0
k,216,4*w,h-t,0
k,217,3*w,h-t,0
k,218,2*w,h-t,0
k,219,b+7*w,h-t,0
k,220,-b,h-7*t,0
k,221,0,h-7*t,0
k,222,w,h-7*t,0
k,223,2*w,h-7*t,0
k,224,3*w,h-7*t,0
k,225,4*w,h-7*t,0
k,163,5*w,h-7*t,0

!-----------------------------------------------

*IF,a1,GT,0,AND,a1,LT,w,THEN
!se c'è la cricca a1 ed è minore di w

!vcct alto all'interfaccia primo-secondo strato

k,39,a1,h-t,0
k,40,a1+5*d,h-t,0
k,41,a1+5*d,h-t+5*d,0
k,42,a1,h-t+5*d,0
k,43,a1-5*d,h-t+5*d,0
k,44,a1-5*d,h-t,0
k,45,a1-5*d,h-t,0
k,46,a1-5*d,h-t-5*d,0
k,47,a1,h-t-5*d,0
k,48,a1+5*d,h-t-5*d,0
k,49,a1+t,h-2*t,0
k,50,a1+t,h,0
k,51,a1-5*d,h,0
k,52,a1-5*d,h-2*t,0
k,53,a1+t,h-t,0
```

```
!vcct basso all'interfaccia settimo-ottavo strato

k,84,7*w-a1,h-7*t,0
k,85,7*w-a1-5*d,h-7*t,0
k,86,7*w-a1-5*d,h-7*t-5*d,0
k,87,7*w-a1,h-7*t-5*d,0
k,88,7*w-a1+5*d,h-7*t-5*d,0
k,89,7*w-a1+5*d,h-7*t,0
k,90,7*w-a1+5*d,h-7*t,0
k,91,7*w-a1+5*d,h-7*t+5*d,0
k,92,7*w-a1,h-7*t+5*d,0
k,93,7*w-a1-5*d,h-7*t+5*d,0
k,94,7*w-a1-t,h-8*t,0
k,95,7*w-a1-t,h-6*t,0
k,96,7*w-a1+5*d,h-6*t,0
k,97,7*w-a1+5*d,h-8*t,0
k,98,7*w-a1-t,h-7*t,0

!altri kp di completamento

k,129,a1-5*d,h-8*t,0
k,130,a1+t,h-8*t,0
k,194,a1-5*d,h-6*t,0
k,195,a1+t,h-6*t,0
k,230,a1-5*d,h-7*t,0
k,231,a1+t,h-7*t,0
k,147,7*w-a1-t,h,0
k,148,7*w-a1+5*d,h,0
k,200,7*w-a1-t,h-2*t,0
k,201,7*w-a1+5*d,h-2*t,0
k,232,7*w-a1-t,h-t,0
k,233,7*w-a1+5*d,h-t,0
k,155,0,h-t-5*d,0

k,165,7*w,h-7*t-5*d,0
k,172,0,h-t+5*d,0
k,182,7*w,h-7*t+5*d,0

*ENDIF

!-----------------------------------------------

*IF,a2,GT,0,AND,a2,LT,w,THEN
!se c'è la cricca a2 ed è minore di w

!vcct alto all'interfaccia secondo-terzo strato

k,54,w+a2,h-2*t,0
k,55,w+a2+5*d,h-2*t,0
k,56,w+a2+5*d,h-2*t+5*d,0
k,57,w+a2,h-2*t+5*d,0
k,58,w+a2-5*d,h-2*t+5*d,0
k,59,w+a2-5*d,h-2*t,0
k,60,w+a2-5*d,h-2*t,0
k,61,w+a2-5*d,h-2*t-5*d,0
k,62,w+a2,h-2*t-5*d,0
k,63,w+a2+5*d,h-2*t-5*d,0
k,64,w+a2+t,h-3*t,0
k,65,w+a2+t,h-t,0
k,66,w+a2-5*d,h-t,0
k,67,w+a2-5*d,h-3*t,0
k,68,w+a2+t,h-2*t,0

!vcct basso all'interfaccia sesto-settimo strato

k,99,6*w-a2,h-6*t,0
k,100,6*w-a2-5*d,h-6*t,0
k,101,6*w-a2-5*d,h-6*t-5*d,0
k,102,6*w-a2,h-6*t-5*d,0
k,103,6*w-a2+5*d,h-6*t-5*d,0
k,104,6*w-a2+5*d,h-6*t,0
```

```
k,105,6*w-a2+5*d,h-6*t,0
k,106,6*w-a2+5*d,h-6*t+5*d,0
k,107,6*w-a2,h-6*t+5*d,0
k,108,6*w-a2-5*d,h-6*t+5*d,0
k,109,6*w-a2-t,h-7*t,0
k,110,6*w-a2-t,h-5*t,0
k,111,6*w-a2+5*d,h-5*t,0
k,112,6*w-a2+5*d,h-7*t,0
k,113,6*w-a2-t,h-6*t,0

!altri kp di completamento

k,131,w+a2-5*d,h-8*t,0
k,132,w+a2+t,h-8*t,0
k,203,w+a2-5*d,h-6*t,0
k,204,w+a2+t,h-6*t,0
k,234,w+a2-5*d,h-7*t,0
k,235,w+a2+t,h-7*t,0
k,137,6*w-a2-t,h-8*t,0
k,138,6*w-a2+5*d,h-8*t,0
k,139,w+a2-5*d,h,0
k,140,w+a2+t,h,0
k,145,6*w-a2-t,h,0
k,146,6*w-a2+5*d,h,0
k,205,6*w-a2-t,h-2*t,0
k,206,6*w-a2+5*d,h-2*t,0
k,236,6*w-a2-t,h-t,0
k,237,6*w-a2+5*d,h-t,0

k,157,w,h-2*t-5*d,0
k,158,w,h-3*t,0

k,164,6*w,h-6*t-5*d,0
k,173,w,h-2*t+5*d,0
k,174,2*w,h-t,0
k,179,6*w,h-5*t,0
k,180,6*w,h-6*t+5*d,0

*ENDIF

!-----------------------------------------------

*IF,a3,GT,0,AND,a3,LT,w,THEN
!se c'è la cricca a3 ed è minore di w

!vcct alto all'interfaccia terzo-quarto strato

k,69,2*w+a3,h-3*t,0
k,70,2*w+a3+5*d,h-3*t,0
k,71,2*w+a3+5*d,h-3*t+5*d,0
k,72,2*w+a3,h-3*t+5*d,0
k,73,2*w+a3-5*d,h-3*t+5*d,0
k,74,2*w+a3-5*d,h-3*t,0
k,75,2*w+a3-5*d,h-3*t,0
k,76,2*w+a3-5*d,h-3*t-5*d,0
k,77,2*w+a3,h-3*t-5*d,0
k,78,2*w+a3+5*d,h-3*t-5*d,0
k,79,2*w+a3+t,h-4*t,0
k,80,2*w+a3+t,h-2*t,0
k,81,2*w+a3-5*d,h-2*t,0
k,245,2*w+a3+t,h-t,0
k,246,2*w+a3-5*d,h-t,0
k,82,2*w+a3-5*d,h-4*t,0
k,83,2*w+a3+t,h-3*t,0

!vcct basso all'interfaccia quinto-sesto strato

k,114,5*w-a3,h-5*t,0
k,115,5*w-a3-5*d,h-5*t,0
k,116,5*w-a3-5*d,h-5*t-5*d,0
k,117,5*w-a3,h-5*t-5*d,0
k,118,5*w-a3+5*d,h-5*t-5*d,0
```

```
k,119,5*w-a3+5*d,h-5*t,0
k,120,5*w-a3+5*d,h-5*t,0
k,121,5*w-a3+5*d,h-5*t+5*d,0
k,122,5*w-a3,h-5*t+5*d,0
k,123,5*w-a3-5*d,h-5*t+5*d,0
k,124,5*w-a3-t,h-6*t,0
k,240,5*w-a3-t,h-7*t,0
k,125,5*w-a3-t,h-4*t,0
k,126,5*w-a3+5*d,h-4*t,0
k,127,5*w-a3+5*d,h-6*t,0
k,241,5*w-a3+5*d,h-7*t,0
k,128,5*w-a3-t,h-5*t,0

!altri kp di completamento

k,133,2*w+a3-5*d,h-8*t,0
k,134,2*w+a3+t,h-8*t,0
k,207,2*w+a3-5*d,h-6*t,0
k,208,2*w+a3+t,h-6*t,0
k,238,2*w+a3-5*d,h-7*t,0
k,239,2*w+a3+t,h-7*t,0
k,135,5*w-a3-t,h-8*t,0
k,136,5*w-a3+5*d,h-8*t,0
k,141,2*w+a3-5*d,h,0
k,142,2*w+a3+t,h,0
k,143,5*w-a3-t,h,0
k,144,5*w-a3+5*d,h,0
k,209,5*w-a3-t,h-2*t,0
k,210,5*w-a3+5*d,h-2*t,0
k,215,5*w-a3-t,h-t,0
k,214,5*w-a3+5*d,h-t,0

k,159,2*w,h-3*t-5*d,0
k,160,2*w,h-4*t,0

k,162,5*w,h-5*t-5*d,0
k,175,2*w,h-3*t+5*d,0

k,177,5*w,h-4*t,0
k,178,5*w,h-5*t+5*d,0

*ENDIF

!-----------------------------------------------

!keypoint di completamento giunto sx

k,149,w,h-8*t,0
k,150,2*w,h-8*t,0
k,151,3*w,h-8*t,0
k,152,4*w,h-8*t,0
k,153,5*w,h-8*t,0
k,154,6*w,h-8*t,0

!keypoint di completamento giunto dx

k,166,w,h,0
k,167,2*w,h,0
k,168,3*w,h,0
k,169,4*w,h,0
k,170,5*w,h,0
k,171,6*w,h,0

!================================
================================

!COSTRUZIONE DELLA GEOMETRIA
LINES

!GIUNTO DI SINISTRA

l,1,2
```

```
!-----------------------------------------------


*IF,a1,GT,0,AND,a1,LT,w,THEN
          l,2,44    !linee del vcct alto (giunto sx)
          l,155,46
          l,44,39
          l,39,40
          l,40,53
          l,2,155,
          l,155,156
          l,156,188
          l,188,221
          l,221,33
          l,156,52
          l,44,46
          l,46,47
          l,39,47
          l,47,48
          l,40,48
          l,46,52
          l,48,49
          l,52,49
          l,53,49
          l,52,194
         l,194,230
         l,230,129
         l,49,195
         l,195,231
         l,231,130
          l,33,129
          l,129,130
          l,130,149
          l,53,3
          l,49,4
         l,188,194
        l,194,195
          l,195,190
          l,221,230
          l,230,231
          l,231,222
          l,14,98

!linee del vcct basso (giunto sx)
          l,85,98
          l,154,94
          l,98,94
          l,85,84
          l,84,89
          l,85,86
          l,86,87
          l,84,87
          l,87,88
          l,89,88
          l,86,94
          l,94,97
          l,88,97
          l,15,89
          l,165,88
          l,97,16
          l,15,165
          l,165,16
*ELSE
          l,2,3
          l,156,4
          l,188,190
          l,221,222
!linee parte alta senza vcct (giunto sx)
          l,2,156
          l,156,188
          l,188,221
          l,221,33
          l,33,149
```

```
        l,14,15

!linee bassa senza vcct (giunto sx)
        l,154,16
        l,15,16
*ENDIF

!-----------------------------------------------

l,3,4
l,14,154

!-----------------------------------------------

*IF,a2,GT,0,AND,a2,LT,w,THEN
        l,4,157
!linee del vcct alto (giunto sx)
        l,157,158
        l,158,190
        l,190,222
        l,222,149
        l,4,59
        l,157,61
        l,158,67
        l,149,131
        l,59,54
        l,54,55
        l,59,61
        l,61,62
        l,54,62
        l,55,63
        l,62,63
        l,55,68
        l,61,67
        l,63,64
        l,67,64
        l,68,64
        l,67,203
        l,203,234
        l,234,131
        l,64,204
        l,204,235
        l,235,132
        l,131,132
        l,68,5
        l,64,6
        l,132,150
      l,190,203
      l,203,204
      l,204,191
      l,222,234
      l,234,235
      l,235,223

        l,12,113
!linee del vcct basso (giunto sx)
        l,100,113
        l,100,99
        l,99,104
        l,113,109
        l,12,163
        l,163,153
        l,163,109
        l,153,137
        l,100,101
        l,101,102
        l,99,102
        l,102,103
        l,104,103
        l,101,109
        l,103,112
        l,109,112
        l,109,137
```

```
            l,112,138
            l,137,138
            l,13,104
            l,164,103
            l,112,14
            l,138,154
            l,13,164
            l,164,14
*ELSE
            l,4,5
        l,190,191
        l,222,223
!linee parte alta senza vcct (giunto sx)
        l,4,190
        l,190,222
        l,222,149
        l,149,150

        l,12,13
        l,163,14
!linee parte bassa senza vcct (giunto sx)
        l,12,163
        l,163,153
            l,153,154
            l,13,14

*ENDIF

!-----------------------------------------------

l,5,6

!-----------------------------------------------

*IF,a3,GT,0,AND,a3,LT,w,THEN
            l,6,74
                    !linee del vcct alto (giunto sx)
            l,74,69
            l,69,70
            l,6,159
            l,159,160
            l,160,191
            l,191,223
            l,223,150
            l,159,76
            l,160,82
            l,150,133
            l,74,76
            l,69,77
            l,76,77
            l,70,78
            l,77,78
            l,70,83
            l,76,82
            l,78,79
            l,82,79
            l,83,79
            l,82,207
            l,207,238
            l,238,133
            l,79,208
            l,208,239
            l,239,134
            l,133,134
            l,83,7
            l,79,8
            l,134,151
            l,191,207
            l,207,208
            l,208,192
            l,223,238
            l,238,239
            l,239,224
```

```
        l,10,128
!linee del vcct basso (giunto sx)
        l,10,193
        l,193,225
        l,225,152
        l,193,124
        l,225,240
        l,152,135
        l,115,128
        l,115,114
        l,114,119
        l,115,116
        l,114,117
        l,116,117
        l,119,118
        l,117,118
        l,128,124
        l,116,124
        l,124,127
        l,240,241
        l,118,127
        l,124,240
        l,240,135
        l,135,136
        l,127,241
        l,241,136
        l,11,119
        l,162,118
        l,127,12
        l,241,163
        l,136,153
        l,11,162
        l,162,12
*ELSE
        l,6,7
        l,191,192
        l,223,224

!linee parte alta senza vcct (giunto sx)
        l,6,191
        l,191,223
        l,223,150
        l,150,151

        l,10,11

!linee parte bassa senza vcct (giunto sx)
        l,11,12
        l,10,193
        l,193,225
        l,225,152
        l,193,12
        l,225,163

        l,152,153
*ENDIF

!---------------------------------------------

!linee di completamento

l,7,8
l,8,9
l,192,193
l,224,225
l,8,192
l,192,224
l,224,151
l,151,152
l,9,10
l,37,1
l,37,184
```

```
l,184,183
l,183,220
l,220,38
l,184,156
l,183,188
l,220,221
l,38,33

!.....
.....

!AREA TROUGH KPS


A,37,38,16,34
!si costruisce un'area tra i kp esterni
ASBL,ALL,ALL

!si divide l'area create per tutte le linee del
giunto sx

ASEL,S,AREA,,ALL

!si crea un nuovo set con tutte le aree fatte
finora
*GET,num_aree,AREA,,COUNT
!si effettua il conteggio delle aree fatte finora

ADELE,num_aree+1,,,0
!si cancella l'ultima area

LSEL,S,LINE,,ALL

!si crea un nuovo set con tutte le linee fatte
finora
*GET,num_linee,LINE,,COUNT
!si effettua il conteggio delle linee fatte finora

LDELE,num_linee+3,,,0
!si cancellano le seguenti linee

LDELE,num_linee+4,,,0

*GET,num_linee,LINE,,COUNT
!si effettua il conteggio delle linee rimaste

ALLSEL,ALL,ALL
!si seleziona tutto

!.....

!GIUNTO DI DESTRA

*IF,a1,GT,0,AND,a1,LT,w,THEN
    l,172,17
    !linee del vcct alto (giunto dx)
    l,172,18
    l,18,45
    l,172,43
    l,45,39
    l,17,51
    l,43,45
    l,43,42
    l,42,39
    l,42,41
    l,41,40
    l,43,51
    l,41,50
    l,51,50
    l,50,53
    l,50,166
    l,53,19

    l,171,147
    !linee del vcct basso (giunto dx)
    l,29,95
    l,30,98
    l,147,232
```

```
l,232,200
l,200,95
l,95,98
l,147,148
l,199,200
l,200,201
l,201,202
l,233,211
l,232,233
l,212,232
l,95,96
l,148,233
l,233,201
l,201,96
l,93,95
l,93,85
l,93,92
l,92,84
l,92,91
l,91,96
l,91,90
l,84,90
l,148,34
l,96,181
l,182,91
l,31,90
l,34,211
l,211,202
l,202,181
l,182,181
l,182,31
l,31,32
*ELSE
l,17,18
!linee parte alta senza vcct (giunto dx)
l,18,19
l,17,166

l,171,34
l,199,202
l,212,211
l,29,181
!linee parte bassa senza vcct (giunto dx)
l,30,31
l,34,211
l,211,202
l,202,181
l,181,31
l,31,32
*ENDIF

!---------------------------------------------

l,166,19

!---------------------------------------------

*IF,a2,GT,0,AND,a2,LT,w,THEN
l,19,173
!linee del vcct alto (giunto dx)
l,173,20
l,166,139
l,19,66
l,173,58
l,20,60
l,60,54
l,58,60
l,58,57
l,57,54
l,57,56
l,56,55
l,58,66
l,56,65
```

```
l,66,65
l,65,68
l,139,66
l,139,140
l,140,65
l,140,167
l,65,174
l,68,21
l,167,174
l,174,21

l,170,27
!linee del vcct basso (giunto dx)
l,27,28
l,170,145
l,198,205
l,205,206
l,206,199
l,213,236
l,236,237
l,237,212
l,27,110
l,28,113
l,145,205
l,205,110
l,110,113
l,145,146
l,146,206
l,206,111
l,110,111
l,108,110
l,108,100
l,108,107
l,107,99
l,107,106
l,106,111
l,106,105
l,99,105
l,146,171
l,111,179
l,180,106
l,29,105
l,171,212
l,212,199
l,199,179
l,179,180
l,180,29
l,29,30
*ELSE
l,19,20
!linee parte alta senza vcct (giunto dx)

l,20,21
l,19,218
l,166,167
l,167,218
l,218,21

l,27,28
!linee parte bassa senza vcct (giunto dx)
l,28,29
l,198,199
l,213,212
l,170,171
l,171,212
l,212,199
l,199,29
l,29,30
*ENDIF

!-----------------------------------------------

*IF,a3,GT,0,AND,a3,LT,w,THEN
```

```
l,21,175
!linee del vcct alto (giunto dx)
l,175,22
l,167,141
l,21,81
l,218,245
l,245,246
l,246,217
l,175,73
l,22,75
l,75,69
l,73,75
l,73,72
l,72,69
l,72,71
l,71,70
l,73,81
l,71,80
l,81,80
l,80,83
l,141,81
l,141,142
l,142,80
l,142,168
l,80,196
l,83,23
l,168,217
l,217,196
l,196,23


l,169,143
!linee del vcct basso (giunto dx)
l,25,125
l,26,128
l,143,144
l,143,215
l,215,209
l,209,125
l,144,214
l,214,210
l,210,126
l,125,126
l,125,128
l,123,125
l,123,115
l,123,122
l,122,114
l,122,121
l,121,120
l,114,120
l,121,126
l,144,170
l,197,209
l,209,210
l,210,198
l,216,215
l,215,214
l,214,213
l,126,177
l,178,121
l,27,120
l,170,177
l,177,178
l,178,27
l,27,28
*ELSE
l,21,22
!linee parte alta senza vcct (giunto dx)
l,22,23
l,167,168
l,21,196
l,218,217
l,168,217
l,217,196
```

```
l,196,23


l,169,170
l,197,198
l,216,213
!linee parte bassa senza vcct (giunto dx)
l,26,27
l,170,213
l,213,198
l,198,27
l,27,28
*ENDIF

!-----------------------------------------------


!linee di completamento


l,23,24
l,24,25
l,168,169
l,196,197
l,217,216
l,169,216
l,216,197
l,197,25
l,25,26
l,34,35
l,202,186
l,211,219
l,181,185
l,32,36
l,35,219
l,219,186
l,186,185
l,185,36
```

```
!.....
.....


*GET,num_totale_linee,LINE,,COUNT
!si effettua il conteggio delle linee totali


LSEL,S,LINE,,num_linee+1,num_totale_linee,1
!si crea un nuovo set con tutte le aree fatte
finora


KSEL,S,,,39,40,1


!si crea un nuovo set con questi kp
KSEL,A,,,53
    !si aggiungono i seguenti kp al set
appena creato
KSEL,A,,,54,55,1
KSEL,A,,,68
KSEL,A,,,69,70,1
KSEL,A,,,83
KSEL,A,,,114,115,1
KSEL,A,,,128
KSEL,A,,,99,100,1
KSEL,A,,,113
KSEL,A,,,84,85,1
KSEL,A,,,98


LSLK,A,1
!si selezionano le linee costruite su questi kp e
le si aggiungono al set di linee precedentemente
creato


KSEL,ALL
!si selezionano tutti i kp costruiti


A,17,33,36,35
!si crea l'area tra i kp
ASBL,1,ALL
```

```
!si divide tale area per tutte le linee del set precedente(linee del giunto dx)

ASEL,S,AREA,,ALL
!si crea un un nuovo set con tutte le aree fatte finora

*GET,num_aree,AREA,,COUNT
!si effettua il conteggio delle aree fatte finora
ADELE,num_aree+1,,,1
!si cancella l'ultima area

ALLSEL,ALL,ALL
!si seleziona tutto

!==================================
==================================

!MESH

!-----------------------------------------------

*IF,a1,GT,0,AND,a1,LT,w,THEN

KSEL,S,,,172
KSEL,A,,,43
KSEL,A,,,155
KSEL,A,,,46

LSLK,S,1

LESIZE,ALL,0.0128125,,,0.64
!si assegna la lunghezza media dell'elemento e lo spacing ratio

ALLSEL,ALL,ALL

KSEL,S,,,91
KSEL,A,,,182
KSEL,A,,,88
KSEL,A,,,165

LSLK,S,1

LESIZE,ALL,0.0128125,,,0.64

ALLSEL,ALL,ALL

KSEL,S,,,2
KSEL,A,,,44
KSEL,A,,,18
KSEL,A,,,45

LSLK,S,1

LESIZE,ALL,0.0128125,,,0.64

ALLSEL,ALL,ALL

KSEL,S,,,90
KSEL,A,,,31
KSEL,A,,,89
KSEL,A,,,15

LSLK,S,1

LESIZE,ALL,0.0128125,,,0.64

ALLSEL,ALL,ALL

*ENDIF

!-----------------------------------------------
```

```
*IF,a2,GT,0,AND,a2,LT,w,THEN

KSEL,S,,,173
KSEL,A,,,58
KSEL,A,,,157
KSEL,A,,,61

LSLK,S,1

LESIZE,ALL,0.0128125,,,0.64

ALLSEL,ALL,ALL

KSEL,S,,,106
KSEL,A,,,180
KSEL,A,,,103
KSEL,A,,,164

LSLK,S,1

LESIZE,ALL,0.0128125,,,0.64

ALLSEL,ALL,ALL

KSEL,S,,,4
KSEL,A,,,59
KSEL,A,,,20
KSEL,A,,,60

LSLK,S,1

LESIZE,ALL,0.0128125,,,0.64

ALLSEL,ALL,ALL

KSEL,S,,,105
KSEL,A,,,29
KSEL,A,,,104
KSEL,A,,,13

LSLK,S,1

LESIZE,ALL,0.0128125,,,0.64

ALLSEL,ALL,ALL

*ENDIF

!-------------------------------------

*IF,a3,GT,0,AND,a3,LT,w,THEN

KSEL,S,,,175
KSEL,A,,,73
KSEL,A,,,159
KSEL,A,,,76

LSLK,S,1

LESIZE,ALL,0.0128125,,,0.64

ALLSEL,ALL,ALL

KSEL,S,,,121
KSEL,A,,,178
KSEL,A,,,118
KSEL,A,,,162

LSLK,S,1

LESIZE,ALL,0.0128125,,,0.64
```

```
ALLSEL,ALL,ALL

KSEL,S,,,6
KSEL,A,,,74
KSEL,A,,,22
KSEL,A,,,75

LSLK,S,1

LESIZE,ALL,0.0128125,,,0.64

ALLSEL,ALL,ALL

KSEL,S,,,120
KSEL,A,,,27
KSEL,A,,,119
KSEL,A,,,11

LSLK,S,1

LESIZE,ALL,0.0128125,,,0.64

ALLSEL,ALL,ALL

*ENDIF

!-----------------------------------------------

!mesh dei vcct

LSEL,S,LENGH,,0.05
!si crea un unovo set con tutte le linee che
hanno questa lunghezza

*DO,i,0,3
LSEL,U,LOC,X,i*w,i*w+0.025
!si deselezionano dal precedente set le linee
comprese in quest'intervallo
*ENDDO

*DO,i,4,7
LSEL,U,LOC,X,(i+1)*w-0.025,(i+1)*w
*ENDDO

LESIZE,ALL,0.01

ALLSEL,ALL,ALL

!-----------------------------------------------

LSEL,S,LENGH,,0.282842712
!si crea un unovo set con tutte le linee che
hanno questa lunghezza

LESIZE,ALL,0.0128125,,,1.5625

ALLSEL,ALL,ALL

!-----------------------------------------------

LSEL,S,LENGH,,0.25
!si crea un unovo set con tutte le linee che
hanno questa lunghezza

*DO,i,0,7
!si deselezionano dal precedente set le linee
comprese in quest'intervallo
LSEL,U,LOC,X,i*w
*ENDDO

KSEL,S,,,139
KSEL,A,,,140
KSEL,A,,,65
KSEL,A,,,66
```

```
KSEL,A,,,109
KSEL,A,,,137
KSEL,A,,,112
KSEL,A,,,138
KSEL,A,,,183
KSEL,A,,,220
KSEL,A,,,38
KSEL,A,,,35
KSEL,A,,,219
KSEL,A,,,186

LSLK,U,1
!si deselezionano dal precedente set le linee costruite su questi kp

LESIZE,ALL,,,16

ALLSEL,ALL,ALL

!------------------------------------------------

LSEL,S,LENGH,,0.3

LESIZE,ALL,0.015625,,,

ALLSEL,ALL,ALL

!------------------------------------------------

LSEL,S,LENGH,,0.20

*DO,i,0,3
LSEL,U,LOC,X,i*w
*ENDDO

*DO,i,4,7
LSEL,U,LOC,X,(i+1)*w-0.01,(i+1)*w
*ENDDO

LESIZE,ALL,0.0128125,,,1.5625

ALLSEL,ALL,ALL

!------------------------------------------------

!parte a sx della zona di giunzione

KSEL,S,,,37
KSEL,A,,,1
LSLK,S,1

LESIZE,ALL,0.15,,,0.025

ALLSEL,ALL,ALL

KSEL,S,,,184
KSEL,A,,,156
LSLK,S,1

LESIZE,ALL,0.15,,,0.025

ALLSEL,ALL,ALL

KSEL,S,,,183
KSEL,A,,,188
LSLK,S,1

LESIZE,ALL,0.15,,,0.025

ALLSEL,ALL,ALL

KSEL,S,,,220
KSEL,A,,,221
```

```
LSLK,S,1

LESIZE,ALL,0.15,,,0.025

ALLSEL,ALL,ALL

KSEL,S,,,38
KSEL,A,,,33
LSLK,S,1

LESIZE,ALL,0.15,,,0.025

ALLSEL,ALL,ALL

!-----------------------------------------------

!linee terminali verticali a sx e dx del giunto

KSEL,S,,,186
KSEL,A,,,185

LSLK,S,1

LESIZE,ALL,,,4

ALLSEL,ALL,ALL

KSEL,S,,,35
KSEL,A,,,219

LSLK,S,1

LESIZE,ALL,,,1

ALLSEL,ALL,ALL

KSEL,S,,,219
KSEL,A,,,186

LSLK,S,1

LESIZE,ALL,,,1

ALLSEL,ALL,ALL

KSEL,S,,,185
KSEL,A,,,36

LSLK,S,1

LESIZE,ALL,,,2

ALLSEL,ALL,ALL

KSEL,s,,,184
KSEL,A,,,183

LSLK,S,1

LESIZE,ALL,,,4

ALLSEL,ALL,ALL

KSEL,S,,,37
KSEL,A,,,184

LSLK,S,1

LESIZE,ALL,,,2

ALLSEL,ALL,ALL
```

```
KSEL,S,,,183
KSEL,A,,,220

LSLK,S,1

LESIZE,ALL,,,1

ALLSEL,ALL,ALL

KSEL,S,,,220
KSEL,A,,,38

LSLK,S,1

LESIZE,ALL,,,1

ALLSEL,ALL,ALL

!-----------------------------------------------

!parte a dx della zona di giunzione

KSEL,S,,,34
KSEL,A,,,35
LSLK,S,1

LESIZE,ALL,0.15,,,40

KSEL,S,,,202
KSEL,A,,,186
LSLK,S,1

LESIZE,ALL,0.15,,,40

KSEL,S,,,211
KSEL,A,,,219
LSLK,S,1

LESIZE,ALL,0.15,,,40
KSEL,S,,,181
KSEL,A,,,185
LSLK,S,1

LESIZE,ALL,0.15,,,40


ALLSEL,ALL,ALL

KSEL,S,,,32
KSEL,A,,,36
LSLK,S,1

LESIZE,ALL,0.15,,,40

ALLSEL,ALL,ALL

!-----------------------------------------------

ESIZE,0.015625
!si definisce un element size globale

MSHKEY,0
!si imposta mesh di tipo free

AMESH,ALL
!si avvia la meshatura

!================================
================================

!definizione delle lamine a 45

ASEL,S,LOC,Y,0.5,1.5
```

```
!si selezionano le aree comprese tra il 3° e 6° strato

ESLA,S

 !si selezionano gli elementi attaccati alle aree precedentemente selezionate

MPCHG,2,ALL

!attribuzione a questi elementi delle proprietà delle lamine a 45 gradi

ALLSEL,ALL

!si seleziona nuovamente tutto


ASEL,S,LOC,Y,0.25,0.5

!si selezionano le aree comprese tra il 3° e 6° strato

ASEL,R,LOC,X,-b,6*w

ESLA,S

!si selezionano gli elementi attaccati alle aree precedentemente selezionate

MPCHG,2,ALL

!attribuzione a questi elementi delle proprietà delle lamine a 45 gradi

ALLSEL,ALL

!si seleziona nuovamente tutto


ASEL,S,LOC,Y,1.5,1.75

 !si selezionano le aree comprese tra il 3° e 6° strato

ASEL,R,LOC,X,w,b+7*w

ESLA,S

!si selezionano gli elementi attaccati alle aree precedentemente selezionate

MPCHG,2,ALL

!attribuzione a questi elementi delle proprietà delle lamine a 45 gradi

ALLSEL,ALL

 !si seleziona nuovamente tutto



!================================
================================
```

```
!DEFINIZIONE VINCOLI


!estremo sinistro


KSEL,S,,,37

KSEL,A,,,184

KSEL,A,,,183

KSEL,A,,,220

KSEL,A,,,38


LSLK,S,1


DL,ALL,,UX,,1

DL,ALL,,UY,,1


ALLSEL,ALL,ALL


!-----------------------------------------------


!estremo destro


KSEL,S,,,35

KSEL,A,,,219

KSEL,A,,,186

KSEL,A,,,185

KSEL,A,,,36


LSLK,S,1


DL,ALL,,UY,,1


ALLSEL,ALL,ALL


!================================
================================
```

```
!DEFINIZIONE DEL CARICO


KSEL,S,,,35

KSEL,A,,,219

KSEL,A,,,186

kSEL,A,,,185

kSEL,A,,,36


LSLK,S,1


SFL,ALL,PRES,-sigma,-sigma,,

!assegnazione di una distribuzione di sigma
all'estremo destro


ALLSEL,ALL,ALL


!================================
================================


!CICLI PER ASSEGNARE LE COUPLING
EQUATION


*IF,a1,GT,0,AND,a1,LT,w,THEN


!--------SX ORIZZONTALE--------


KSEL,S,,,53

!si crea un nuovo set con questi kp

KSEL,A,,,3

KSEL,A,,,19


LSLK,S,1

!si selezionano le linee costruite su questi kp


NSLL,S,1

!si selezionano tutti i nodi giacenti su queste
linee


*GET,numero_linea,LINE,,NUM,MAX

!si identifica il numero maggiore di queste
linee(una vale l'altra, sono uguali)

*GET,lunghezza,LINE,numero_linea,LENG

!si identifica la lunghezza di tale linea

*GET,numdiv,LINE,numero_linea,ATTR,NDI
V

!si identificano il numero di divisioni di questa
linea


incr=lunghezza/numdiv/2

!si definisce la varibile incr


x1=a1+t+incr/2

!si definisce il punto di partenza per il ciclo
delle coupling equation

x2=w+incr

!si definisce il punto finale per il ciclo delle
coupling equation


*DO,j,x1,x2,incr

NSEL,R,LOC,X,j,j+incr

!si seleziona lungo l'asse x i nodi compresi in
tale intervallo

*GET,nnodisel,NODE,,COUNT

!si identifica il numero di nodi(2, uno di una
linea,uno dell'altra)

*IF,nnodisel,EQ,2,THEN

CP,,ALL,ALL

!si creano i set di coupled degrees of freedom

*ELSE

*ENDIF

NSLL,S,1

!si selezionano tutti i nodi delle linee e si passa
all'intervallo successivo

*ENDDO


ALLSEL,ALL,ALL


!--------DX ORIZZONTALE--------
```

```
KSEL,S,,,14
KSEL,A,,,30
KSEL,A,,,98

LSLK,S,1

NSLL,S,1

*GET,numero_linea,LINE,,NUM,MAX
*GET,lunghezza,LINE,numero_linea,LENG
*GET,numdiv,LINE,numero_linea,ATTR,NDI
V

incr=lunghezza/numdiv/2

x1=6*w-incr/2
x2=7*w-a1-t

*DO,j,x1,x2,incr
NSEL,R,LOC,X,j,j+incr
*GET,nnodisel,NODE,,COUNT
*IF,nnodisel,EQ,2,THEN
CP,,ALL,ALL
*ELSE
*ENDIF
NSLL,S,1
*ENDDO

ALLSEL,ALL,ALL

*ELSEIF,a1,EQ,w,THEN

*ELSEIF,a1,EQ,0,THEN

!---------SX_ORIZZONTALE--------
```

```
KSEL,S,,,2
KSEL,A,,,3
KSEL,A,,,18
KSEL,A,,,19

LSLK,S,1

NSLL,S,1

*GET,numero_linea,LINE,,NUM,MAX
*GET,lunghezza,LINE,numero_linea,LENG
*GET,numdiv,LINE,numero_linea,ATTR,NDI
V

incr=lunghezza/numdiv/2

x1=-incr/2
x2=w+incr

*DO,j,x1,x2,incr
NSEL,R,LOC,X,j,j+incr
*GET,nnodisel,NODE,,COUNT
*IF,nnodisel,EQ,2,THEN
CP,,ALL,ALL
*ELSE
*ENDIF
NSLL,S,1
*ENDDO

ALLSEL,ALL,ALL

!---------SX_VERTICALE--------

KSEL,S,,,1
KSEL,A,,,2
KSEL,A,,,17
KSEL,A,,,18
```

```
LSLK,S,1

NSLL,S,1

*GET,numero_linea,LINE,,NUM,MAX
*GET,lunghezza,LINE,numero_linea,LENG
*GET,numdiv,LINE,numero_linea,ATTR,NDI
V

incr=lunghezza/numdiv/2

y1=h-t+incr/2
y2=h+incr/2

*DO,j,y1,y2,incr
NSEL,R,LOC,Y,j,j+incr
*GET,nnodisel,NODE,,COUNT
*IF,nnodisel,EQ,2,THEN
CP,,ALL,ALL
*ELSE
*ENDIF
NSLL,S,1
*ENDDO

ALLSEL,ALL,ALL

!---------DX_ORIZZONTALE--------

KSEL,S,,,14
KSEL,A,,,15
KSEL,A,,,30
KSEL,A,,,31

LSLK,S,1

NSLL,S,1

*GET,numero_linea,LINE,,NUM,MAX
*GET,lunghezza,LINE,numero_linea,LENG
*GET,numdiv,LINE,numero_linea,ATTR,NDI
V

incr=lunghezza/numdiv/2

x1=6*w-incr/2    !0.03125/2
x2=7*w+incr

*DO,j,x1,x2,incr
NSEL,R,LOC,X,j,j+incr
*GET,nnodisel,NODE,,COUNT
*IF,nnodisel,EQ,2,THEN
CP,,ALL,ALL
*ELSE
*ENDIF
NSLL,S,1
*ENDDO

ALLSEL,ALL,ALL

!---------DX_VERTICALE--------

KSEL,S,,,15
KSEL,A,,,16
KSEL,A,,,31
KSEL,A,,,32

LSLK,S,1

NSLL,S,1

*GET,numero_linea,LINE,,NUM,MAX
*GET,lunghezza,LINE,numero_linea,LENG
```

```
*GET,numdiv,LINE,numero_linea,ATTR,NDI
V

incr=lunghezza/numdiv/2

y1=h-8*t-incr/2
y2=h-7*t-incr

*DO,j,y1,y2,incr
NSEL,R,LOC,Y,j,j+incr
*GET,nnodisel,NODE,,COUNT
*IF,nnodisel,EQ,2,THEN
CP,,ALL,ALL
*ELSE
*ENDIF
NSLL,S,1
*ENDDO

*ENDIF

ALLSEL,ALL,ALL

!-----------------------------------------------

*IF,a2,GT,0,AND,a2,LT,w,THEN

!--------SX ORIZZONTALE--------

KSEL,S,,,68
KSEL,A,,,5
KSEL,A,,,21

LSLK,S,1

NSLL,S,1

*GET,numero_linea,LINE,,NUM,MAX
*GET,lunghezza,LINE,numero_linea,LENG
*GET,numdiv,LINE,numero_linea,ATTR,NDI
V

incr=lunghezza/numdiv/2

x1=w+a2+t+incr/2
x2=2*w+incr

*DO,j,x1,x2,incr
NSEL,R,LOC,X,j,j+incr
*GET,nnodisel,NODE,,COUNT
*IF,nnodisel,EQ,2,THEN
CP,,ALL,ALL
*ELSE
*ENDIF
NSLL,S,1
*ENDDO

ALLSEL,ALL,ALL

!--------DX ORIZZONTALE--------

KSEL,S,,,12
KSEL,A,,,28
KSEL,A,,,113

LSLK,S,1

NSLL,S,1

*GET,numero_linea,LINE,,NUM,MAX
*GET,lunghezza,LINE,numero_linea,LENG
*GET,numdiv,LINE,numero_linea,ATTR,NDI
V

incr=lunghezza/numdiv/2
```

```
x1=5*w-incr/2
x2=6*w-a2-t

*DO,j,x1,x2,incr
NSEL,R,LOC,X,j,j+incr
*GET,nnodisel,NODE,,COUNT
*IF,nnodisel,EQ,2,THEN
CP,,ALL,ALL
*ELSE
*ENDIF
NSLL,S,1
*ENDDO

ALLSEL,ALL,ALL

*ELSEIF,a2,EQ,w,THEN

*ELSEIF,a2,EQ,0,THEN

!--------SX_ORIZZONTALE--------

KSEL,S,,,4
KSEL,A,,,5
KSEL,A,,,20
KSEL,A,,,21

LSLK,S,1

NSLL,S,1

*GET,numero_linea,LINE,,NUM,MAX
*GET,lunghezza,LINE,numero_linea,LENG
*GET,numdiv,LINE,numero_linea,ATTR,NDI
V

incr=lunghezza/numdiv/2
```

```
x1=w-incr/2
x2=2*w+incr

*DO,j,x1,x2,incr
NSEL,R,LOC,X,j,j+incr
*GET,nnodisel,NODE,,COUNT
*IF,nnodisel,EQ,2,THEN
CP,,ALL,ALL
*ELSE
*ENDIF
NSLL,S,1
*ENDDO

ALLSEL,ALL,ALL

!!--------SX_VERTICALE--------
!
!commentato per creare le cricche verticali nella
zona di giunzione
!eliminare ! per ricreare l'accoppiamento
!
!KSEL,S,,,3
!KSEL,A,,,4
!KSEL,A,,,19
!KSEL,A,,,20
!
!LSLK,S,1
!
!NSLL,S,1
!
!*GET,numero_linea,LINE,,NUM,MAX
!*GET,lunghezza,LINE,numero_linea,LENG
!*GET,numdiv,LINE,numero_linea,ATTR,NDI
V
!
!incr=lunghezza/numdiv/2
```

```
!
!*IF,a1,GE,0,AND,a1,LT,w,THEN
!
!y1=h-2*t+incr/2
!y2=h-t-incr
!
!*DO,j,y1,y2,incr
!NSEL,R,LOC,Y,j,j+incr
!*GET,nnodisel,NODE,,COUNT
!*IF,nnodisel,EQ,2,THEN
!CP,,ALL,ALL
!*ELSE
!*ENDIF
!NSLL,S,1
!*ENDDO
!
!*ELSE
!
!y1=h-2*t+incr/2
!y2=h-t+incr
!
!*DO,j,y1,y2,incr
!NSEL,R,LOC,Y,j,j+incr
!*GET,nnodisel,NODE,,COUNT
!*IF,nnodisel,EQ,2,THEN
!CP,,ALL,ALL
!*ELSE
!*ENDIF
!NSLL,S,1
!*ENDDO
!
!*ENDIF
!
!ALLSEL,ALL,ALL

!---------DX_ORIZZONTALE--------
KSEL,S,,,12
KSEL,A,,,13
KSEL,A,,,28
KSEL,A,,,29

LSLK,S,1

NSLL,S,1

*GET,numero_linea,LINE,,NUM,MAX
*GET,lunghezza,LINE,numero_linea,LENG
*GET,numdiv,LINE,numero_linea,ATTR,NDI
V

incr=lunghezza/numdiv/2

x1=5*w-incr/2
x2=6*w+incr

*DO,j,x1,x2,incr
NSEL,R,LOC,X,j,j+incr
*GET,nnodisel,NODE,,COUNT
*IF,nnodisel,EQ,2,THEN
CP,,ALL,ALL
*ELSE
*ENDIF
NSLL,S,1
*ENDDO

ALLSEL,ALL,ALL

!!---------DX_VERTICALE--------
!
!commentato per creare le cricche verticali nella
zona di giunzione
!eliminare ! per ricreare l'accoppiamento
```

```
!
!KSEL,S,,,13
!KSEL,A,,,14
!KSEL,A,,,29
!KSEL,A,,,30
!
!LSLK,S,1
!
!NSLL,S,1
!
!*GET,numero_linea,LINE,,NUM,MAX
!*GET,lunghezza,LINE,numero_linea,LENG
!*GET,numdiv,LINE,numero_linea,ATTR,NDI
V
!
!incr=lunghezza/numdiv/2
!
!*IF,a1,GE,0,AND,a1,LT,w,THEN
!
!y1=h-7*t+incr/2
!y2=h-6*t-incr
!
!*DO,j,y1,y2,incr
!NSEL,R,LOC,Y,j,j+incr
!*GET,nnodisel,NODE,,COUNT
!*IF,nnodisel,EQ,2,THEN
!CP,,ALL,ALL
!*ELSE
!*ENDIF
!NSLL,S,1
!*ENDDO
!
!*ELSE
!
!y1=h-7*t-incr/2
!y2=h-6*t-incr
!
!*DO,j,y1,y2,incr
!NSEL,R,LOC,Y,j,j+incr
!*GET,nnodisel,NODE,,COUNT
!*IF,nnodisel,EQ,2,THEN
!CP,,ALL,ALL
!*ELSE
!*ENDIF
!NSLL,S,1
!*ENDDO
!
!*ENDIF

*ENDIF

ALLSEL,ALL,ALL

!-----------------------------------------------

*IF,a3,GT,0,AND,a3,LT,w,THEN

!--------SX ORIZZONTALE--------

KSEL,S,,,83
KSEL,A,,,7
KSEL,A,,,23

LSLK,S,1

NSLL,S,1

*GET,numero_linea,LINE,,NUM,MAX
*GET,lunghezza,LINE,numero_linea,LENG
*GET,numdiv,LINE,numero_linea,ATTR,NDI
V

incr=lunghezza/numdiv/2
```

```
x1=2*w+a3+t+incr/2
x2=3*w+incr

*DO,j,x1,x2,incr
NSEL,R,LOC,X,j,j+incr
*GET,nnodisel,NODE,,COUNT
*IF,nnodisel,EQ,2,THEN
CP,,ALL,ALL
*ELSE
*ENDIF
NSLL,S,1
*ENDDO

ALLSEL,ALL,ALL

!--------DX ORIZZONTALE--------

KSEL,S,,,10
KSEL,A,,,26
KSEL,A,,,128

LSLK,S,1

NSLL,S,1

*GET,numero_linea,LINE,,NUM,MAX
*GET,lunghezza,LINE,numero_linea,LENG
*GET,numdiv,LINE,numero_linea,ATTR,NDI
V

incr=lunghezza/numdiv/2

x1=4*w-incr/2
x2=5*w-a3-t

*DO,j,x1,x2,incr
NSEL,R,LOC,X,j,j+incr
*GET,nnodisel,NODE,,COUNT
*IF,nnodisel,EQ,2,THEN
CP,,ALL,ALL
*ELSE
*ENDIF
NSLL,S,1
*ENDDO

ALLSEL,ALL,ALL

*ELSEIF,a3,EQ,w,THEN

*ELSEIF,a3,EQ,0,THEN

!--------SX_ORIZZONTALE--------

KSEL,S,,,6
KSEL,A,,,7
KSEL,A,,,22
KSEL,A,,,23

LSLK,S,1

NSLL,S,1

*GET,numero_linea,LINE,,NUM,MAX
*GET,lunghezza,LINE,numero_linea,LENG
*GET,numdiv,LINE,numero_linea,ATTR,NDI
V

incr=lunghezza/numdiv/2

x1=2*w-incr/2
x2=3*w+incr

*DO,j,x1,x2,incr
NSEL,R,LOC,X,j,j+incr
```

```
*GET,nnodisel,NODE,,COUNT
*IF,nnodisel,EQ,2,THEN
CP,,ALL,ALL
*ELSE
*ENDIF
NSLL,S,1
*ENDDO

ALLSEL,ALL,ALL

!!--------SX_VERTICALE--------
!
!commentato per creare le cricche verticali nella zona di giunzione
!eliminare ! per ricreare l'accoppiamento
!
!KSEL,S,,,5
!KSEL,A,,,6
!KSEL,A,,,21
!KSEL,A,,,22
!
!LSLK,S,1
!
!NSLL,S,1
!
!*GET,numero_linea,LINE,,NUM,MAX
!*GET,lunghezza,LINE,numero_linea,LENG
!*GET,numdiv,LINE,numero_linea,ATTR,NDIV
!
!incr=lunghezza/numdiv/2
!
!*IF,a2,GE,0,AND,a2,LT,w,THEN
!
!y1=h-3*t+incr/2
!y2=h-2*t-incr
!
!*DO,j,y1,y2,incr
!NSEL,R,LOC,Y,j,j+incr
!*GET,nnodisel,NODE,,COUNT
!*IF,nnodisel,EQ,2,THEN
!CP,,ALL,ALL
!*ELSE
!*ENDIF
!NSLL,S,1
!*ENDDO
!
!*ELSE
!
!y1=h-3*t+incr/2
!y2=h-2*t+incr
!
!*DO,j,y1,y2,incr
!NSEL,R,LOC,Y,j,j+incr
!*GET,nnodisel,NODE,,COUNT
!*IF,nnodisel,EQ,2,THEN
!CP,,ALL,ALL
!*ELSE
!*ENDIF
!NSLL,S,1
!*ENDDO
!
!*ENDIF
!
!ALLSEL,ALL,ALL

!--------DX_ORIZZONTALE--------

KSEL,S,,,10
KSEL,A,,,11
KSEL,A,,,26
KSEL,A,,,27
```

```
LSLK,S,1

NSLL,S,1

*GET,numero_linea,LINE,,NUM,MAX
*GET,lunghezza,LINE,numero_linea,LENG
*GET,numdiv,LINE,numero_linea,ATTR,NDI
V

incr=lunghezza/numdiv/2

x1=4*w-incr/2
x2=5*w+incr

*DO,j,x1,x2,incr
NSEL,R,LOC,X,j,j+incr
*GET,nnodisel,NODE,,COUNT
*IF,nnodisel,EQ,2,THEN
CP,,ALL,ALL
*ELSE
*ENDIF
NSLL,S,1
*ENDDO

ALLSEL,ALL,ALL

!!---------DX_VERTICALE--------
!
!commentato per creare le cricche verticali nella
zona di giunzione
!eliminare ! per ricreare l'accoppiamento
!
!KSEL,S,,,11
!KSEL,A,,,12
!KSEL,A,,,27
!KSEL,A,,,28
!
```

```
!LSLK,S,1
!
!NSLL,S,1
!
!*GET,numero_linea,LINE,,NUM,MAX
!*GET,lunghezza,LINE,numero_linea,LENG
!*GET,numdiv,LINE,numero_linea,ATTR,NDI
V
!
!incr=lunghezza/numdiv/2
!
!*IF,a2,GE,0,AND,a2,LT,w,THEN
!
!y1=h-6*t+incr/2
!y2=h-5*t-incr
!
!*DO,j,y1,y2,incr
!NSEL,R,LOC,Y,j,j+incr
!*GET,nnodisel,NODE,,COUNT
!*IF,nnodisel,EQ,2,THEN
!CP,,ALL,ALL
!*ELSE
!*ENDIF
!NSLL,S,1
!*ENDDO
!
!*ELSE
!
!y1=h-6*t-incr/2
!y2=h-5*t-incr
!
!*DO,j,y1,y2,incr
!NSEL,R,LOC,Y,j,j+incr
!*GET,nnodisel,NODE,,COUNT
!*IF,nnodisel,EQ,2,THEN
!CP,,ALL,ALL
!*ELSE
```

```
!*ENDIF
!NSLL,S,1
!*ENDDO
!
!*ENDIF

*ENDIF

ALLSEL,ALL,ALL

!-----------------------------------------------

!--------CENTRO ORIZZONTALE--------

KSEL,S,,,8
KSEL,A,,,9
KSEL,A,,,24
KSEL,A,,,25

LSLK,S,1

NSLL,S,1

*GET,numero_linea,LINE,,NUM,MAX
*GET,lunghezza,LINE,numero_linea,LENG
*GET,numdiv,LINE,numero_linea,ATTR,NDIV

incr=lunghezza/numdiv/2

!x1=3*w+0.2-incr/2    !eliminare il commento e commentare le successive per creare le cricche da 0,2mm
!x2=4*w-0.2-incr/2

x1=3*w-incr/2
x2=4*w+incr

*DO,j,x1,x2,incr
NSEL,R,LOC,X,j,j+incr
*GET,nnodisel,NODE,,COUNT
*IF,nnodisel,EQ,2,THEN
CP,,ALL,ALL
*ELSE
*ENDIF
NSLL,S,1
*ENDDO

ALLSEL,ALL,ALL

!!--------CENTRO SX VERTICALE--------
!
!commentato per creare le cricche verticali nella zona di giunzione
!eliminare ! per ricreare l'accoppiamento
!
!KSEL,S,,,7
!KSEL,A,,,8
!KSEL,A,,,23
!KSEL,A,,,24
!
!LSLK,S,1
!
!NSLL,S,1
!
!*GET,numero_linea,LINE,,NUM,MAX
!*GET,lunghezza,LINE,numero_linea,LENG
!*GET,numdiv,LINE,numero_linea,ATTR,NDIV
!
!incr=lunghezza/numdiv/2
!
!y1=h-4*t+incr/2
!y2=h-3*t-incr
```

```
!
!*DO,j,y1,y2,incr
!NSEL,R,LOC,Y,j,j+incr
!*GET,nnodisel,NODE,,COUNT
!*IF,nnodisel,EQ,2,THEN
!CP,,ALL,ALL
!*ELSE
!*ENDIF
!NSLL,S,1
!*ENDDO
!
!ALLSEL,ALL,ALL
!
!!---------CENTRO DX VERTICALE--------
!
!commentato per creare le cricche verticali nella zona di giunzione
!eliminare ! per ricreare l'accoppiamento
!
!KSEL,S,,,9
!KSEL,A,,,10
!KSEL,A,,,25
!KSEL,A,,,26
!
!LSLK,S,1
!
!NSLL,S,1
!
!*GET,numero_linea,LINE,,NUM,MAX
!*GET,lunghezza,LINE,numero_linea,LENG
!*GET,numdiv,LINE,numero_linea,ATTR,NDIV
!
!incr=lunghezza/numdiv/2
!
!y1=h-5*t+incr/2
!y2=h-4*t-incr
!
!*DO,j,y1,y2,incr
!NSEL,R,LOC,Y,j,j+incr
!*GET,nnodisel,NODE,,COUNT
!*IF,nnodisel,EQ,2,THEN
!CP,,ALL,ALL
!*ELSE
!*ENDIF
!NSLL,S,1
!*ENDDO

ALLSEL,ALL,ALL

!================================
================================
!LANCIO DELLA SOLUZIONE

/SOL
ANTYPE,0
NLGEOM,1
DELTIM,0.05,0.00001,0.1
        !time step
OUTRES,ERASE
OUTRES,NSOL,LAST
OUTRES,RSOL,LAST
OUTRES,ESOL,LAST
OUTRES,NLOA,LAST
OUTRES,STRS,LAST
AUTOTS,1
TIME,1

SOLVE
FINISH

!================================
================================
!POSTPROCESSING
```

```
/POST1

!-------------------------------------
!SPOSTAMENTI VCCT

*CFOPEN,'RESULTS w=3(prima interfaccia_cricche trasversali aperte_basso carico_NL)',txt,,APPEND
*VWRITE,'-----------------------------------------'
%/%c%/
*VWRITE,'LUNGHEZZA DI SOVRAPPOSIZIONE W=',w
%c%f
*VWRITE,'LUNGHEZZA CRICCA A1=',a1
%c%f
*VWRITE,'LUNGHEZZA CRICCA A2=',a2
%c%f
*VWRITE,'LUNGHEZZA CRICCA A3=',a3
%c%f%/
*VWRITE,'SPOSTAMENTI VCCT:'
%c
*VWRITE,'UX','UY'
('          'A2,'          'A2)

!------------m,m*------------

KSEL,S,,,45
KSEL,A,,,39

LSLK,S,1

NSLL,S,1

NSEL,R,LOC,X,a1-0.0125,a1-0.0075
!seleziono il punto m

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX
*GET,u_m1,NODE,num_nodo,U,X
!spostamento di m lungo X
*GET,v_m1,NODE,num_nodo,U,Y
!spostamento di m lungo Y

*VWRITE,'m',u_m1,'m',v_m1
('  ',A1,'  'F10.6'   ',A1,'  'F10.6'  ')

ALLSEL,ALL,ALL

KSEL,S,,,44
KSEL,A,,,39

LSLK,S,1

NSLL,S,1

NSEL,R,LOC,X,a1-0.0125,a1-0.0075
!seleziono il punto m*

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX
*GET,u_m2,NODE,num_nodo,U,X
!spostamento di m* lungo X
*GET,v_m2,NODE,num_nodo,U,Y
!spostamento di m* lungo Y

*VWRITE,'m*',u_m2,'m*',v_m2
('  ',A2,' 'F10.6'   ',A2,' 'F10.6'  ')

ALLSEL,ALL,ALL

!------------l,l*------------

KSEL,S,,,45
KSEL,A,,,39

LSLK,S,1
```

```
NSLL,S,1


NSEL,R,LOC,X,a1-0.0075,a1-0.0025
!seleziono il punto l


*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX

*GET,u_l1,NODE,num_nodo,U,X
!spostamento di l lungo X

*GET,v_l1,NODE,num_nodo,U,Y
!spostamento di l lungo Y


*VWRITE,'l',u_l1,'l',v_l1

('  ',A1,'  'F10.6'   ',A1,'  'F10.6'  ')



KSEL,S,,,44

KSEL,A,,,39


LSLK,S,1


NSLL,S,1


NSEL,R,LOC,X,a1-0.0075,a1-0.0025
!seleziono il punto l*


*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX

*GET,u_l2,NODE,num_nodo,U,X
!spostamento di l* lungo X

*GET,v_l2,NODE,num_nodo,U,Y
!spostamento di l* lungo Y


*VWRITE,'l*',u_l2,'l*',v_l2

('  ',A2,' 'F10.6'   ',A2,' 'F10.6'  ')


ALLSEL,ALL,ALL


!---------------------------------------

!SPOSTAMENTI PER ROTAZIONE


*VWRITE,'SPOSTAMENTI PER
ROTAZIONI:'

%/%c

*VWRITE,'U','V'

('         'A2,'         'A2)


KSEL,S,,,39

KSEL,A,,,40


LSLK,S,1

!seleziono la linea lungo la direzione di
propagazione della cricca


NSLL,S,1


NSEL,R,LOC,X,a1+0.001,a1-0.001
!seleziono il nodo esattamente sull'apice della
cricca nodo_i


*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX

*GET,u_a,NODE,num_nodo,U,X
!spostamenti lungo X e Y del nodo sull'apice
della cricca

*GET,v_a,NODE,num_nodo,U,Y


*VWRITE,'a',u_a,'a',v_a

('  ',A1,'  'F10.6'   ',A1,'  'F10.6'  ')



ALLSEL,ALL,ALL


KSEL,S,,,39

KSEL,A,,,40


LSLK,S,1


NSLL,S,1

!seleziono la linea lungo la direzione di
propagazione della cricca
```

```
NSEL,R,LOC,X,a1+0.0025,a1+0.0075
!seleziono il nodo immediatamente a destra
dell'apice della cricca nodo_j

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX

*GET,u_b,NODE,num_nodo,U,X
!spostamenti lungo X e Y del nodo
precedentemente selezionato

*GET,v_b,NODE,num_nodo,U,Y

*VWRITE,'b',u_b,'b',v_b

('  ',A1,'  'F10.6'   ',A1,'  'F10.6'  ')

ALLSEL,ALL,ALL

!---------------------------------------

!FORZE Xi,Xj,Yi,Yj

*VWRITE,'FORZE VCCT:'

%/%c

*VWRITE,'X','Y'

('         'A2,'            'A2)

NSEL,S,LOC,X,a1-0.001,a1+0.001
                              !seleziono il nodo
all'apice della cricca

NSEL,R,LOC,Y,h-t-0.001,h-t+0.001

ESLN,S,0,ALL

  !seleziono gli elementi attaccati a quel nodo

ESEL,R,CENT,Y,h-t,h-t+0.01

 !seleziono gli elementi superiori

NSLE,S,ALL
!seleziono i nodi di questi elementi

NSEL,R,LOC,X,a1-0.001,a1+0.001

!seleziono il nodo dell'apice

NSEL,R,LOC,Y,h-t-0.001,h-t+0.001

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX
!forze sul nodo all'apice dell'elemento di destra

*GET,num_elem,ELEM,0,NUM,MIN

*GET,X_idx,ELEM,num_elem,EFOR,num_nod
o,FX

*GET,Y_idx,ELEM,num_elem,EFOR,num_nod
o,FY

*GET,num_elem,ELEM,0,NUM,MAX

!forze sul nodo all'apice dell'elemento di sinistra

*GET,X_isx,ELEM,num_elem,EFOR,num_nod
o,FX

*GET,Y_isx,ELEM,num_elem,EFOR,num_nod
o,FY

X_i=X_idx+X_isx

Y_i=Y_idx+Y_isx

*VWRITE,'i',X_i,'i',Y_i

('  ',A1,'  'F10.6'   ',A1,'  'F10.6'  ')

ALLSEL,ALL,ALL

NSEL,S,LOC,X,a1-0.001,a1+0.001

!seleziono il nodo all'apice della cricca

NSEL,R,LOC,Y,h-t-0.001,h-t+0.001

ESLN,S,0,ALL

!seleziono gli elementi attaccati a quel nodo

ESEL,R,CENT,Y,h-t,h-t+0.01

!seleziono gli elementi superiori
```

```
NSLE,S,ALL
!seleziono i nodi di questi elementi

NSEL,R,LOC,X,a1+0.0025,a1+0.0075
!seleziono il nodo successivo all'apice
NSEL,R,LOC,Y,h-t-0.001,h-t+0.001

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX
*GET,num_elem,ELEM,0,NUM,MIN
*GET,X_j,ELEM,num_elem,EFOR,num_nodo,
FX
*GET,Y_j,ELEM,num_elem,EFOR,num_nodo,
FY

*VWRITE,'j',X_j,'j',Y_j
('  ',A1,'  'F10.6'   ',A1,'  'F10.6'  ')

ALLSEL,ALL,ALL

!---------------------------------------
!SPOSTAMENTI AGLI ESTREMI

*VWRITE,'SPOSTAMENTI AGLI ESTREMI:'
%/%c%/

!------------ux,alto------------

KSEL,S,,,35
KSEL,A,,,219

LSLK,S,1

NSLL,S,1

NSEL,R,LOC,Y,h

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX
*GET,ux_alto,NODE,num_nodo,U,X

*VWRITE,'ux_alto',ux_alto
('  ',A7,'  'F10.6)

ALLSEL,ALL,ALL

!------------ux,basso------------

KSEL,S,,,185
KSEL,A,,,36

LSLK,S,1

NSLL,S,1

NSEL,R,LOC,Y,0

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX
*GET,ux_basso,NODE,num_nodo,U,X

*VWRITE,'ux_basso',ux_basso
('  ',A7,'  'F10.6)

ALLSEL,ALL,ALL

!------------ux,vcct------------

KSEL,S,,,35
KSEL,A,,,219

LSLK,S,1

NSLL,S,1

NSEL,R,LOC,Y,h-t          !seleziono il nodo
all'estremo destro situato ad Y=h-t
```

```
*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX
*GET,ux_vcct,NODE,num_nodo,U,X

*VWRITE,'ux_vcct',ux_vcct
('  ',A7,'  'F10.6)

ALLSEL,ALL,ALL

*CFCLOS

ALLSEL,ALL,ALL

/PREP7

CPDELE,ALL,,,ALL
ACLEAR,ALL
ADELE,ALL
LCLEAR,ALL
LDELE,ALL
KDELE,ALL

FINISH

!_____
```

Appendice C: studio delle prove di Modo II (ENF) e Modo Misto (MMB)

Secondo la teoria della meccanica della frattura, la crescita e la propagazione di una cricca interlaminare, può avvenire secondo tre tipi di sollecitazione elementare, Modo I (trazione), Modo II (taglio nel piano) e Modo III (lacerazione)

Nel presente lavoro di tesi sono state eseguite delle prove di trazione a fatica su provini *stepped* e si è visto, tramite le simulazioni FEM, che la delaminazione propaga a Modo Misto (I+II).

Esistono tuttavia anche delle diverse tipologie di prove a fatica, utili per studiare il comportamento a fatica, la cedevolezza e la quota di rilascio dell'energia di deformazione, di campioni soggetti a sollecitazioni differenti.

In questa appendice si riporta un approfondimento relativo alla prova ENF di Modo II e alla prova MMB di Modo Misto. Entrambe queste prove sono state standardizzate da ASTM.

Prove di delaminazione in Modo II (ENF)

Per studiare la frattura interlaminare di Modo II sono state proposte diverse teorie nel corso degli anni. La prima metodologia di prova, introdotta negli anni '60, è l'*Interlaminar Shear Strength (ILSS)*, standardizzata da ASTM e pubblicata con la sigla ASTM D2344. Si tratta del primo metodo di prova che consente di valutare la frattura di taglio interlaminare nei materiali compositi laminati. Questa tipologia di prova oggi viene usata soprattutto per testare la qualità dei materiali.

Per valutare la tenacità a frattura interlaminare di materiali compositi è stata ideata una prova che prende il nome di *End Notched Flexure* (ENF), la quale prevede l'utilizzo di un provino pre-criccato. Tale delaminazione viene creata o attraverso l'inserzione di un film non adesivo durante la fase di preparazione del materiale, oppure mediante lavorazione meccanica.

La configurazione di prova prevede che il provino sia appoggiato su 2 pin situati ad una distanza fissa 2L, e che venga vincolato superiormente ad un pin centrale (*vedi Fig.C.1*). Il provino ha dunque 3 punti di flessione con una delaminazione iniziale di lunghezza a_0, situata in corrispondenza del piano medio del laminato, questo favorisce lo scorrimento dei due lembi del provino durante l'applicazione del carico flessionale. Un

classico provino ENF ha una lunghezza *2L*=100 mm, una profondità *b* =25 mm e uno spessore *2h* = 3-4 mm

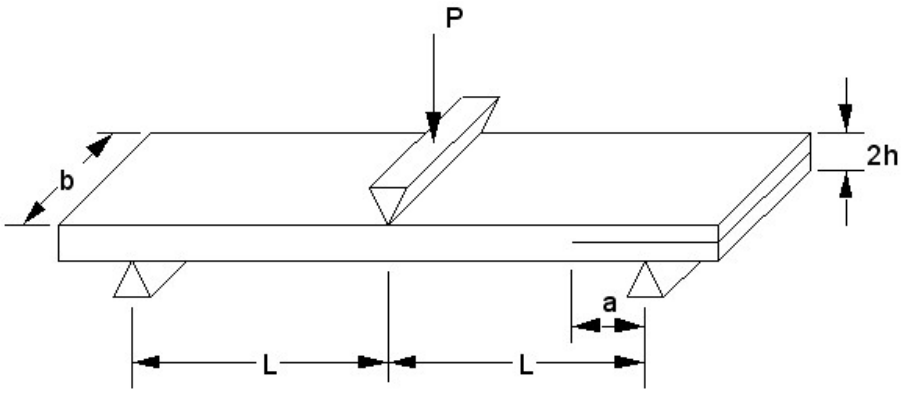


Fig.C.1 schematizzazione prova ENF

In questa prova il provino oltre ad essere soggetto ad un carico flessionale è altresì soggetto ad un taglio trasversale (*vedi Fig. C.2*) che genera delle tensioni di taglio che distorcono la sezione del braccio del provino.

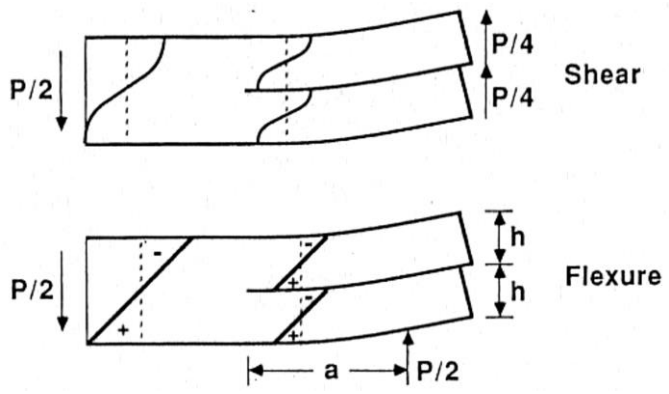


Fig.C.2 sollecitazioni provino ENF

Nel 1977 gli studiosi Barret e Foschi [57] utilizzarono il provino ENF per studiare la frattura interlaminare di Modo II in provini di legno pre-criccati, successivamente nel 1982 Russel e Street [58] utilizzarono la medesima prova per stimare la quota di rilascio dell'energia di deformazione di Modo II, G_{IIC}, nei compositi avanzati.

Nel corso degli anni successivi sono state ideate varie tipologie di provini simili all'ENF per lo studio della frattura interlaminare di Modo II: nel 1986 Bradley [59] introdusse il cosiddetto *end-loaded split* (ELS) *specimen*, nel 1985 Prel e Benzeggagh utilizzarono il *cantilever beam enclosed notch* (CBEN) *specimen*, che verrà adoperato

nel 1987 da Vu-Khanh [60] per condurre i suoi studi sull'arresto della propagazione di cricche di Modo II; Maikuma [61] adoperò il *center notch flexural* (CNF) *specimen*, per studiare la frattura interlaminare di Modo II sotto l'applicazione di un carico statico e impattivo. Ciò nonostante, il provino ENF rimane tuttora il più utilizzato per studiare la frattura interlaminare di Modo II sostanzialmente per tre motivazioni: il provino è facile da realizzare, l'apparato di prova è semplice da realizzare e l'analisi dei dati delle prove è sufficientemente immediata e chiara.

Per queste ragioni la prova ENF è stata standardizzata dall'ASTM D-30. La propagazione instabile della cricca durante questa prova costituisce l'unico svantaggio.

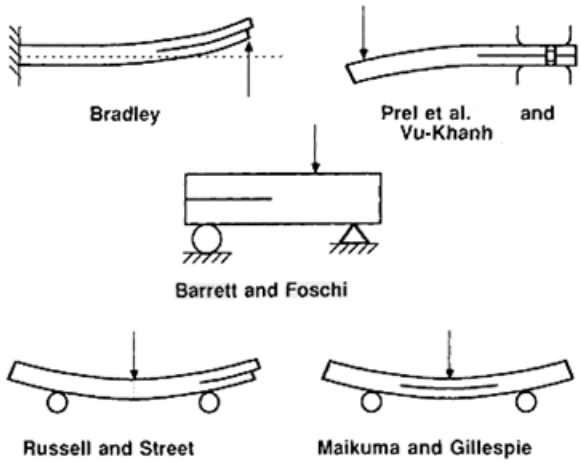


Fig.C.3 diverse tipologie di prove ENF

A partire dagli anni 80 si svilupparono anche teorie che sfruttavano l'analisi agli elementi finiti, gli studiosi Mail and Kochhar [1986], Gillespie [1986], and Salpekar [1988] condussero analisi agli elementi finiti su un provino ENF in materiale composito.

Successivamente Murthy [1988], Valisetty e Chamis [1988] arrivarono a sviluppare un modello ad elementi finite in tre dimensioni per valutare lo *strain energy release rate*. Allo stesso modo anche He e Evans [1992] analizzarono l'ENF test e molti altri test di delaminazione usando il metodo degli elementi finiti.

Crews e Reeder [62] introdussero nel 1988 il *mixed mode bending* (MMB) *specimen*, che può essere utilizzato per misurare la tenacità a frattura di Modo I e di Modo II.

Approccio analitico

Come precedentemente detto il provino ENF, durante la prova è soggetto sia a carico flessionale che a forze di taglio trasversali. La combinazione di queste tipologie di carico costituisce la forza motrice per la propagazione della cricca. Il meccanismo dominante corrisponde alla deformazione per scorrimento delle due sottoparti del laminato (*forward shear*) indotto dall'applicazione di un carico flessionale nella zona centrale del provino.

Da notare che le tensioni di flessione all'interfaccia dei due bracci del provino sono di trazione per il braccio superiore e di compressione per il braccio inferiore.

All'apice della cricca la discontinuità tensionale è eliminata dalla presenza di singolarità dovuta alla tensione di taglio interlaminare associata alla propagazione della delaminazione di Modo II.

Il meccanismo flessionale è strettamente collegato alla lunghezza della cricca, al modulo flessionale e allo spessore del provino.

La meccanica della geometria del provino ENF è abbastanza complessa a causa della presenza di una cricca in un dominio finito, inoltre i due bracci del provino sono elasticamente collegati al resto del provino attraverso la sezione adiacente l'apice della cricca, e ciò complica ulteriormente l'analisi. In assenza di una soluzione in campo elastico, sono stati sviluppati modelli analitici approssimati.

Si analizzano ora le principali teorie analitiche per il calcolo dello *strain energy release rate* (SERR) nelle prove ENF: la prima è quella proposta da Russel e Street nel 1982, rielaborata da Carlsson e Gillespie nel 1986 tenendo conto dello sforzo di taglio (*simple beam theory 1*, *SBT1*), la seconda riprende i concetti della *SBT1* ma considera nel calcolo di G lo spostamento δ misurato realmente e non quello calcolato analiticamente *(simple beam theory 2*, *SBT2*), viene inoltre riportata la *modified beam theory* (*MBT*) proposta da Wang e Williams nel 1992 che introduce un fattore correttivo alla lunghezza di cricca a nell'espressione della cedevolezza, la *compliance calibration* (CC) e infine il metodo di *Kinloch.*

Simple Beam Theory (SBT1)

La *Simple Beam Theory Analysis 1* è la prima e la più semplice teoria per il calcolo di G_{II}; questa teoria infatti non considera la singolarità all'apice della cricca, la deformazione a taglio trasversale, l'effetto della rotazione che si ha all'apice della cricca

e neppure l'effetto di De Saint Venant di conseguenza il valore G_{II} ricavato sarà sottostimato di molto. Questo metodo considera ciascun braccio come incastrato ad una estremità.

Per calcolare la quota di rilascio dell'energia di deformazione è necessario introdurre una nuova grandezza, la cedevolezza *C*, in quanto G_{IIC} può essere calcolato come variazione differenziale di *C* rispetto alla lunghezza della delaminazione *a*.

La cedevolezza *C* di un provino ENF è definita come il rapporto tra lo spostamento δ (*vedi Fig C.4*) del punto centrale di applicazione del carico flessionale e il carico flessionale *P* stesso . Lo spostamento δ è definito come

$$\delta = \frac{\left(\Delta_{AB} + \Delta_{BC} + \Delta_{CD}\right)}{2} \tag{1}$$

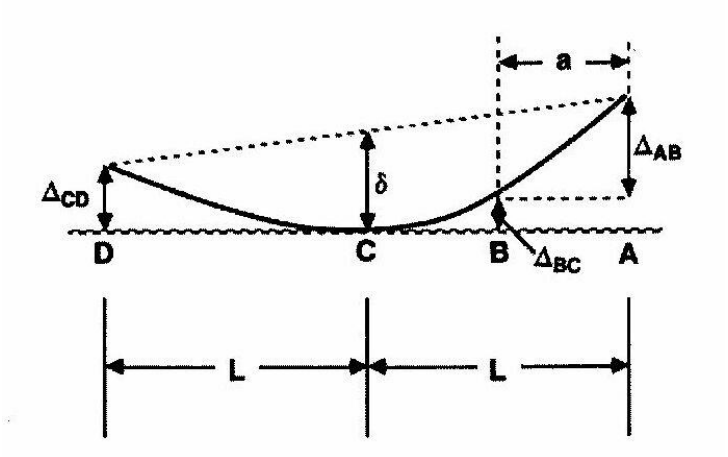


Fig.C.4 spostamenti per calcolare la cedevolezza

Riferendosi alla *simple beam theory* (SBT1), si può esprimere la cedevolezza per materiali con una elevata rigidità al taglio e un piccolo rapporto semispessore su lunghezza della cricca *h/a*, nel seguente modo:

$$C_{SBT1} = \frac{2L^3 + 3a^3}{8E_1 bh^3} \tag{2}$$

A questo punto per ricavare la *Strain Energy Release Rate* o *G* basta calcolare la variazione differenziale di *C* rispetto alla lunghezza di delaminazione *a*. In questo caso si parlerà di G_{II} in quanto si riferisce all'energia di deformazione rilasciata durante una sollecitazione di Modo II.

Prendendo come riferimento la teoria di Russel e Street, l'espressione di G_{II} si può esprimere come:

$$G_{II}^{SBT1} = \frac{9a^2P^2}{16E_1b^2h^3} \tag{3}$$

Esiste una versione modificata di tale teoria la quale incorpora l'effetto del taglio e propone un modello più realistico per rappresentare il comportamento dei materiali compositi a bassa rigidezza interlaminare, Questa trattazione venne affrontata da Carlsson e Gillespie [63] basandosi sulla teoria delle travi di Timoshenko [64], con l'assunzione di uno sforzo di taglio costante lungo lo spessore della trave e perpendicolare alla trave stessa. Questi autori hanno proposto una nuova espressione per la cedevolezza del provino ENF:

$$C_{SBT1_{SH}} = \frac{2L^3 + 3a^3}{8E_1bh^3}\left[1 + \frac{2(1{,}2L + 0{,}9a)h^2E_1}{(2L^3 + 3a^3)G_{13}}\right] \tag{4}$$

dove il pedice *SH* sta ad indicare che nella valutazione della cedevolezza C_{SH} sono stati inclusi gli effetti della deformazione da taglio (*shear*).

L'espressione di G_{II} , tenendo conto degli studi di Carlsonn e Gillespie, si modifica nel seguente modo:

$$G_{II}^{SBT1_{SH}} = \frac{9a^2P^2}{16E_1b^2h^3}\left[1 + 0{,}2\frac{E_1}{G_{13}}\left(\frac{h}{a}\right)^2\right] \tag{5}$$

Il modulo elastico E_1 può essere ricavato mediante prova di trazione monoassiale o mediante calibrazione sperimentale:

$$E_{11} = \frac{L^3}{4bh^3C_0} \tag{6}$$

Quest'ultimo metodo non è molto attendibile poiché C_0, che rappresenta la cedevolezza della trave in assenza dell'inserto ($a=0$), viene misurata nella prova di calibrazione che restituisce valori molto dispersi tra loro.

Si è visto che la deformazione da taglio interlaminare influenza la cedevolezza e la quota di rilascio dell'energia di deformazione nel provino ENF.

L'errore che consegue alla mancata considerazione della deformazione da taglio nel calcolo del SERR, non supera il 10% rispetto all'analisi corretta, mentre l'errore relativo alla cedevolezza è risultato il doppio.

Simple Beam Theory 2 (SBT2)

Questa teoria si basa sulla *SBT1* ma si differenzia da questa per il fatto che considera lo spostamento reale e non quello calcolato analiticamente per trovare G_{II}.

$$G_{II}^{SBT2} = \frac{9a^2P^2\delta}{2b(3a^3+2L^3)} \tag{7}$$

Questa formula può essere ricavata dalla SBT1 sostituendo E_{11} con il modulo flessionale E_{1f}.

$$E_{1f} = \frac{(3a^3+2L^3)}{8bh^3C_0} \tag{8}$$

Modified Beam Theory (MBT)

Con entrambe le teorie SBT si arriva a sovrastimare il valore di G_{II} in quanto non si tiene conto della rotazione che si ha all'apice della delaminazione. Questo aspetto è invece riportato nella *Modified Beam Theory (MBT)*, teoria introdotta da ASTM per la prima volta nella normativa D5528. Per correggere questo aspetto si considera una lunghezza di delaminazione leggermente più lunga, $a+\Delta$, dove Δ può essere determinato sperimentalmente dopo aver plottato la curva relativa alla radice cubica della cedevolezza, $C^{1/3}$, in funzione della lunghezza di delaminazione a, prendendo l'intersezione della retta di regressione con l'asse delle ascisse, di segno opposto. Bisogna inoltre apportare un'ulteriore correzione, che chiamiamo Δ_0, alla semilunghezza L del provino affinché la cedevolezza teoricamente calcolata sia compatibile con la

cedevolezza reale del provino. Il termine correttivo Δ_0 si calcola tramite una prova statica su un provino non criccato.

Nel caso di una prova ENF il provino criccato avrà dunque la seguente cedevolezza:

$$C_{MBT} = \frac{3(a+\Delta_{II})^3 L^3 + 2(L+\Delta_0)^3}{8E_1 bh^3} \tag{9}$$

Una volta conosciuta la cedevolezza, si può ricavare il valore di *G* sempre differenziando tale grandezza rispetto alla lunghezza di delaminazione *a* ottenendo

$$G_{II}^{MBT} = \frac{9(a+\Delta_{II})^2 P^2}{16b^2 h^3 E_1} \tag{10}$$

Anche in questo caso si può sostituire il valore di E_1 con E_{1f} come fatto per la *simple beam theory* 1 e 2.

$$E_{1f} = \frac{(3a+\Delta_{II})^3 + 2(L+\Delta_0)^3}{8bh^3 C_0} \tag{11}$$

Compliance Calibration (CC)

Questo metodo, proposto nel protocollo TC4 dell'ESIS (*European Structural Integrity Society)* [65], prevede di ricavare la cedevolezza per via sperimentale e di risalire ad una espressione analitica da utilizzare per il calcolo di *G*.

Si effettuano prove in controllo di spostamento variando di volta in volta la lunghezza di delaminazione facendo scorrere il provino sugli afferraggi. Questo metodo richiede l'utilizzo di un provino ENF abbastanza lungo, con una pre-cricca altrettanto lunga in modo tale da poter eseguire numerose misura di cedevolezza in funzione della lunghezza della delaminazione.

Una volta raggiunto un determinato valore del carico P applicato al sistema, si ottengono differenti valori della cedevolezza a diverse lunghezze di cricca osservando la pendenza delle curve di carico.

Essendo la cedevolezza *C* proporzionale al cubo della lunghezza di delaminazione *a* (*C* α a^3) si effettua un'interpolazione lineare dei valori di C diagrammati in funzione di a^3.

Il coefficiente angolare della retta di regressione lineare *m* e l'intercetta con l'asse delle ordinate C_0 vengono utilizzati per definire la cedevolezza come:

$$C = C_0 + ma^3 \tag{12}$$

C_0 è una costante che comprende la cedevolezza della macchina.

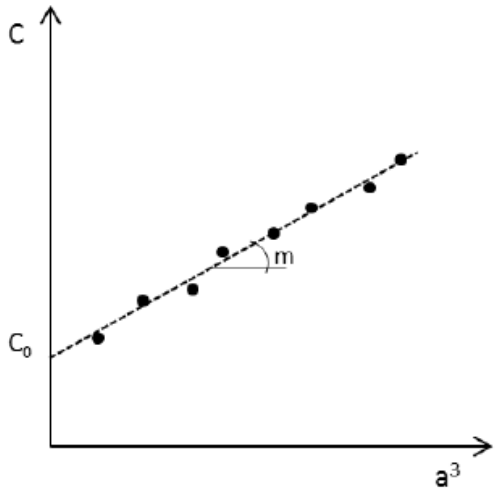


Fig.C.5 cedevolezza al variare della lunghezza della delaminazione

L'espressione risultante della cedevolezza viene poi differenziata rispetto alla lunghezza della cricca, *dC/da*, per ottenere infine G_{IIC} tramite l'equazione

$$G = \frac{P^2}{2b}\frac{\partial C}{\partial a} \tag{13}$$

Il tasso di rilascio di energia *SERR*, considerando l'*Experimental Compliance Calibration Method* diventa quindi

$$G_{II}^{CC} = \frac{1{,}5P^2ma^2}{b} \tag{14}$$

Dal momento che la calibrazione della cedevolezza è soggetta a incertezza sperimentale i risultati di *G* che si ottengono sono molto dispersi rispetto ai metodi esaminati precedentemente.

Il metodo Kinloch [66]

Questo metodo si differenzia dal *Modified Beam Theory* per il fatto che il fattore correttivo Δ_{II} anziché essere calcolato sperimentalmente è calcolato analiticamente:

$$\Delta_{II} = \chi_{II} h = 0{,}42\,\chi_I h \tag{15}$$

con

$$\chi_I = \left[\frac{E_{11}}{11 G_{13}} \left(3 - 2\left(\frac{\Gamma}{\Gamma + 1} \right)^2 \right) \right]^{1/2} \tag{16}$$

e con

$$\Gamma = 1{,}18 \frac{\sqrt{E_{11} E_{22}}}{G_{13}} \tag{17}$$

Da analisi agli elementi finiti risulta

$$\chi_{II} = 0{,}42\,\chi_I \tag{18}$$

Perciò dopo aver eseguito tutti i conti e aver ricavato la cedevolezza *C*, *G* si trova ancora una volta semplicemente differenziando rispetto la lunghezza *a*:

$$G_{II}^{KLH} = \frac{9(a + \chi_{II} h)^2 P^2}{16 b^2 h^3 E_{11}} \tag{19}$$

Propagazione della delaminazione

La delaminazione, secondo il criterio di Griffith, si propaga non appena viene rispettata la seguente condizione

$$\frac{dG_{II}}{da} > 0 \tag{20}$$

assumendo G_{II} costante e indipendente dalla lunghezza della delaminazione.
Facendo riferimento ancora una volta alla *Beam Theory* (BT), Carlsson ha dimostrato che in condizioni di carico costante (durante l'ENF test), si ottiene sempre una crescita instabile della cricca; infatti andando a derivare l'equazione (3) rispetto alla lunghezza della delaminazione si ottiene:

$$\frac{dG}{da} = \frac{9aP^2}{8E_1bh^3} \tag{21}$$

quantità sempre positiva e per questo la crescita della cricca è instabile.
Se si fa riferimento ad una prova condotta a spostamento costante si ottiene invece una propagazione stabile. Se si considera l'espressione della cedevolezza $C_{SBT} = \frac{2L^3 + 3a^3}{8E_1bh^3}$, questa può essere riscritta nel seguente modo:

$$8E_1bh^3 = \frac{2L^3 + 3a^3}{C_{BT}} \tag{22}$$

Sostituendo quest'ultima all'espressione di G_{II}^{SBT1} si ottiene:

$$G_{II}^{SBT1} = \frac{9a^2P^2}{2w\left(8E_1bh^3\right)} \tag{23}$$

Sostituendo ancora il valore di $8E_1wh^3$ all'espressione di G_{II}^{SBT1}, appena ricavata si ottiene:

$$G_{II}^{SBT1} = \frac{9a^2P^2C}{2b\left(2L^3 + 3a^3\right)} \tag{24}$$

A questo punto, dopo aver sostituito P con la propria espressione $P = \delta/C$, si deriva il valore di G rispetto alla lunghezza di delaminazione a ottenendo:

$$\frac{dG}{da} = \frac{9\delta^2 a}{8E_1 b^2 h^3 C^2}\left[1 - \frac{9a^3}{2L^3 + 3a^3}\right] \tag{25}$$

Il termine fuori parentesi risulta essere sempre positivo, di conseguenza il rapporto $\frac{dG}{da}$ sarà negativo se

$$\left[1 - \frac{9a^3}{2L^3 + 3a^3}\right] \leq 0 \tag{26}$$

Si avrà una crescita stabile della cricca se viene quindi rispettata la seguente disuguaglianza:

$$\frac{a}{L} \geq \frac{1}{\sqrt[3]{3}} \approx 0{,}69 \tag{27}$$

Generalmente un provino ENF ha un rapporto $\frac{a}{L}$ pari a 0,5 ciò implica una crescita instabile della cricca: questo fatto risulta essere in accordo con quanto visualizzato nelle prove sperimentali.

Effetto dell'attrito

Nelle prove di delaminazione di modo II è necessario tener presente che lo scorrimento tra le superfici di contatto dei due bracci avviene in presenza di attrito che si oppone allo scorrimento delle stesse.

L'attrito è un meccanismo di dissipazione energetica aggiuntivo al meccanismo di creazione di una nuova cricca tra le due superfici, ed è di difficile valutazione. Esso porta ad un aumento della tenacità a frattura misurata e comporta una riduzione della cedevolezza del provino.

Carlsson e Gillespie hanno proposto una modifica alla teoria delle travi che includa l'effetto dell'attrito dinamico usando la legge di Coulomb

$$F_{ATT}(x) = \mu N(x) \tag{28}$$

Dove μ è il coefficiente di attrito dinamico mentre *N(x)* è la distribuzione degli sforzi normali. Tenendo conto dell'anisotropia del materiale e della localizzazione del fenomeno alla regione delaminata in prossimità, la distribuzione viene approssimata ad una delta di Dirac:

$$N(x) = \frac{P}{4}\delta(x) \tag{29}$$

Sostituendo la distribuzione con un carico puntuale applicato dove la deformazione di scorrimento è massima, il lavoro compiuto dalla forza d'attrito viene stimato per eccesso integrando la forza per la deformazione ricavata dalla teoria delle travi ottenendo:

$$W_f \leq \frac{\mu P \Delta u(0)}{4} \tag{30}$$

dove *Δu(0)* è la deformazione per slittamento in corrispondenza del supporto del provino (x=0).
Sommando questo contributo al bilancio energetico impostato per risalire al tasso di rilascio di energia si ricava:

$$G_{II}^{ATT} = G_{II}^{BT}(1 - g(\mu)) \tag{31}$$

dove

$$g(\mu) = \frac{4h}{3a}\mu \tag{32}$$

Si vede dunque come la riduzione del SERR sia direttamente proporzionale al coefficiente di attrito μ e decresce con l'incremento del rapporto *h/a*.
Si è visto da prove sperimentali che l'estensione della zona di contatto è al massimo pari a *4h*. Dato che il campo di compressione è simmetrico rispetto al punto di applicazione si deduce che la lunghezza massima di cricca risulta

$$a_{\max} = L - 2h \tag{33}$$

Si può altresì ricavare un valore di a_{min} imponendo un fattore di abbattimento g^* sufficientemente piccolo per poter trascurare l'attrito e ricavare

$$a_{\min} = \frac{4h}{3g^*}\mu \tag{34}$$

Prove di delaminazione di modo misto I+II (MMB)

Risulta sempre molto raro nelle applicazioni pratiche che le cricche e le delaminazioni, presenti nei materiali compositi, si propaghino in presenza di campi di tensione di Modo I o di Modo II puri. È invece molto più frequente che essi siano soggetti a un modo misto, combinazione di modo I e II, durante la propagazione. Per le prove di modo misto sono stati sviluppati numerosi provini: il provino *mixed mode bending* (MMB), il provino *mixed mode* ELS, il provino *single leg bending* (SLB), il provino *mixed-mode flexure* (MMF), il provino *cracked-lap shear* (CLS), l'*asymmetric double cantilever beam* (ADCB). Queste prove sono comparate in *Szekrényes* and *Uj* 2007 [67]. ASTM ha standardizzato la prova MMB per provini unidirezionali (ASTM standard D6671 2006).

Anche il test SLB è abbastanza diffuso per via della relativa semplicità dell'apparato di carico e dell'esecuzione del test. Uno dei vantaggi del provino SLB rispetto a quello MMB risiede nel fatto che se si utilizza il *compliance calibration method* si ottengono risultati più accurati per quanto riguarda il calcolo delle componenti del SERR. In un MMB test il calcolo del SERR comporta la conoscenza di alcune proprietà del materiale. Generalmente esistono notevoli discrepanze tra le proprietà del materiale teoricamente predette e quelle reali, come ad esempio la rigidezza flessionale oppure il modulo di taglio. Come risultato, la prova MMB non è indicata per *lay-up* multidirezionali.

In seguito si farà riferimento alla prova MMB normata da ASTM.

Come si vede dalla figura seguente, il provino pre-criccato è appoggiato dalla parte integra e incernierato all'estremità criccata. Il carico *P* viene applicato a distanza *c* dal rullo superiore che si trova sulla mezzeria del provino. Grazie al sistema di carico costituito dalla leva superiore, il rullo di mezzeria e la cerniera di estremità, si ha un carico premente in mezzeria e un carico aprente all'estremità criccata.

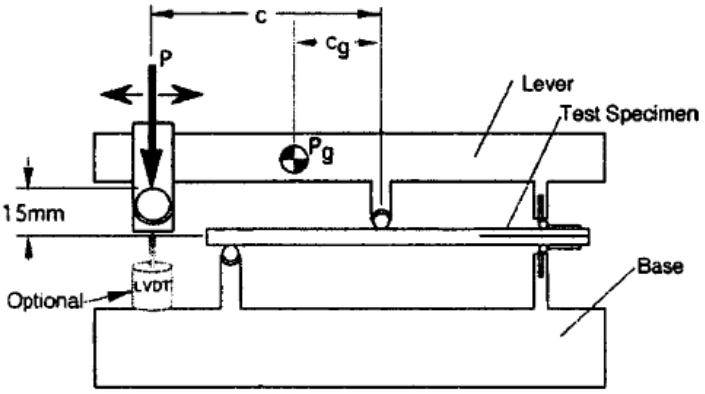


Fig.C.6 strumentazione per prova MMB

La leva di carico permette dunque di applicare simultaneamente sul provino una sollecitazione di trazione (Modo I) e una sollecitazione di taglio (Modo II).
La distanza *c* determina il rapporto tra la forza di compressione e la forza di trazione, e quindi la tipologia del Modo Misto applicato. Si può facilmente intuire che per una lunghezza $c = 0$ si avrà una sollecitazione di Modo II puro.
Per facilitare i conti si può scomporre la condizione di carico in due condizioni in cui sono presenti le condizioni dei Modi I e II puri

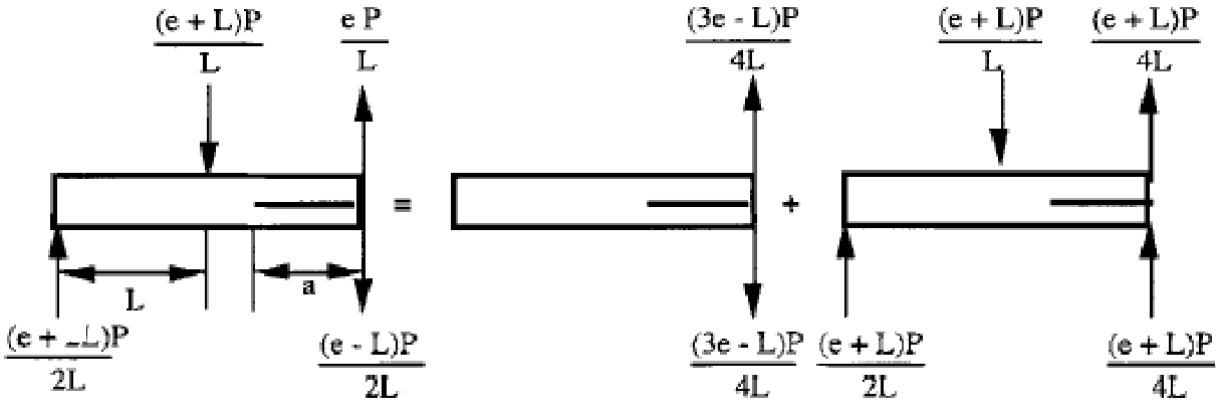


Fig.C.7 scomposizione delle forze applicate su provino MMB

Dalla scomposizione si ricavano i carichi di Modo I e Modo II che risultano

$$P_I = (\frac{3c - L}{4L})P \tag{35}$$

$$P_{II} = (\frac{c + L}{L})P \tag{36}$$

Con questi valori si può definire un G totale pari a

$$G = G_I + G_{II} \tag{37}$$

Si può anche definire il mode mixity relativo alla condizione di carico

$$\gamma = \frac{G_{II}}{G} \tag{38}$$

Lo spostamento δ del punto di applicazione del carico si calcola nel seguente modo:

$$\delta = \delta_I(\frac{3c - L}{4L}) + \delta_{II}(\frac{c + L}{L}) \tag{39}$$

Dove $\delta_I = \delta_{end}$

e $\delta_{II} = \delta_{mezz} + \frac{\delta_I}{4}$

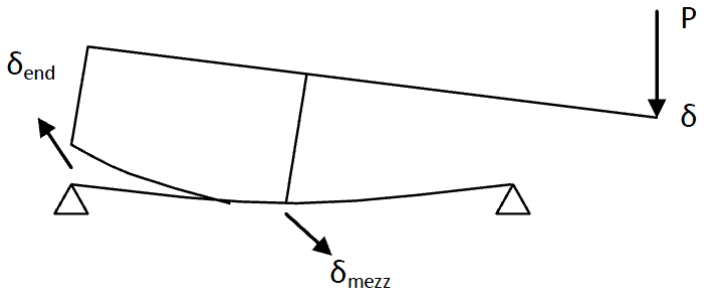


Fig.C.8 deformata e spostamenti provino MMB

Conoscendo lo spostamento δ complessivo non è dunque possibile risalire agli spostamenti δ_I e δ_{II} dei singoli modi. Lo stesso ragionamento vale per la cedevolezza, per cui si ha che la cedevolezza del punto di applicazione del carico è legata a quelle di Modo I e II dalla seguente equazione:

$$C = C_I(\frac{3c - L}{4L})^2 + C_{II}(\frac{c + L}{L})^2 \tag{40}$$

Per calcolare sia la cedevolezza *C* che lo spostamento δ è dunque necessario misurare direttamente gli spostamenti in mezzeria e all'estremità tramite sensori di spostamento, queste misure molto spesso non risultano essere molto agevoli.

NORMATIVA D 6671

Il provino utilizzato nella prova *Mixed -Mode Bending* (MMB), mostrato nella figura, presenta una forma rettangolare, è costituito da uno spessore uniforme e da fibre unidirezionali inoltre contiene un inserto non adesivo nel piano mediano, che serve per favorire l'insorgere della delaminazione. I carichi vengono applicati al provino tramite due cerniere (oppure 2 tab) applicate all'estremità pre-criccata del provino e attraverso un cilindretto premente nella mezzeria dello stesso.

In questo modo si possono riprodurre contemporaneamente una sollecitazione di trazione (Modo I) e una sollecitazione di taglio (Modo II).

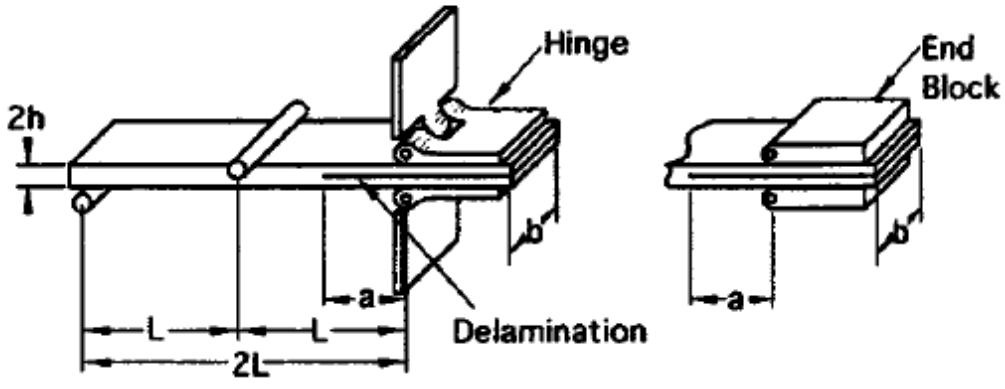


Fig.C.8 sistemi per l'applicazione del carico

La lunghezza del braccio di leva *c* tra il punto di applicazione del carico e il cilindro di carico sulla mezzeria del provino, determina il rapporto tra la forza di compressione e la forza di trazione, e quindi la tipologia del Modo Misto applicato. Per ridurre effetti non lineari legati alla geometria del provino, la leva deve essere caricata in modo che il punto di applicazione del carico sia leggermente sopra il piano mediano del provino (~ 15 mm). Il diametro dei due cilindri di supporto e del cilindro superiore deve essere compreso tra i 5 e i 15mm.

È molto importante che la resistenza di un materiale possa essere valutata a diversi *mode mixtures*.

La dimensioni raccomandate per il provino sono una lunghezza di 137 mm, una larghezza variabile tra i 20 e i 25 mm e uno spessore compreso tra 3 e 5 mm; la variazione di spessore in un provino non deve superare i 0,1mm. Per ciascun provino è opportuno rilevare i valori medi della larghezza e dello spessore: tali valori devono essere misurati in corrispondenza del punto medio e a 25 mm dalle estremità. I valori medi dello spessore e della larghezza devono poi essere registrati. La lunghezza del film non adesivo posizionato sul piano mediano è di circa 50 mm, mentre la delaminazione iniziale a_0, utilizzata in fase di prova, è pari a 25 mm.

È necessario localizzare e marcare la fine dell'inserto prima di tagliare il provino, si marcano i primi 5 mm con tratti verticali ogni 1 mm a partire dall'apice dell'inserto non-adesivo e con successivi tratti ogni 5 mm, per altri 20-25 mm, per poter visualizzare la crescita della delaminazione.

La semilunghezza tra i due cilindri di supporto, *L*, è pari a 50 mm e la lunghezza della leva di carico, *c*, deve essere settata per caratterizzare la tenacità a frattura interlaminare in presenza di un ben preciso rapporto G_{II}/G_I di Modo Misto.

Il carico viene introdotto attraverso le cerniere esterne realizzate in materiale metallico il cui modulo elastico deve essere almeno di 60000MPa. Queste cerniere possono essere incollate al provino oppure possono venire fissate mediante l'utilizzo di bulloni. Il posizionamento di queste deve essere fatto in modo che la distanza *a* sia compresa tra $0.45L < a < L - 3h$. La larghezza delle cerniere deve essere approssimativamente pari a quella del provino ovvero variabile tra i 20 e i 25 mm. Per ridurre la non linearità geometrica il punto di applicazione del carico deve essere 4 mm più in alto del piano medio del provino.

Sia la superfici vincolate delle cerniere che le superfici del provino devono essere accuratamente pulite prima di procedere al fissaggio, questo per ridurre i rischi di separazione durante l'esecuzione della prova. Qualora si verificasse un distacco, il provino non può essere riutilizzato se la delaminazione ha già incominciato a propagarsi.

La prova secondo normativa può essere condotta ad una temperatura standard di laboratorio di 23 ± 3 ºC e 50 ± 10% di umidità relativa.

L'equazione seguente derivante dalla *simple beam theory*, viene utilizzata per ottenere *c*, dato un determinato rapporto di *mode mixity*.

$$c = \left(\frac{\sqrt[8]{3(1-\frac{G_{II}}{G})\frac{G_{II}}{G} + 3(1+3\frac{G_{II}}{G})}}{39\frac{G_{II}}{G} - 3} \right) L \tag{41}$$

In alternativa può essere usata un'altra espressione per il calcolo di *c*

$$c = (0{,}167 + 0{,}000137\tilde{a}^2 - 0.108\sqrt{ln\,\tilde{a}}\left(\frac{G_{II}}{G}\right)^4 + \frac{-1400 + 0.725\tilde{a}^2 - 141\,ln(\tilde{a}) - 302\,ln\left(\frac{G_{II}}{G}\right)}{219 - 5000\frac{G_{II}}{G} + 55\,ln(\tilde{a})} \tag{42}$$

Dove ã = a/ hχ e

$$\chi = \left[\frac{E_{11}}{11G_{13}} \left(3 - 2\left(\frac{\Gamma}{\Gamma + 1} \right)^2 \right) \right]^{1/2} \tag{43}$$

con

$$\Gamma = 1{,}18\frac{\sqrt{E_{11}E_{22}}}{G_{13}} \tag{44}$$

Una volta posizionato il provino nell'apparato di prova si può procedere con il posizionamento di un microscopio ottico per osservare la crescita della delaminazione.
Attraverso questo strumento si deve esssere in grado di definire il posizionamento del fronte della delaminazione con un'accuratezza di ±0,5 mm.
La velocità di applicazione del carico è di 0,5 mm/min e durante la fase di prova si deve registrare su diagramma *X-Y* l'andamento del carico *P* in funzione dello spostamento δ, andando anche a marcare sul diagramma la corrispondente lunghezza della delaminazione e i punti che corrispondono alla deviazione dalla linearità, durante la fase di carico, (NL), alla propagazione visiva della cricca (Vis) e al massimo carico applicato (Max).

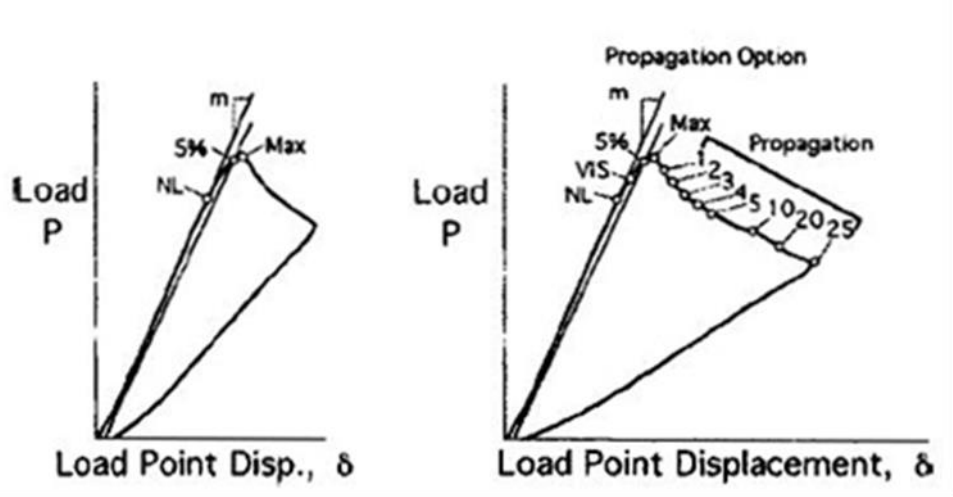


Fig.C.9 curve di carico in cui si evidenzia la non linearità che coincide con l'inizio della propagazione della delaminazione

Una volta terminata la prova, il provino deve essere rimosso dall'apparato e mantenuto aperto in modo che la delaminazione aumenti la lunghezza del provino. A questo punto bisogna prendere metà probivo e misurare la distanza tra il punto di applicazione del carico in corrispondenza della cerniera e il fronte di delaminazione. È opportuno effettuare almeno 3 misurazioni con un'accuratezza di ±25mm, la media risultante prende il nome a_0, la lunghezza iniziale di delaminazione. Bisogna successivamente ispezionare la superficie di delaminazione per vedere se la lunghezza del fronte di delaminazione non è cresciuta in maniera progressiva e uniforme. Se fossero presenti delle linee che rappresentano una crescita istantanea della delaminazione, il test è preferibile che venga ripetuto. Successivamente bisogna considerare la curva di carico/spostamento; si ricava la pendenza della parte iniziale di tale curva non

considerando le possibili non linearità che possono essere presenti nel 20% dei casi. Tale pendenza prende viene indicata con *m*. Si marca successivamente il punto in cui la curva varia la propria pendenza, e si indica questo punto con NL (*non linear*). Si marca infine il punto di intersezione tra la curva trovata e una retta passante per l'origine avente pendenza (*m* - 5%). Se la retta del 5% interseca la curva prima del punto di massimo allora bisogna segnare l'intersezione trovata con 5%/Max, se invece accade il contrario bisogna marcare il punto di massimo carico con 5%//Max.

Il calcolo di G_c utilizzando il punto NL assume che la delaminazione inizi a crescere dall'inserto interno al provino fino a quando viene raggiunto NL. Il valore NL rappresenta un limite inferiore per G_c. Il calcolo di G_c usando il punto 5%//Max normalmente porta a valori più riproducibili, ma generalmente questi sono anche i più elevati quindi non conservativi.

Il calcolo di G_c usando il punto VIS porta ad un valore intermedio tra NL e 5%//Max e rappresenta la tenacità a frattura per cui si osserva visivamente la crescita della delaminazione a partire dall'inserto non adesivo.

Il valore di G_c calcolato analizzando la curva carico/spostamento e la lunghezza della cricca misurata mentre la delaminazione sta crescendo sono generalmente elevati a causa del fenomeno del *fiber bridging*.

Relazioni analitiche

-Modulo elastico a flessione

Il modulo elastico a flessione si ricava dalla seguente espressione:

$$E_{1f} = \frac{8(a_0 + \chi h)^3 (3c - L)^2 + \left[6(a_0 + 0{,}43\chi h)^3 + 4L^3\right](c + L)^2}{16bh^3 \left(\frac{1}{m} - C_{sys}\right)} \qquad (45)$$

Dove a_0 è la lunghezza della cricca, *Csys* è la cedevolezza del sistema misurata tramite una prima prova di calibrazione. per ogni misura di *c.*

Tale espressione di ha il pregio di considerare che anche il sistema di carico ha una sua cedevolezza.

-Tenacità a frattura, Gc e Mode Mixture, G_{II}/G

La tenacità a frattura e il rapporto G_{II}/G si calcolano utilizzando le equazioni seguenti. Queste espressioni tengono conto delle correzioni apportate alla lunghezza di

delaminazione tenendo presente la rotazione del fronte in modo tale da far aderire maggiormente i risultati sperimentali a quelli FEM.

$$G = G_I + G_{II} \tag{46}$$

$$\frac{G_{II}}{G} = \frac{G_{II}}{G_I + G_{II}} \tag{47}$$

Dove

$$G_I = \frac{12P^2(3c - L)^2}{16b^2L^2h^3E_{1f}}(a + \chi h)^2 \tag{48}$$

$$G_{II} = \frac{12P^2(c + L)^2}{16b^2L^2h^3E_{1f}}(a + 0{,}42\chi h)^2 \tag{49}$$

P non è altro che uno dei carichi critici P_{nl}, $P_{5\,\%/\max}$ o P_{vis}

-*Correzione del peso del braccio di leva*

Il braccio di leva e il sistema di carico devono essere realizzati con un materiale leggero come per esempio l'alluminio. Occasionalmente quando si testano materiali a bassa resistenza, il peso del braccio di leva può causare un carico significativo del provino MMB e quindi la misura della tenacità può risultare falsata. Questo fatto deve essere tenuto in considerazione quando il peso del braccio di leva e dell'apparato di carico (P_g) supera del 3% il carico totale applicato. L'equazione seguente tiene conto di questo fatto.

$$G_I = \frac{12[P(3c - L) + P_g(3c_g - L)]^2}{16b^2L^2h^3E_{1f}}(a + \chi h)^2 \tag{50}$$

$$G_{II} = \frac{12[P(c + L) + P_g(c_g + L)]^2}{16b^2L^2h^3E_{1f}}(a + \chi h)^2 \tag{51}$$

c_g rappresenta la distanza tra il centro di gravità dell'apparato di carico e il cilindro centrale premente (vedi *Fig. C.6*).

Bibliografia

[1] Kim H.S., Lee S.J., Lee D.G. (1995) Development of a Strength Model for the Cocured Stepped Lap Joints under Tensile Loading. Composite Structures, 593-600.

[2] Lawcock G., Ye L., Mai Y.W., Sun C.T. (1997) The Effect of Adhesive Bonding between Aluminum and Composite Prepreg on the Mechanical Properties of Carbon-fiber-reinforced Metal Laminates. Composites Science and Technology, 35-45.

[3] Shin K.C., Lee J.J. (2000) Prediction of the Tensile Load-bearing Capacity of a Cocured Singl Lap Joint Considering Residual Thermal Stresses. J. Adhesion Sci. Technol. 14, 1691-1704.

[4] Cristanini Simone. (2002-2003). *Analisi del comportamento statico ed a fatica di giunzioni stampate ed incollate in composito tessuto.* Università degli studi di Padova: Tesi di laurea.

[5] Balzarini Elisa. (2003-2004). *Studio del comportamento a fatica di giunzioni stampate in composito tessuto.* Università degli studi di Padova: Tesi di laurea.

[6] Ferrari Michele. (2013-20014). *Stima della vita a fatica di giunzioni stampate in materiale composito.* Università degli studi di Padova: Tesi di laurea.

[7] Polloni Simone. (2003-2004). *Analisi del danneggiamento per fatica in giunzioni stampate in materiale composito.* Università degli studi di Padova: Tesi di laurea.

[8] Griffith, A.A., ‘‘The Phenomena of Rupture and Flow in Solids.” *Philosophical Transactions,* Series A,Vol. 221, 1920, pp. 163–198.

[9] Irwin, G.R., ‘‘Onset of Fast Crack Propagation in High Strength Steel and Aluminum Alloys.” *Sagamore Research Conference Proceedings,* Vol. 2, 1956, pp. 289–305.

[10] Inglis, C.E., “Stresses in a Plate Due to the Presence of Cracks and Sharp Corners.” *Transactions of the Institute of Naval Architects,* Vol. 55, 1913, pp. 219–241.

[11] Irwin, G.R., “Fracture Dynamics.” *Fracturing of Metals,* American Society for Metals, Cleveland, OH, 1948, pp. 147–166.

[12] Orowan, E., “Fracture and Strength of Solids.” *Reports on Progress in Physics,* Vol. XII, 1948, p. 185.

[13] Irwin, G.R., "Onset of Fast Crack Propagation in High Strength Steel and Aluminum Alloys."*Sagamore Research Conference Proceedings,* Vol. 2, 1956, pp. 289–305.

[14] E.F. Rybicki, M. K. (1977). *A finite element calculation of stress intensity factors by a modified crack clousire integral.* Engineering Fracture Mechanics, vol 9, pp: 931- 938.

[15] Raju, I. (1987). *Calculation of strain energy release rates with higher order and singular finite elements.* Eng Frac Mech vol 28, No. 3, pp: 251-274.

[16] H. Onses, A. A. (2003). computational analysis of geometric nonlinear effects in adhesively bonded single lap joints. *Composites: part B,* vol 34, pp: 417-427.

[17] P.A. Carraro, G. Meneghetti, M. Quaresimin, M. Ricotta. (2012). *Crack propagation analysis in composite bonded joints under mixed-mode (I+II) static and fatigue loading: experimental invetigation and phenomenological modelling.* Università di Padova: Journal of Adhesion Science and Technology.

[18] Hutchinson JW, Suo Z. Mixed mode cracking in layered materials. Adv Appl Mech 1992; 29:63–191.

[19] Gleich D. Stress analysis of structural bonded joints. Phd thesis, TU Delft; 2002.

[20] Renton JW, Vinson JR. On the behavior of bonded joints in composite material structures. Engng Fract Mech 1975;7(1):41–60.

[21] Liniecki A, Hsu TR, Li W. Fatigue strength of adhesive bonded aluminum joints. J Test Eval 1995;23(6):453–68.

[22] Imanaka M, Iwata T. Fatigue failure criterion of adhesively-bonded joints under combined stress conditions. J Adhes 1996;59(1–4):111–26.

[23] Imanaka M, Iwata T. Effect of adhesive layer thickness on fatigue strength of adhesively bonded butt, scarf and butterfly type butt joints. Int J Fract 1996;80(4):R69–76.

[24] Ishii K, Imanaka M, Nakayama H, Kodama H. Evaluation of the fatigue strength of adhesively bonded CFRP/metal single and single-step double-lap joints. Compos Sci Technol 1999; 59(11): 1675–83.

[25] Ratwani M, Kan HP. Compression fatigue analysis of fiber composites. J Aircraft 1981;18(6):458–62.

[26] Poursartip A, Chinatambi N. Fatigue damage development in notched (02/±45)s laminates. In: Lagace PA, editor. Composite materials: fatigue and fracture. ASTM STP 1012, vol. 2. Philadelphia: American Society for Testing and Materials; 1989. p. 45–65.

[27] Paris P, Gomez M, Anderson W. A rational analytic theory of fatigue. Trend Engng 1961; 13:9–14.

[28] Paris P. The fracture mechanics approach to fatigue. In: 10th Sagamore army materials research conference. Syracuse University Press; 1964. p. 107–32.

[29] Paris P, Erdogan F. A critical analysis of crack propagation laws. J Basic Engng 1963; 85(4):528–33.

[30] Mostovoy S, Ripling E. Flaw tolerance of a number of commercial and experimental adhesives. Polymer science and technology 9B. New York: Plenum Press; 1975. p. 513–62.

[31] Everett RA Jr. The role of peel stresses in cyclic debonding. Tech Rep NASA-TM-84504, NASA; 1982.

[32] Jablonski DA. Fatigue crack growth in structural adhesives. J Adhes 1980;11(2):125–43.

[33] Brussat TR, Chiu ST, Mostovoy S. Fracture mechanics for structural adhesive bonds – final report. Tech Rep AFML-TR-77-163, US Air Force Materials Laboratory; 1977.

[34] Roderick GL, Everett RA Jr., Crews JH Jr. Cyclic debonding of unidirectional composite bonded to aluminum sheet for constant-amplitude loading. Tech Rep NASA TN D-8126, NASA; 1976

[35] Mohlin T, Blom A, Carlsson L, Gustavsson A. Delamination growth in a notched graphite/epoxy laminate under compression fatigue loading. In: Johson W, editor. Delamination and debonding of materials. ASTM STP 876. Philadelphia: American Society for Testing and Materials; 1985. p. 168–88.

[36] Bathias C, Laksimi A. Delamination threshold and loading effect in fiber glass epoxy composite. In: Johnson W, editor. Delamination and debonding of materials. ASTM STP 876. Philadelphia: American Society for Testing and Materials; 1985. p. 217–37.

[37]Hojo M, Tanaka K, Gustafson CG, Hayashi R. Effect of stress ratio on near-threshold propagation of delimination fatigue cracks in unidirectional CFRP.Compos Sci Technol 1987;29(4):273–92.

[38] Atodaria DR, Putatunda SK, Mallick PK. A fatigue crack growth model for random fiber composites. J Compos Mater 1997;31(18):1838–55.

[39] Blanco Villaverde N. Variable mixed-mode delamination in composite laminates under fatigue conditions: testing & analysis. Ph.D. thesis, Universitat de Girona; 2004

[40] Brussat TR, Chiu ST, Mostovoy S. Fracture mechanics for structural adhesive bonds – final report. Tech Rep AFML-TR-77-163, US Air Force Materials Laboratory; 1977.

[41] Mall S, Johnson WS, Everett RA Jr. Cyclic debonding of adhesively bonded composites. Tech Rep NASA TM-84577, NASA; 1982.

[42] Ramkumar R, Whitcomb J. Characterization of mode I and mixed-mode delamination growth in T300/5208 graphite/expoxy. In: Johnson W, editor. Delamination and debonding of materials. ASTM STP 876. Philadelphia: American Society for Testing and Materials; 1985. p. 315–35.

[43] Kenane M, Benzeggagh ML. Mixed-mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites under fatigue loading. Compos Sci Technol 1997;57(5):597–605.

[44] Kardomateas GA, Pelegri AA, Malik B. Growth of internal delaminations under cyclic compression in composite plates. J Mech Phys Solids 1995;43(6):847–68.

[45] Asp LE, Sjögren A, Greenhalgh E. Delamination growth and thresholds in a carbon/epoxy composite under fatigue loading. J Compos Tech Res 2001;23(2):55–68.

[46] Quaresimin M, Ricotta M. Stress intensity factors and strain energy release rates in single lap bonded joints in composite materials. Compos Sci Technol 2006;66(5):647–56.

[47] Quaresimin M, Ricotta M. Life prediction of bonded joints in composite materials. Int J Fatigue 2006;28(10):1166–76.

[48]Giannis S, Hansen K, Martin RH. Accounting for the R-curve effects on the mode I fatigue delamination growth characterisation of unidirectional composites. In: 5th Annual

technical conference of the american society for composites, Dayton, Ohio, vol. 2; 2010. p. 983–1000.

[49] Murri GB. Evaluation of delamination onset and growth characterization methods under mode I fatigue loading. In: American society for composites,27th technical conference. Arlington, TX: DEStech Publications, Inc; 2012. p. 601–20.

[50] Chan W, Wang A. Free-edge delamination characteristics in S2/CE9000 glass/epoxy laminates under static and fatigue loads. In: Lagace PA, editor. Composite materials: fatigue and fracture. ASTM STP 1012, vol. 2. Philadelphia: American Society for Testing and Materials; 1989. p. 270–95.

[51] Sjögren A, Asp LE. Effects of temperature on delamination growth in a carbon/epoxy composite under fatigue loading. Int J Fatigue 2002;24(2–4):179–84.

[52] Shindo Y, Inamoto A, Narita F, Horiguchi K. Mode I fatigue delamination growth in GFRP woven laminates at low temperatures. Engng Fract Mech 2006;73(14):2080–90.

[53] Coronado P, Argüelles A, Viña J, Mollón V, Viña I. Influence of temperature on a carbon–fibre epoxy composite subjected to static and fatigue loading under mode I delamination. Int J Solids Struct 2012;49(21):2934–40.

[54] Burianek DA, Spearing SM. Delamination growth from face sheet seams in cross-ply titanium/graphite hybrid laminates. Compos Sci Technol 2001;61(2):261–9.

[55] Rans CD, Alderliesten RC, Benedictus R. Predicting the influence of temperature on fatigue crack propagation in fibre metal laminates. Engng Fract Mech 2011;78(10):2193–201.

[56] Russell A, Street K. Moisture and temperature effects on the mixed-mode delamination fracture of unidirectional graphite/epoxy. In: Johnson WS, editor. Delamination and debonding of materials. ASTM STP 876. Philadelphia: American Society for Testing and Materials; 1985. p. 349–70.

[57] Barret J.D., Foschi R.O., "Mode II Stress Intensity Factors for Cracked Wood Beams", *Eng. Fracture Mech.*, 9 (1977) 371.

[58] Russel A. J., Street K. N., "Factors Affetting the Interlaminar Fracture Energy of Graphite/Epoxy Laminates", *Progress in science and Engineering Composites*, Hayashi T., Kawata [3] K., Umekawa S. eds., ICCM-IV Tokyo, p.279 (1982).

[59] Bradley W. L., Presentation at ASTM Task Group Meeting, Committee D-30, Charleston, SC (April 30, 1986).

[61] Vu-Khanh T., "Crack Arrest Study in Mode II Delamination in composites", *Poly. Comp.*, 8:331 (1987).

[62] Crews J. H., Reeder J. R., "A Mixed Mode Bending Apparatus for Delaminations Testing", NASA TM 100662 (August 1988).

[63] Gillespie J. W., Carlsson L. A., Trethewey B. R., "Finite Element and Plate Theory Based Design and Data Reduction of the ENF Fracture Specimen", *Proceedings from the 2nd Conference of Composite Materials*, Technomic Publishing Co., Inc., Lancaster, PA , p.399 (1987).

[64] Timoshenko S. P., *Strength of Materials, Part. I* Krieger Publishing (1984).

[65] European Structural Integrity Society**.** *TC4 Protocol: The determination of the mode II fracture resistance, GIIC, of unidirectional fibre-composites using the calibrated end loaded split (C-ELS) test and an effective crack length approach.* 2009.

[66] A. J. Kinloch, Y. Wang, J. G. Williams and P. Yayla, "The Mixed-Mode Delamination of Fibre Composite Materials," Composites Science and Technology, Vol. 47, No. 3, 1993, pp. 225-237.

[67] Szekrényes, A., and József, U. (2006). "Comparison of some improved solutions for mixed-mode composite delamination coupons." *Composite Structures*, 72, 321-329.

Ringraziamenti

Ringrazio innanzitutto i miei genitori per avermi concesso la possibilità di studiare per tutti questi anni, spero di avere ripagato i loro sforzi con la soddisfazione derivante dal raggiungimento di questo importante traguardo. Ringrazio mio fratello per la sopportazione reciproca durante tutto questo tempo passato assieme sui libri, e mi congratulo con lui per la sua imminente laurea.

Ringrazio il mio relatore il Dott.Ing. Mauro Ricotta per la disponibilità, la gentilezza che mi ha sempre dimostrato e per i suoi preziosi aiuti durante tutti questi 6 mesi di tesi. Ringrazio l'ing. Nicola De Rossi e l'Ing. Paolo Andrea Carraro per avermi assistito durante le "trasferte" vicentine e Giacomo Mazzacavallo per avermi fatto apprendere l'arte della lucidatura dei provini.

Ringrazio tutte le persone che hanno condiviso assieme a me questo percorso di studi: Cente, per tutti i progetti fatti assieme e per la sua sempre grande disponibilità, Seglia per le girate in bici, per gli annunci su Subito e perché basta chiedere a lui per sapere sempre tutto di tutti, e ancora Ceck, Bise, Isma, il Warrior, Darietto, Nuzzo e chiunque altro abbia dimenticato per tutte le ore passate assieme in questi 5 anni universitari.

Ringrazio ancora Cesco per i momenti extra-universitari passati assieme.

Un ringraziamento speciale va alla mia ragazza Beatrice per essermi sempre stata vicino in questi anni di università, per le rassicurazioni reciproche che tutto andrà per il meglio prima di ogni esame, per tutti i momenti belli trascorsi insieme. Sono entusiasta di sapere che entrambi taglieremo questo importante traguardo nei prossimi giorni ed è per questo che mi congratulo con lei.

Grazie a tutti quelli che mi conoscono e che non ho citato.