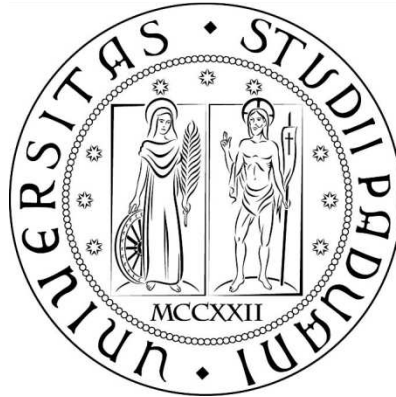


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE



TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA MECCANICA :

STIMA DELLA VITA A FATICA DI GIUNZIONI STAMPATE IN MATERIALE COMPOSITO

Relatore : Dott. Ing. Mauro Ricotta

Correlatore: Prof. Marino Quaresimin

Laureando : Michele Ferrari

ANNO ACCADEMICO 2013-2014

Indice

Capitolo 1: GIUNZIONI STEPPED-LAP E DINAMICA DELLA PROPAGAZIONE DEL DANNEGGIAMENTO A FATICA	- 1 -
1.1 INTRODUZIONE	- 1 -
1.2 GIUNZIONI CO-CURED	- 3 -
1.3 MATERIALE E METODOLOGIA	- 5 -
1.4 DINAMICA DELLA PROPAGAZIONE E DEL DANNEGGIAMENTO A FATICA.....	- 7 -
 Capitolo 2: ANALISI NUMERICHE	- 11 -
2.1 INTRODUZIONE	- 11 -
2.2 STRAIN ENERGY RELEASE RATE G (SERR)	- 12 -
2.3 MODELLO <i>STEPPED-LAP</i> JOINTS	- 14 -
2.4 REALIZZAZIONE MODELLO FEM	- 17 -
2.5 ANALISI FEM GEOMETRICAMENTE LINEARI	- 21 -
2.5.1 Prima campagna di simulazioni: “zona di giunzione integra”	- 21 -
2.5.2 Seconda campagna di simulazioni: “zona di giunzione danneggiata”	- 25 -
2.5.3 terza campagna prove: “variante della zona di giunzione danneggiata” ..	- 32 -
2.6 ANALISI FEM GEOMETRICAMENTE NON LINEARI.....	- 46 -
 Capitolo 3: ANALISI DELLE PROPAGAZIONI E COSTRUZIONE DELLA CURVA DI PARIS	- 59 -
3.1 INTRODUZIONE	- 59 -
3.2 MEDIA DELLE DELAMINAZIONI MEDIE	- 61 -
➤ Provino S03_21 $\Delta\sigma=119.7$ MPa (basso carico):	- 62 -
➤ Provino S03_22 $\Delta\sigma=119.7$ MPa (basso carico):	- 68 -

➤ Provino S03_19 $\Delta\sigma=153.9$ MPa (alto carico):.....	- 70 -
➤ Provino S03_20 $\Delta\sigma=153.9$ MPa (alto carico):.....	- 74 -
➤ Provino S03_24 $\Delta\sigma=153.9$ MPa (alto carico):.....	- 76 -
➤ Provino S05_18 $\Delta\sigma=140$ MPa (basso carico):.....	- 80 -
➤ Provino S05_19 $\Delta\sigma=140$ MPa (basso carico):.....	- 84 -
➤ Provino S05_14 $\Delta\sigma=200$ MPa (alto carico):.....	- 87 -
➤ Provino S05_17 $\Delta\sigma=200$ MPa (alto carico):.....	- 90 -
➤ Provino S08_18 $\Delta\sigma=202.5$ MPa (basso carico):.....	- 94 -
➤ Provino S08_19 $\Delta\sigma=202.5$ MPa (basso carico):.....	- 98 -
➤ Provino S08_20 $\Delta\sigma=202.5$ MPa (basso carico):.....	- 100 -
➤ Provino S08_16 $\Delta\sigma=282.6$ MPa (alto carico):.....	- 103 -
➤ Provino S08_17 $\Delta\sigma=282.6$ MPa (alto carico):.....	- 107 -
3.3 ANALISI DELL'AREA DI DANNEGGIAMENTO	- 112 -
➤ Provino S08_20 $\Delta\sigma=202.5$ MPa (basso carico):.....	- 114 -
➤ Provino S05_19 $\Delta\sigma=140$ MPa (basso carico):.....	- 119 -
➤ Provino S05_14 $\Delta\sigma=200$ MPa, Provino S03_24 $\Delta\sigma=200$ MPa (alto carico) : ..	- 123 -
➤ Provino S08_19 $\Delta\sigma=202.5$ MPa (basso carico):.....	- 131 -
➤ Provino S08_18 $\Delta\sigma=202.5$ MPa (basso carico):.....	- 134 -
3.4 ALTRE FORMULAZIONI DI ΔG_{eqv}	- 141 -
 Capitolo 4: ANALISI NUMERICHE SUL BI-MATERIALE	- 151 -
4.1 INTRODUZIONE	- 151 -
4.2 DETERMINAZIONE DELLE PROPRIETA' DEL MATERIALE	- 152 -
4.3 REALIZZAZIONE MODELLO FEM	- 152 -
4.4 ANALISI FEM GEOMETRICAMENTE NON LINEARI	- 158 -

Capitolo 5: ANALISI NUMERICHE SU GIUNTI STEPPED-LAP CON MESH GROSSOLANE	- 165 -
5.1 INTRODUZIONE	- 165 -
5.2 QUOTA DI RILASCIO DELL'ENERGIA DI DEFORMAZIONE	- 166 -
5.3 ANALISI FEM GEOMETRICAMENTE NON LINEARI.....	- 169 -
5.3.1 mesh grossolane primo tentativo:	- 177 -
5.3.2 mesh grossolane secondo tentativo:	- 179 -
5.3.3 mesh grossolane terzo tentativo:	- 180 -
 Capitolo 6: CONCLUSIONI	 - 185 -
 BIBLIOGRAFIA	 - 189 -
 Appendice A: APDL per la costruzione dei giunti stepped-lap.....	 - 191 -
 Appendice B: APDL per la realizzazione della tessitura del materiale composito per il provino S05_17.....	 - 251 -

SOMMARIO

La finalità di questo lavoro consiste nell'analizzare il danneggiamento e definire un modello di previsione della resistenza a fatica per giunzioni stampate in materiale composito utilizzando i concetti della Meccanica della Frattura in grado di fornire un valido aiuto al progettista per la valutazione della vita totale della giunzione ad un determinato livello di carico. Il lavoro è composto da una prima parte in cui sono state condotte analisi agli elementi finiti geometricamente lineari e non tramite l'utilizzo del pacchetto ANSYS 14.0 da cui sono stati ottenuti gli andamenti delle componenti dello Strain Energy Release Rates utilizzando la tecnica della Virtual Crack Closure Technique. Tali analisi hanno evidenziato come la propagazione avvenga a Modo misto (Modo I e Modo II). Successivamente sono stati riutilizzati i dati sulle propagazioni ottenuti in lavori precedenti per calcolare le velocità di propagazione al fine di costruire curve tipo Paris. 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} . È stata effettuata poi un'analisi bibliografica che illustra come alcune formulazioni di ΔG_{eqv} approssimino i dati sperimentali. Nella parte finale di questo lavoro è stata analizzata l'influenza della tessitura del materiale composito sulla propagazione delle delaminazioni e successivamente è stato proposto un metodo di verifica semplificato in ΔG_{TOT} valido solamente per questo tipo di giunzioni.

Capitolo 1: GIUNZIONI STEPPED-LAP E DINAMICA DELLA PROPAGAZIONE DEL DANNEGGIAMENTO A FATICA

1.1 INTRODUZIONE

La maggior parte delle strutture sono composte di parti costituenti, che necessitano di essere unite; le giunzioni rappresentano quasi sempre l'elemento più debole di un sistema.

I materiali in genere possono essere uniti mediante una molteplicità di metodi diversi. Le tecniche maggiormente utilizzate prevedono l'utilizzo di bulloni, rivetti o saldature ed ognuno di questi metodi presenta dei vantaggi e degli svantaggi.

Nei materiali compositi l'unione di due elementi può essere realizzata mediante bullonatura o rivettatura; in questi casi il carico viene trasmesso attraverso elementi metallici con sforzi prevalentemente di compressione sugli elementi collegati. Questo implica che gli elementi da unire devono essere forati; la presenza di un foro richiede un adeguato dimensionamento della zona circostante per assicurare la resistenza alla concentrazione delle tensioni che si verificano in tale area, inoltre si procura un aumento di peso della struttura data dalla presenza di bulloni o rivetti. Vi è però il vantaggio di poter smontare e rimontare le parti unite e di eseguire eventuali ispezioni per controllare lo stato del pezzo.

Un altro modo per ottenere l'unione di due elementi in materiale composito è l'incollaggio mediante adesivo nel quale il carico viene trasmesso attraverso le superfici incollate degli elementi con sforzi prevalentemente di taglio sull'adesivo. Tale metodo ha il vantaggio di evitare i problemi precedentemente esposti ma presenta i seguenti svantaggi:

- I. La dipendenza della durata dell'incollaggio dalle condizioni in cui esso è stato eseguito;
- II. La limitata resistenza dell'adesivo nell'uso in condizioni estremamente critiche, soprattutto dovute al calore;

- III. Speciali fasi di lavorazione per la preparazione dei componenti prima dell'incollaggio e per l'applicazione dell'adesivo;
- IV. Speciali condizioni ambientali che includono spesso periodi di cottura prolungati a temperatura e pressione costanti. La necessità di speciali attrezzature per l'incollaggio può inoltre costituire un notevole disincentivo dal punto di vista finanziario, che talvolta può completamente annullare qualsiasi risparmio, a dispetto delle difficoltà realizzative.

Nella realtà pratica accade raramente che un giunto sia sottoposto ad un tipo solo di sollecitazione, ma piuttosto ad una combinazione di diversi tipi in seguito alle particolari applicazioni oppure per motivi geometrici, quindi ci sono complicazioni aggiuntive nella progettazione di un giunto. Le geometrie di giunto più utilizzate nella pratica applicativa sono:

- a. Single-lap joints, giunti a semplice sovrapposizione. Studiati in modo molto dettagliato e sono quello più comunemente usati nelle applicazioni a basso carico. Sottoporre un giunto a semplice sovrapposizione ad una forza di trazione causa una distribuzione non uniforme delle tensioni nella zona incollata, che presenta picchi di tensione ad entrambi i lati della sovrapposizione. Queste concentrazioni di tensione sono causate dalla flessione delle superfici sovrapposte sotto forze applicate in modo eccentrico. Carichi eccentrici, tipici per questi giunti, producono tensioni di flessione nell'incollaggio che tendono ad aprire la zona incollata. Modifiche pratiche di un giunto a singola sovrapposizione che si sono mostrate in grado di aumentare la resistenza sono:
 - b. Double-lap joints, giunzione a doppia sovrapposizione;
 - c. Single strap joints, giunzione a semplice coprigiunto;
 - d. Stepped-lap joints, giunzioni a gradino. Oggetto di questo lavoro di tesi, rappresentano una soluzione pratica al problema di unire i pezzi di grande spessore in quanto tali giunti permettono il trasferimento di elevati carichi tra gli aderenti;
 - e. Scarf joints, giunzione ad ammorsatura;
 - f. tapered single-lap joints, giunzioni a sovrapposizione rastremata che consentono di attenuare gli effetti dell'eccentricità del carico.

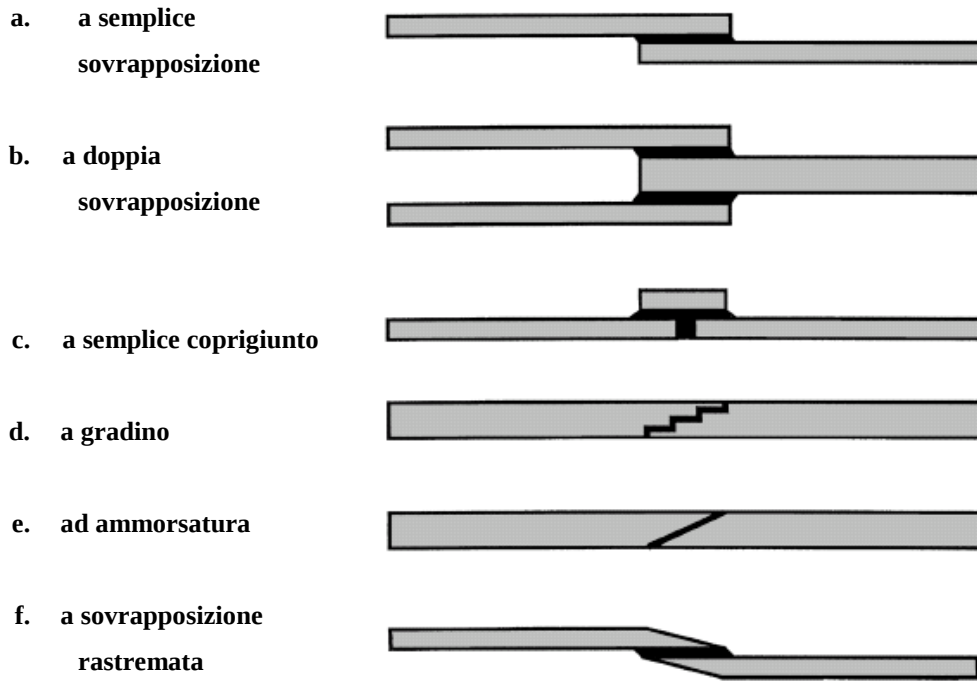


Figura 1.1: principali tipologie di giunto

1.2 GIUNZIONI CO-CURED

In alternativa all'unione meccanica e all'incollaggio con adesivi è disponibile una diversa soluzione tecnologica che permette l'unione tra due elementi in composito o tra un elemento in composito e un altro materiale: è la realizzazione della giunzione in fase di stampaggio del composito definita *co-curing*. Questa è una tecnica molto efficiente in quanto diversamente da una procedura per incollaggio con adesivo, sia la procedura di fabbricazione del laminato sia la procedura di incollaggio avvengono simultaneamente.

Il metodo di unione *co-curing* non richiede nessun tipo di adesivo, ne richiede trattamenti di superficie dell'aderendo composito, poiché è la resina eccedente che funge da adesivo. Tale tecnica di collegamento viene utilizzata molto spesso con la presenza di materiali pre/impregnati abbinata al processo di stratificazione a sacco vuoto VACUUM-BAG (Figura 1.2) soprattutto nel caso di componenti monoscocca.

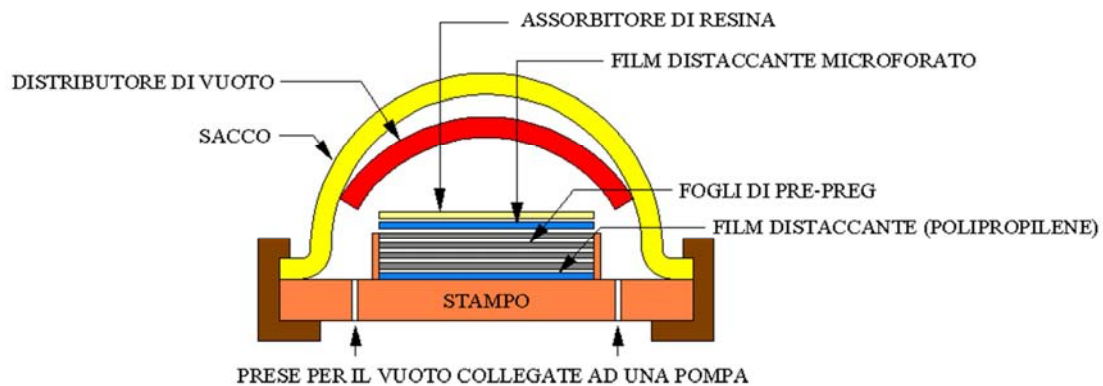


Figura 1.2: Vacuum bag per pannello con giunzione stepped

Sullo stampo, in questo caso piano, si deposita un foglio di distaccante sul quale posare poi i diversi strati di pre/preg necessari per formare il laminato; l'accoppiamento fibre-resina è perfetto anche se in realtà è sempre presente un eccesso di resina, una parte verrà utilizzata per creare l'unione tra i due elementi e la restante parte dovrà 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 si eliminano eventuali bolle d'aria e tracce di solvente ed applicando una pressione uniforme sul materiale composito si porta alla compattazione degli strati. Per migliorare ulteriormente le prestazioni del materiale composito si effettua un adeguato ciclo termico, ciclo di pressione e temperatura, in autoclave.

La procedura descritta offre quindi i seguenti vantaggi:

- ✓ per le giunzioni adesive la selezione del tipo di adesivo si basa sulle proprietà meccaniche e sull'ambiente in cui sarà esposto. Il principale ruolo dell'adesivo è quello di trasferire il carico da un aderendo all'altro attraverso l'azione di taglio. Per questo motivo le caratteristiche di tensione e deformazione sono importanti per

il progettista. Tipicamente gli adesivi possono essere fragili e quindi più resistenti, rigidi ma con limitato comportamento visco-elastico o più duttili. Poiché l'unione della giunzione *co-curing* 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;

- ✓ minori costi di fabbricazione dato che è richiesto minor adesivo e sono ridotte le procedure di fabbricazione.

1.3 MATERIALE E METODOLOGIA

I dati analizzati in questo lavoro di tesi derivano da prove effettuate su campioni ottenuti da un tessuto prepreg SEAL - TEXIPREG[®] CC206 – ET442 costituito da resina epossidica tenacizzata CIBA 5021 rinforzata con un tessuto di fibra di carbonio T300 twill 2x2 con frazione di volume di fibre $V_f=60\%$. I pannelli sono stati prodotti con due lay-up, $[0]_8$ e $[0_2/45_2]_s$, con la tecnologia del sacco a vuoto con un ciclo di 60 minuti a 120°C e una pressione di 0,6 MPa. Nella zona centrale dei pannelli sono state realizzate le giunzioni secondo lo schema riportato in figura seguente facendo variare, per le diverse serie, la lunghezza di sovrapposizione tra i singoli strati: gli *overlap* sono stati rispettivamente di 3, 5 e 8 mm. Dai pannelli, mediante taglio con mola diamantata, sono stati ottenuti i campioni da testare:

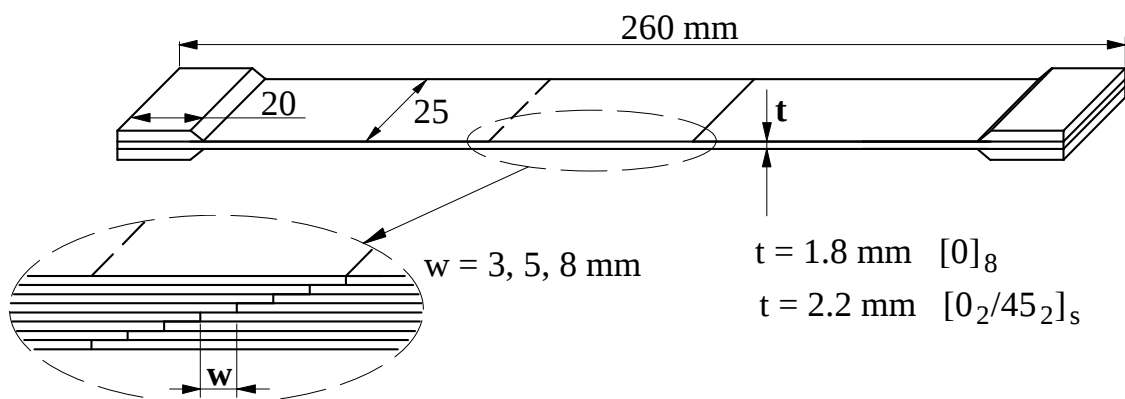


Figura 1.3: geometria delle giunzioni e schema di sovrapposizione

I dati qui analizzati derivano da prove effettuate su una macchina servoidraulica MTS 809 con cella di carico 10/100 kN operante in controllo di spostamento, per determinare le caratteristiche statiche del materiale, in controllo di forza per le prove a fatica. In particolare, i test statici sono stati eseguiti applicando una rampa in controllo di spostamento con velocità della traversa pari a 2 mm/min, mentre, per quelle a fatica si sono scelte due modalità distinte di prova: nella prima, finalizzata all'ottenimento delle curve di fatica convenzionale, le prove sono state eseguite in continuo fino alla rottura (separazione completa) dei campioni; nella seconda, finalizzata allo studio dell'evoluzione del danneggiamento a fatica mediante osservazione al microscopio ottico, le prove sono state realizzate a blocchi di carico successivi fino a rottura, ad ampiezza di sollecitazione costante e al termine di ogni blocco di carico i bordi del campione, precedentemente lucidati, sono stati osservati al microscopio ottico. I blocchi di carico sono stati scelti in base all'ampiezza di sollecitazione applicata e la relativa vita a fatica prevista: in generale sono stati eseguiti blocchi di carico di durata limitata all'inizio e alla fine della prova in modo da poter osservare le fasi iniziali e finali di danneggiamento. Per valutare l'eventuale effetto del livello di tensione applicato e quindi del numero di cicli a rottura, sono state eseguite prove di fatica a basso ed alto numero di cicli per ogni lay-up e lunghezza di sovrapposizione. Sia le prove in continuo sia quelle a blocchi di carico sono state realizzate in controllo di forza, scegliendo un forma d'onda sinusoidale ed una frequenza variabile da 10 a 15 Hz in funzione del lay-up e del livello di tensione applicato.

Per quanto riguarda le prove statiche si è evidenziata una notevole riduzione della resistenza a trazione rispetto al materiale base a causa della concentrazione delle tensioni che si ha nella zona di giunzione. Infatti quest'ultima costituisce sia una discontinuità delle fibre, limitando quindi la trasmissione del carico, sia una zona in cui il campo di tensione locale presenta una singolarità a causa degli effetti geometrici e delle diverse proprietà elastiche dei materiali nella zona di giunzione (strati rinforzati e zone ricche di resina). Per entrambi i lay-up si sono registrati aumenti della resistenza statica della giunzione di circa il 15% passando da 3 a 5 mm per quanto riguarda l'*overlap*, mentre non si sono riscontrati aumenti significativi nel passaggio da 5 a 8 mm. ([1] Cristanini Simone, 2002-2003) ([15] S. Cristanini M. Quaresimin M. Ricotta, 2001)

Dall'analisi delle curve a fatica si nota subito una netta influenza della lunghezza di sovrapposizione sulla resistenza a fatica della giunzione, con un sensibile incremento della resistenza all'aumentare della sovrapposizione tra gli strati, in particolare per il lay-up [0]₈

([1] Cristanini Simone, 2002-2003) ([15] S. Cristanini M. Quaresimin M. Ricotta, 2001). L'influenza della lunghezza di sovrapposizione sulla resistenza a fatica può essere spiegata sulla base delle modalità di evoluzione del danneggiamento per fatica della giunzione caratterizzato principalmente da delaminazione interlaminare. A differenza di quanto riscontrato per le prove statiche, nella fatica sembra non si giunga mai ad una saturazione degli effetti della lunghezza di sovrapposizione; è quindi ipotizzabile che la resistenza a fatica aumenti per *overlap* superiori agli 8 mm. Questo porterebbe a situazioni di scarso interesse applicativo per le notevoli complicazioni operative che si dovrebbero introdurre in fase di produzione dei laminati.

1.4 DINAMICA DELLA PROPAGAZIONE E DEL DANNEGGIAMENTO A FATICA

In questo paragrafo viene richiamato lo studio precedentemente condotto da S. Cristanini sulla dinamica della propagazione del danneggiamento a fatica relativo alle giunzioni stampate *stepped-lap* in materiale composito realizzate con resina epossidica rinforzata con tessuto di fibra di carbonio a matrice polimerica ([1] Cristanini Simone, 2002-2003). Tramite analisi microscopiche si sono potuti individuare i principali meccanismi di danneggiamento per fatica (Figura 1.4):

- cricca trasversale in corrispondenza delle zone di giunzione dei diversi strati;
- delaminazione interlaminare parallela alla direzione di applicazione del carico.

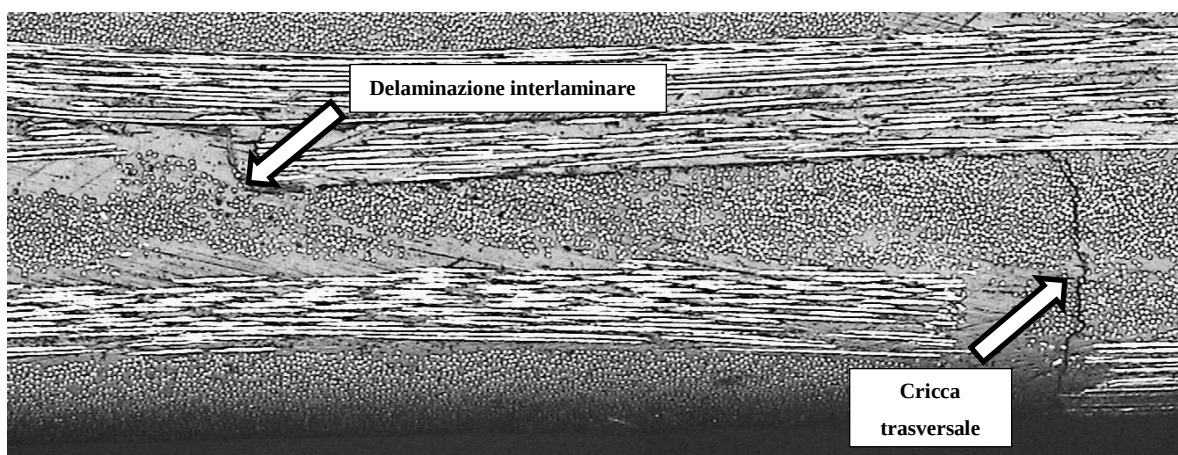


Figura 1.4 : principali meccanismi di danneggiamento a fatica della giunzione ([1] Cristanini Simone, 2002-2003)

Questi due meccanismi sono caratterizzati da due fasi successive: innesco e propagazione.

I giunti stampati analizzati si differenziano per lay-up $[0]_8$, $[0_2/45_2]_s$ e per lunghezza di sovrapposizione 3, 5, 8 mm sollecitati a fatica.

Quello che si evince dalle analisi microscopiche per quanto riguarda il lay-up $[0]_8$ è che il danneggiamento ha inizio nelle lamine più esterne con la comparsa di cricche trasversali in corrispondenza della zona di giunzione, per le quali le fasi di innesco e propagazione sono praticamente contemporanee, cioè nel momento in cui la cricca si forma essa propaga velocemente fino ad incontrare l'interfaccia con lo strato successivo e questo accade già dopo i primi cicli di carico. Gli apici di questa cricca costituiranno poi punti d'innesco per la delaminazione interlaminare che propagando, con il procedere della vita a fatica, tenderà ad unire le varie cricche trasversali formatesi negli strati più interni per i quali appunto costituiscono il meccanismo di danneggiamento dominante (Figura 1.5). Il cedimento della giunzione si è osservato avvenire, mediamente, quando la delaminazione propaga fino al secondo o terzo strato.

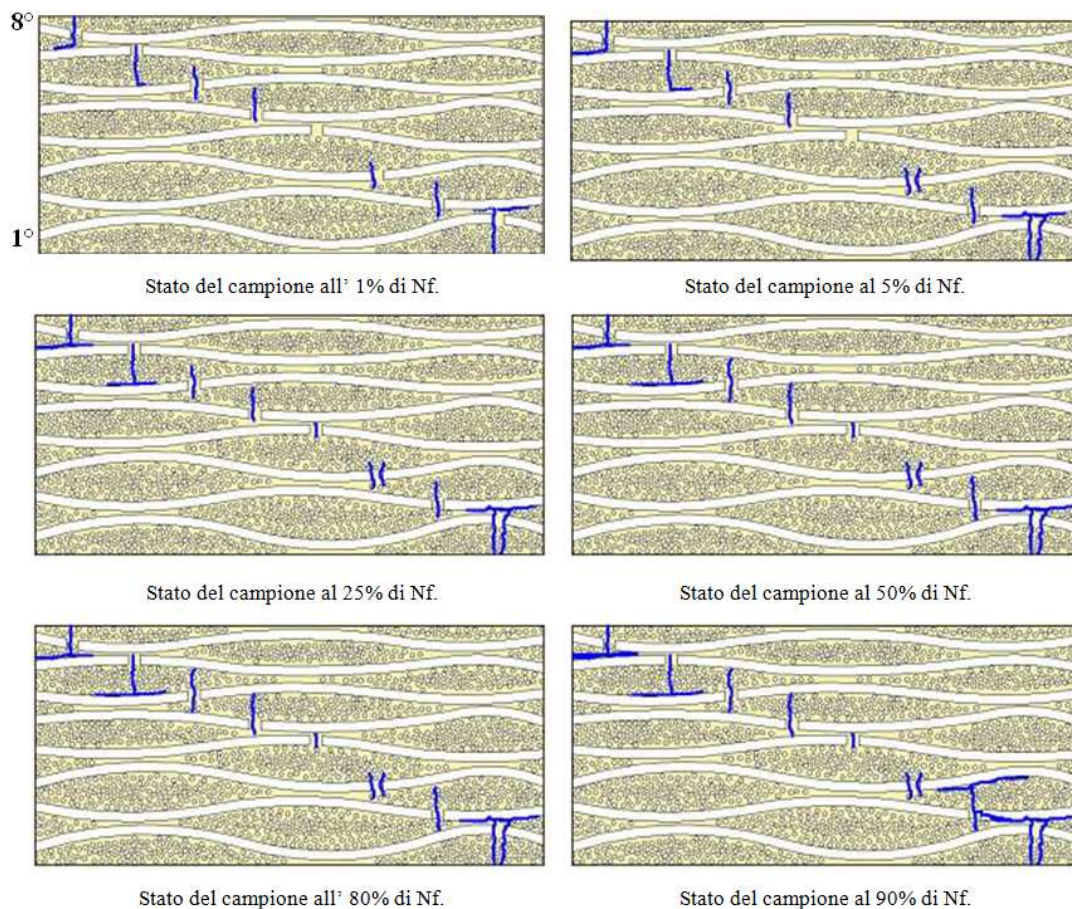


Figura 1.5: schematizzazione del danneggiamento a fatica, lay-up $[0]_8$ ([1] Cristanini Simone, 2002-2003)

Essendo quindi la delaminazione interlaminare il meccanismo che controlla il cedimento della giunzione, è possibile giustificare l'influenza della lunghezza di sovrapposizione sulla resistenza a fatica: maggiore è l'*overlap*, maggiore è la frazione di vita necessaria per la propagazione della delaminazione fino alla sua lunghezza critica.

Per quanto riguarda il lay-up $[0_2/45_2]_s$, il danneggiamento ha inizio ancora una volta con la formazione di cricche trasversali nella zona di giunzione degli strati più esterni a 0° , ed evolve poi in maniera diversa negli strati esterni ed interni della giunzione. Il danneggiamento degli strati esterni è caratterizzato ancora una volta dalla propagazione di una delaminazione longitudinale originatasi dagli apici delle cricche trasversali presenti nella zona di giunzione. All'aumentare della vita a fatica il danneggiamento evolve e la delaminazione propaga all'interno degli strati a 45° , caratterizzati da una ridotta capacità di resistenza, portando ad un cedimento quasi immediato. È importante sottolineare che il cedimento degli strati a 45° è dovuto alla propagazione della cricca innescata nelle lamine a 0° e non per evoluzioni di fenomeni di danneggiamento in essi comparsi: durante tutta la vita a fatica non si registra infatti la comparsa di cricche trasversali nella zona di giunzione con lamine orientate a 45° ([1] Cristanini Simone, 2002-2003) ([15] S. Cristanini M. Quaresimin M. Ricotta, 2001).

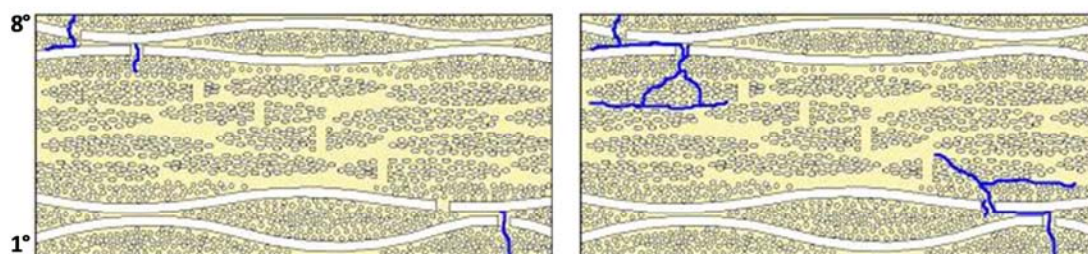


Figura 1.6: schematizzazione del danneggiamento a fatica, lay-up $[0_2/45_2]_s$ ([1] Cristanini Simone, 2002-2003)

Anche in questo caso la delaminazione interlaminare è il meccanismo di danneggiamento predominante con percentuali di vita spesa superiori al 90%.

Nell'ottica di definire modelli previsionali basati sull'analisi sperimentale della meccanica del danneggiamento è possibile dunque ipotizzare un criterio basato solamente sulla previsione della propagazione della delaminazione fino ad una lunghezza critica.

Capitolo 2: ANALISI NUMERICHE

2.1 INTRODUZIONE

L'applicazione di carichi ciclici ad un composito può dare luogo a rottura anche quando la massima sollecitazione risulta essere inferiore alla resistenza statica del materiale (fatica). Una delle modalità più comuni di danneggiamento osservate nei materiali compositi è la delaminazione, la quale consiste nella separazione degli strati rinforzati di fibra che impaccati insieme costituiscono il laminato. Sostanzialmente si tratta dell'inizio e della successiva crescita della cricca nel piano interlaminare tra gli strati della struttura.

Il formarsi delle delaminazioni è causato da sollecitazioni di diversa tipologia i cui effetti vengono spesso amplificati dalle caratteristiche del componente; si possono individuare tre casi elementari di sollecitazione a cui corrispondono tre modi di propagazione della cricca:

- a) Modo I (opening mode) ;
- b) Modo II (sliding mode) ;
- c) Modo III (tearing mode).

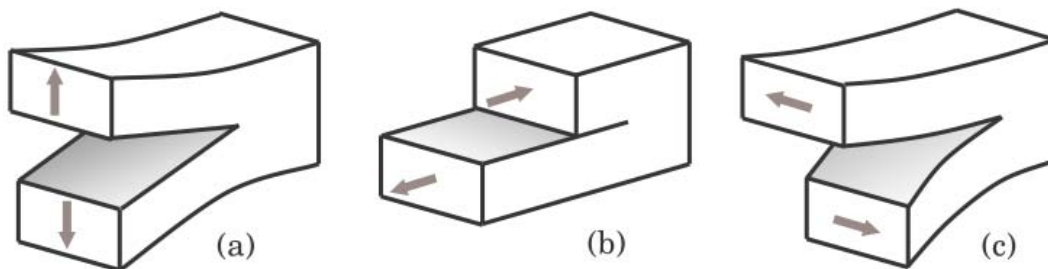


Figura 2.1 principali modi di propagazione della cricca ([2] Blanco, 2004)

È opportuno far presente che nella realtà difficilmente una frattura è causata da uno solo dei tre modi elencati, bensì dalla combinazione di essi.

2.2 STRAIN ENERGY RELEASE RATE G (SERR)

Gli approcci agli elementi finiti, nella meccanica della frattura, possono basarsi indifferentemente su un metodo diretto oppure indiretto. Il metodo diretto consiste nella determinazione del SIF (Stress Intesity Factor, K), calcolato direttamente dalla soluzione; mentre il metodo indiretto consiste nella determinazione del SERR (Strain Energy Release Rate, G), che rappresenta il tasso di rilascio dell'energia di deformazione necessaria per la formazione di una nuova entità di superficie di cricca, e quindi poi nella valutazione del SIF. Parlando di frattura interlaminare nei materiali compositi è consuetudine prendere in considerazione la quota di rilascio dell'energia di deformazione G; essa è l'energia rilasciata dal materiale durante la rottura ed è dovuta ad una infinitesima estensione di una delaminazione ([3] Indrio M., 2001-2002). G può essere calcolato con la seguente equazione :

$$G = \frac{dW}{da} - \frac{dU}{da} \quad (2.1)$$

dove W è il lavoro fatto dalle forze esterne per unità di spessore, U è l'energia di deformazione ed a è la lunghezza della cricca. La determinazione della quota di rilascio di energia di deformazione è utilizzata per prevedere il cedimento del materiale composito; tale valore viene calcolato utilizzando dei metodi che approssimano i casi di sollecitazione a cui sono associati i modi di propagazione Modo I, Modo II, Modo misto (combinazione del Modo I e del Modo II), invece il Modo III ha poca influenza nel danneggiamento del materiale e per tale motivo viene trascurato. Questi permettono di determinare il valore critico G_c detto anche tenacità (toughness), e si parla infatti di tenacità a frattura interlaminare (interlaminar fracture toughness).

Per il calcolo di G sono stati proposti dei metodi numerici basati sul calcolo agli elementi finiti fondati sulla teoria formulata da Irwin, secondo al 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 ([4] E.F. Rybicki, 1977). Considerando un sistema di riferimento polare centrato sull'apice della cricca, questa affermazione di può esprimere attraverso la seguente relazione:

$$G = \lim_{\Delta a \rightarrow 0} \frac{1}{2\Delta a} \int_0^{\Delta a} \sigma_y(\Delta a - r, 0) \bar{v}(r, \pi) dr + \lim_{\Delta a \rightarrow 0} \frac{1}{2\Delta a} \int_0^{\Delta a} \tau_{xy}(\Delta a - r, 0) \bar{u}(r, \pi) dr \quad (2.2)$$

dove i due contributi rappresentano rispettivamente il tasso di energia rilasciata in Modo I e in Modo II, σ_y e τ_{xy} sono le tensioni agenti all'apice della cricca mentre $\bar{v}$ e $\bar{u}$ sono i relativi spostamenti di apertura (opening) e scorrimento (sliding) tra i punti delle facce della cricca e Δa è l'estensione infinitesima della cricca all'apice della stessa.

Si può quindi scrivere:

$$G_I = \lim_{\Delta a \rightarrow 0} \frac{1}{2\Delta a} \int_0^{\Delta a} \sigma_y(\Delta a - r, 0) \bar{v}(r, \pi) dr \quad (2.3)$$

$$G_{II} = \lim_{\Delta a \rightarrow 0} \frac{1}{2\Delta a} \int_0^{\Delta a} \tau_{xy}(\Delta a - r, 0) \bar{u}(r, \pi) dr \quad (2.4)$$

Nell'approccio numerico agli elementi finiti si può pervenire alla valutazione dei due contributi tramite il calcolo delle forze e degli spostamenti nodali come indicato in figura:

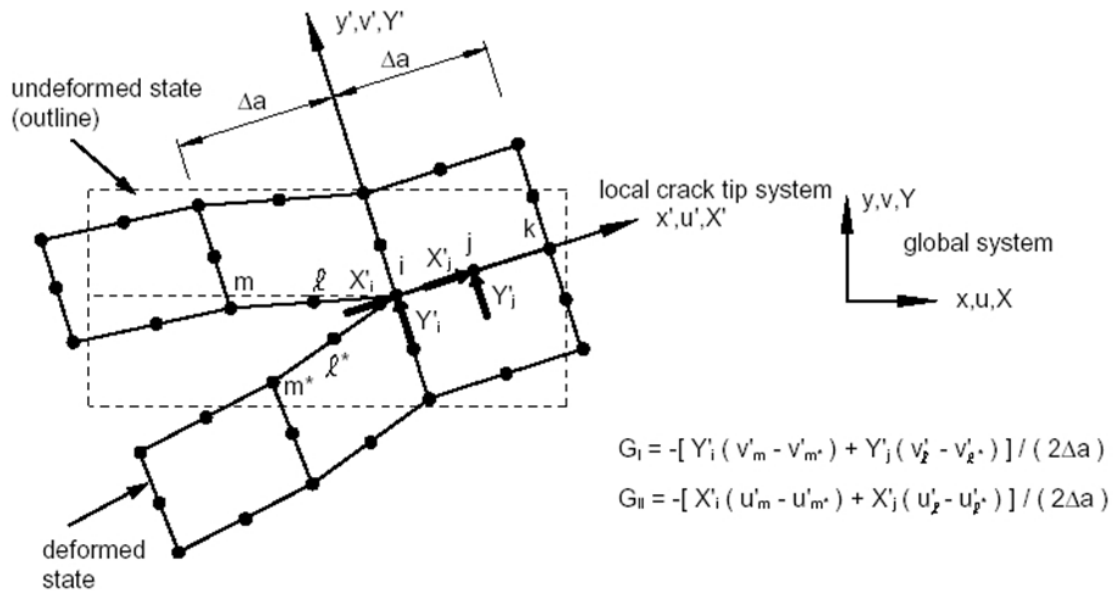


Figura 2.2: Virtual Crack Closure Technique (VCCT)

Questo metodo è detto Virtual Crack Closure Technique (VCCT) ([4] E.F. Rybicki, 1977; [5] Raju, 1987) e permette, attraverso una singola analisi di determinare entrambi i contributi GI e GII:

$$G_I = -\frac{1}{2\Delta a} \cdot [Y'_i(v'_m - v'_{m*}) + Y'_j(v'_l - v'_{l*})] \quad (2.5)$$

$$G_{II} = -\frac{1}{2\Delta a} \cdot [X'_i(u'_m - u'_{m*}) + X'_j(u'_l - u'_{l*})] \quad (2.6)$$

Nelle formule (2.5) e (2.66) 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.

2.3 MODELLO STEPPED-LAP JOINTS

In questo paragrafo vengono analizzati i modelli utilizzati nelle analisi agli elementi finiti eseguiti mediante l'utilizzo del codice ANSYS 14.0.

La geometria analizzata è quella dei giunti *stepped-lap* con lay-up $[0]_8$ (Figura 2.3), in tre configurazioni, differenti per lunghezza di sovrapposizione w (overlap) (Tabella 2.1).

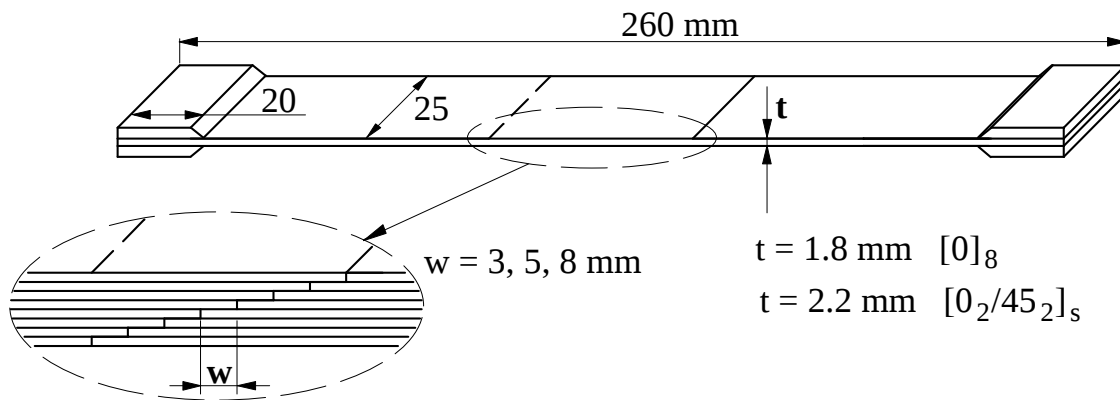


Figura 2.3: geometria giunti stepped ([1] Cristanini Simone, 2002-2003)

LAY-UP	OVERLAP W [mm]
[0] ₈	3
	5
	8

Tabella 2.1: overlap analizzati

Tali giunti sono realizzati con tecnologia produttiva Vacuum bag più autoclave, attraverso una procedura co-curing che realizza l'incollaggio sfruttando la resina in eccesso dai pre-impregnati.

Per la modellazione del giunto sono stati utilizzati elementi tipo PLANE 183 isoparametrici ad 8 nodi, nelle condizioni di deformazione piana (plane strain) e materiale ortotropo con caratteristiche uguali a quelle dei giunti testati (Tabella 2.2) :

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

Tabella 2.2: caratteristiche elastiche del giunto

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. Per ognuna delle tre configurazioni sono stati analizzati due diversi livelli di carico, basso carico ed alto carico (Tabella 2.3): dove con alto carico si indica una sollecitazione per cui la vita a fatica attesa si aggira attorno ai 50000÷100000 cicli, mentre con basso carico si indica una sollecitazione per cui la vita a fatica attesa si aggira attorno ai 2000000 cicli.

LAY-UP	OVERLAP W [mm]	BASSO CARICO [MPa]	ALTO CARICO [MPa]
[0] ₈	3	119.7	153.9
	5	140	200
	8	202.5	282.6

Tabella 2.3: livelli di carico analizzati

La cricca è stata modellata all'interfaccia lungo le facce di giunzione del laminato, come l'attività sperimentale ha dimostrato avvenire; inoltre la cricca è presente su entrambe le estremità della zona di giunzione ed avanza in egual misura su entrambi i lati (Figura 2.4):

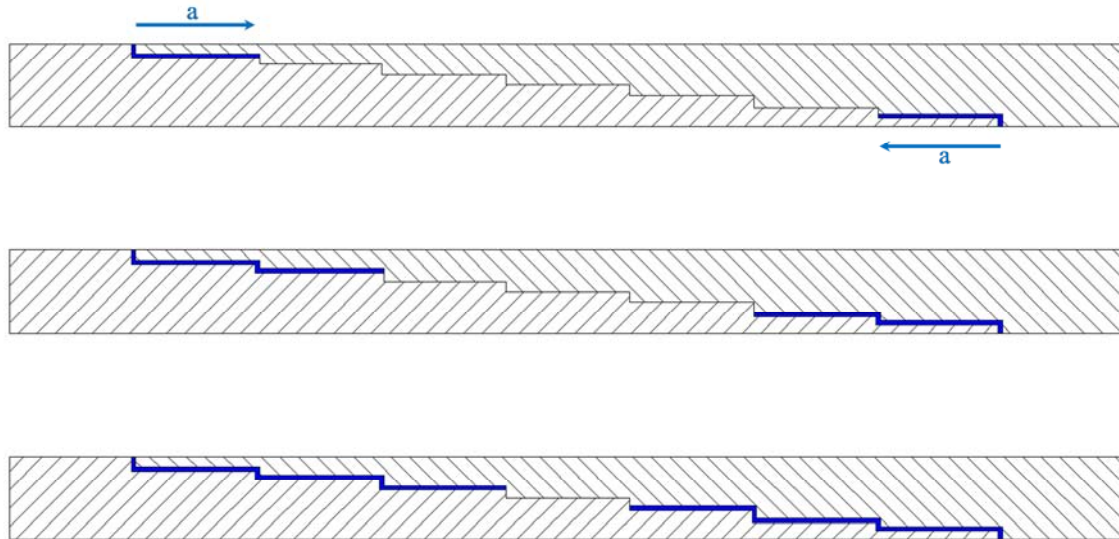


Figura 2.4: schematizzazione della propagazione della delaminazione nella zona di giunzione

Sono dunque stati creati tre file log, adeguatamente parametrizzati, in grado di seguire la propagazione della cricca lungo la prima, la seconda e la terza interfaccia sulle sette totali, assumendo che il passaggio da un'interfaccia all'altra avvenisse 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 (riportati in appendice A).

Per il calcolo di G si è quindi utilizzata la tecnica del VCCT, la quale permette di ottenere con una singola analisi i valori di G_I e G_{II} per una certa propagazione della cricca una volta determinate le forze dei nodi che seguono l'apice nella direzione di propagazione e gli spostamenti dei nodi precedenti l'apice della cricca (Figura 2.2). Oltre a tali valori, i diversi file log 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:

$$G_{TOT,ext} = \frac{P^2}{2B} \frac{\partial c}{\partial a} \quad (2.7)$$

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 equazione, oltre a fornire una verifica del risultato ottenuto tramite la tecnica del VCCT, la quale utilizza parametri strettamente locali, permette di effettuare una misurazione di quanto succede localmente, e cioè all'apice della cricca, tramite l'utilizzo di parametri globali come il carico applicato e la variazione di cedevolezza globale del pezzo.

2.4 REALIZZAZIONE MODELLO FEM

Si procede dunque con la realizzazione del modello agli elementi finiti tramite codice ANSYS 14.0. Al fine di costruire un modello che permetta nelle analisi successive di seguire al meglio possibile il reale comportamento del giunto, e cioè la propagazione della delaminazione lungo le varie interfacce, si sono modellate separatamente le due componenti del giunto (giunto SX Figura 2.5, giunto DX Figura 2.6):

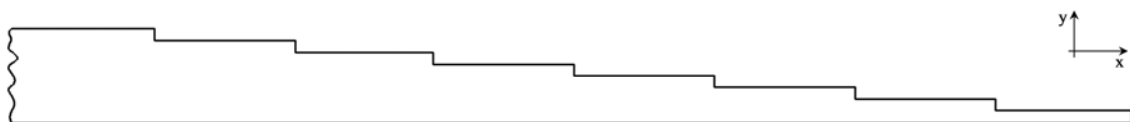


Figura 2.5: giunto SX (zona di giunzione)



Figura 2.6: giunto DX (zona di giunzione)

Le due “scalinate”, e quindi le linee e i nodi che la costituiscono, sono, ovviamente, sovrapposte nel modello agli elementi finiti e perciò la zona di giunzione presenta linee e nodi doppi e coincidenti, ma a causa della loro distinta appartenenza sono del tutto sconnessi Figura 2.7:

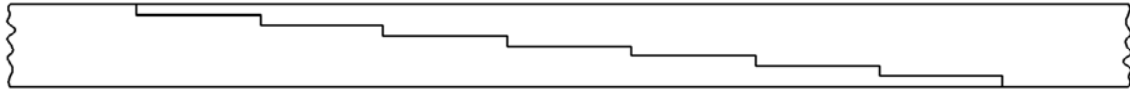


Figura 2.7: giunto (zona di giunzione)

L'unione di queste e quindi la creazione della zona di giunzione vera e propria del giunto è stata realizzata tramite l'impiego di set di coupled degrees of freedom, associati ai g.d.l. desiderati, per ogni coppia di nodi giacente sulla scalinatura, nella quale un nodo appartiene al giunto SX e l'altro al giunto di DX Figura 2.8 :

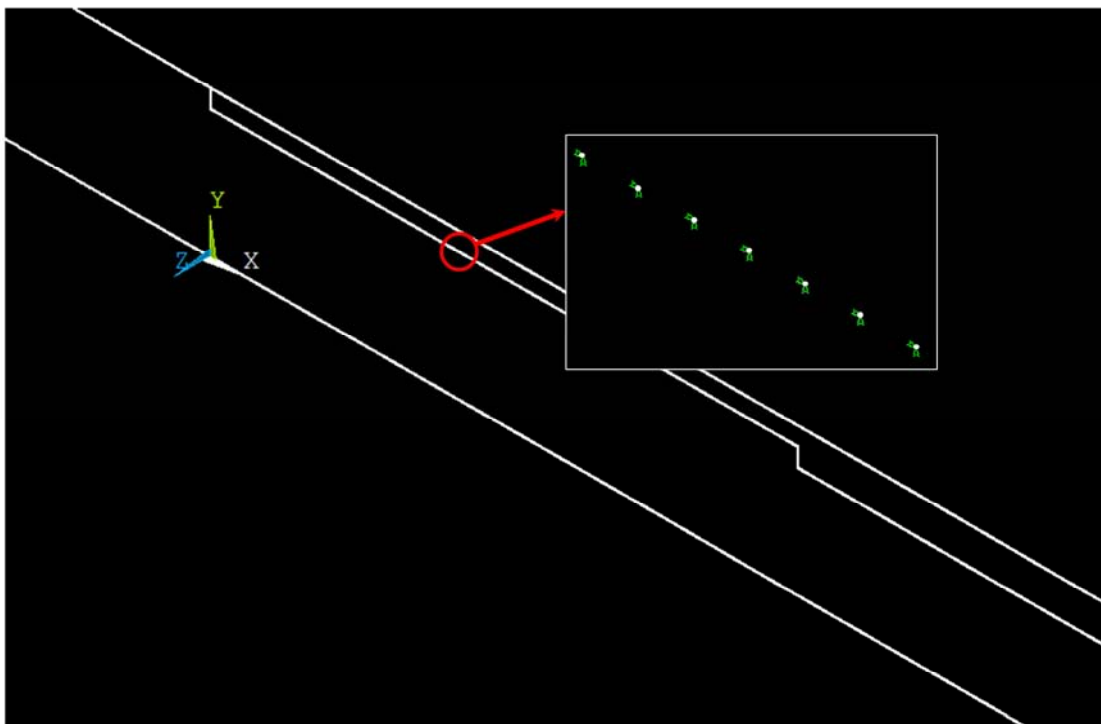


Figura 2.8: coupled sets degrees of freedom nella zona di giunzione

Con questa operazione ad ogni nodo appartenente al giunto SX ed al suo corrispettivo, appartenente al giunto DX, sono associati gli stessi spostamenti (che nel nostro caso sono

lungo l'asse x ed y essendo in plane strain), realizzando di fatto la continuità strutturale. La rimozione controllata e progressiva di questi set permette di ricreare la cricca e quindi di seguire poi la propagazione della delaminazione lungo le varie interfacce. L'attribuzione ai nodi dei set di coupled degrees of freedom può avvenire, ovviamente, solo una volta che le varie aree costituenti il modello siano state meshate opportunamente. A tal riguardo sono state eseguite preliminarmente 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. Queste analisi sono state condotte per un giunto con lunghezza di sovrapposizione w pari a 3, lunghezza della cricca orizzontale di 0.2 mm e tensione applicata pari a 119.7 MPa per varie dimensioni dell'elemento vicino all'apice della cricca.

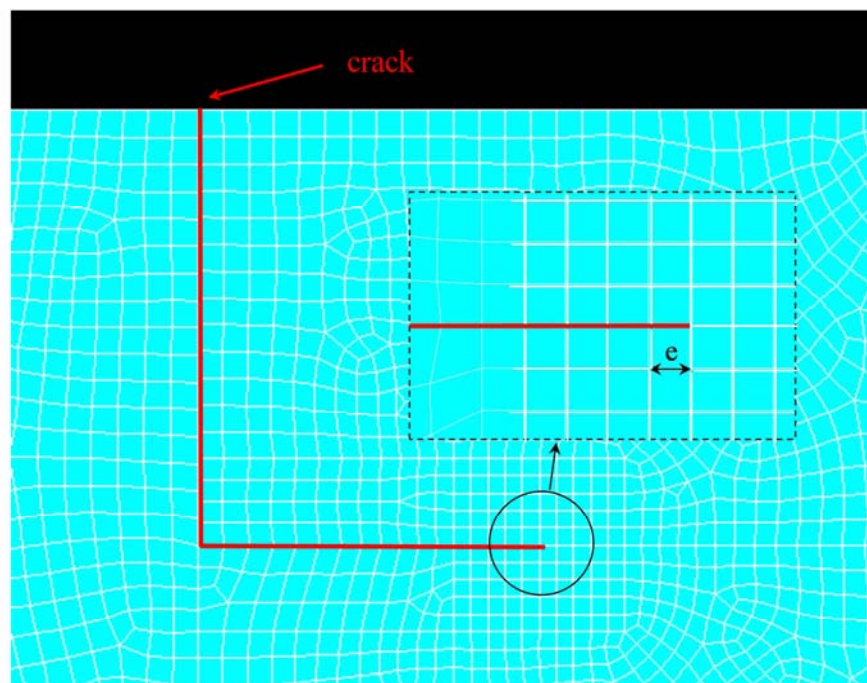


Figura 2.9: element size all'apice della cricca

Come si può notare dal grafico successivo (Figura 2.10) i valori di ΔG_I e ΔG_{II} risultano soggetti a variazioni sempre più apprezzabili al diminuire dell'element size, mentre all'aumentare di quest'ultimo i valori tendono a stabilizzarsi. È interessante notare come il valore di ΔG_{TOT} , espresso come la somma dei valori relativi al modo I e modo II è tendenzialmente costante e quindi risulta pressoché insensibile alle variazioni dell'element size.

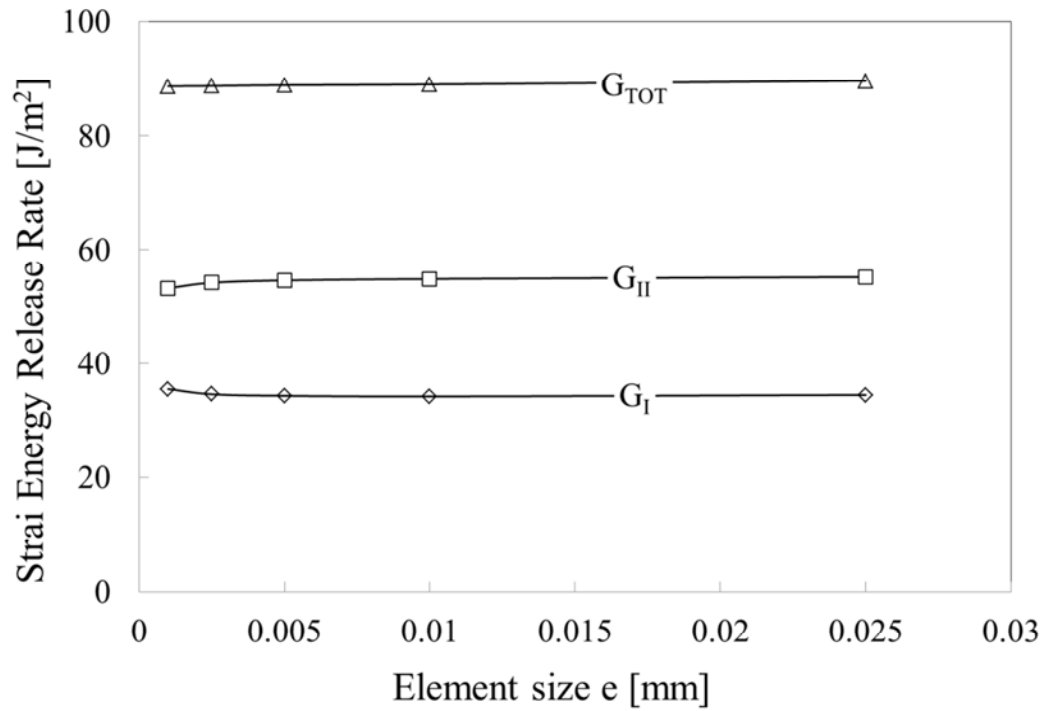


Figura 2.10: influenza dell'element size nella valutazione dello strai energy release rate

In base alle considerazioni appena fatte, al fine di mantenere valori sostanzialmente costanti delle componenti del SERR e un numero ragionevole di elementi della mesh per non appesantire in maniera eccessiva il modello fem, con relativi aumenti di tempi di calcolo, si è scelto 0.01 mm come minimo valore di element size all'apice della cricca.

2.5 ANALISI FEM GEOMETRICAMENTE LINEARI

2.5.1 Prima campagna di simulazioni: “zona di giunzione integra”

Nel corso dei precedenti lavori di tesi sono state effettuate delle analisi agli elementi finiti su giunti *stepped-lap* ([6] Polloni Simone, 2003-2004) nelle quali la zona di giunzione del provino è soggetta ad una propagazione simmetrica della cricca innescata dalle due zone esterne come riportato schematicamente in Figura 2.4; il passaggio inoltre da un’interfaccia a quella successiva è stato ricreato assumendo una completa e non graduale separazione da quella precedente e cioè non viene considerata e quindi analizzata alcuna propagazione lungo le interfacce verticali della zona di giunzione. Si parlerà pertanto di propagazione della delaminazione solo lungo le interfacce orizzontali del giunto ovvero lungo la lunghezza di sovrapposizione (overlap).

I risultati di tali analisi hanno evidenziato un trend decrescente delle componenti del SERR all’avanzare della delaminazione lungo l’interfaccia. Si è deciso quindi di condurre delle analisi numeriche, in un primo momento lineari dal punto di vista geometrico, e di utilizzare un modello di propagazione della cricca concettualmente uguale a quello di ([6] Polloni Simone, 2003-2004), a “zona di giunzione integra” (Figura 2.4), in modo da verificare tali risultati.

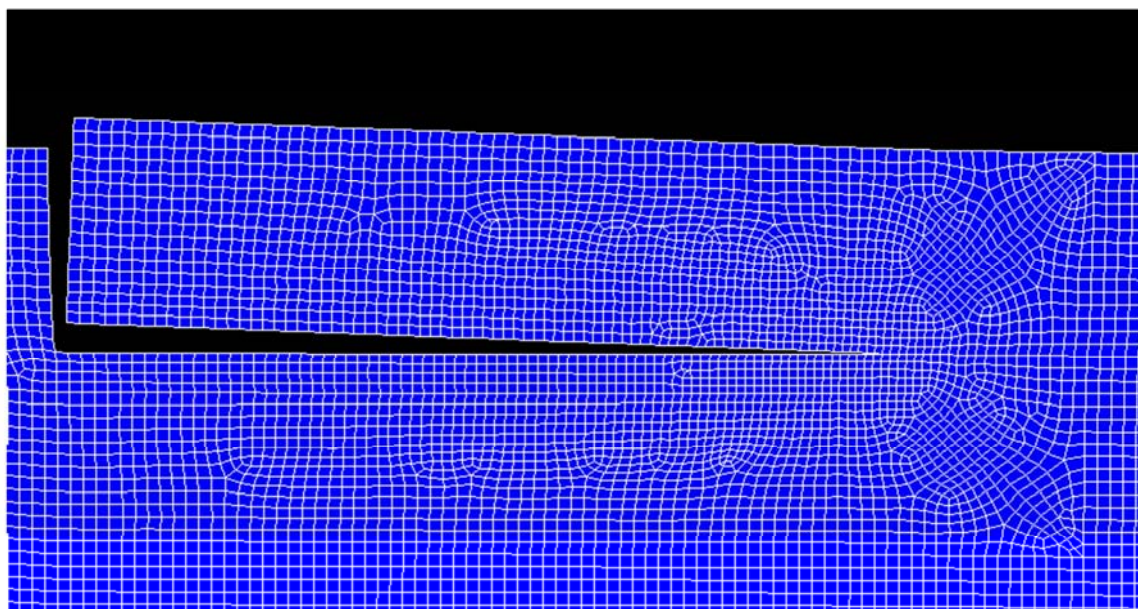


Figura 2.11 propagazione della delaminazione (deformata amplificata del 200%)

Come era facilmente ipotizzabile si sono ottenuti dei trend analoghi ai precedenti, e quindi caratterizzati da un'evoluzione decrescente delle componenti del SERR al propagare della delaminazione, mentre si sono calcolati valori diversi per quanto riguarda le componenti del SERR essendo le analisi del lavoro precedente condotte in presenza di una non linearità dal punto di vista geometrico. A medesimi risultati si perviene effettuando il calcolo di ΔG dall'esterno tramite l'equazione (2.7). Data l'analogia dei risultati, tali analisi sono state condotte solamente per lunghezza di sovrapposizione w pari a 3 mm e per una tensione applicata pari a 119.7 MPa (basso carico). Vengono riportati di seguito i risultati (Figura 2.12):

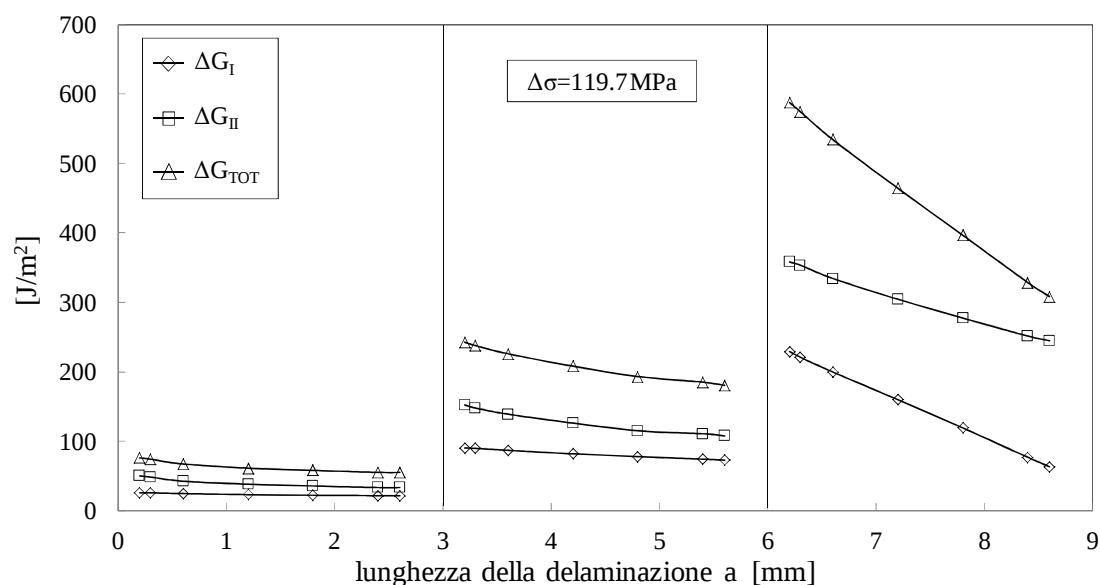


Figura 2.12: Andamento delle componenti del SERR al propagare della delaminazione per zona di giunzione integra, lunghezza di sovrapposizione $w=3$, $\Delta\sigma=119.7$ MPa (basso carico)

Come è ben visibile dalla figura, si verifica un salto di energia nel passaggio della delaminazione dal primo strato al secondo e ancor più dal secondo al terzo; questo perché è stato ipotizzato un fronte di rottura unico che avanza lungo la dimensione maggiore del provino su tutta la sua larghezza.

A tal riguardo si può dire quindi che nel momento in cui il fronte di cricca passa dal primo al secondo strato la differenza di energia calcolata per una lunghezza di delaminazione $w+da$ e per una lunghezza $w-da$ sia l'energia necessaria per far sì che la delaminazione possa avanzare lungo il secondo strato.

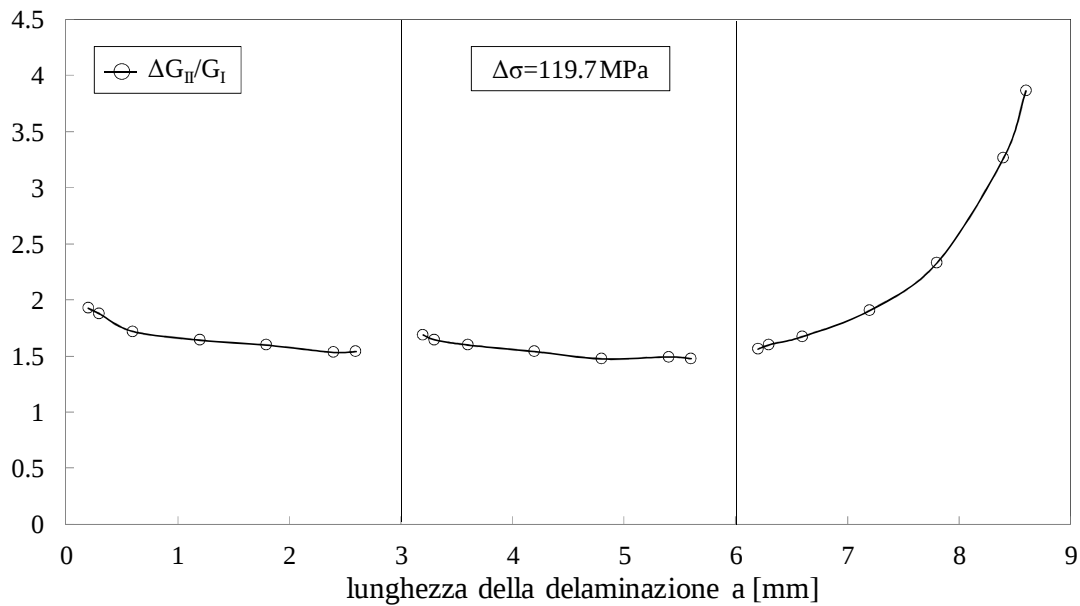


Figura 2.13: Andamento del rapporto G_{II}/G_I al propagare della delaminazione per zona di giunzione integra, lunghezza di sovrapposizione $w=3$, $\Delta\sigma=119.7$ MPa (basso carico)

In Figura 2.13 viene riportato l'andamento del rapporto $\Delta G_{II}/\Delta G_I$; tale andamento evidenzia come la propagazione della delaminazione lungo le interfacce sia a modo misto.

I valori di ΔG calcolati attraverso le analisi FEM combinati con i valori di da/dn ottenuti dall'analisi dei dati sperimentali riguardanti le propagazioni ([6] Polloni Simone, 2003-2004) permettono la costruzione della curva di Paris. Come mostrato in ([6] Polloni Simone, 2003-2004) tali curve evidenziano come per valori crescenti di ΔG la velocità di propagazione della cricca decresca. Ciò si traduce in un andamento opposto rispetto alla consueta curva di Paris e questo è dovuto appunto al carattere decrescente delle componenti del SERR al propagare della cricca.

Per tentar di spiegare questo comportamento si consideri il seguente esempio: schematizzando il giunto come un insieme di molle in parallelo, si immagini quindi di tirarlo con una forza da un lato e fissarlo dall'altro; ora se per qualche motivo la prima molla comincia a danneggiarsi, essa risulterà essere sempre meno caricata a scapito delle altre molle che lo saranno di più. Nel caso dei giunti *stepped-lap*, se la prima interfaccia si cricca, e man mano tale cricca avanza formando la delaminazione, lo strato interessato da questa propagazione sarà man mano sempre meno gravato dalla sollecitazione mentre gli

altri strati interni lo saranno di più, contariamente a quello che accade nelle giunzioni incollate (bonded joints) dove vi è un unico strato.

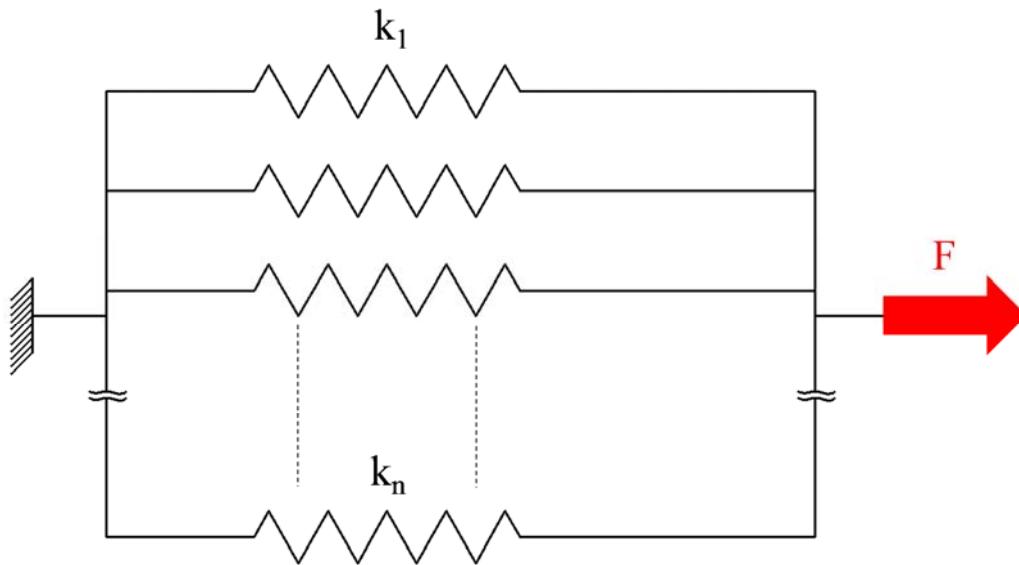


Figura 2.14: schematizzazione della giunzione *stepped-lap*

Quindi le componenti del SERR, calcolate tramite l'applicazione della tecnica del VCCT ad un modello presentante una zona di giunzione integra, danneggiata man mano a partire dalle zone esterne con un fronte di cricca simmetrico, risultano decrescenti e presentano inoltre un salto di energia nel passaggio della delaminazione da un'interfaccia alla successiva.

2.5.2 Seconda campagna di simulazioni: “zona di giunzione danneggiata”

La ricerca di trend differenti dello Strain Energy Release Rates, che meglio descrivano la legge di Paris, ha portato, tramite un’analisi più accurata della reale dinamica del meccanismo di danneggiamento, alla realizzazione di un nuovo modello. Come è ampiamente discusso in ([1] Cristanini Simone, 2002-2003) e brevemente riassunto nel capitolo 1 di questo lavoro, 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:

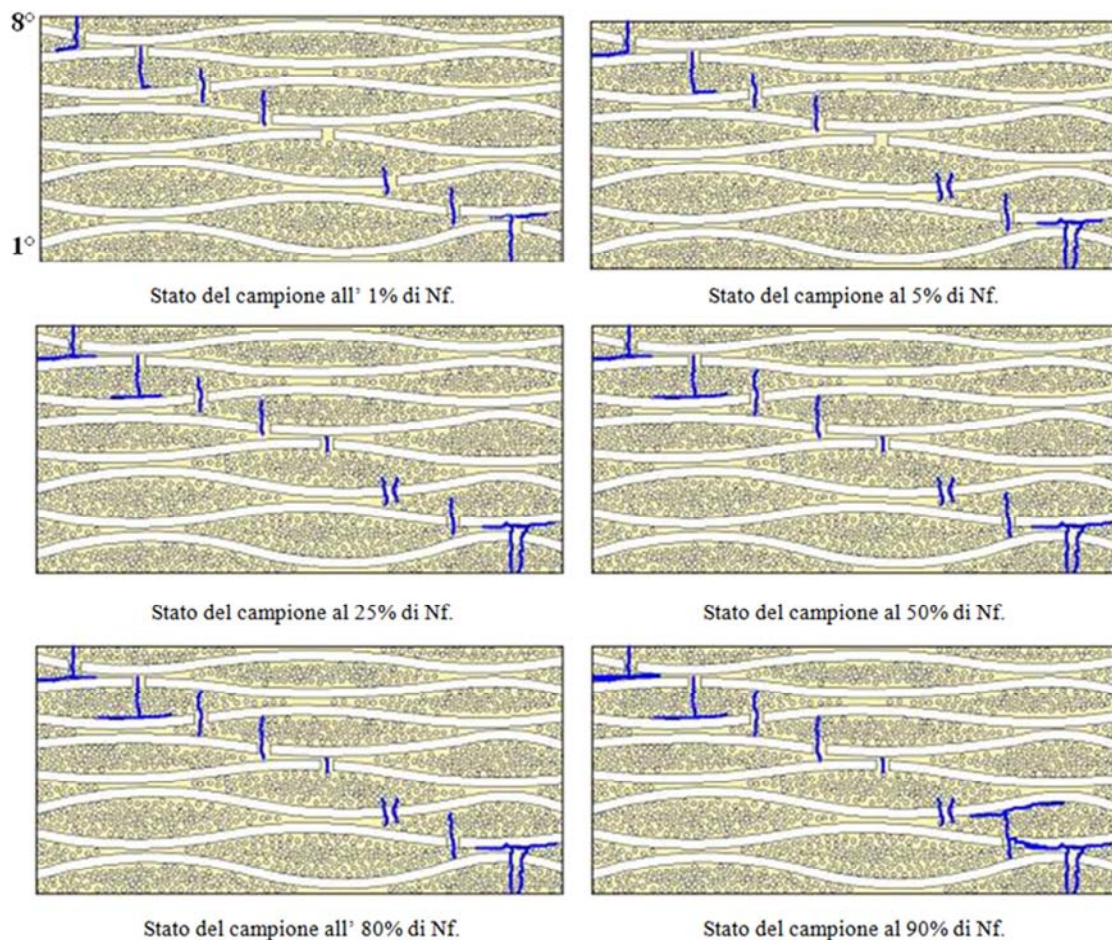


Figura 2.15: schematizzazione del danneggiamento a fatica, lay-up $[0]_8$ ([1] Cristanini Simone, 2002-2003)

Una volta innescata, questa cricca, avanza pressoché istantaneamente fino a raggiungere l’interfaccia dello strato successivo da cui propagherà poi la delaminazione:

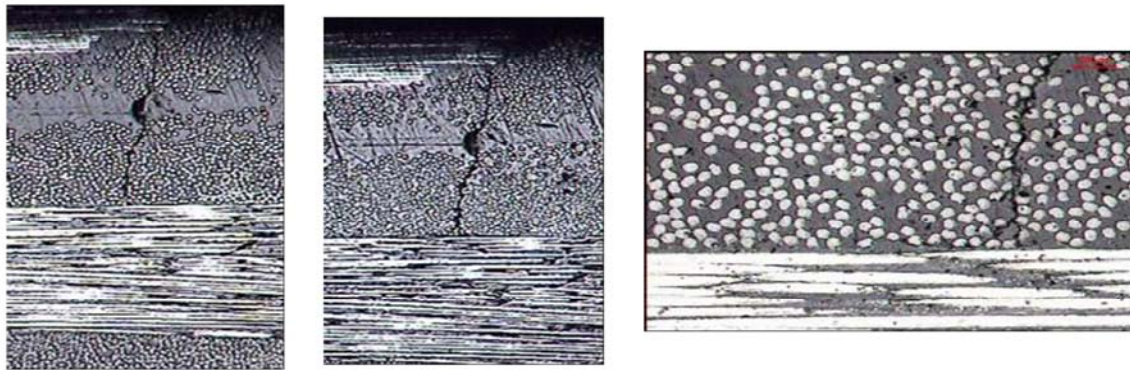


Figura 2.16: cricatura trasversale dello strato al 4% di Nf ([1] Cristanini Simone, 2002-2003)

Da qui l'idea di considerare per le successive analisi agli elementi finiti un modello caratterizzato da una zona di giunzione iniziale non integra, bensì già "danneggiata" nei soli tratti verticali della scalinatura in accordo con l'analisi sperimentale:



Figura 2.17: schematizzazione del nuovo modello con la "zona di giunzione danneggiata"

La propagazione risulta quindi così schematizzabile:

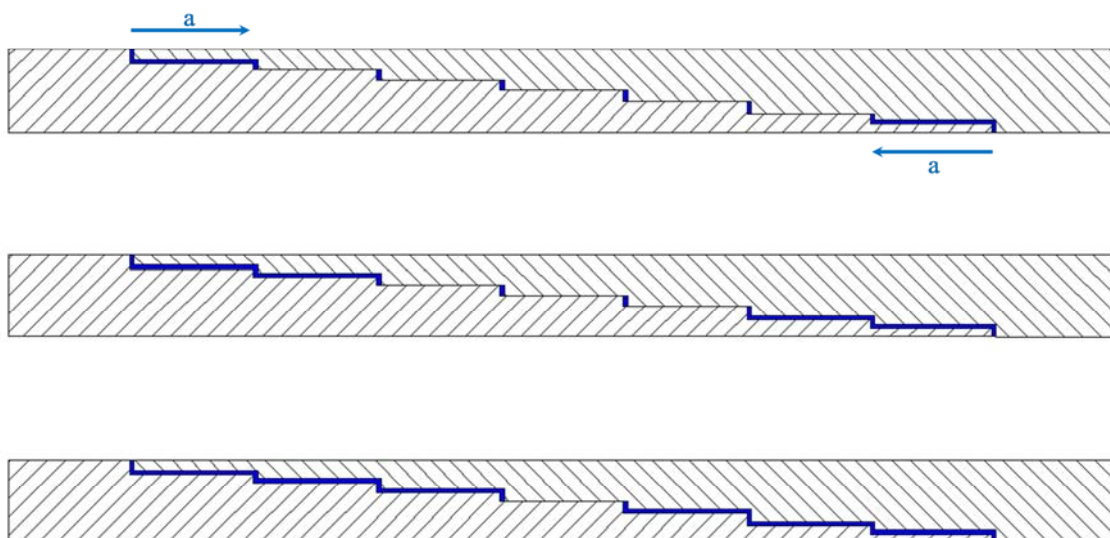


Figura 2.18: schematizzazione della propagazione della delaminazione nella zona di giunzione

Tale operazione si realizza semplicemente non assegnando i set di coupled degrees of freedom per le coppie di nodi giacenti nei tratti verticali della scalinatura:

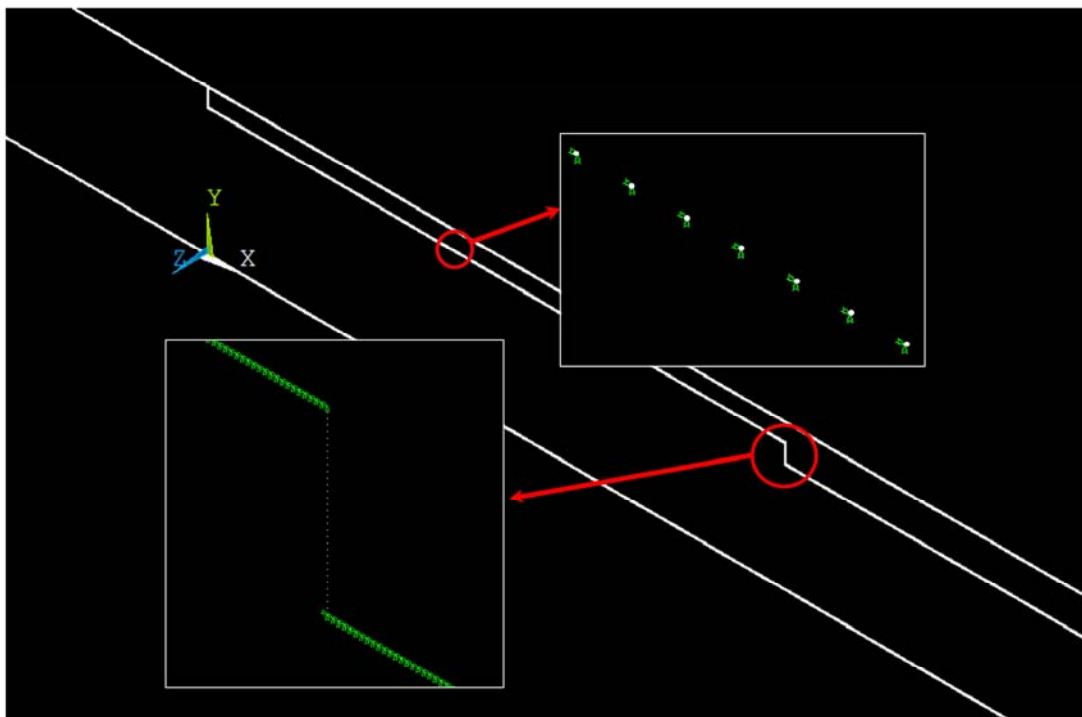


Figura 2.19: coupled sets degrees of freedom nella zona di giunzione

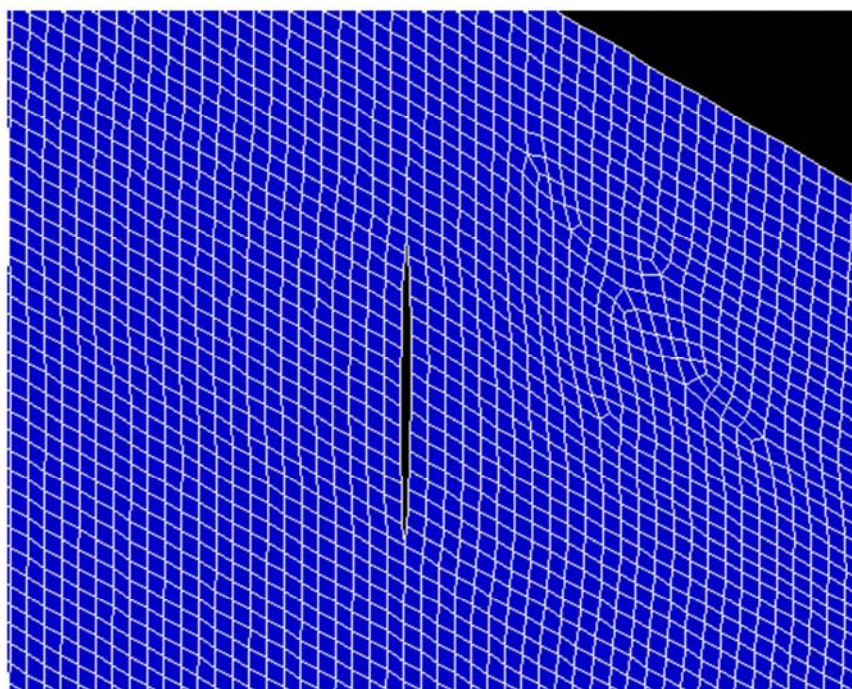


Figura 2.20: cricche trasversali degli strati interni (deformata amplificata 200 volte)

Il modello così ottenuto descrive, a nostro parere, più fedelmente il comportamento reale della giunzione *stepped-lap*.

I grafici successivi riportano i valori di ΔG_I , ΔG_{II} e ΔG_{TOT} ed il rapporto $\Delta G_{II}/\Delta G_I$ ottenuti dalle analisi agli elementi finiti calcolati per provini $[0]_8$ con lunghezza di sovrapposizione w pari a 3, 5, 8 in funzione della lunghezza di cricca sottoposti a basso carico:

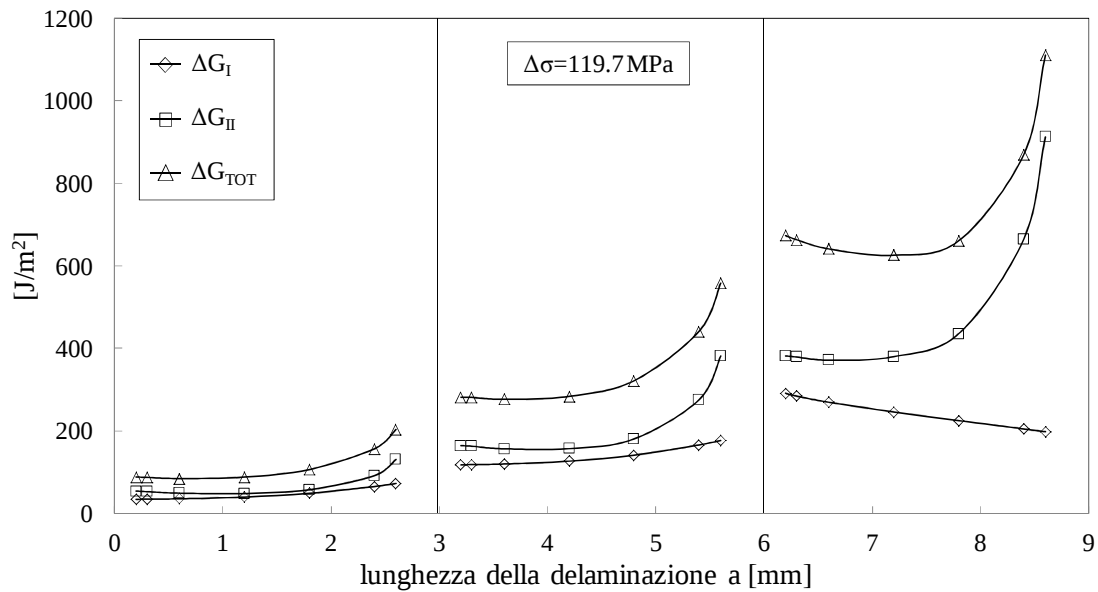


Figura 2.21: Andamento delle componenti del SERR al propagare della delaminazione per zona di giunzione danneggiata, lunghezza di sovrapposizione $w=3$, $\Delta\sigma=119.7$ MPa (basso carico)

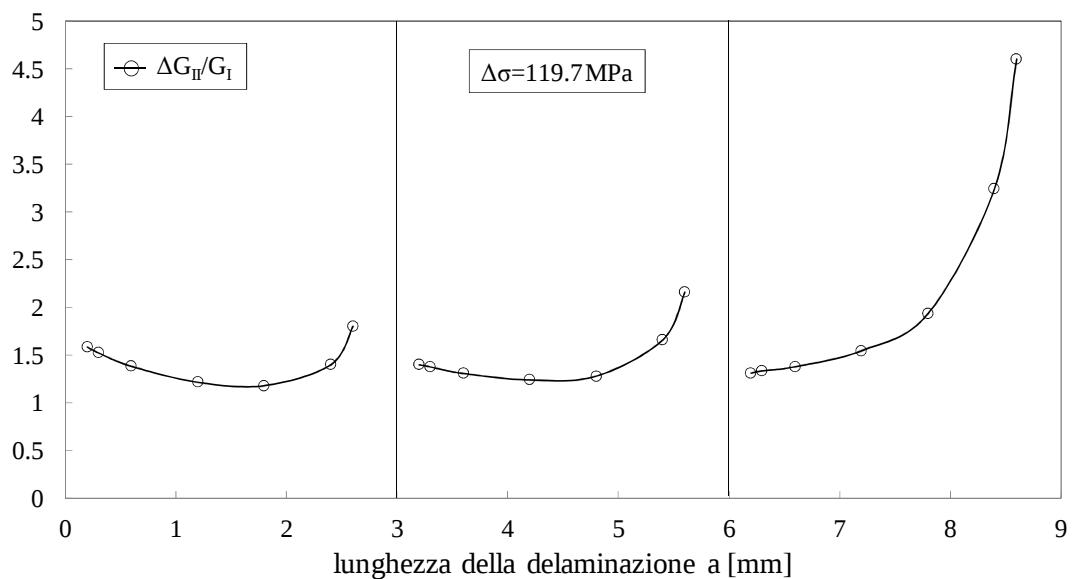


Figura 2.22: Andamento del rapporto $\Delta G_{II}/\Delta G_I$ al propagare della delaminazione per zona di giunzione danneggiata, lunghezza di sovrapposizione $w=3$, $\Delta\sigma=119.7$ MPa (basso carico)

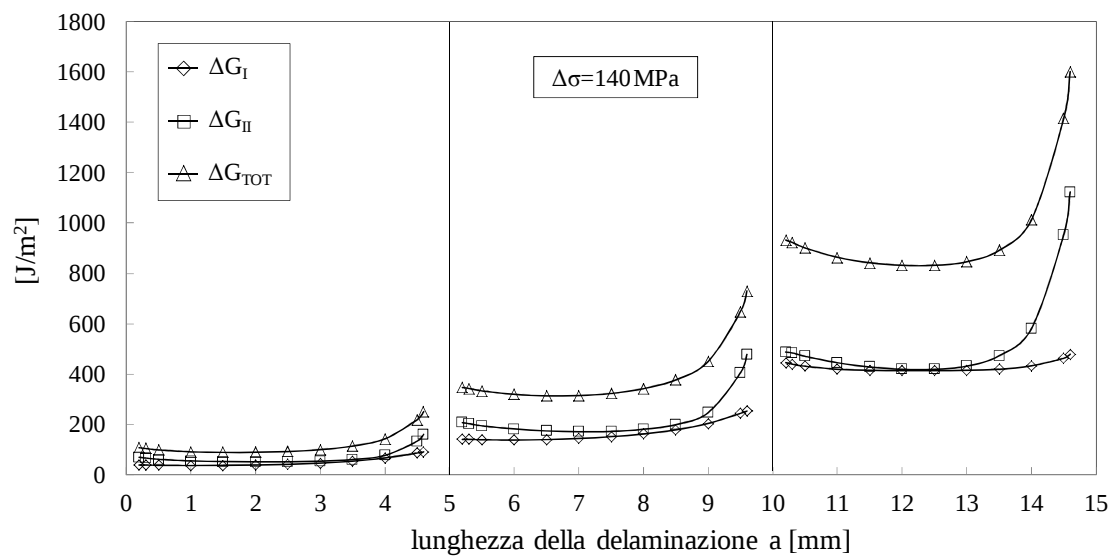


Figura 2.23: Andamento delle componenti del SERR al propagare della delaminazione per zona di giunzione danneggiata, lunghezza di sovrapposizione $w=5$, $\Delta\sigma=140$ MPa (basso carico)

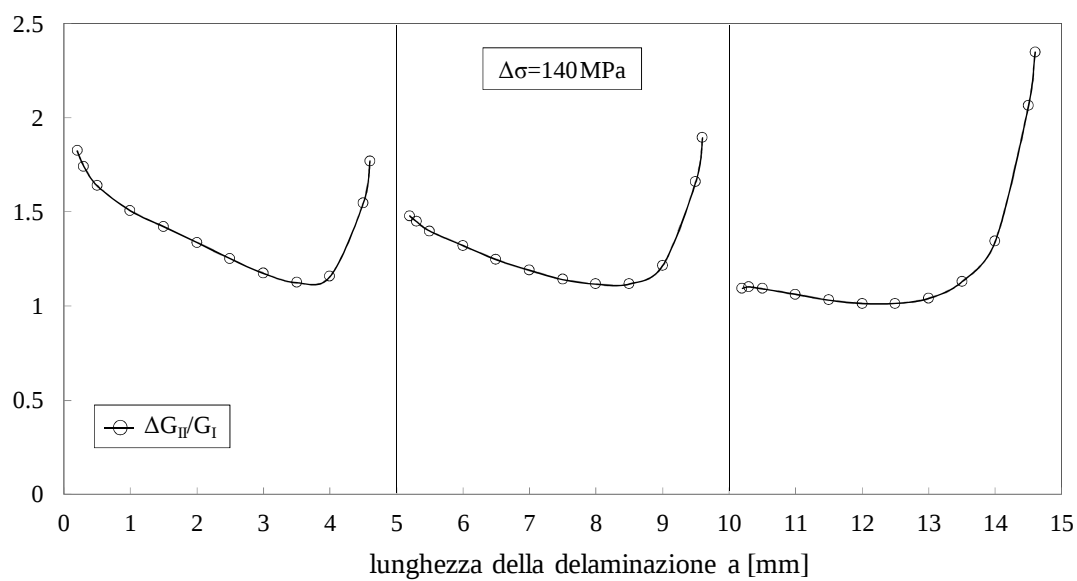


Figura 2.24: Andamento del rapporto $\Delta G_{II}/\Delta G_I$ al propagare della delaminazione per zona di giunzione danneggiata, lunghezza di sovrapposizione $w=5$, $\Delta\sigma=140$ MPa (basso carico)

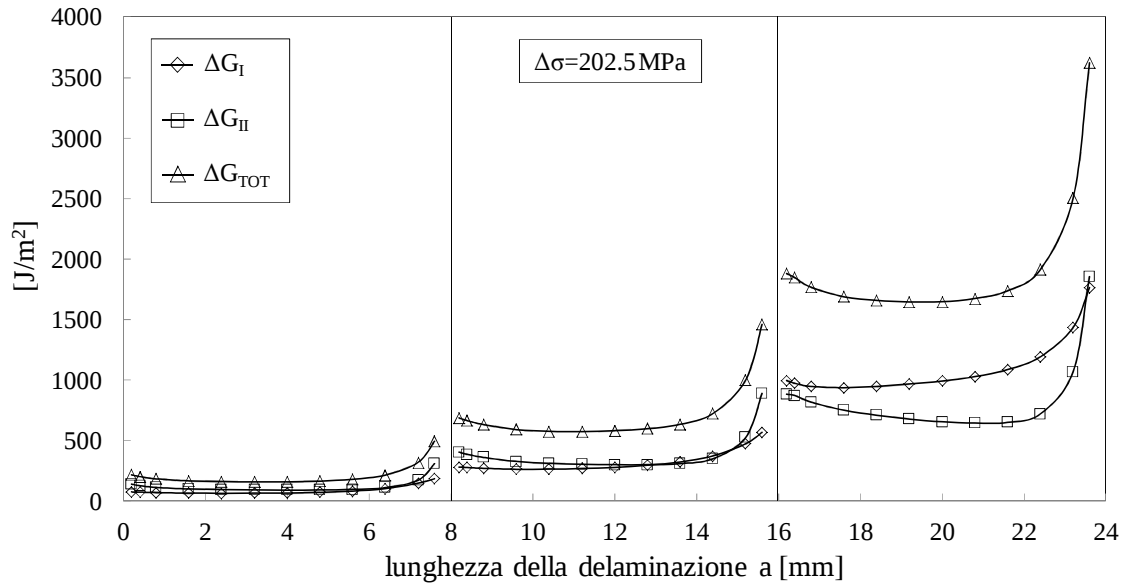


Figura 2.25: Andamento delle componenti del SERR al propagare della delaminazione per zona di giunzione danneggiata, lunghezza di sovrapposizione $w=8$, $\Delta\sigma=202.5$ MPa (basso carico)

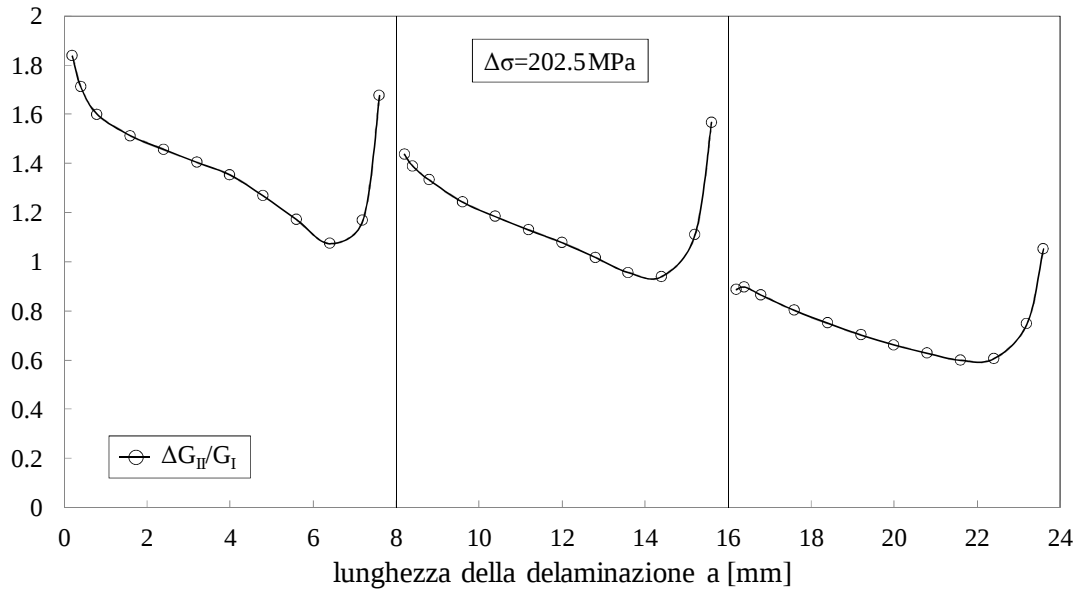


Figura 2.26: Andamento del rapporto $\Delta G_{II}/\Delta G_I$ al propagare della delaminazione per zona di giunzione danneggiata, lunghezza di sovrapposizione $w=8$, $\Delta\sigma=202.5$ MPa (basso carico)

Da un punto di vista qualitativo la prima cosa che risalta da questi grafici è il fatto che ora le componenti del SERR presentano un trend diverso e abbastanza simile al variare della lunghezza di sovrapposizione. Più nel dettaglio si può osservare che ΔG_I , ΔG_{II} e quindi ΔG_{TOT} , per piccole lunghezze di cricca esibiscono ancora un volta 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 . Come nelle analisi precedenti anche in questo caso il passaggio della delaminazione da un'interfaccia all'altra è accompagnato da un salto di energia e questo, ancora una volta, 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. Questo fatto ha anche un riscontro nella realtà, in quanto l'analisi agli ultrasuoni ([6] Polloni Simone, 2003-2004) ha evidenziato che gran parte della vita a fatica del campione viene spesa per separare completamente l'interfaccia di giunzione “a” o “g”.

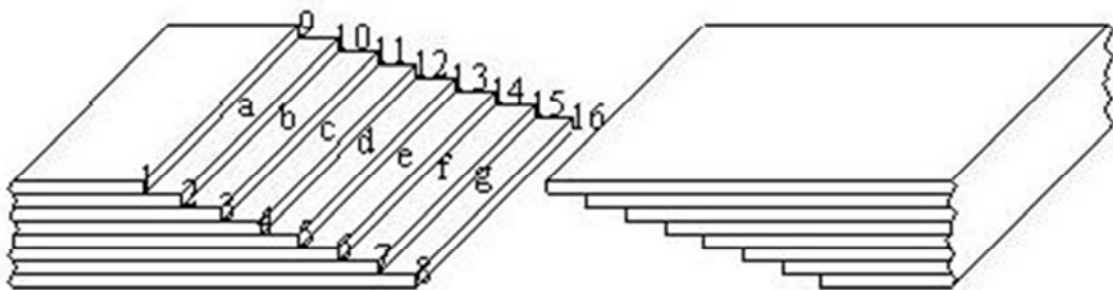


Figura 2.27: numerazione alfabetica delle interfacce di giunzione

Nel momento in cui le suddette interfacce vengono separate la velocità di delaminazione aumenta rapidamente dividendo così le interfacce successive e portando quindi il giunto a cedimento.

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 anche se sembrerebbe essere il Modo

Il quello che influisce di più sul danneggiamento della giunzione fatta eccezione per la terza interfaccia dei provini con lunghezza di sovrapposizione pari ad 8 mm.

2.5.3 terza campagna prove: “variante della zona di giunzione danneggiata”

Nell’analisi dei dati sperimentali relativi alla reale dinamica del meccanismo di danneggiamento ([6] Polloni Simone, 2003-2004) si è osservato che in un numero considerevole di casi la formazione della cricca trasversale e quindi la sua pressoché istantanea propagazione fino allo strato successivo è accompagnata da una seguente delaminazione: infatti gli apici della cricca trasversali sono punti che favoriscono l’innesco di essa. Tali cricche sono di dimensioni variabili ma nella quasi totalità dei provini analizzati arrivano ad un massimo di 1 mm verso la fine della vita del giunto, eccezion fatta per i giunti con lunghezza di sovrapposizione pari ad 8 mm soggetti ad alto carico (282.6 MPa) per i quali se n’è registrata una di 2.5 mm. La formazione di queste cricche avviene, come per quelle verticali, a percentuali molto basse di Nf (number of cycles to failure), e rimangono di lunghezza pressoché costante per quasi tutta la vita del giunto. In alcuni casi invece vengono inglobate dalla propagazione della delaminazione principale che porta a cedimento la giunzione.

Da qui l’idea di integrare il modello precedentemente utilizzato con la zona di giunzione danneggiata dalle cricche trasversali con l’aggiunta di un principio di delaminazione fissato a 0.2 mm, essendo questo il minimo valore riportato nelle tabelle contenenti i dati relativi all’attività sperimentale svolta in ([6] Polloni Simone, 2003-2004) ed anche il minimo valore sensato per cui ci si aspetta una differenza in termini di risultati dal modello precedente ottenendo così la “variante della zona di giunzione danneggiata”:



Figura 2.28: schematizzazione della variante della zona di giunzione danneggiata

La propagazione risulta quindi così schematizzabile:

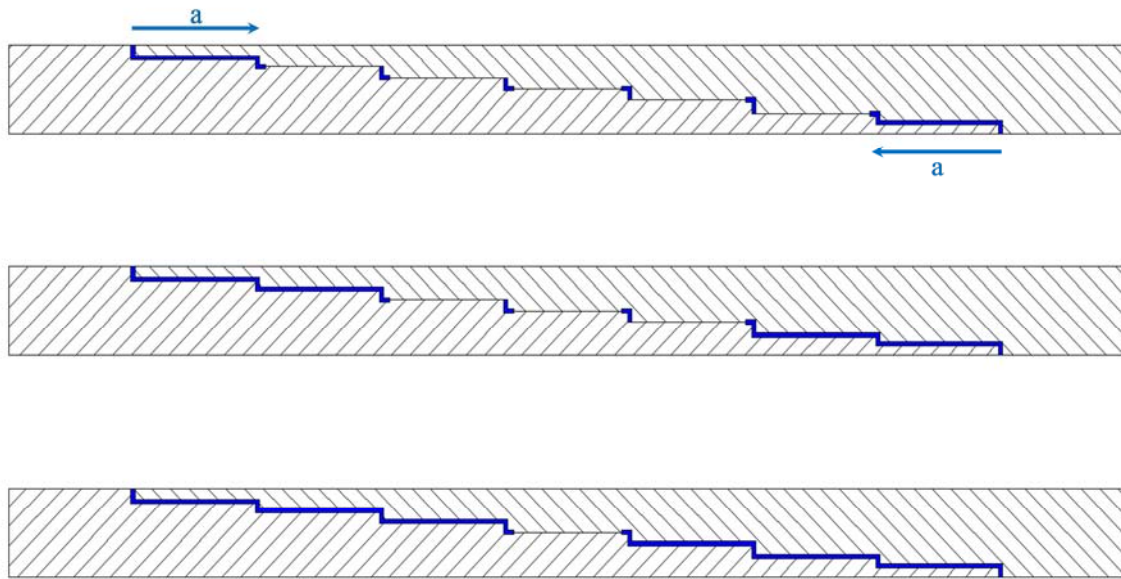


Figura 2.29: schematizzazione della propagazione della delaminazione nella zona di giunzione

Poiché il file apdl creato è in grado di gestire simultaneamente le propagazioni lungo le varie interfacce costituenti la giunzione, per realizzare questo modello si sono fissate le lunghezze di cricca, pari a 0.2 mm per gli strati successivi a quello interessato dall'avanzare della delaminazione; in questo modo è stato inoltre possibile effettuare il calcolo delle componenti del SERR con la tecnica del VCCT anche all'apice di queste cricche valutando quindi l'andamento di ΔG_I e ΔG_{II} su altri strati non soggetti a propagazione all'avanzare della delaminazione lungo le interfacce precedenti.

I grafici successivi riportano i valori di ΔG_I , ΔG_{II} e ΔG_{TOT} ed il rapporto $\Delta G_{II}/\Delta G_I$, ottenuti dalle analisi agli elementi finiti calcolati per provini $[0]_8$, in funzione della lunghezza di cricca sottoposti a basso carico:

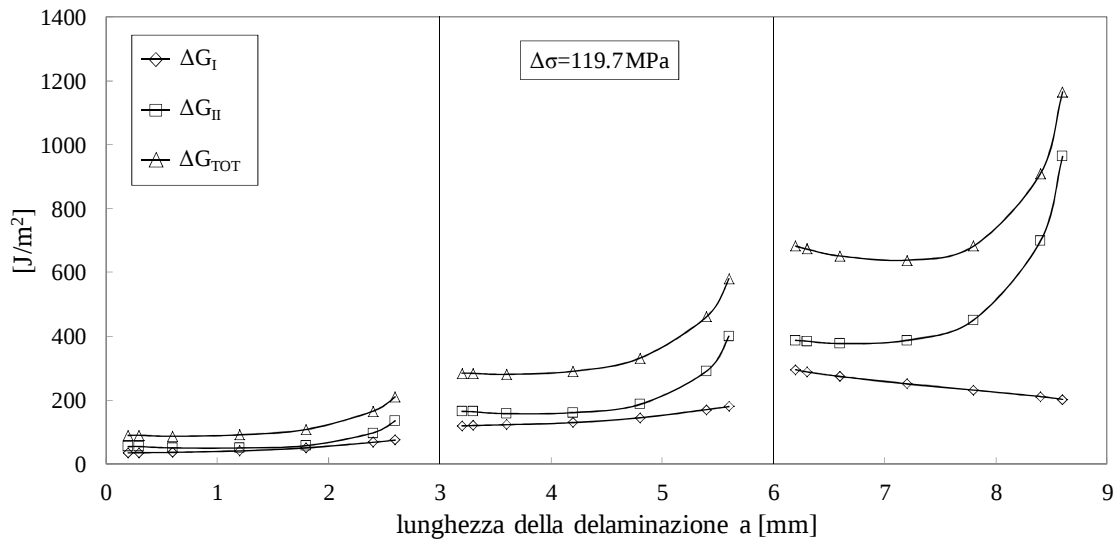


Figura 2.30: Andamento delle componenti del SERR al propagare della delaminazione per la variante della zona di giunzione danneggiata, lunghezza di sovrapposizione $w=3$, $\Delta\sigma=119.7\text{ MPa}$ (basso carico)

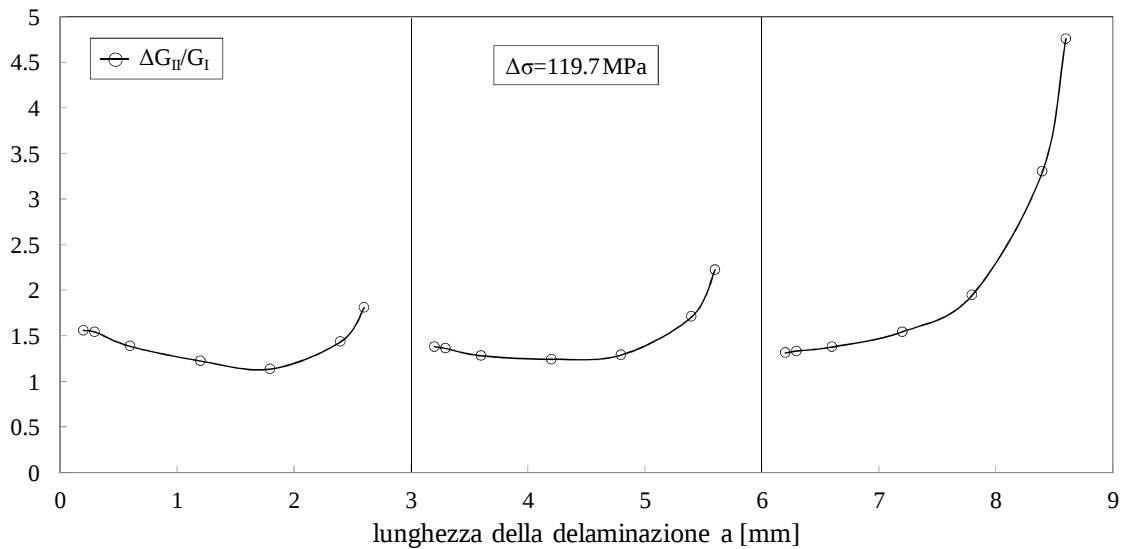


Figura 2.31: Andamento del rapporto G_{II}/G_I al propagare della delaminazione per la variante della zona di giunzione danneggiata, lunghezza di sovrapposizione $w=3$, $\Delta\sigma=119.7\text{ MPa}$ (basso carico)

I trend ottenuti, da un punto di vista qualitativo, sono del tutto analoghi a quelli ottenuti per la medesima geometria del giunto soggetto allo stesso carico ma con la zona di giunzione caratterizzata dalle sole cricche verticali. Per quanto riguarda i valori in modulo, questi sono maggiori nell'ultimo caso: si passa da una differenza di pochi unità di J/m^2 per quanto riguarda la propagazione nella prima interfaccia a qualche decina per la terza interfaccia.

Più interessante risulta l'andamento delle componenti del SERR all'apice della cricca di 0.2 mm situata all'inizio della seconda interfaccia al propagare della delaminazione lungo la prima:

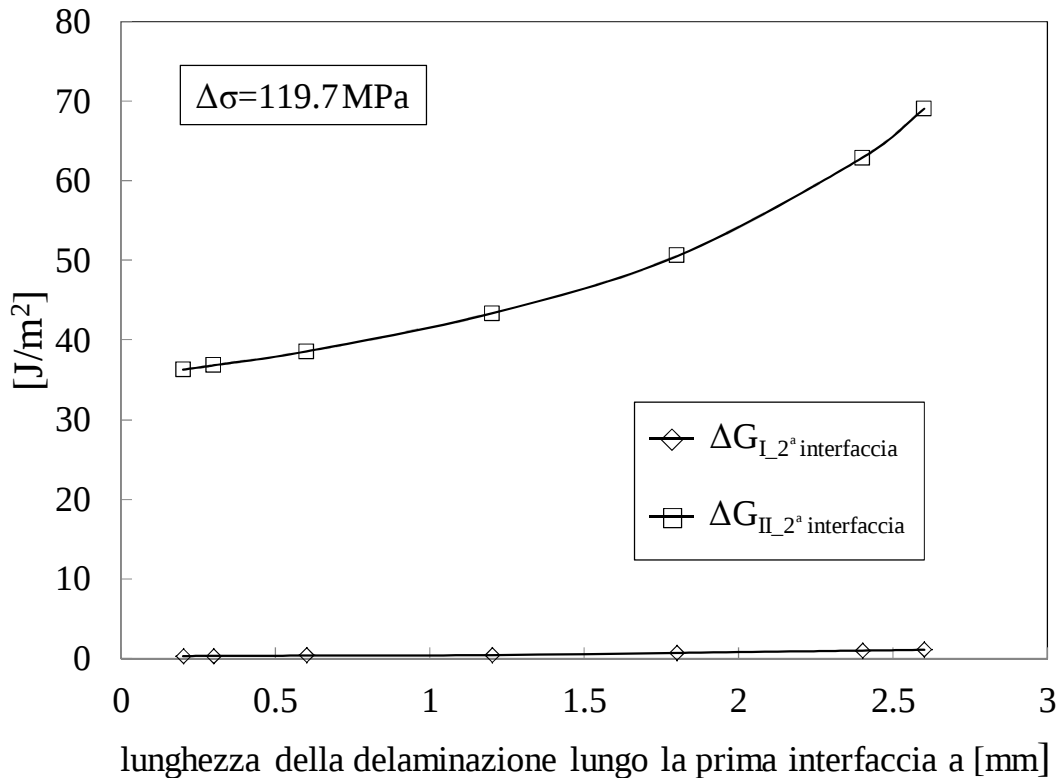


Figura 2.32: Andamento delle componenti del SERR all'apice della cricca situata sulla seconda interfaccia al propagare della delaminazione lungo la prima interfaccia per la variante della zona di giunzione danneggiata, lunghezza di sovrapposizione $w=3$, $\Delta\sigma=119.7$ MPa (basso carico)

Quello che il precedente grafico permette di osservare è come varia ΔG all'apice della cricca di 0.2 mm, innescata in corrispondenza della seconda interfaccia e mantenuta tale al propagare della delaminazione lungo la prima interfaccia; in particolare ΔG_I mantiene un valore pressoché nullo mentre ΔG_{II} aumenta. L'andamento crescente di quest'ultimo sembra confermare la maggior influenza del Modo II sul danneggiamento della giunzione.

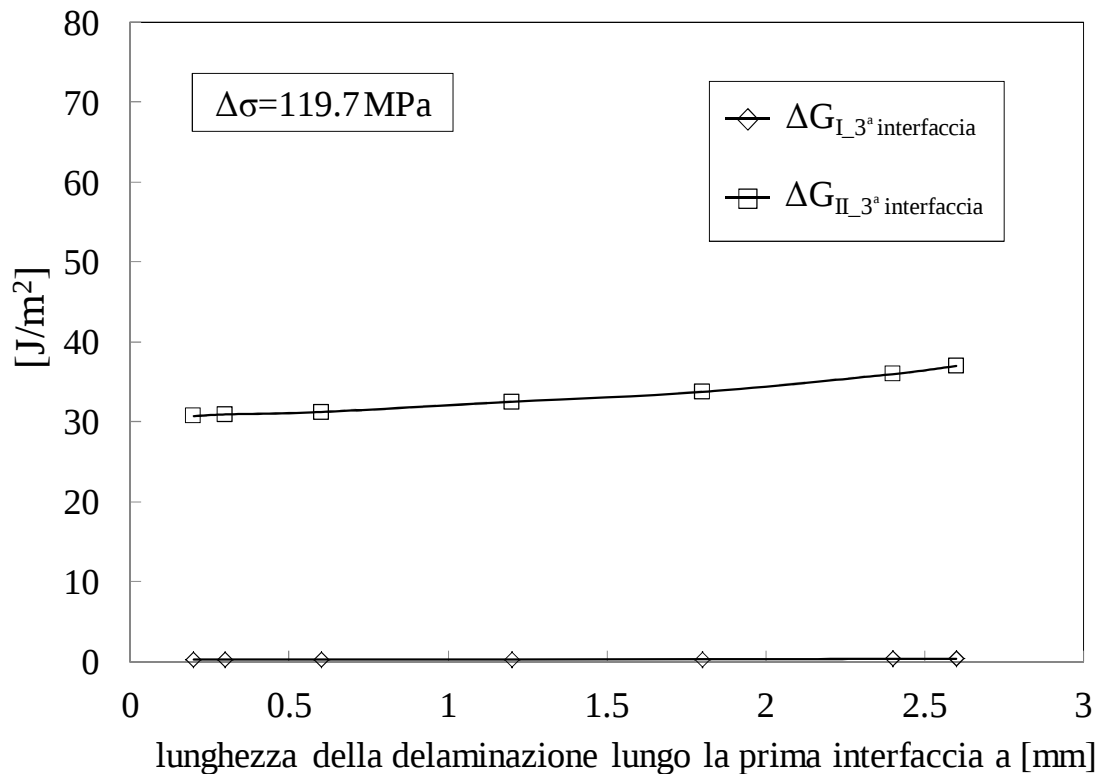


Figura 2.33: Andamento delle componenti del SERR all'apice della cricca situata sulla terza interfaccia al propagare della delaminazione lungo la prima interfaccia per la variante della zona di giunzione danneggiata, lunghezza di sovrapposizione $w=3$, $\Delta\sigma=119.7$ MPa (basso carico)

In corrispondenza all'apice della cricca di 0.2 mm situata sulla terza interfaccia si registra ancora una volta un valore nullo di ΔG_I e un andamento crescente di ΔG_{II} , anche se di entità minore rispetto a quanto accade in corrispondenza dell'apice situato sulla seconda interfaccia.

Una volta che la delaminazione ha completamente separato la prima interfaccia e quindi avanza lungo la seconda, è possibile calcolare le componenti del SERR e quindi il loro andamento in corrispondenza della sola cricca di 0.2 mm situata all'inizio della terza interfaccia di nuovo tramite la tecnica di calcolo della VCCT:

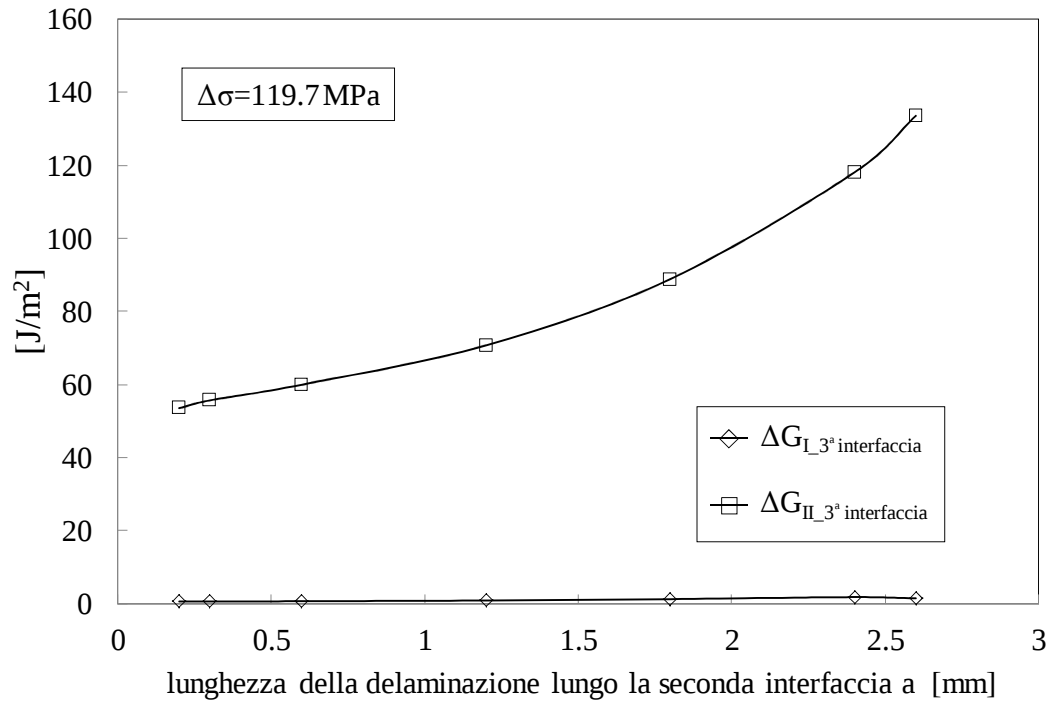


Figura 2.34: Andamento delle componenti del SERR all'apice della cricca situata sulla terza interfaccia al propagare della delaminazione lungo la seconda interfaccia per la variante della zona di giunzione danneggiata, lunghezza di sovrapposizione $w=3$, $\Delta\sigma=119.7$ MPa (basso carico)

Si può quindi visualizzare l'andamento all'apice della cricca situata in corrispondenza del terzo strato al passaggio di interfaccia della delaminazione:

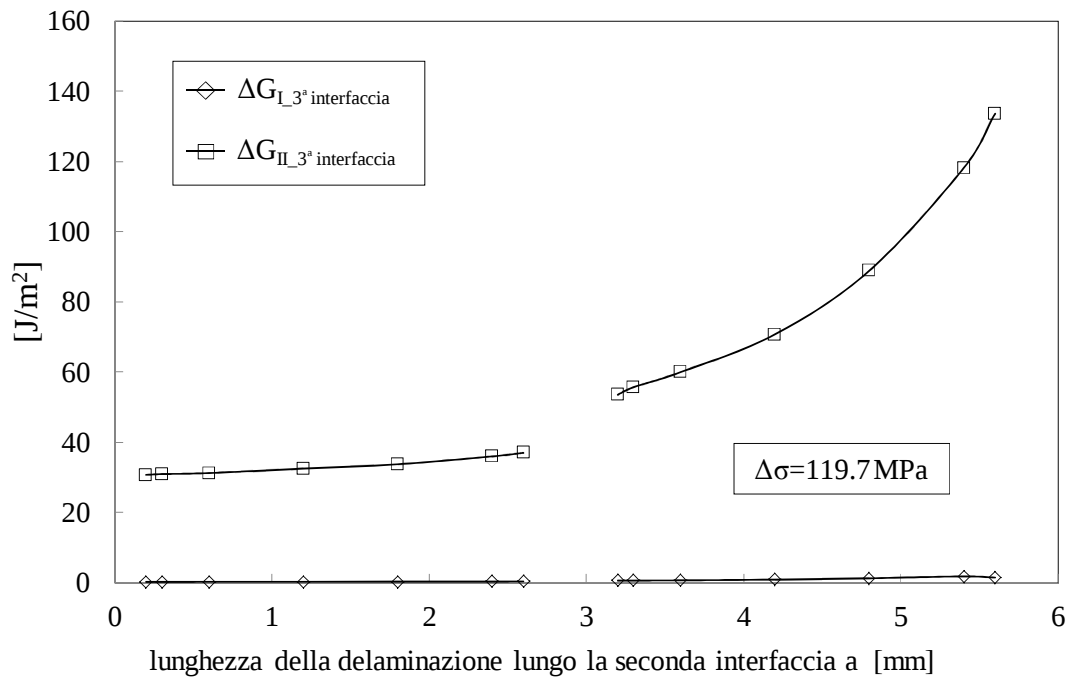


Figura 2.35: Andamento delle componenti del SERR all'apice della cricca situata sulla terza interfaccia al propagare della delaminazione lungo la prima e la seconda interfaccia per la variante della zona di giunzione danneggiata, lunghezza di sovrapposizione $w=3$, $\Delta\sigma=119.7$ MPa (basso carico)

Nel passaggio dalla prima alla seconda interfaccia si registra un salto di energia per quanto riguarda la componente ΔG_{II} ed una suo successivo aumento al propagare della delaminazione lungo la seconda interfaccia. Anche in questo caso, presentando andamento crescente, ΔG_{II} sembra essere il fattore più influente sul danneggiamento della giunzione per quanto riguarda anche gli strati interni della stessa.

Queste analisi sono state condotte anche per lunghezza di sovrapposizione w pari a 5 e 8 mm, per i risultati delle quali valgono le stesse considerazioni appena fatte.

Per quanto riguarda $w=5$:

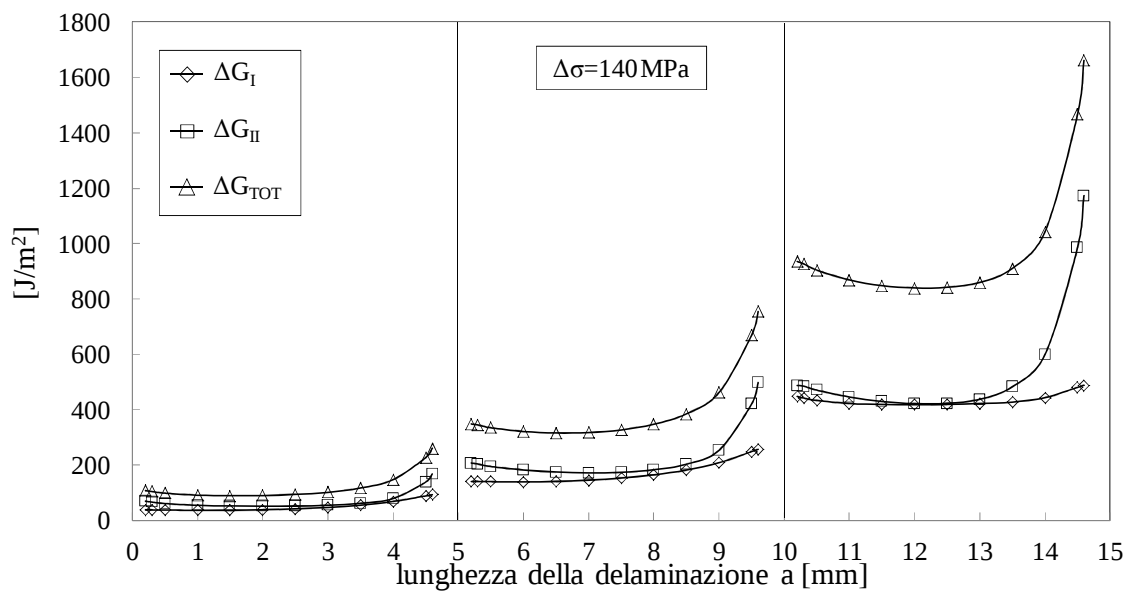


Figura 2.36: Andamento delle componenti del SERR al propagare della delaminazione per la variante della zona di giunzione danneggiata, lunghezza di sovrapposizione $w=5$, $\Delta\sigma=140$ MPa (basso carico)

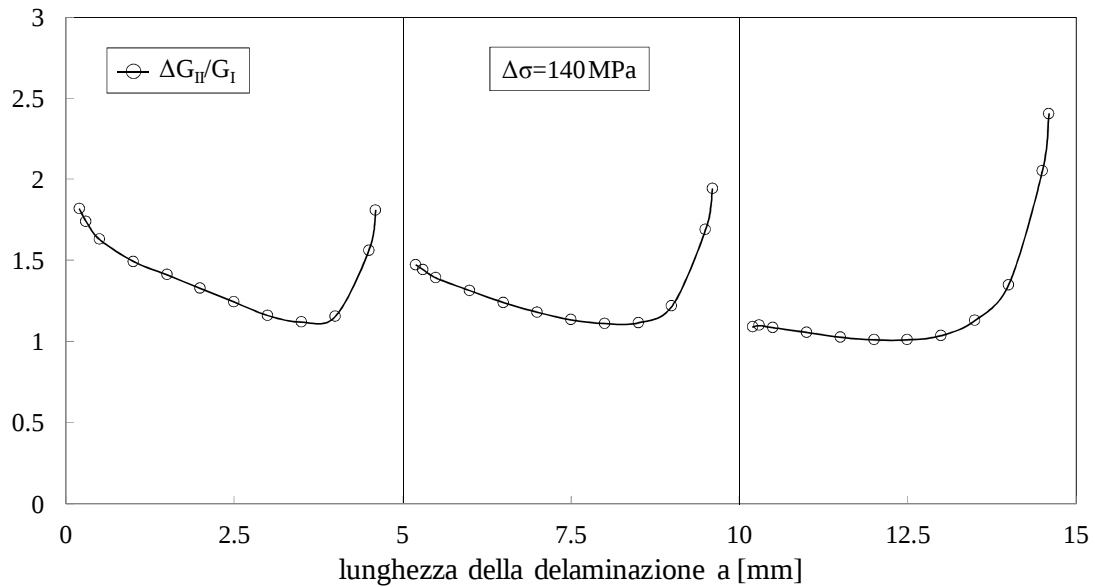


Figura 2.37: Andamento del rapporto G_{II}/G_I al propagare della delaminazione per la variante della zona di giunzione danneggiata, lunghezza di sovrapposizione $w=5$, $\Delta\sigma=140$ MPa (basso carico)

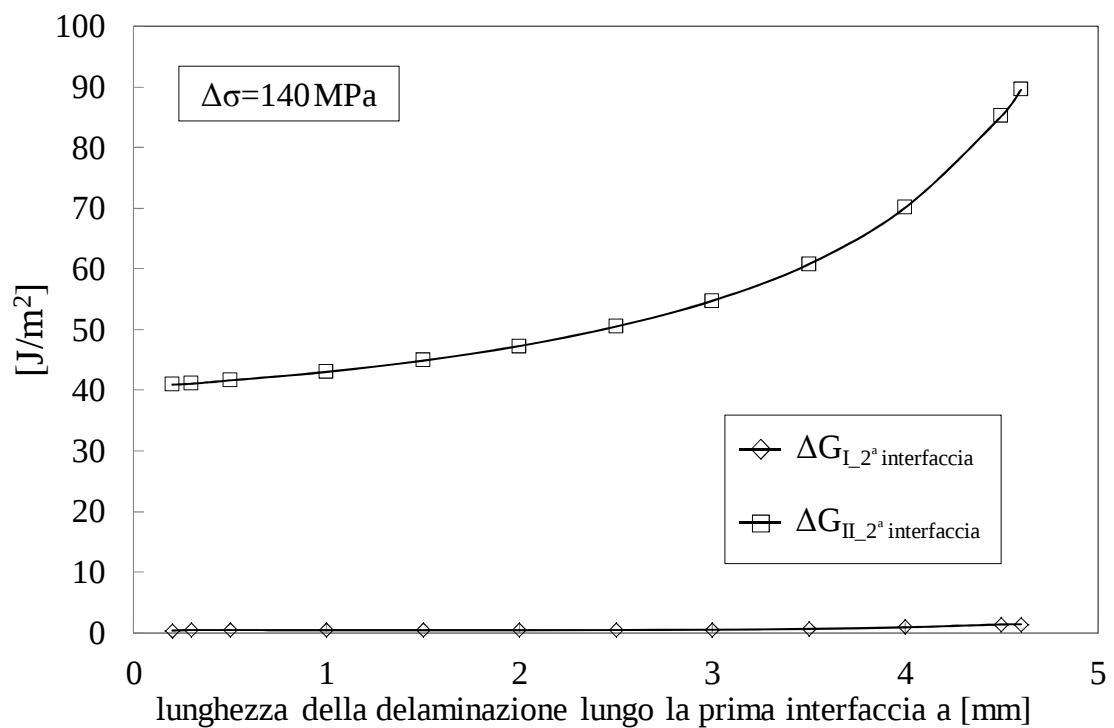


Figura 2.38: Andamento delle componenti del SERR all'apice della cricca situata sulla seconda interfaccia al propagare della delaminazione lungo la prima interfaccia per la variante della zona di giunzione danneggiata, lunghezza di sovrapposizione $w=5$, $\Delta\sigma=140$ MPa (basso carico)

Nel precedente grafico è riportato l'andamento delle componenti del SERR all'apice della cricca di 0.2 mm situata all'inizio della seconda interfaccia, al propagare della delaminazione lungo la prima, e, come nel precedente caso, si registra un valore praticamente nullo e costante di ΔG_I mentre un trend crescente di ΔG_{II} .

In corrispondenza dell'apice della cricca di 0.2 mm situata sulla terza interfaccia si registra ancora una volta un valore nullo e costante di ΔG_I e un andamento crescente di ΔG_{II} , anche se di entità minore rispetto a quanto accade in corrispondenza dell'apice situato sulla seconda interfaccia:

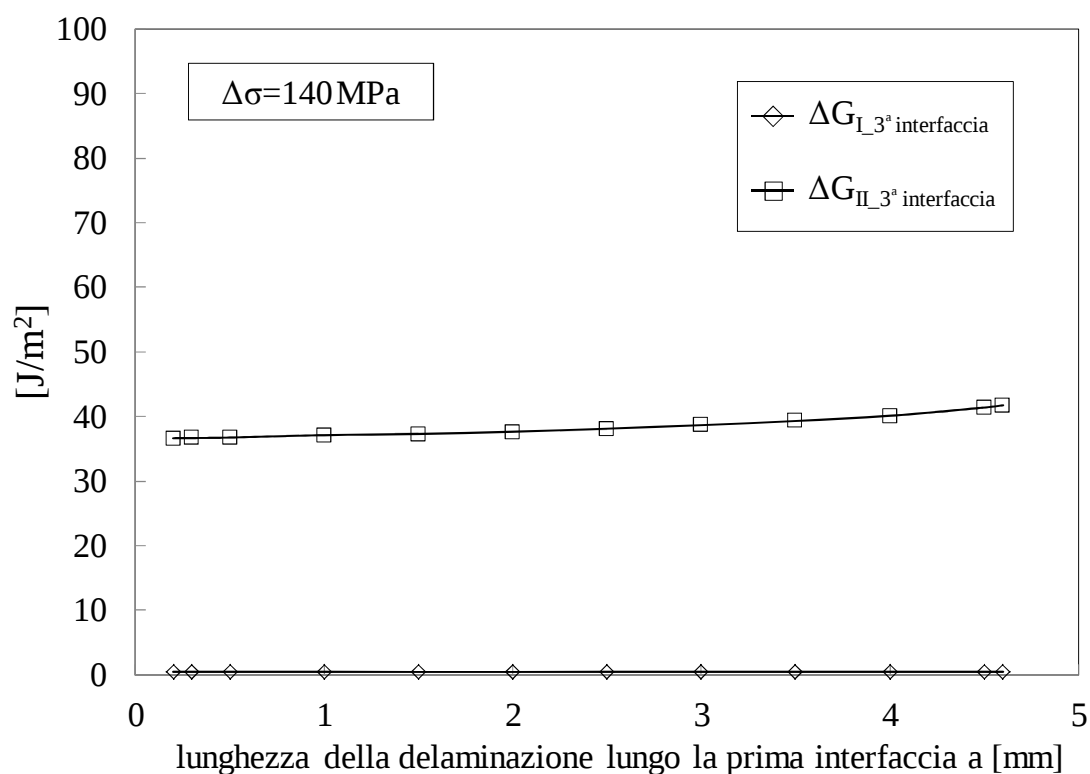


Figura 2.39: Andamento delle componenti del SERR all'apice della cricca situata sulla terza interfaccia al propagare della delaminazione lungo la prima interfaccia per la variante della zona di giunzione danneggiata, lunghezza di sovrapposizione $w=5$, $\Delta\sigma=140$ MPa (basso carico)

Una volta che la delaminazione ha completamente separato la prima interfaccia e quindi avanza lungo la seconda è possibile calcolare le componenti del SERR e quindi il loro andamento in corrispondenza della sola cricca di 0.2 mm situata all'inizio della terza interfaccia di nuovo tramite la tecnica di calcolo della VCCT:

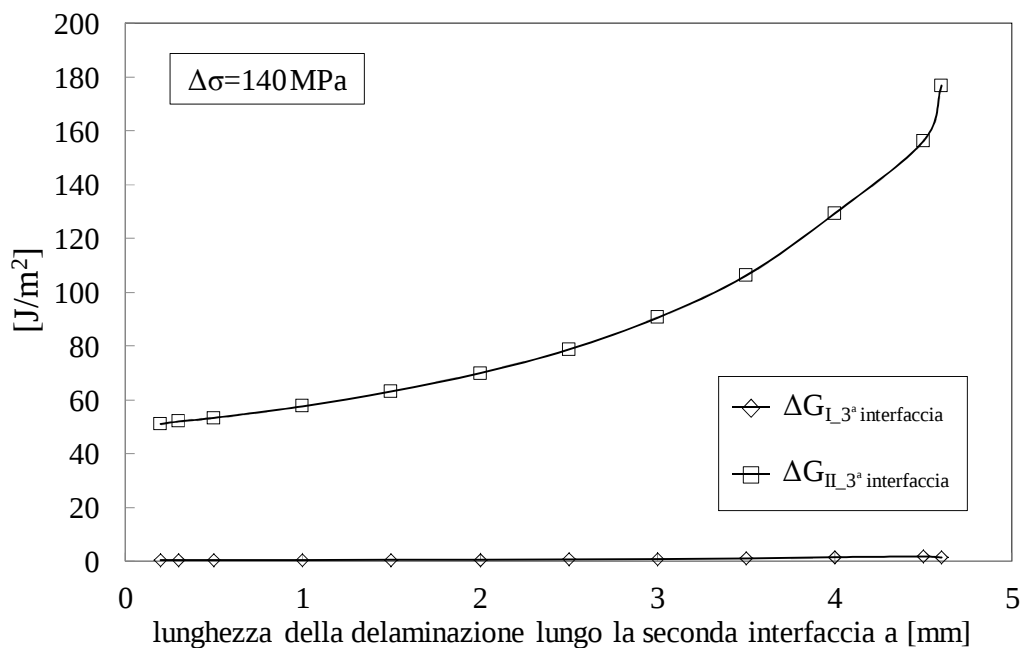


Figura 2.40: Andamento delle componenti del SERR all'apice della cricca situata sulla terza interfaccia al propagare della delaminazione lungo la seconda interfaccia per la variante della zona di giunzione danneggiata, lunghezza di sovrapposizione $w=5$, $\Delta\sigma=140$ MPa (basso carico)

Si può quindi visualizzare l'andamento all'apice della cricca situata in corrispondenza del terzo strato al passaggio di interfaccia della delaminazione:

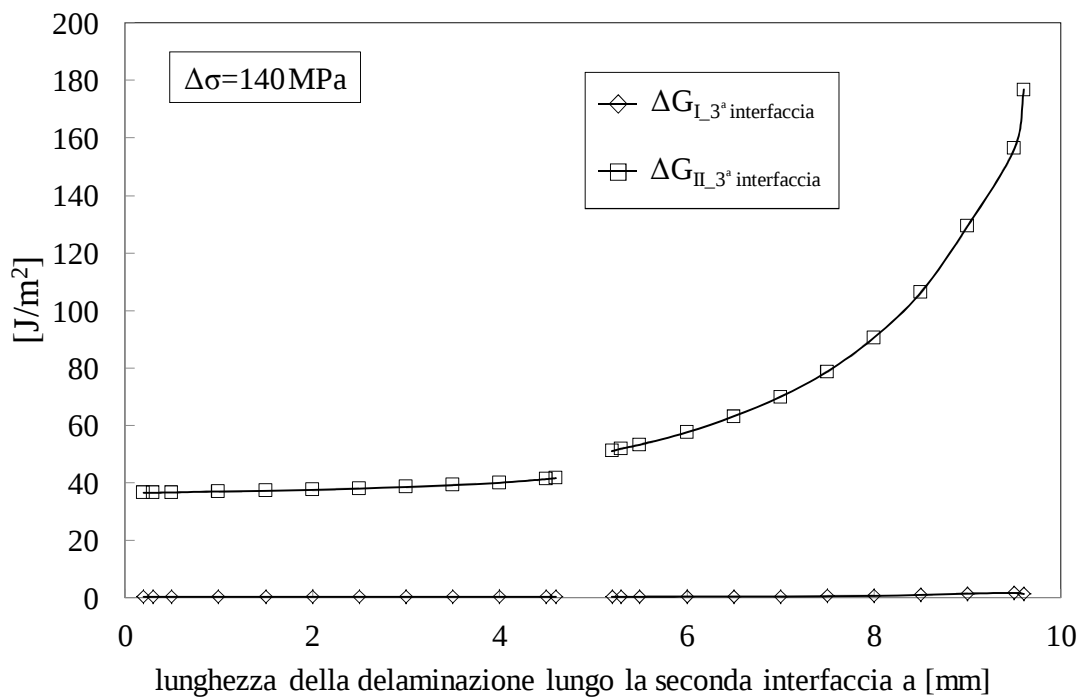


Figura 2.41: Andamento delle componenti del SERR all'apice della cricca situata sulla terza interfaccia al propagare della delaminazione lungo la prima e la seconda interfaccia per la variante della zona di giunzione danneggiata, lunghezza di sovrapposizione $w=5$, $\Delta\sigma=140$ MPa (basso carico)

Per quanto riguarda $w=8$:

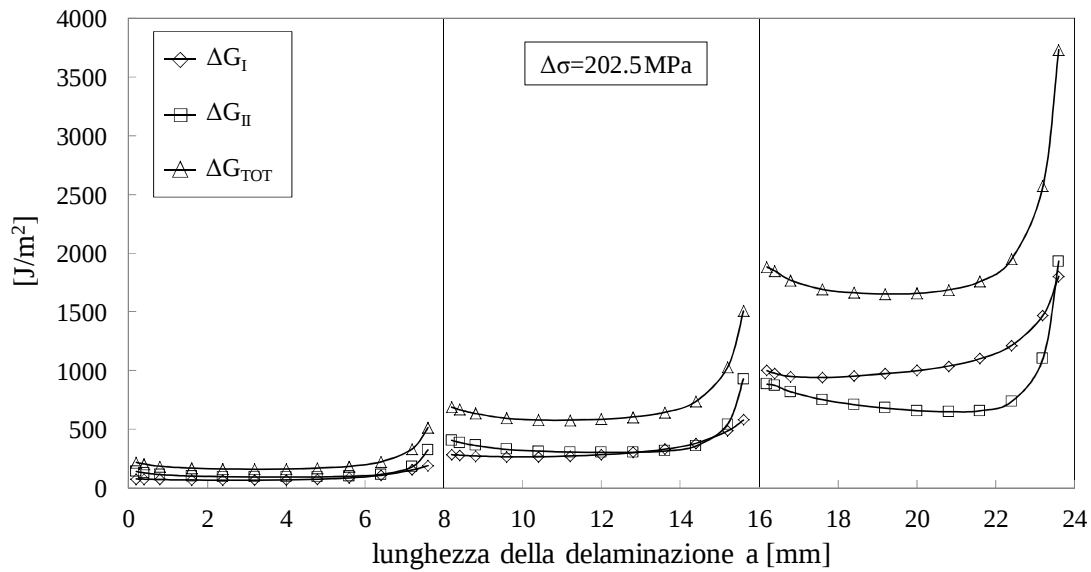


Figura 2.42: Andamento delle componenti del SERR al propagare della delaminazione per la variante della zona di giunzione danneggiata, lunghezza di sovrapposizione $w=8$, $\Delta\sigma=202.5$ MPa (basso carico)

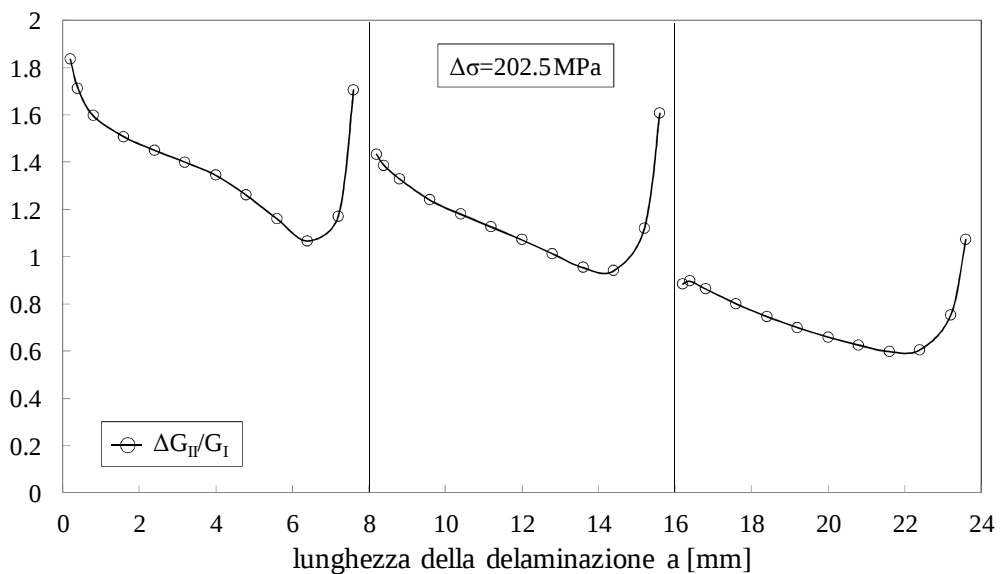


Figura 2.43: Andamento del rapporto G_{II}/G_I al propagare della delaminazione per la variante della zona di giunzione danneggiata, lunghezza di sovrapposizione $w=8$, $\Delta\sigma=202.5$ MPa (basso carico)

Nel grafico successivo è riportato ancora una volta l'andamento delle componenti del SERR all'apice della cricca di 0.2 mm situata all'inizio della seconda interfaccia, al

propagare della delaminazione lungo la prima, e, come nei precedente casi, si registra un valore praticamente nullo e costante di ΔG_I mentre un trend crescente di ΔG_{II} :

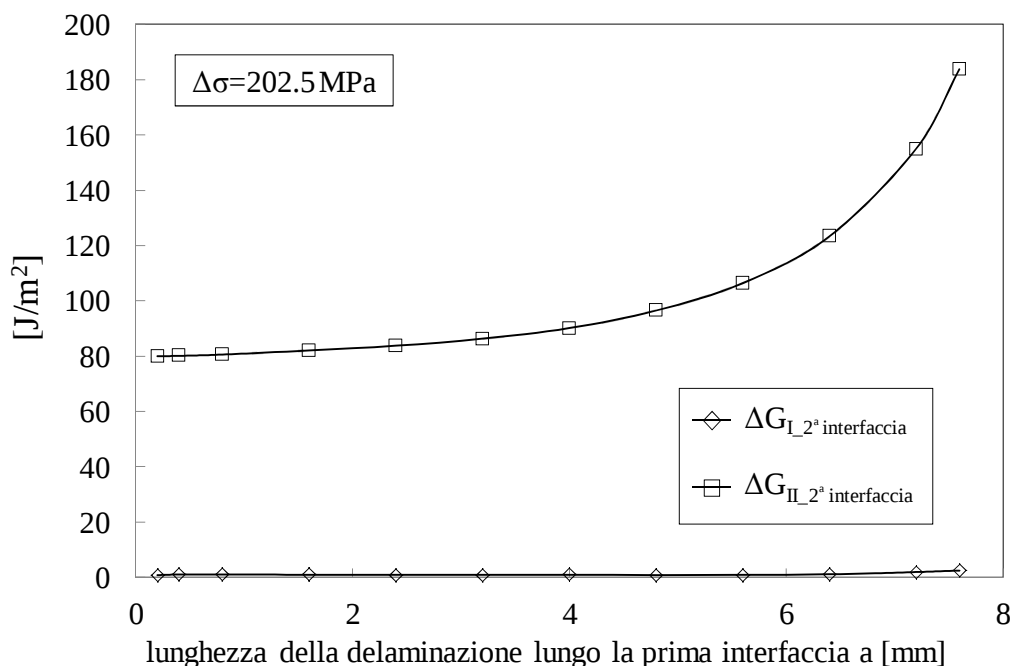


Figura 2.44: Andamento delle componenti del SERR all'apice della cricca situata sulla seconda interfaccia al propagare della delaminazione lungo la prima interfaccia per la variante della zona di giunzione danneggiata, lunghezza di sovrapposizione $w=8$, $\Delta\sigma=202.5$ MPa (basso carico)

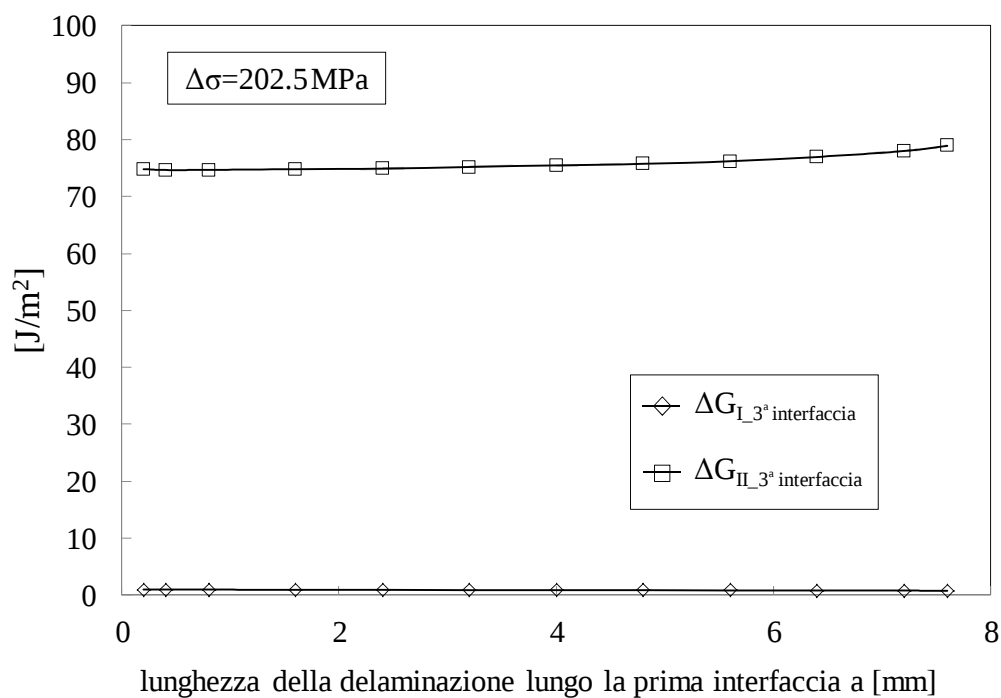


Figura 2.45: Andamento delle componenti del SERR all'apice della cricca situata sulla terza interfaccia al propagare della delaminazione lungo la prima interfaccia per la variante della zona di giunzione danneggiata, lunghezza di sovrapposizione $w=8$, $\Delta\sigma=202.5$ MPa (basso carico)

In corrispondenza dell'apice della cricca di 0.2 mm situata sulla terza interfaccia si registra ancora una volta un valore nullo di ΔG_I e un andamento crescente di ΔG_{II} , anche se di entità minore rispetto a quanto accade in corrispondenza dell'apice situato sulla seconda interfaccia, come mostrato nel grafico precedente.

Una volta che la delaminazione ha completamente separato la prima interfaccia e quindi avanza lungo la seconda è possibile calcolare le componenti del SERR e quindi il loro andamento in corrispondenza della sola cricca di 0.2 mm situata all'inizio della terza interfaccia di nuovo tramite la tecnica di calcolo della VCCT:

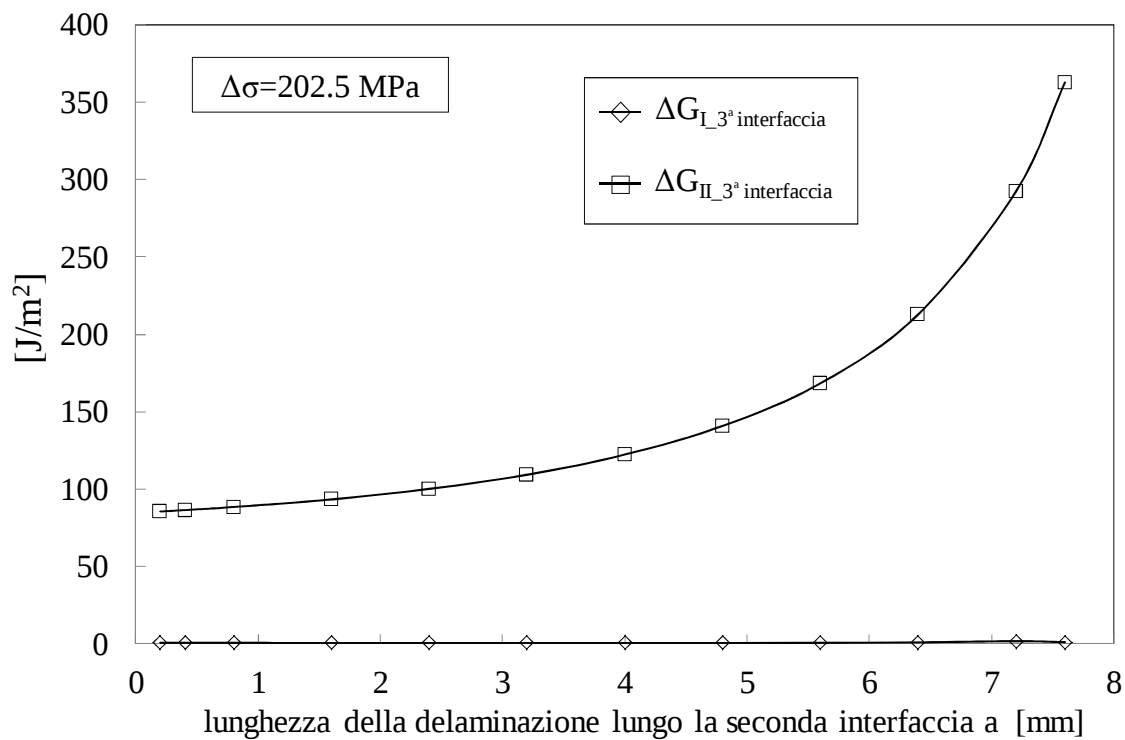


Figura 2.46: Andamento delle componenti del SERR all'apice della cricca situata sulla terza interfaccia al propagare della delaminazione lungo la seconda interfaccia per la variante della zona di giunzione danneggiata, lunghezza di sovrapposizione $w=8$, $\Delta\sigma=202.5$ MPa (basso carico)

Si può quindi visualizzare l'andamento all'apice della cricca situata in corrispondenza del terzo strato al passaggio di interfaccia della delaminazione:

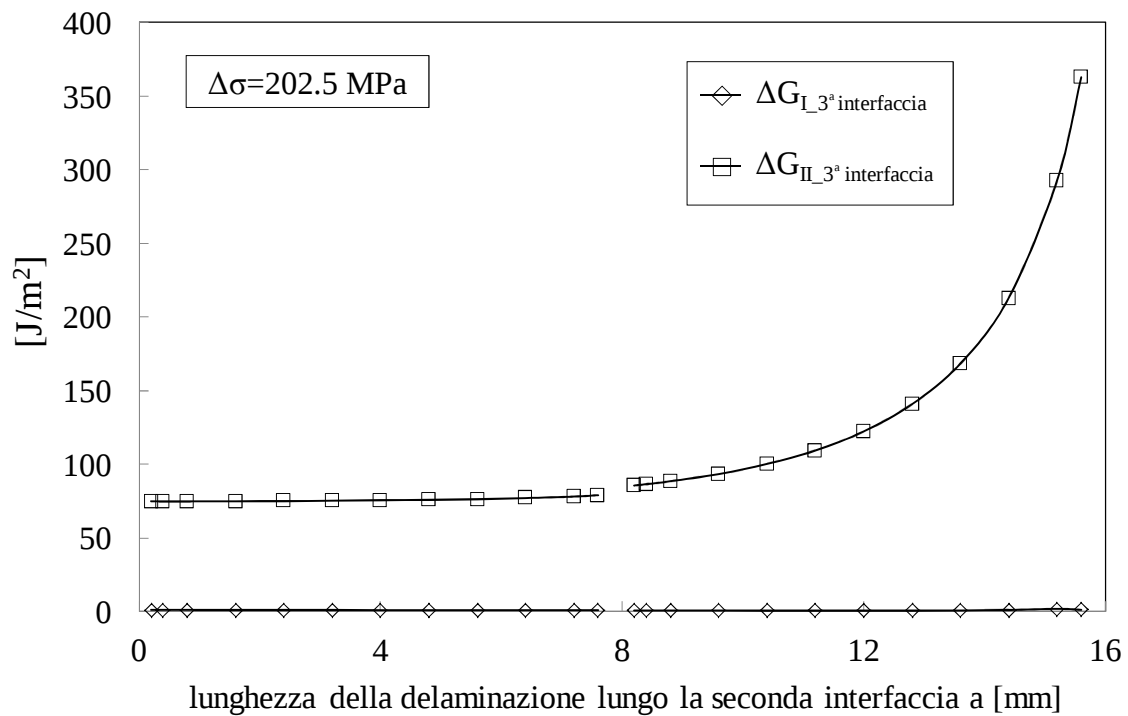


Figura 2.47: Andamento delle componenti del SERR all'apice della cricca situata sulla terza interfaccia al propagare della delaminazione lungo la prima e la seconda interfaccia per la variante della zona di giunzione danneggiata, lunghezza di sovrapposizione $w=8$, $\Delta\sigma=202.5$ MPa (basso carico)

Anche in questo caso rimangono valide le considerazioni fatte per i risultati ottenuti per il giunto con lunghezza di sovrapposizione w pari a 3 mm.

2.6 ANALISI FEM GEOMETRICAMENTE NON LINEARI

Data la presenza di una non linearità geometrica, in quanto nella realtà le giunzioni *stepped-lap* esibiscono spostamenti elevati, una volta completate tutte le analisi geometricamente lineari per le diverse lunghezze di sovrapposizione soggette a basso carico si è deciso di condurre analisi geometricamente non lineari, valutando così la differenza in termini di risultati al fine di scegliere il tipo di analisi più adatto a descrivere il comportamento di una giunzione criccata. La scelta, confermata anche da alcuni lavori presenti in letteratura ([7] H. Onses, 2003), è ricaduta su analisi non lineari poichè in grado di descrivere in modo più adeguato spostamenti elevati e fuori dal piano a cui è sottoposto il giunto criccato. In presenza della cricca infatti questi aumentano consistentemente.

Le analisi, e quindi i file apdl utilizzati in questo ambito, differiscono dai precedenti nella sola sezione dedicata al lancio della risoluzione, che ora prevede l'assunzione di *large displacement* contro la precedente di *small displacement* e la definizione di un numero di *substeps* tramite i quali si arriva ad assegnare la totalità del carico alla giunzione.

È opportuno far presente che nell'ipotesi di *large displacement* alcuni elementi della mesh, soprattutto per carichi elevati e per lunghezze di cricca corrispondenti all'inizio o alla fine dell'interfaccia, subiscono distorsioni troppo elevate che portano alla non convergenza dell'analisi. In alcuni casi questo problema è stato by-passato con delle analisi mirate caratterizzate da *substeps* molto piccoli ma restando comunque nel limite del ragionevole, in quanto per analisi di questo tipo si necessita, nel caso più impegnativo costituito dai giunti con lunghezza di sovrapposizione di 8 mm, anche di alcune ore di analisi.

Data la somiglianza in termini di risultati ottenuti per le componenti del SERR con le analisi geometricamente lineari, sia per quanto riguarda gli andamenti sia per quanto riguarda i valori, condotte per giunti modellati con la zona di giunzione danneggiata (Figura 2.17) e con la variante della zona di giunzione danneggiata (Figura 2.28) si è deciso di utilizzare per le analisi geometricamente non lineari solamente il modello a zona di giunzione danneggiata anche per motivi legati alle tempistiche di risoluzione richieste.



Figura 2.48: schematizzazione della zona di giunzione danneggiata

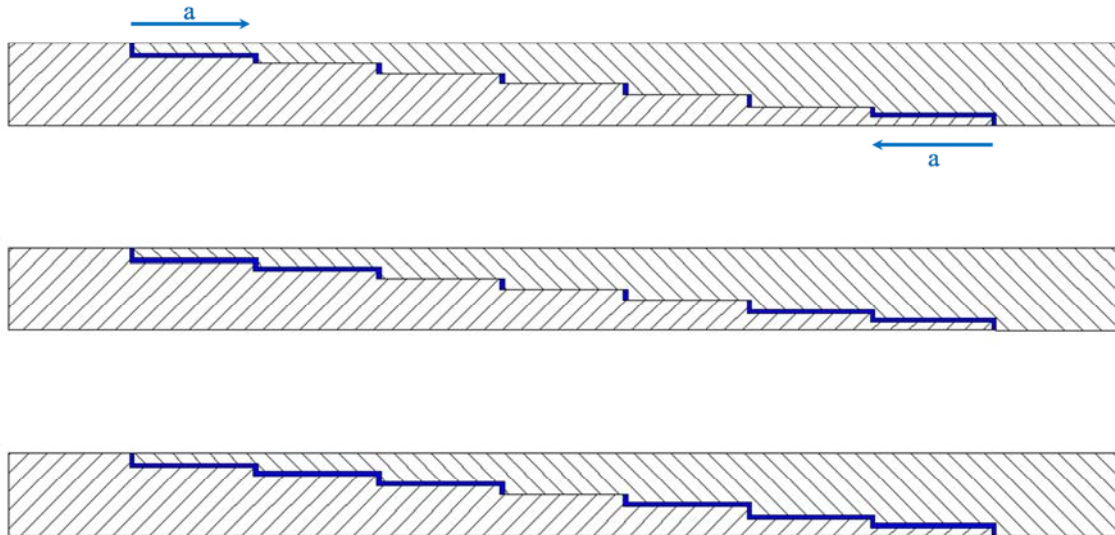


Figura 2.49: schematizzazione della propagazione nella zona di giunzione

I grafici successivi riportano i valori di ΔG_I , ΔG_{II} e ΔG_{TOT} ed il rapporto $\Delta G_{II}/\Delta G_I$, ottenuti dalle analisi agli elementi finiti giunte a convergenza, calcolati per provini $[0]_8$ con lunghezza di sovrapposizione w pari a 3, 5, 8 in funzione della lunghezza di cricca sottoposti a basso carico.

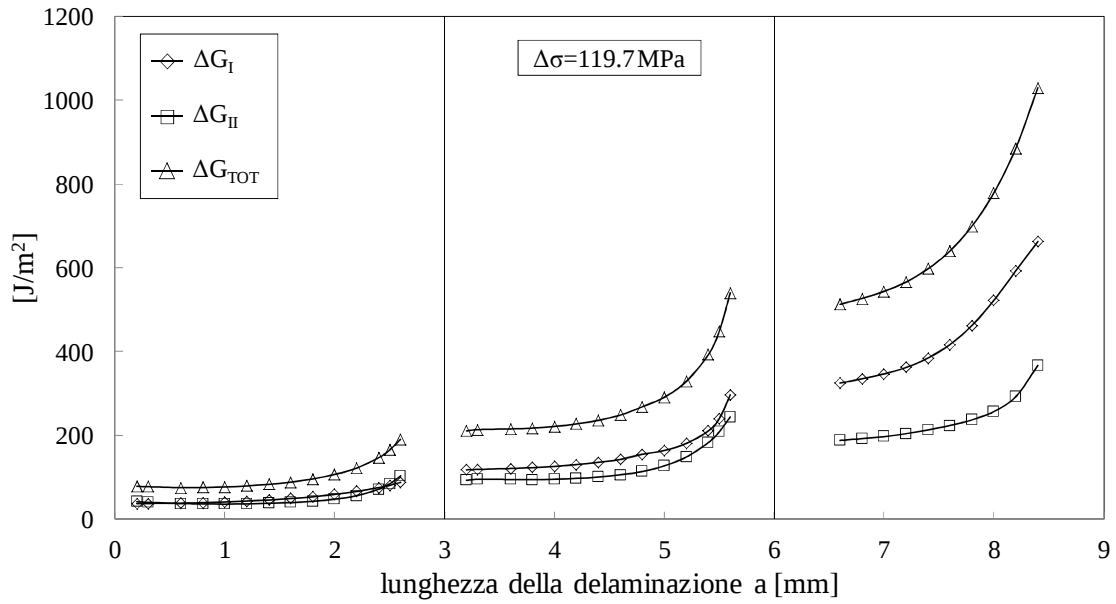


Figura 2.50: Andamento delle componenti del SERR al propagare della delaminazione per zona di giunzione danneggiata, lunghezza di sovrapposizione $w=3$, $\Delta\sigma=119.7 \text{ MPa}$ (basso carico), analisi geometricamente NON LINEARI

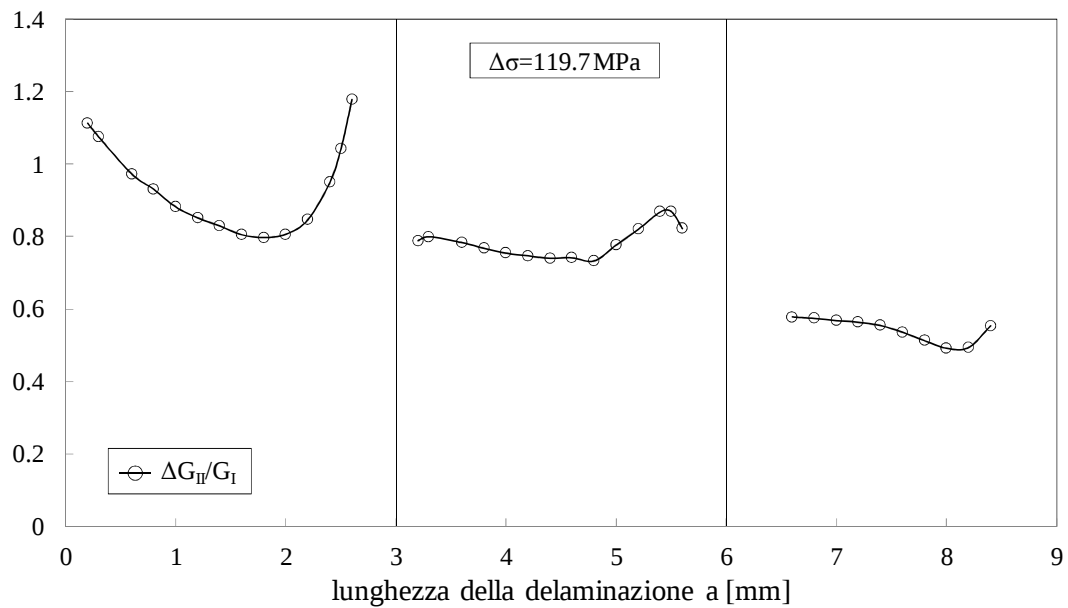


Figura 2.51: Andamento del rapporto $\Delta G_{II}/\Delta G_I$ al propagare della delaminazione per zona di giunzione danneggiata, lunghezza di sovrapposizione $w=3$, $\Delta\sigma=119.7 \text{ MPa}$ (basso carico), analisi geometricamente NON LINEARI

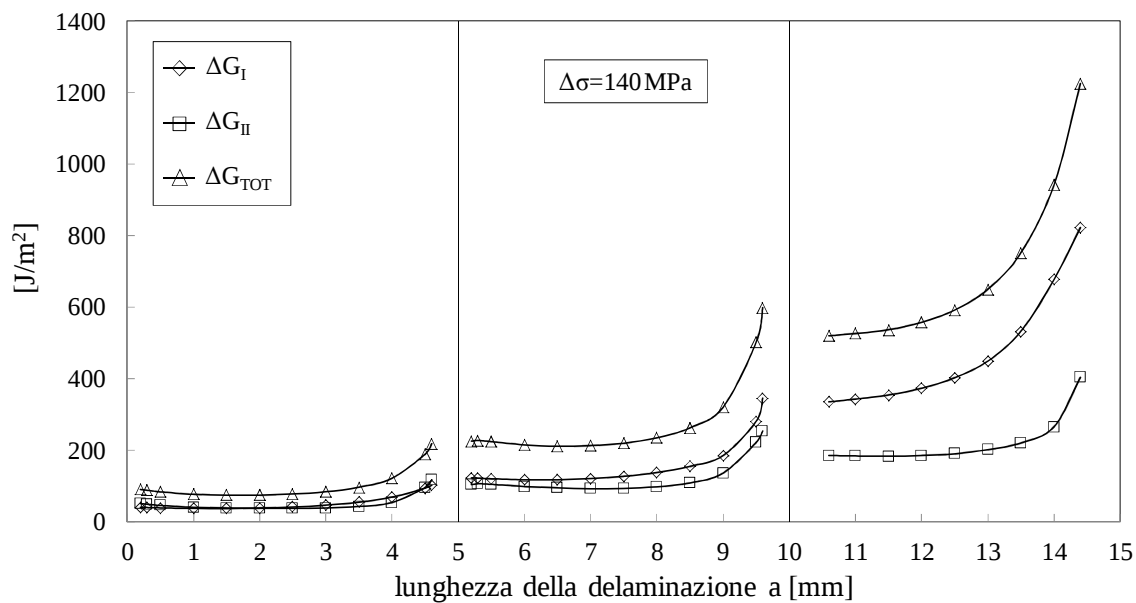


Figura 2.52: Andamento delle componenti del SERR al propagare della delaminazione per zona di giunzione danneggiata, lunghezza di sovrapposizione $w=5$, $\Delta\sigma=140$ MPa (basso carico), analisi geometricamente NON LINEARI

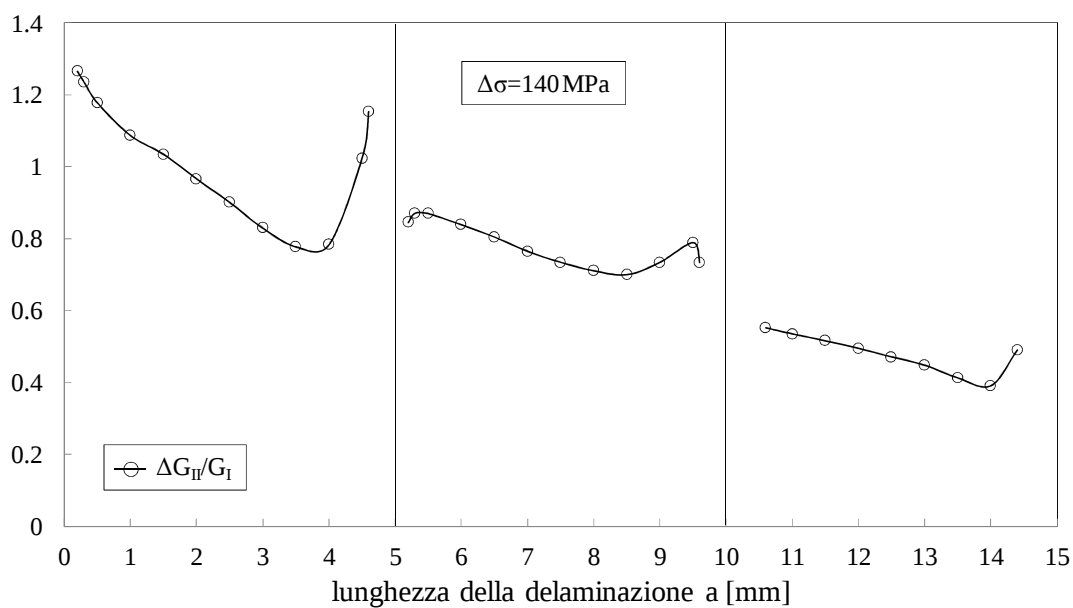


Figura 2.53: Andamento del rapporto $\Delta G_{II}/\Delta G_I$ al propagare della delaminazione per zona di giunzione danneggiata, lunghezza di sovrapposizione $w=5$, $\Delta\sigma=140$ MPa (basso carico), analisi geometricamente NON LINEARI

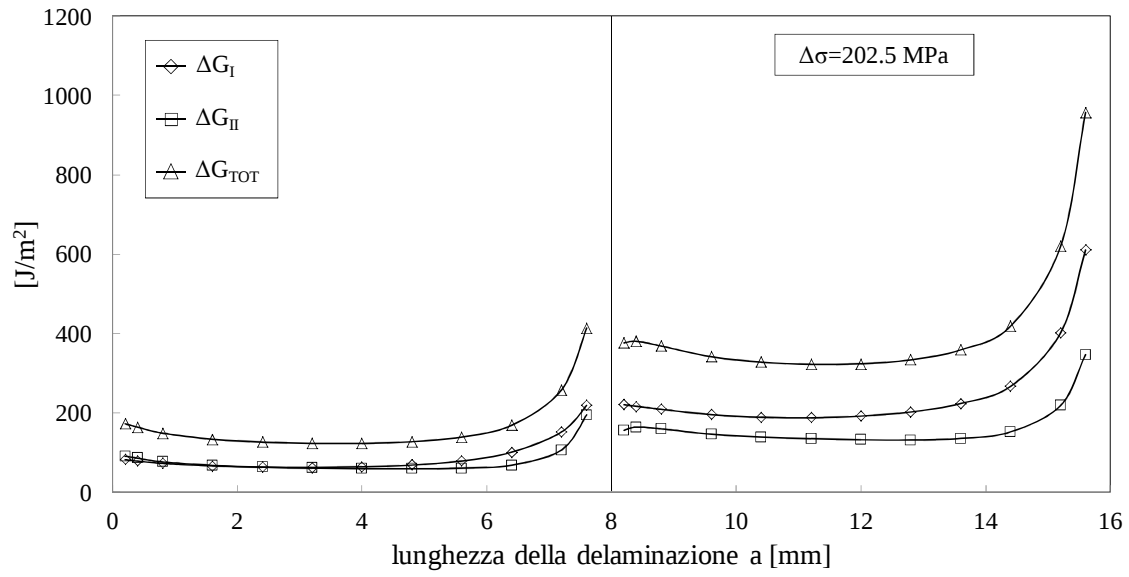


Figura 2.54: Andamento delle componenti del SERR al propagare della delaminazione per zona di giunzione danneggiata, lunghezza di sovrapposizione $w=8$, $\Delta\sigma=202.5$ MPa (basso carico), analisi geometricamente NON LINEARI

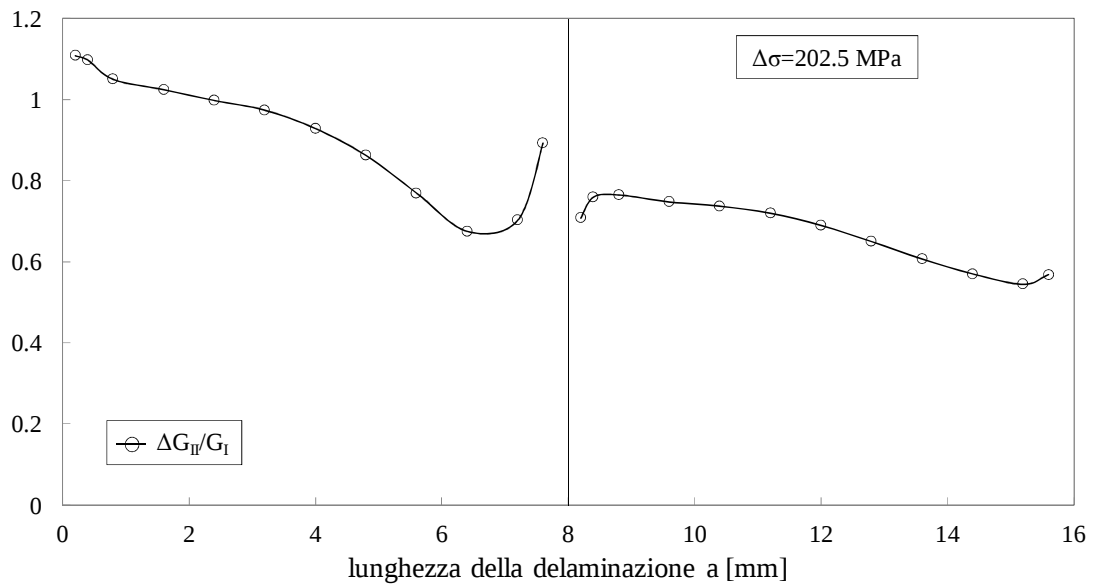


Figura 2.55: Andamento del rapporto $\Delta G_{II}/\Delta G_I$ al propagare della delaminazione per zona di giunzione danneggiata, lunghezza di sovrapposizione $w=8$, $\Delta\sigma=202.5$ MPa (basso carico), analisi geometricamente NON LINEARI

Come si può notare dai grafici la caratterizzazione della propagazione della delaminazione lungo la terza interfaccia non è completa per quanto riguarda le lunghezze di sovrapposizione pari a 3 e 5 mm, e del tutto assente nel caso di w pari a 8. Queste mancanze di dati testimoniano la difficoltà delle relative analisi a raggiungere la convergenza a causa dell'elevata distorsione subita dagli elementi. Per far fronte a questo inconveniente si potrebbero usare dimensioni di elemento più piccole oppure assegnando *substeps* inferiori (con i quali si attribuisce la totalità del carico tramite quote parti costanti). D'altro canto, come già accennato nell'introduzione di questo paragrafo, ulteriori diminuzioni di questi comporterebbero aumenti in termini di tempi di calcolo troppo onerosi.

Confermati anche in questo caso andamenti sostanzialmente crescenti delle componenti del SERR, i precedenti grafici inoltre mettono in evidenza come sia ora il modo I il fattore che principalmente influenza il cedimento della giunzione almeno per quanto riguarda l'interfaccia soggetta alla propagazione della delaminazione. Per gli strati interni infatti, dopo che sono state eseguite a campione delle analisi geometricamente non lineari caratterizzate dall'utilizzo del modello "variante della zona di giunzione danneggiata", sono stati confermati i trend riportati in precedenza relativamente alle analisi lineari geometriche e quindi per questi il Modo II rimane il fattore che maggiormente influenza il cedimento.

Si può ancora osservare come da un punto di vista qualitativo i grafici esibiscano degli andamenti anche per quanto riguarda il rapporto $\Delta G_{II}/\Delta G_I$ abbastanza simili in relazione all'interfaccia considerata.

Infine i valori di ΔG ottenuti tramite analisi non lineari risultano essere inferiori rispetto a quelli calcolati con analisi lineari a parità di propagazione della cricca.

Poiché la non linearità geometrica permette quindi di descrivere in maniera più appropriata la propagazione della cricca lungo le varie interfacce della zona di giunzione, si decide di mantenere tale modalità di risoluzione e di proseguire quindi alla caratterizzazione dei giunti *stepped-lap* analizzando il loro comportamento anche per carichi elevati.

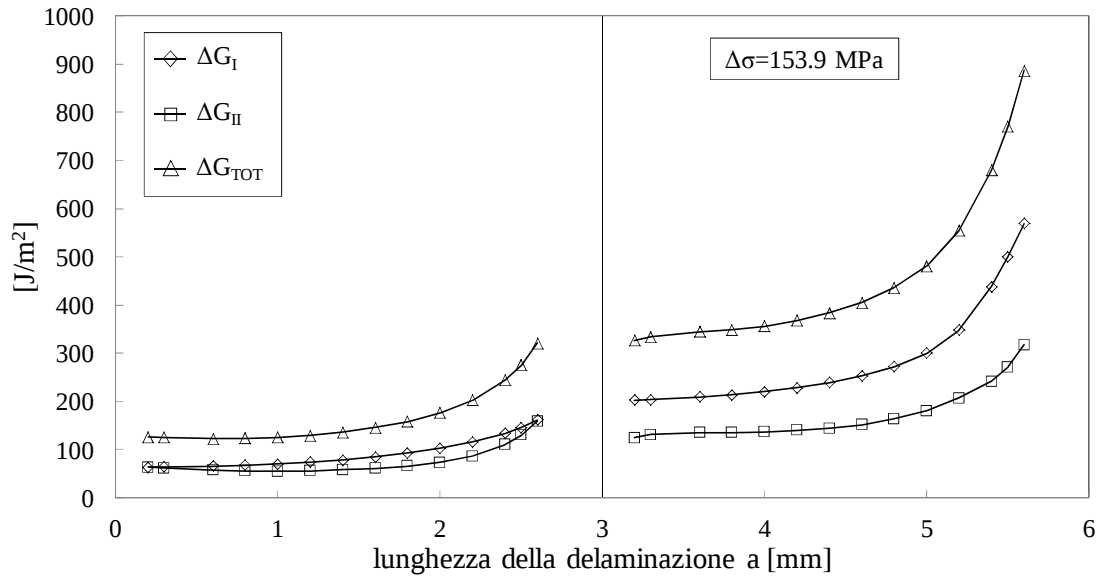


Figura 2.56: Andamento delle componenti del SERR al propagare della delaminazione per zona di giunzione danneggiata, lunghezza di sovrapposizione $w=3$, $\Delta\sigma=153.9$ MPa (alto carico), analisi geometricamente NON LINEARI

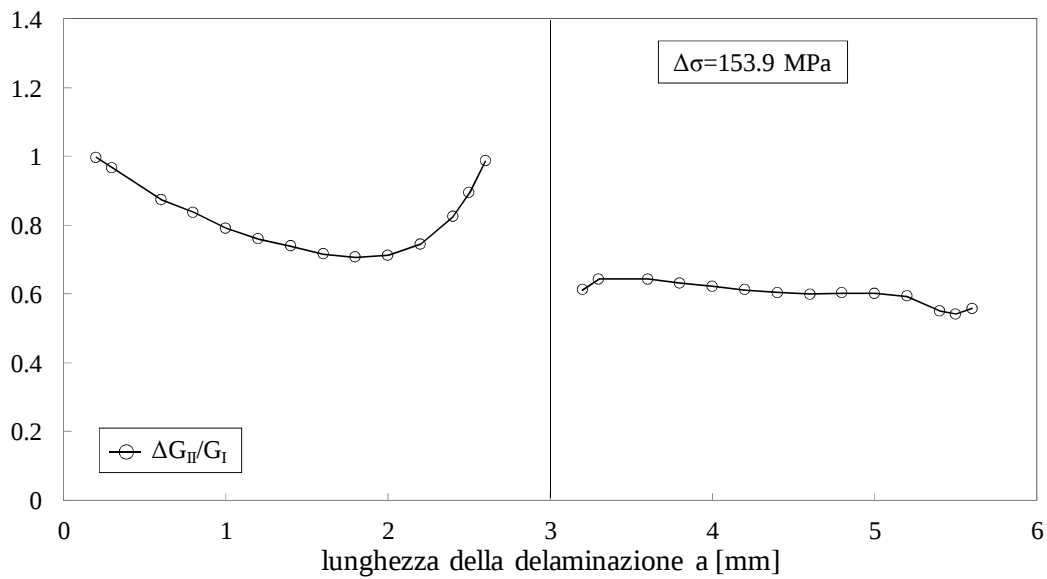


Figura 2.57: Andamento del rapporto $\Delta G_{II}/\Delta G_I$ al propagare della delaminazione per zona di giunzione danneggiata, lunghezza di sovrapposizione $w=3$, $\Delta\sigma=153.9$ MPa (alto carico), analisi geometricamente NON LINEARI

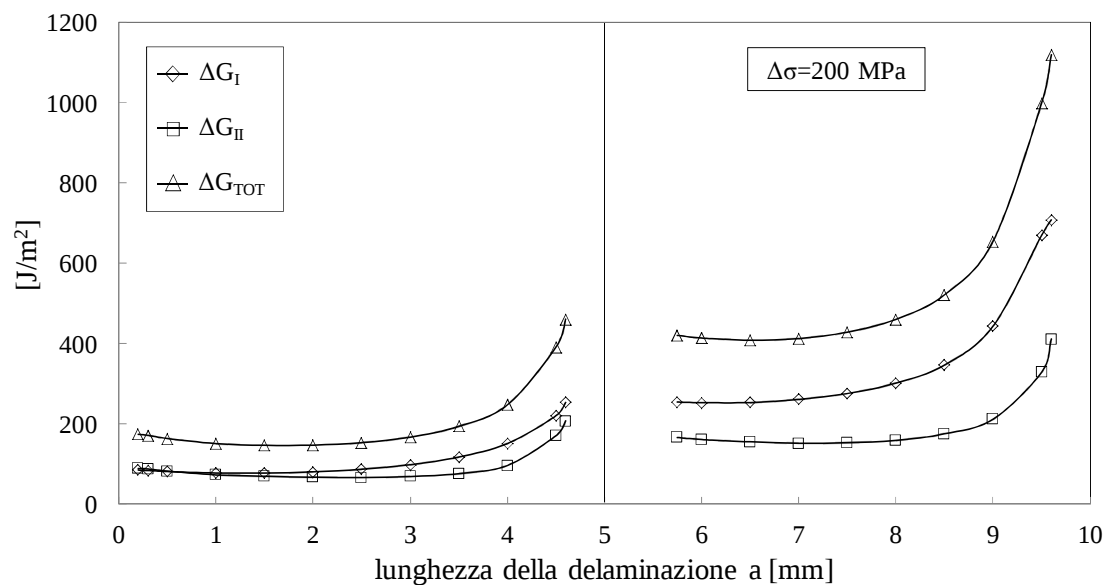


Figura 2.58: Andamento delle componenti del SERR al propagare della delaminazione per zona di giunzione danneggiata, lunghezza di sovrapposizione $w=5$, $\Delta\sigma=200$ MPa (alto carico), analisi geometricamente NON LINEARI

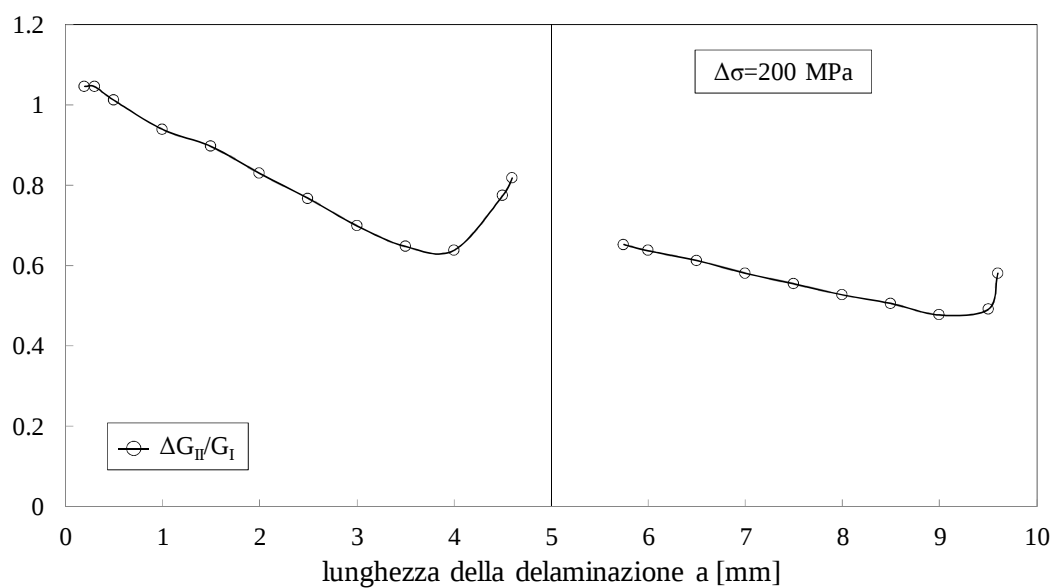


Figura 2.59: Andamento del rapporto $\Delta G_{II}/\Delta G_I$ al propagare della delaminazione per zona di giunzione danneggiata, lunghezza di sovrapposizione $w=5$, $\Delta\sigma=200$ MPa (alto carico), analisi geometricamente NON LINEARI

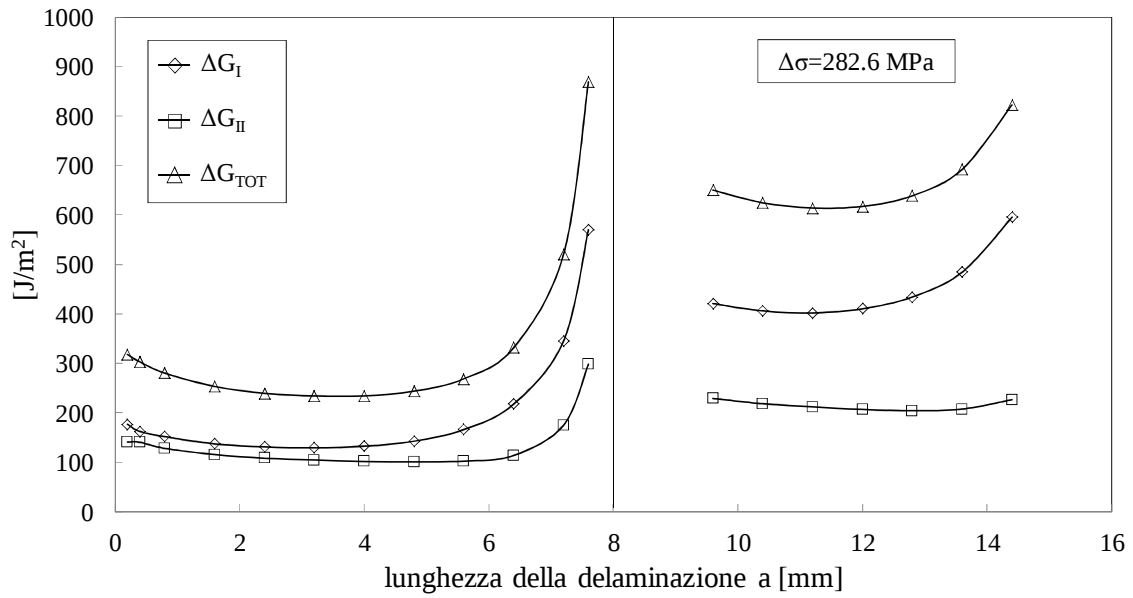


Figura 2.60: Andamento delle componenti del SERR al propagare della delaminazione per zona di giunzione danneggiata, lunghezza di sovrapposizione $w=8$, $\Delta\sigma=282.6 \text{ MPa}$ (alto carico), analisi geometricamente NON LINEARI

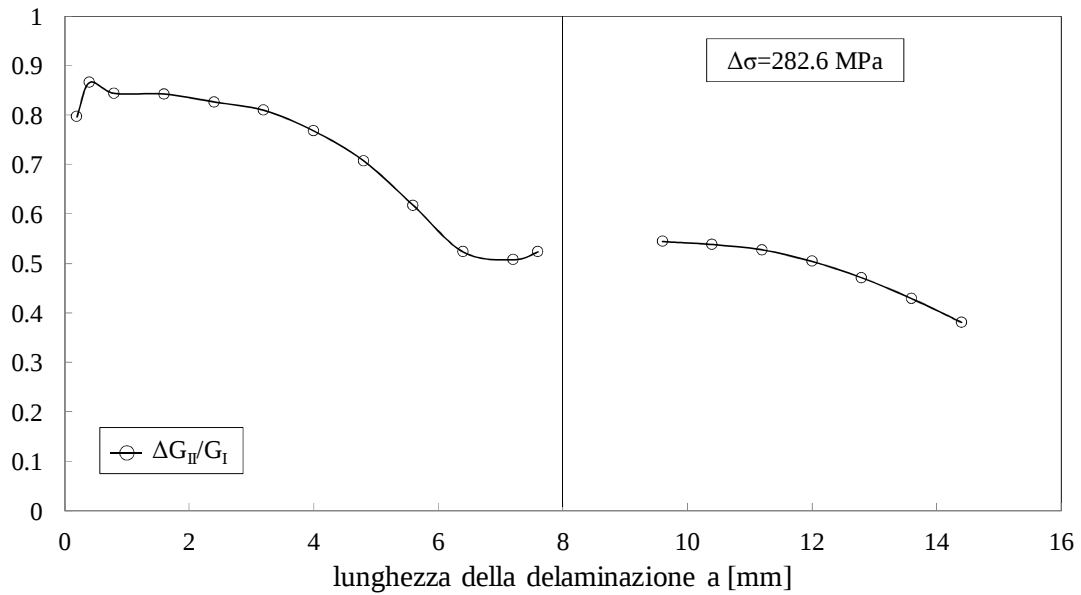


Figura 2.61: Andamento del rapporto $\Delta G_{II}/\Delta G_I$ al propagare della delaminazione per zona di giunzione danneggiata, lunghezza di sovrapposizione $w=8$, $\Delta\sigma=282.6 \text{ MPa}$ (alto carico), analisi geometricamente NON LINEARI

Per quanto riguarda l'alto carico non è stato possibile seguire la propagazione della delaminazione lungo la terza interfaccia a causa, ancora una volta, dell'eccessiva distorsione presentata da alcuni elementi. Lo stesso inconveniente si è presentato per valori di cricca corrispondenti all'inizio e alla fine della seconda interfaccia. Si può osservare come per i provini soggetti ad alto carico sia più evidente la maggior influenza del Modo I sul danneggiamento della zona di giunzione (Figura 2.57, Figura 2.59, Figura 2.61). Per quanto riguarda le componenti del SERR si vede come per lunghezza di sovrapposizione w pari a 3 mm l'andamento sia praticamente sempre crescente, mentre i provini con w pari a 5 e 8 mm esibiscono un iniziale trend decrescente, durante il quale la giunzione sembra non avvertire la propagazione della delaminazione, seguito da una fase ad andamento pressoché costante per poi aumentare nella parte finale dell'interfaccia. Tale comportamento è più accentuato all'aumentare della lunghezza di sovrapposizione.

Si possono a questo punto riassumere i risultati ottenuti nei seguenti grafici ove 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, per cui la vita a fatica attesa si aggira attorno ai 2000000 cicli, ed alto carico per cui la vita a fatica attesa si aggira attorno ai 50000÷100000 cicli) in funzione della lunghezza di delaminazione normalizzata rispetto alla lunghezza di sovrapposizione:

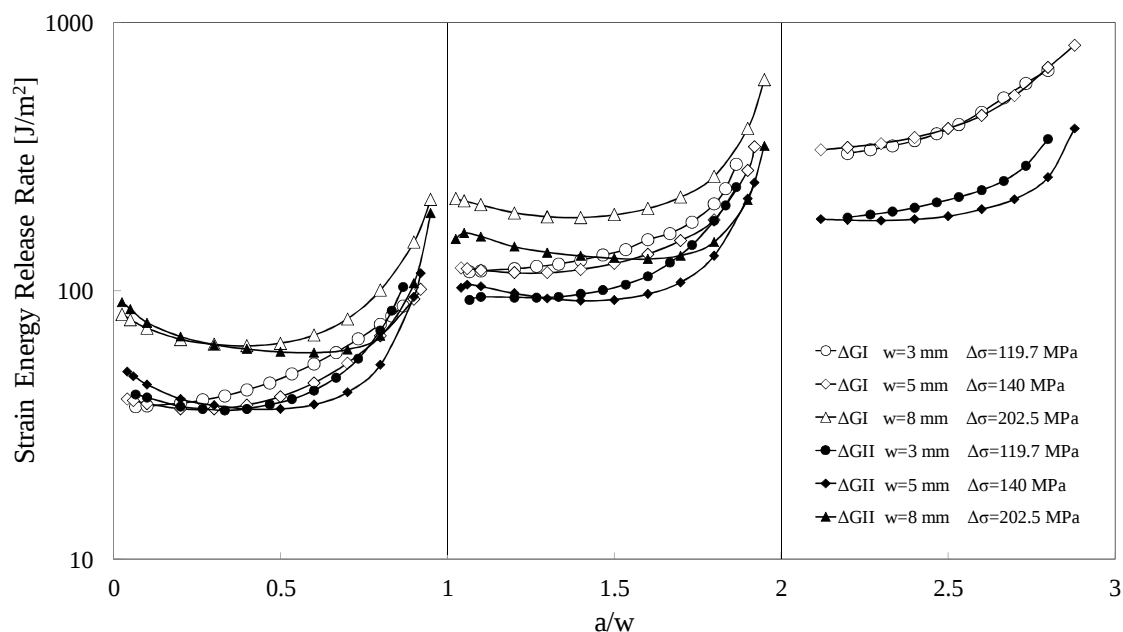


Figura 2.62: andamento di ΔG_I e ΔG_{II} per i vari *overlap* soggetti a basso carico in funzione della lunghezza di delaminazione normalizzata rispetto alla lunghezza di sovrapposizione

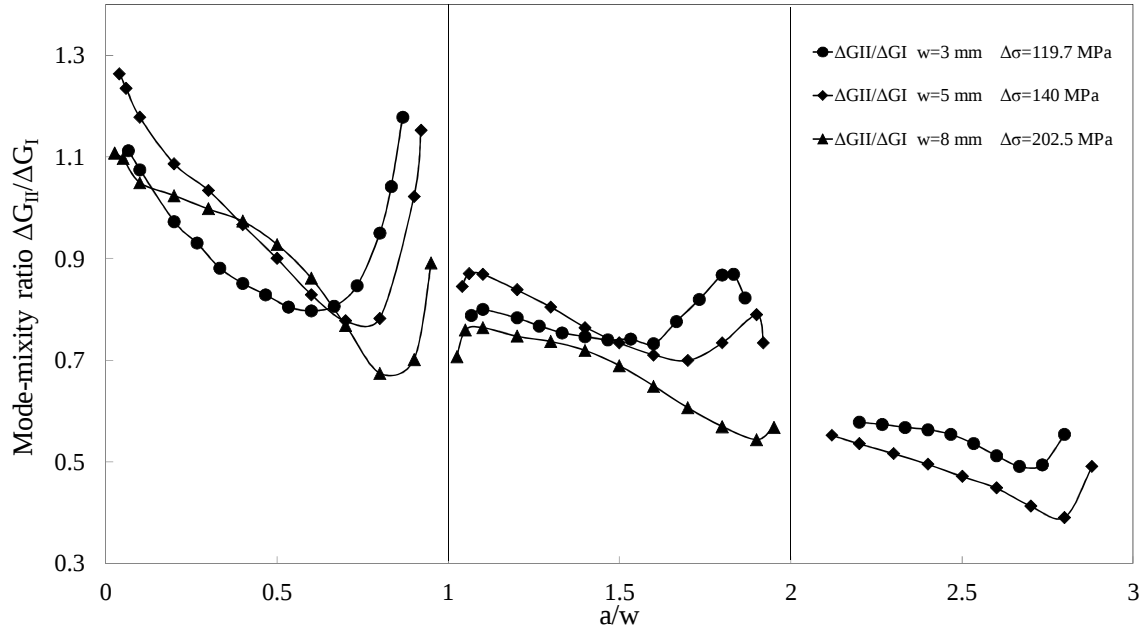


Figura 2.63: andamento di $\Delta G_{II}/\Delta G_I$ per i vari *overlap* soggetti a basso carico in funzione della lunghezza di delaminazione normalizzata rispetto alla lunghezza di sovrapposizione

Utilizzando in aggiunta la formulazione del Modo Misto (MM) reperita in ([16] P.A. Carraro G. Meneghetti M. Quaresimin M. Ricotta, 2012):

$$MM = \frac{G_{II}}{G_I + G_{II}} \quad (2.8)$$

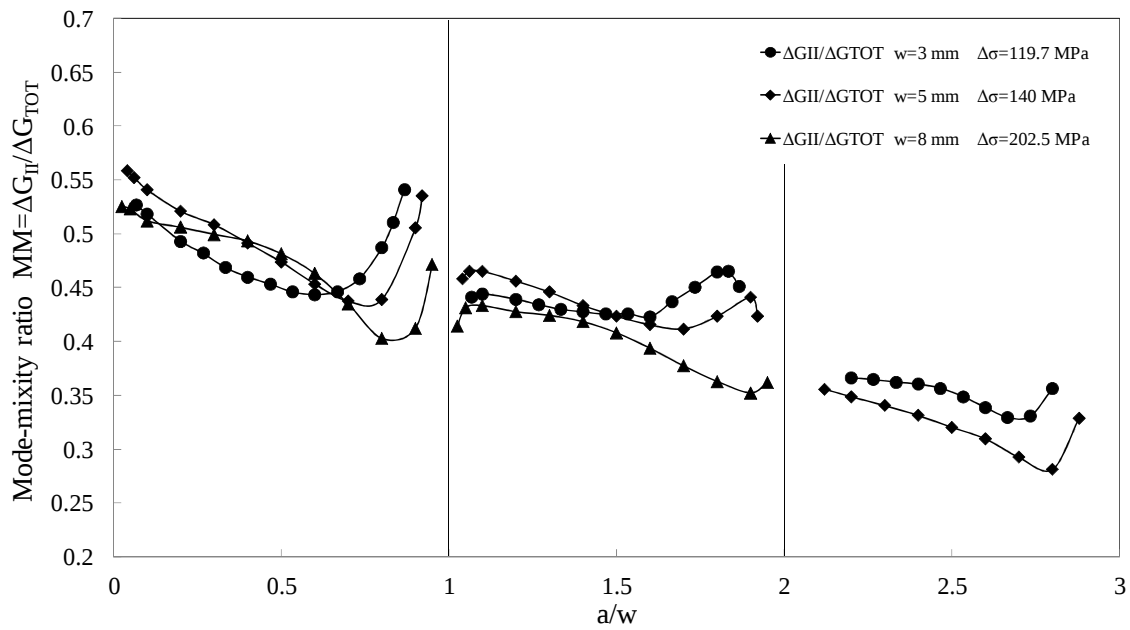


Figura 2.64: andamento del $MM=\Delta G_{II}/\Delta G_{TOT}$ per i vari *overlap* soggetti a basso carico in funzione della lunghezza di delaminazione normalizzata rispetto alla lunghezza di sovrapposizione

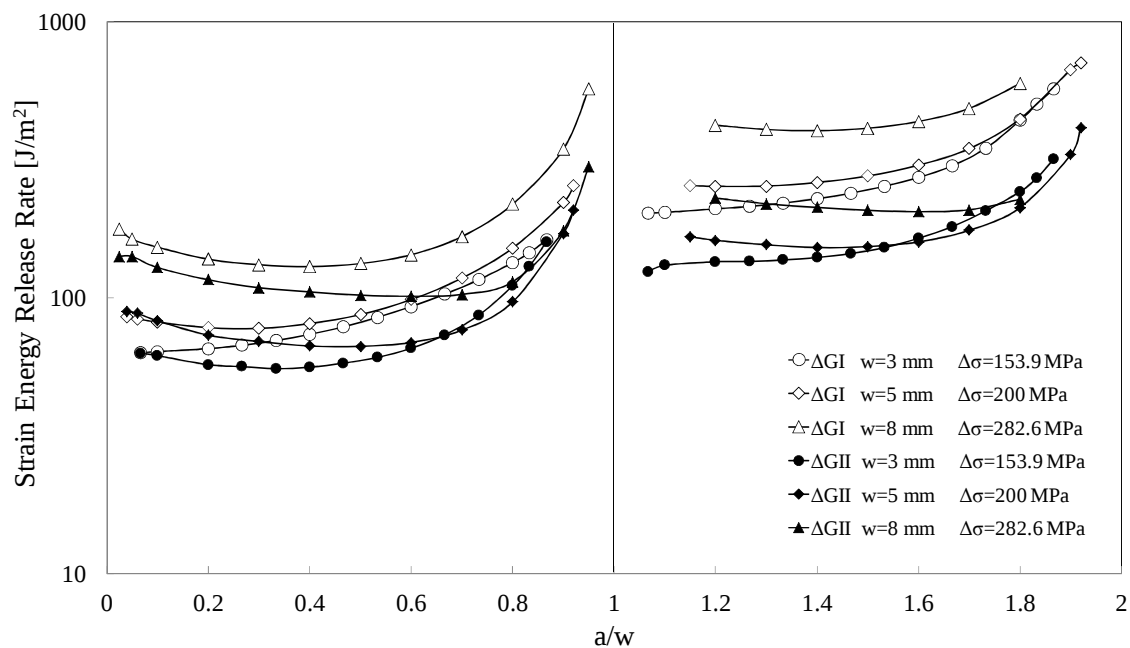


Figura 2.65: andamento di ΔG_I e ΔG_{II} per i vari overlap soggetti ad alto carico in funzione della lunghezza di delaminazione normalizzata rispetto alla lunghezza di sovrapposizione

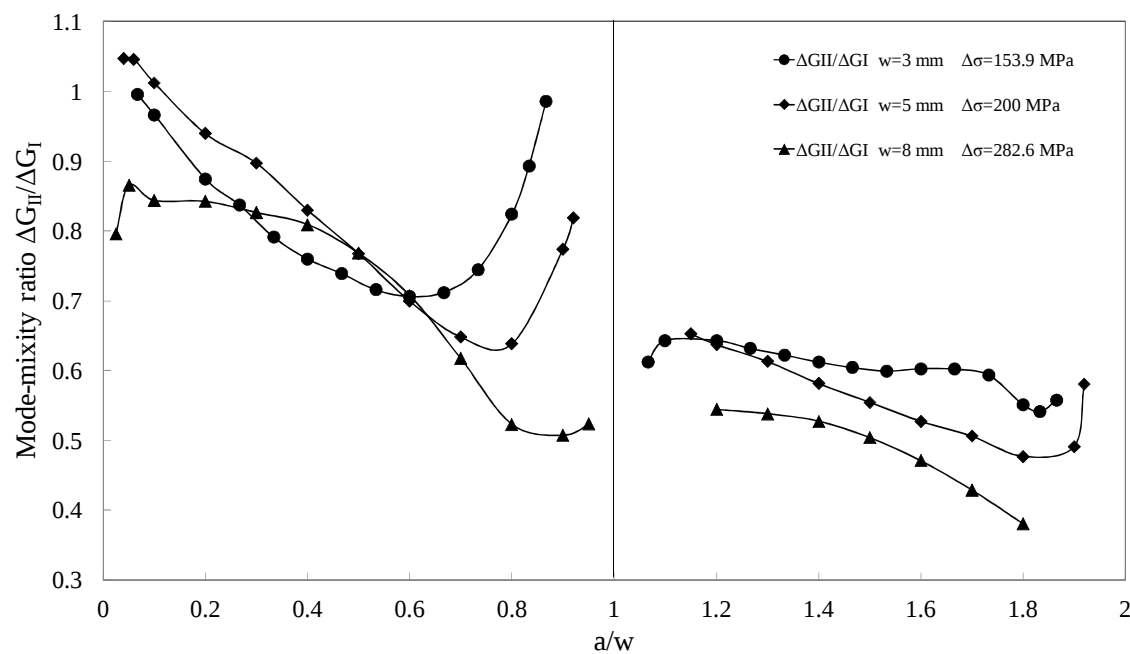


Figura 2.66: andamento di $\Delta G_{II}/\Delta G_I$ per i vari overlap soggetti ad alto carico in funzione della lunghezza di delaminazione normalizzata rispetto alla lunghezza di sovrapposizione

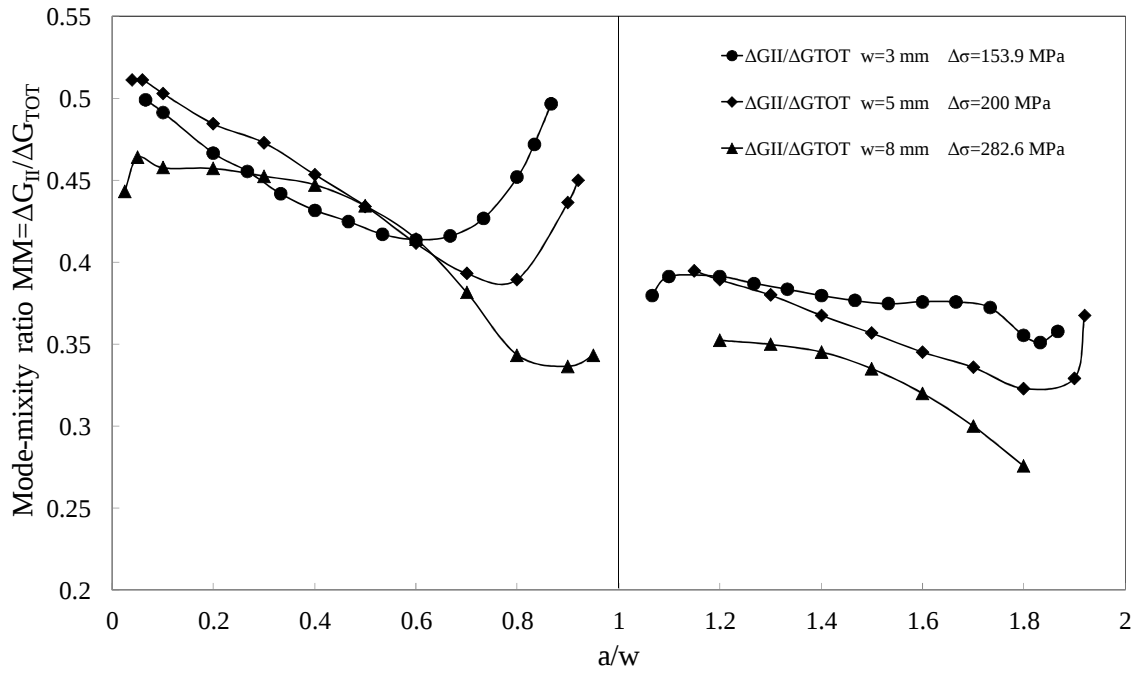


Figura 2.67: andamento del $MM=\Delta G_{II}/\Delta G_{TOT}$ per i vari *overlap* soggetti ad alto carico in funzione della lunghezza di delaminazione normalizzata rispetto alla lunghezza di sovrapposizione

Capitolo 3: ANALISI DELLE PROPAGAZIONI E COSTRUZIONE DELLA CURVA DI PARIS

3.1 INTRODUZIONE

In questo capitolo vengono richiamati e riutilizzati i dati raccolti dall'attività sperimentale condotta in ([6] Polloni Simone, 2003-2004), nella quale è analizzata l'evoluzione del danneggiamento delle giunzioni stepped-lap sottoposte a carichi ciclici e cioè è stato osservato l'avanzamento delle delaminazioni ai bordi della giunzione e i fronti di rottura all'interno del provino. A titolo riassuntivo viene riportata la tabella contenente i provini analizzati:

Codice provino	Over-lap	σ_r [MPa]	%σ_r	N cicli attesi	N cicli attesi
S03_21	3	359.94	35	200000	506000
S03_22					272000
S03_24			45	20000	36111
S03_19					81600
S03_20					104000
S05_18	5	420.42	35	1200000	1440000
S05_19					852000
S05_14			50	50000	22500
S05_17					27500
S08_20	8	425.01	50	1300000	1340000
S08_18					1860310
S08_19					1402000
S08_16			70	50000	63000
S08_17					36000

Tabella 3.1: provini e carichi analizzati

Come già detto in precedenza, 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 punto lo scenario che si presenta è l'insorgenza della delaminazione che propaga dagli strati esterni a quelli interni.

Per descrivere più facilmente l'evoluzione del danneggiamento durante la vita a fatica del giunto, sono state numerate le zone di sovrapposizione tra le varie interfacce come mostrato in figura seguente:

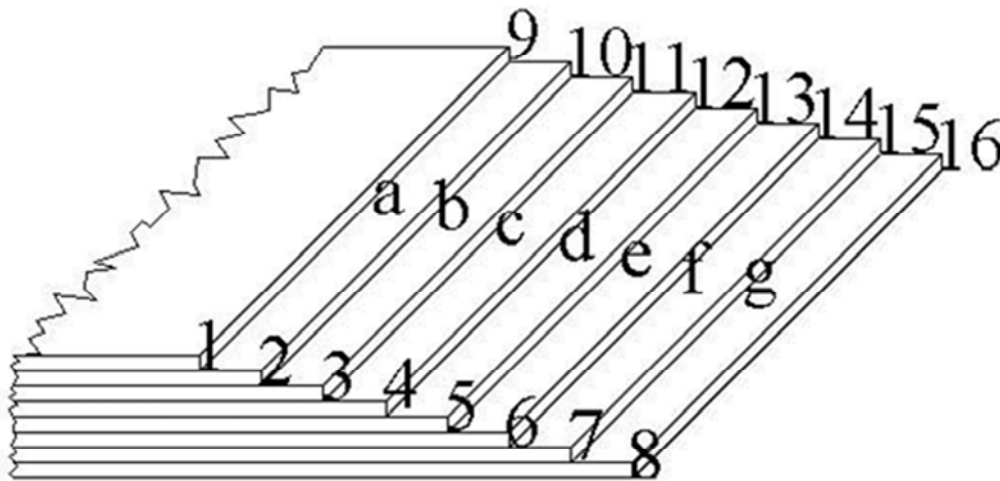


Figura 3.1: numerazione della zona di giunzione

In ([6] Polloni Simone, 2003-2004) sono riportati i grafici e le tabelle contenenti gli andamenti delle varie delaminazioni innescate a partire da punti numerati in Figura 3.1. L'analisi sperimentale condotta e la misura tramite microscopio delle cricche ai bordi del provino, ha evidenziato come in alcuni casi le delaminazioni innescano a partire dai punti più critici: 1-8-9-16, le quali alcune volte evolvono in maniera sostanzialmente uniforme fino al cedimento del giunto; mentre altre volte è una sola la delaminazione che propaga fino alla lunghezza critica. Per la delaminazione che porterà alla separazione della giunzione sono stati evidenziati tre periodi: uno in cui si ha la formazione della cricca stessa (1° periodo), un 2° periodo in cui la propagazione rallenta ed infine un 3° e ultimo

periodo in cui si ha un aumento della velocità di propagazione e la successiva rottura del provino. Molto spesso il periodo di stasi di una delaminazione coincide con il propagare di un'altra. Il tempo necessario per delaminare le interfacce a e g rappresenta gran parte della vita del provino stesso.

È opportuno far presente che tramite le osservazioni al microscopio è possibile rilevare i danni solamente lungo i bordi del provino; d'altra parte non si acquisisce alcuna informazione sul comportamento della giunzione lungo la sua larghezza. Sempre nel lavoro di Simone Polloni sono state inoltre condotte delle analisi ultrasoniche con le quali è stato possibile valutare il grado di danneggiamento lungo tutta la larghezza del campione permettendo un confronto tra i due approcci.

3.2 MEDIA DELLE DELAMINAZIONI MEDIE

Con questo nome si identifica il primo approccio preso in considerazione per l'analisi delle propagazioni.

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 e quindi una sua correlazione con le componenti del SERR calcolate nelle precedenti analisi (capitolo 2). Infatti un tale parametro consentirebbe di stimare i valori del SERR, almeno in una progettazione preliminare, tramite l'utilizzo di analisi agli elementi finiti sotto le condizioni di *plane strain*.

Poiché nelle analisi condotte si è prevista una propagazione simultanea e simmetrica delle delaminazioni da entrambi gli estremi 1 e 8 o 9 e 16 (Figura 3.1), essendo il nostro un modello 2D, per definire in maniera realistica un parametro atto a quantificare il danneggiamento della giunzione, ma anche per garantire una sua facile correlazione con le componenti del SERR calcolate, si è deciso di considerare 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. Si ignorano difatti eventuali cricche e relative propagazioni negli strati più interni della giunzione in quanto i dati sperimentali riportati in ([6] Polloni Simone, 2003-2004) hanno evidenziato come possano essere ragionevolmente trascurate se confrontate con le delaminazioni che portano a

cedimento il provino. Nella maggior parte dei casi, comunque, tali cricche vengono inglobate dall'avanzare della delaminazione principale lungo le varie interfacce del giunto.

Calcolata così la media delle delaminazioni medie “ a ”, con il quale si determina la velocità di propagazione da/dN , è possibile poi calcolare tramite le curve di ΔG il relativo valore del Strain Energy Release Rate e quindi la costruzione della curva di Paris.

➤ **Provino S03_21 $\Delta\sigma=119.7$ MPa (basso carico):**

La particolarità di questo campione è costituita dalla presenza di un'unica delaminazione innescata dal punto 1 (Figura 3.1). Si riporta quindi il grafico ottenuto calcolando la media delle delaminazioni medie in funzione del numero di cicli:

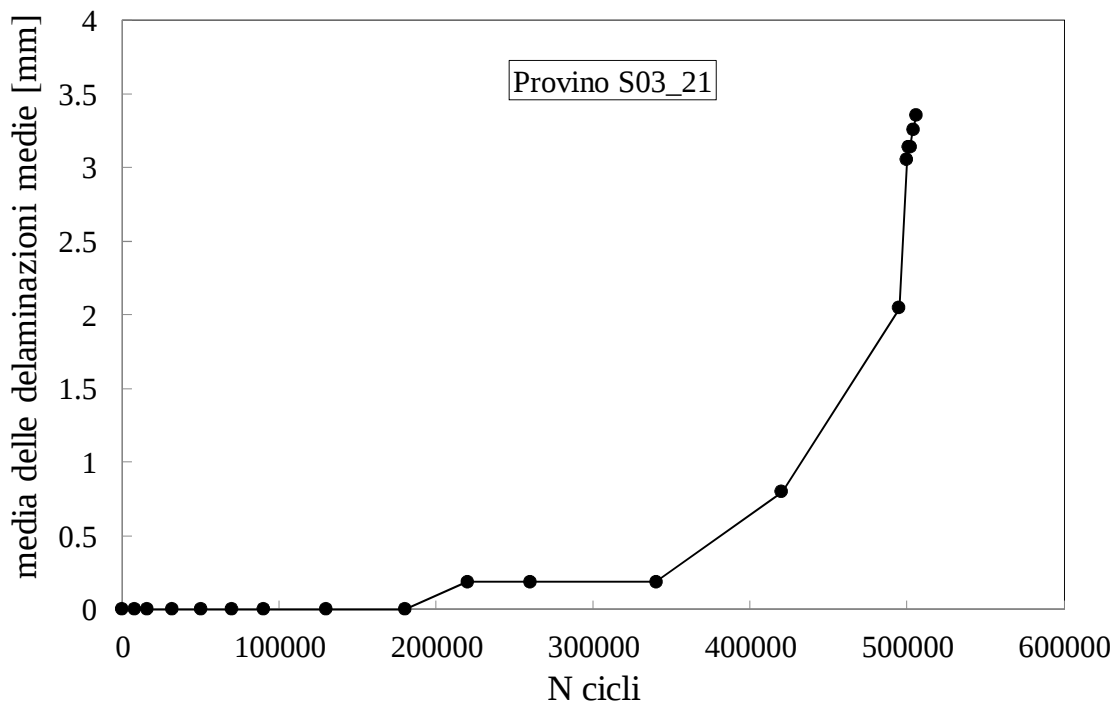


Figura 3.2: propagazione sperimentale della media delle delaminazioni medie ($\Delta\sigma=119.7$ MPa, basso carico)

In questa trattazione la valutazione della velocità di propagazione da/dN è stata effettuata mediante il calcolo del rapporto incrementale tra due punti successivi; a tal riguardo, intervalli temporali in cui non si è osservata alcuna propagazione di cricca che si traducono in tratti a pendenza nulla nel diagramma precedente, comportano l'annullarsi del rapporto incrementale e quindi una conseguente velocità di propagazione pari a 0. Per evitare questo

inconveniente è stato considerato il valor medio dei punti giacenti nei tratti orizzontali, ossia il valor medio del numero di cicli caratterizzati da un'estensione di cricca costante; nel presente caso per i tre punti a 220000, 260000, 340000 cicli, per i quali la lunghezza di cricca è rimasta costante e pari 0.186 mm, si è calcolato il valor medio pari a 280000 cicli, e quindi il grafico precedente diventa:

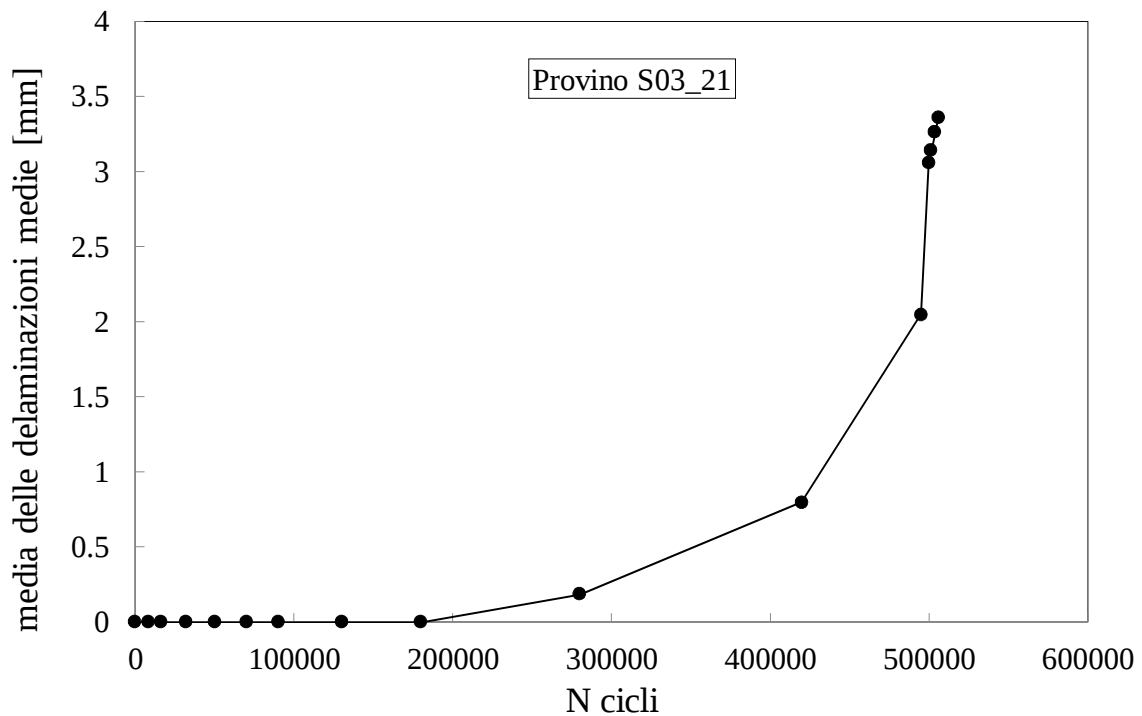


Figura 3.3: propagazione rielaborata della media delle delaminazioni medie ($\Delta\sigma=119.7$ MPa, basso carico)

È opportuno osservare come una rielaborazione così fatta non comporti uno stravolgimento della realtà fisica del comportamento della giunzione. Infatti le analisi ultrasoniche, con le quali si è in grado di valutare il danneggiamento lungo la larghezza del provino, hanno 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; ma questo verrà discusso nel proseguo del presente capitolo.

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:

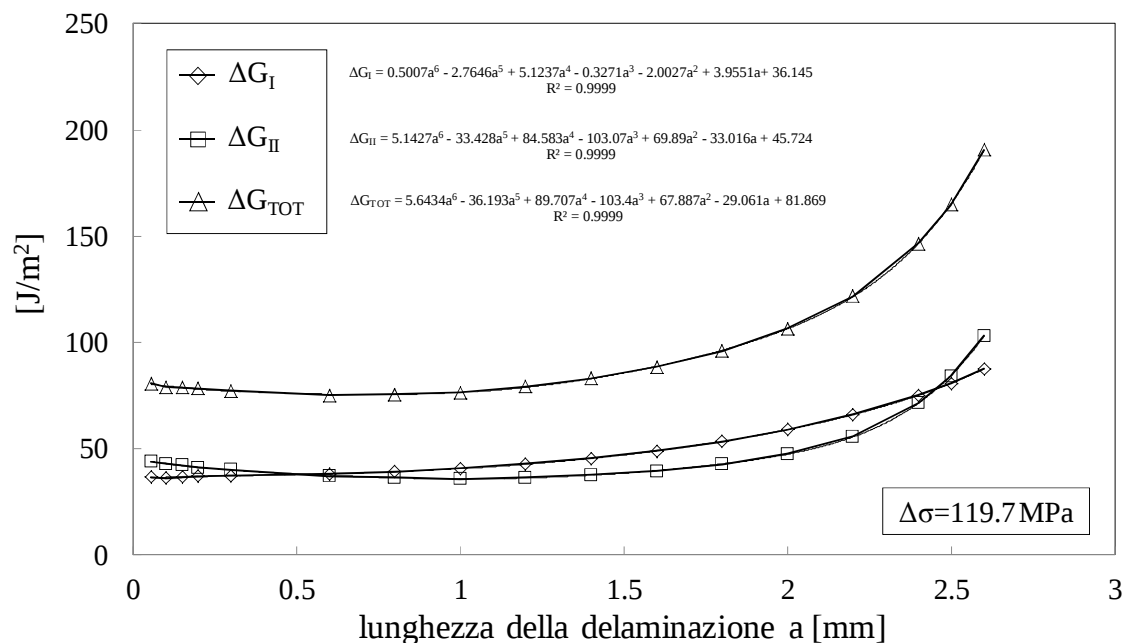


Figura 3.4: andamento delle componenti del SERR e relative linee di tendenza (polinomiali) lungo la prima interfaccia al propagare della delaminazione, lunghezza di sovrapposizione $w=3$, $\Delta\sigma=119.7 \text{ MPa}$ (basso carico), analisi geometricamente NON LINEARI

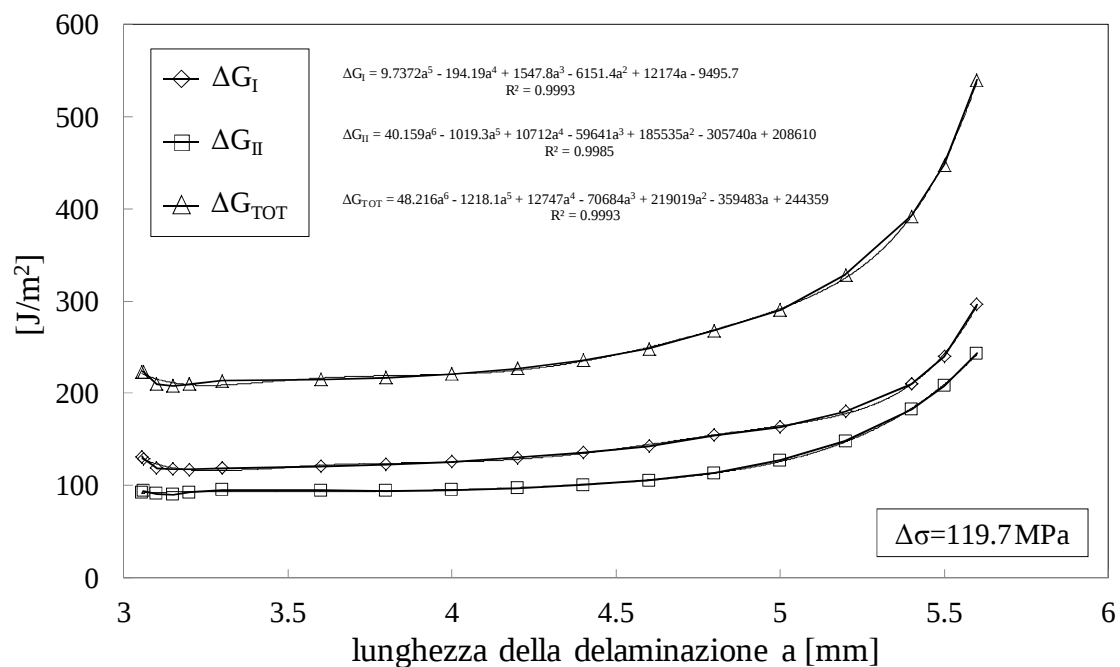


Figura 3.5: andamento delle componenti del SERR e relative linee di tendenza (polinomiali) lungo la seconda interfaccia al propagare della delaminazione, lunghezza di sovrapposizione $w=3$, $\Delta\sigma=119.7 \text{ MPa}$ (basso carico), analisi geometricamente NON LINEARI

Per caratterizzare alcune lunghezze di cricca nei riguardi di ΔG sono state necessarie ulteriori analisi mirate agli elementi finiti in quanto la media delle delaminazioni medie presenta lunghezze di cricca inferiori alle minime considerate in precedenza, verificando così che tali punti siano descritti con buona approssimazione dalla linea di tendenza considerata.

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:

$$\Delta G_{eqv} = \Delta G_I + \frac{\Delta G_{II}}{\Delta G_I + \Delta G_{II}} \cdot \Delta G_{II} \quad (3.1)$$

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 come mostrato in ([8] Quaresimin Ricotta, 2006).

È stato effettuato il conto di ΔG_{eqv} anche mediante altre espressioni reperibili in letteratura ([9] N. Blanco, 2004) ([10] J.A. Pascoe, 2013) al fine di confrontare la bontà delle varie formulazioni rispetto ai dati sperimentali. Tali risultati saranno discussi successivamente.

Riassumendo quindi i valori calcolati in tabella:

N. CICLI	media 1-9; 8-16	da/dN	ΔG_I	ΔG_{II}	ΔG_{TOT}	ΔG_{eqv}
0	0		0	0	0	0
8000	0	0	0	0	0	0
16000	0	0	0	0	0	0
32000	0	0	0	0	0	0
50000	0	0	0	0	0	0
70000	0	0	0	0	0	0
90000	0	0	0	0	0	0
130000	0	0	0	0	0	0
180000	0	0	0	0	0	0
280000	0.18625	1.86E-06	36.81562	41.42787	78.24335	58.75059
420000	0.799	4.38E-06	39.17796	36.31292	75.48902	56.64534
495000	2.045	1.66E-05	60.41429	48.87486	109.2537	82.27146
500000	3.05525	2.02E-04	129.0849	92.3341	221.4207	167.5892
501500	3.138	5.52E-05	119.9465	92.23287	212.1807	160.0395
504000	3.25875	4.83E-05	115.7652	92.85172	208.6174	157.0919
506000	3.357	4.91E-05	116.5407	93.54042	210.081	158.1904

Tabella 3.2 provino S03_21

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 S03_21:

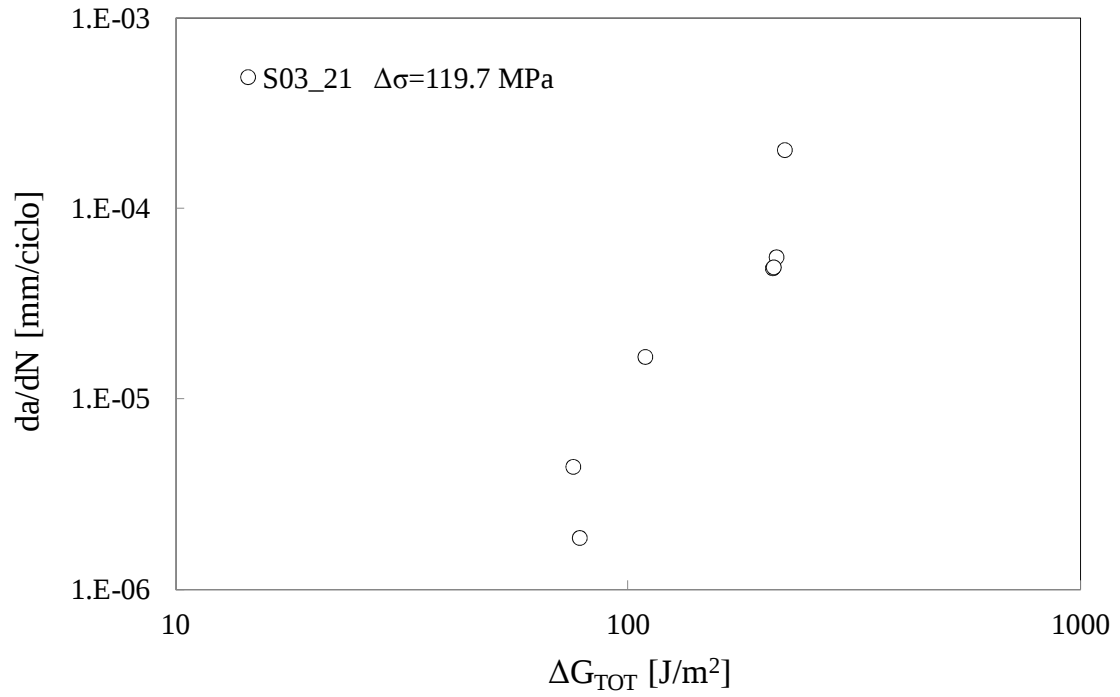


Figura 3.6: curva di Paris in ΔG_{TOT} per il provino S03_21

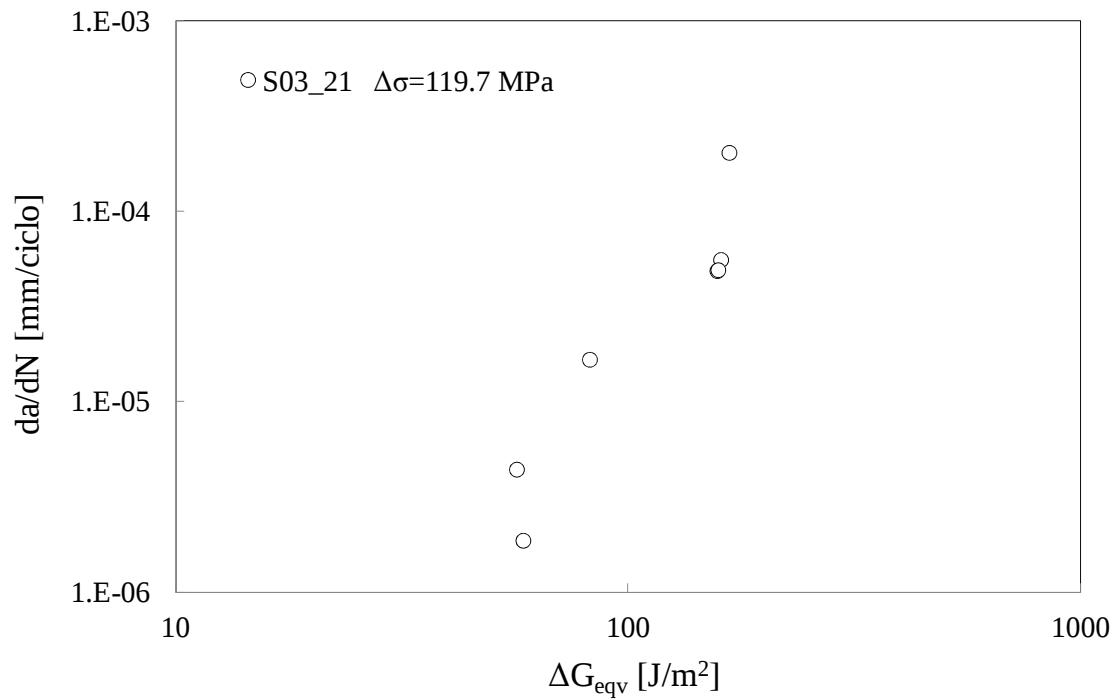


Figura 3.7: curva di Paris in ΔG_{eqv} per il provino S03_21

Tali operazioni sono state ripetute per tutti i provini analizzati in ([6] Polloni Simone, 2003-2004):

➤ **Provino S03_22 $\Delta\sigma=119.7$ MPa (basso carico):**

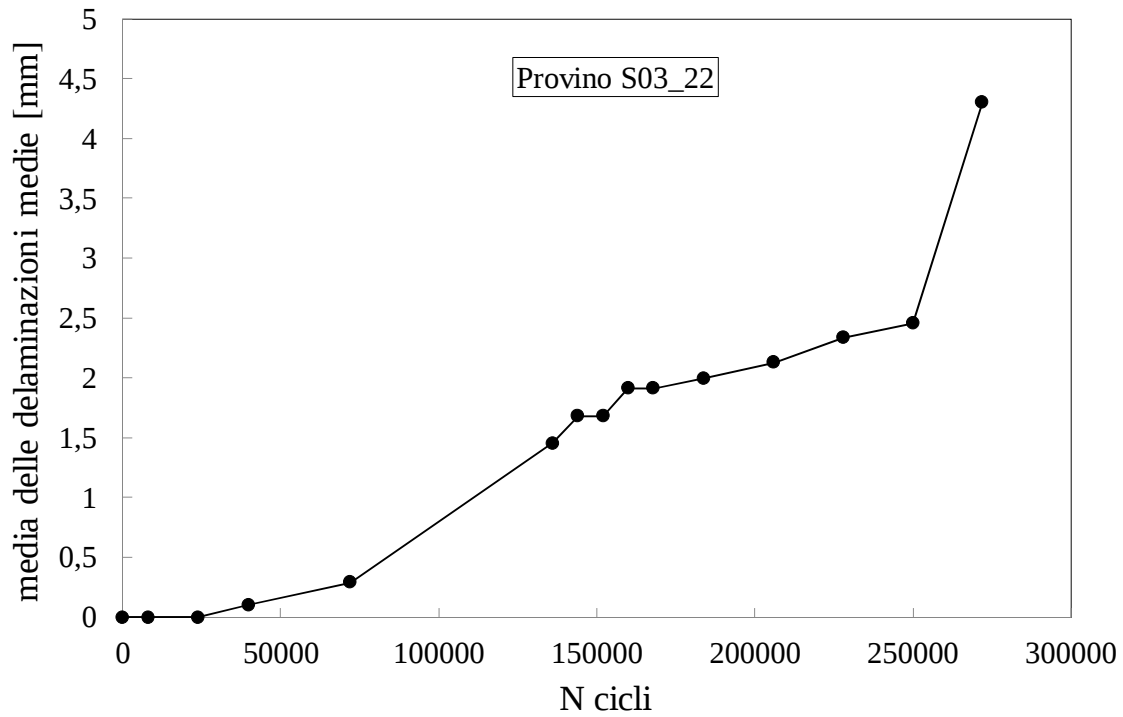


Figura 3.8: propagazione sperimentale della media delle delaminazioni medie ($\Delta\sigma=119.7$ MPa, basso carico)

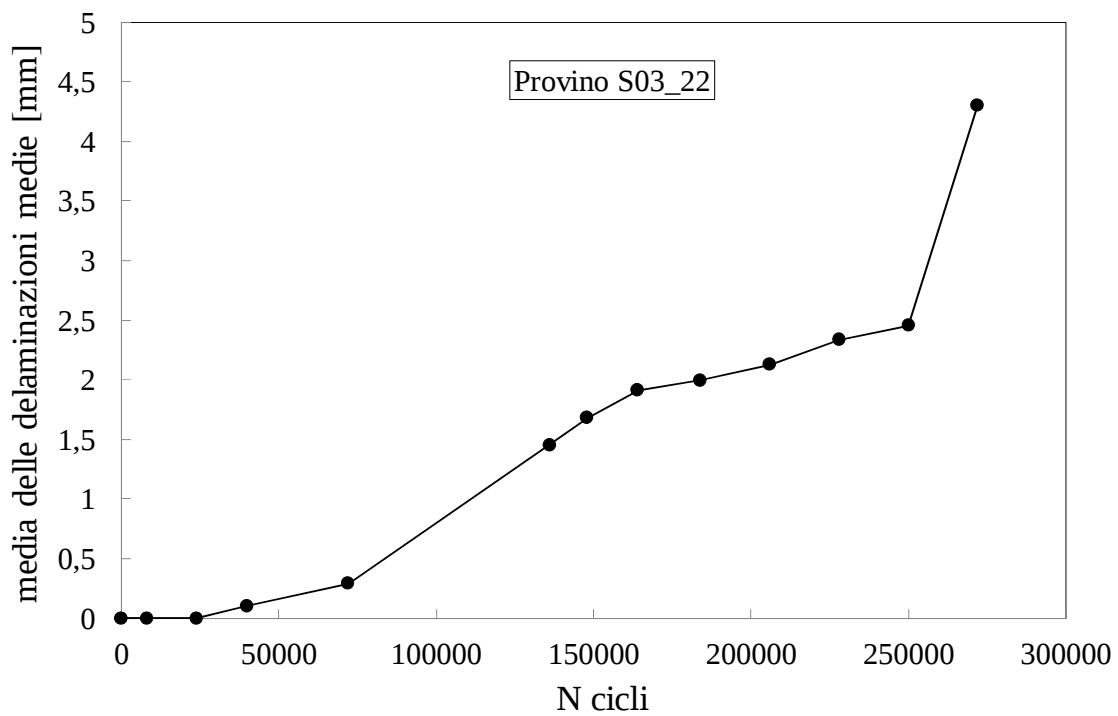
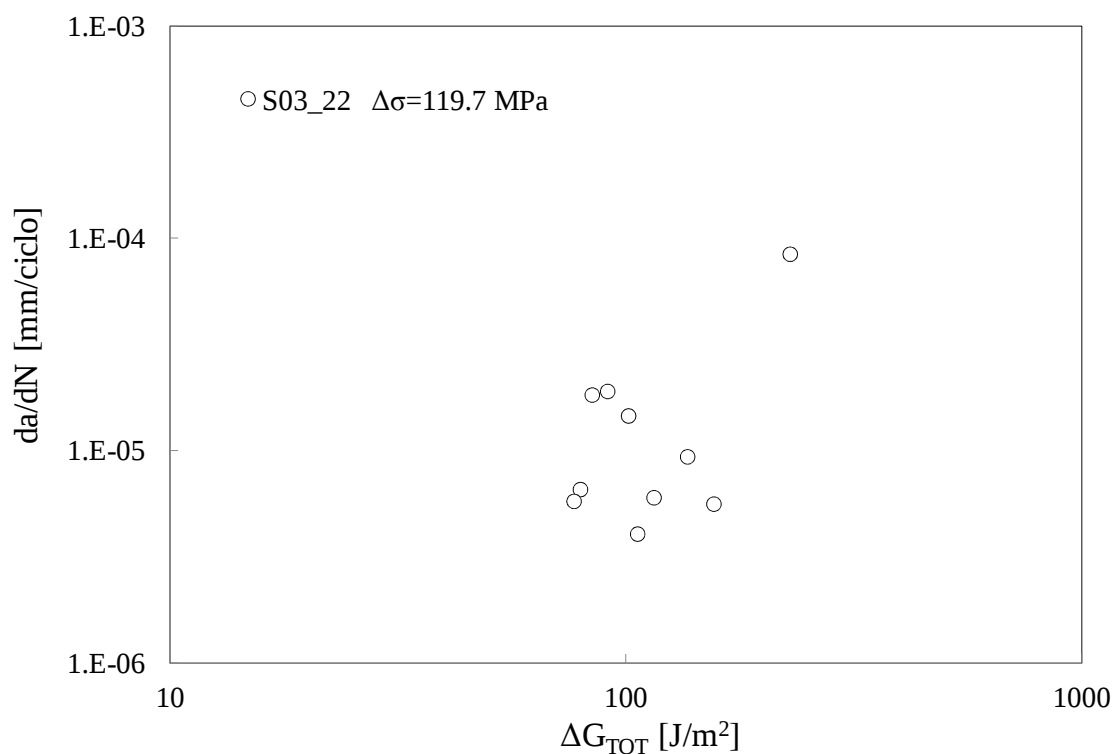


Figura 3.9: propagazione rielaborata della media delle delaminazioni medie ($\Delta\sigma=119.7$ MPa, basso carico)

N. CICLI	media 1-9; 8-16	da/dN	ΔG_I	ΔG_{II}	ΔG_{TOT}	ΔG_{eqv}
0	0		0	0	0	0
8000	0	0	0	0	0	0
24000	0	0	0	0	0	0
40000	0.1045	6.53E-06	36.53664	42.9292	79.46573	59.72794
72000	0.28925	5.77E-06	37.1441	40.05469	77.19857	57.92653
136000	1.4525	1.82E-05	46.29643	38.02968	84.31509	63.44719
148000	1.6805	1.90E-05	50.67136	40.84949	91.503	68.90415
164000	1.91425	1.46E-05	56.45731	45.19629	101.6256	76.55207
184000	1.995	4.04E-06	58.83013	47.31034	106.1081	79.91792
206000	2.1275	6.02E-06	63.24564	52.0341	115.2388	86.73239
228000	2.33375	9.38E-06	71.80359	64.98734	136.7333	102.6781
250000	2.45625	5.57E-06	78.21257	78.34615	156.4887	117.4191
272000	4.30575	8.41E-05	131.4848	98.12584	229.6023	173.4196

Tabella 3.3: Provino S03_22


 Figura 3.10: curva di Paris in ΔG_{TOT} per il provino S03_22

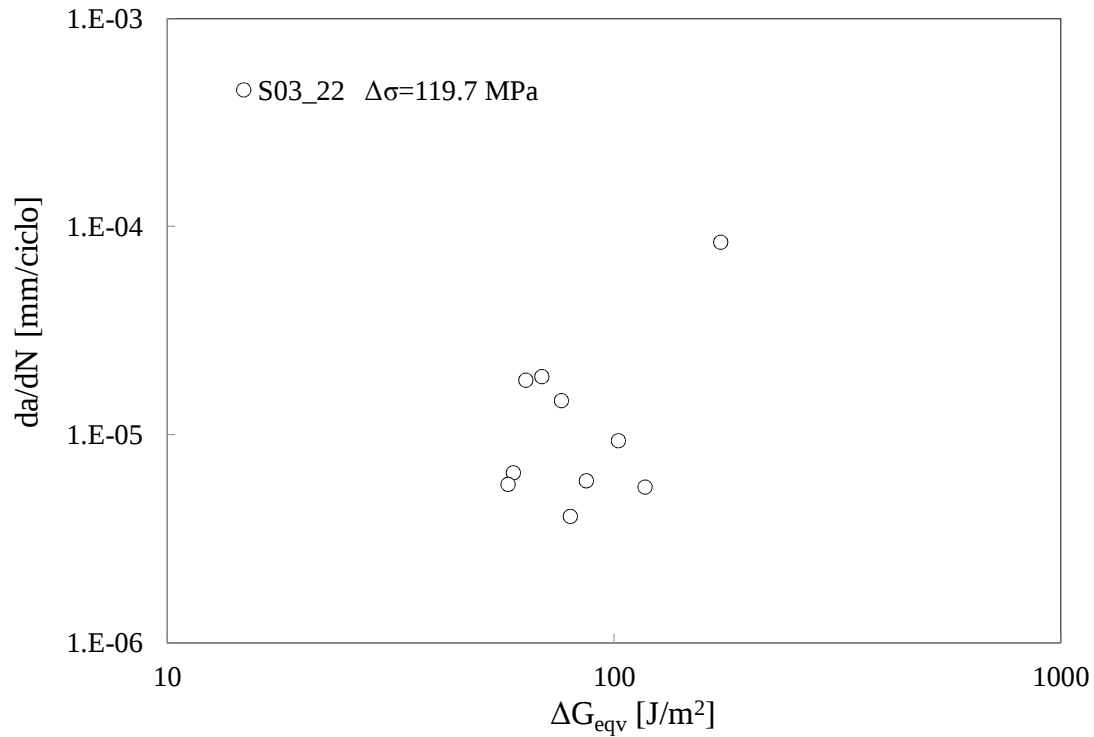


Figura 3.11: curva di Paris in ΔG_{eqv} per il provino S03_22

Si passa ora all'alto carico per quanto riguarda l'*overlap* w pari a 3 mm:

➤ **Provino S03_19 $\Delta\sigma=153.9$ MPa (alto carico):**

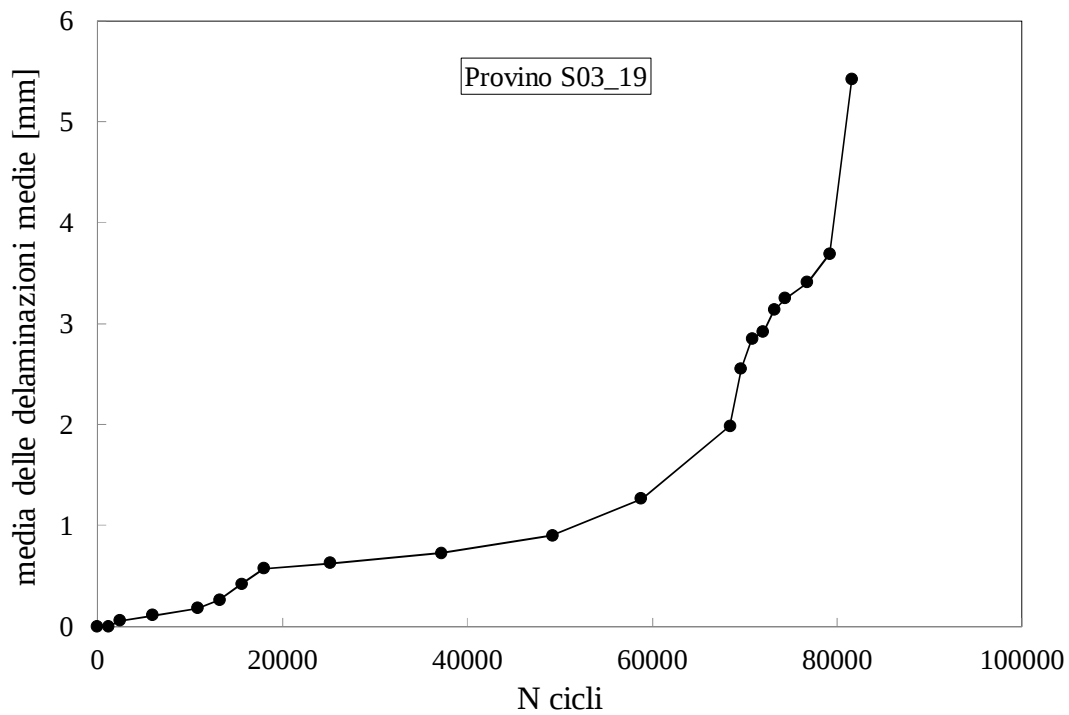


Figura 3.12: propagazione sperimentale della media delle delaminazioni medie ($\Delta\sigma=153.9$ MPa, alto carico)

I provini soggetti ad alto carico non presentano alcun intervallo temporale a propagazione nulla di cricca; per questi non è dunque necessaria alcuna rielaborazione dei dati.

Il calcolo delle componenti del SERR richiede invece l'estrapolazione dalle linee di tendenza relative alla propagazione soggetta ad alto carico. Anche in questo caso sono state necessarie ulteriori analisi mirate per poter descrivere in modo più accurato la propagazione della media delle delaminazioni medie relativamente a ΔG (Figura 3.13, Figura 3.14).

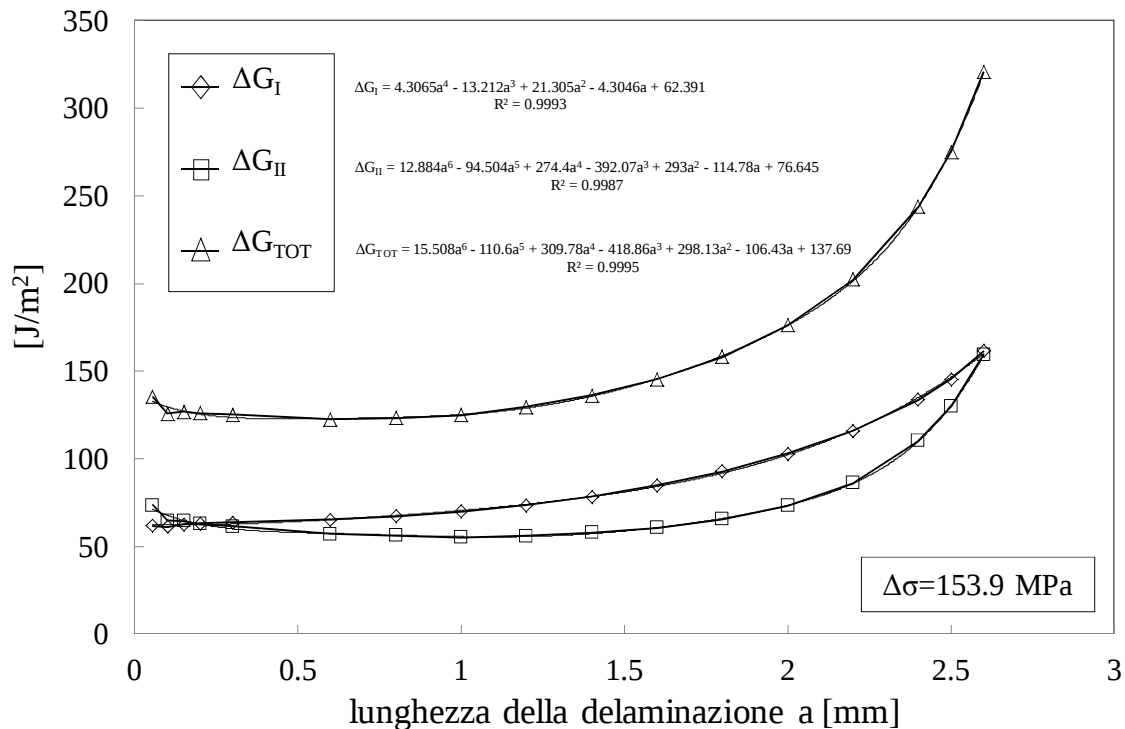


Figura 3.13: andamento delle componenti del SERR e relative linee di tendenza (polinomiali) lungo la prima interfaccia al propagare della delaminazione, lunghezza di sovrapposizione $w=3$, $\Delta\sigma=153.9 \text{ MPa}$ (alto carico), analisi geometricamente NON LINEARI

Per la propagazione lungo la seconda interfaccia l'aggiunta di punti nelle curve di ΔG corrispondenti a piccoli valori di cricca evidenzia un andamento non più approssimabile in maniera adeguata tramite l'utilizzo di una sola linea di tendenza e quindi è stata necessaria l'estrapolazione da più linee di tendenza (Figura 3.14).

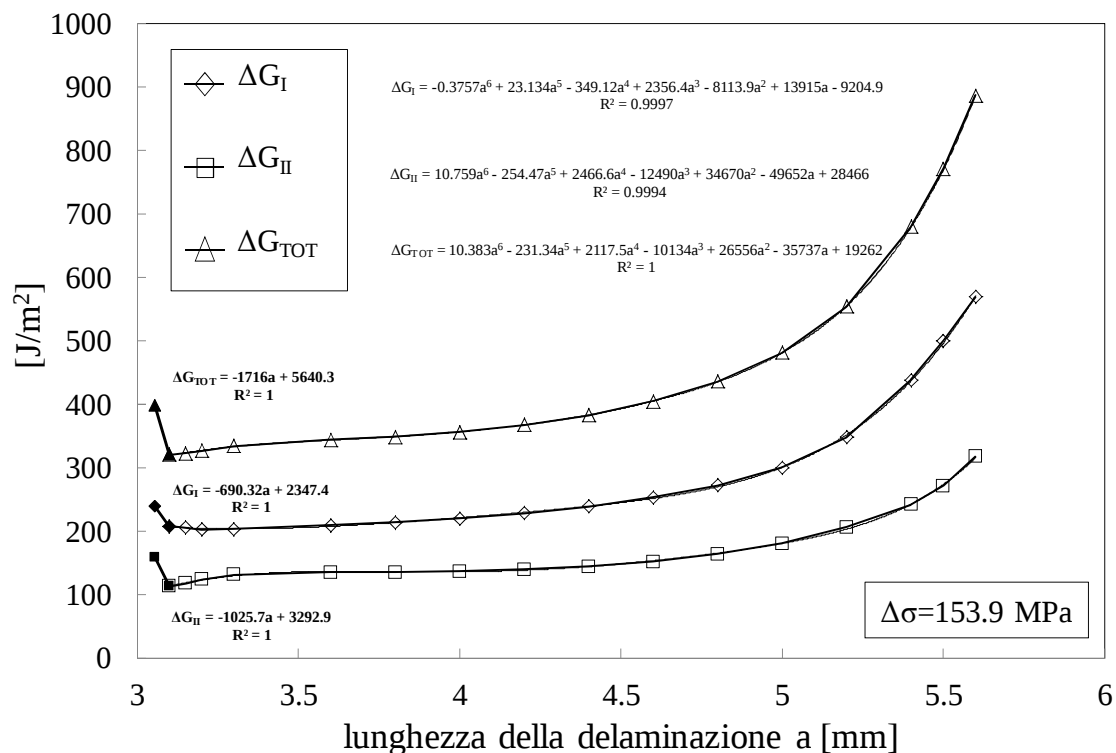


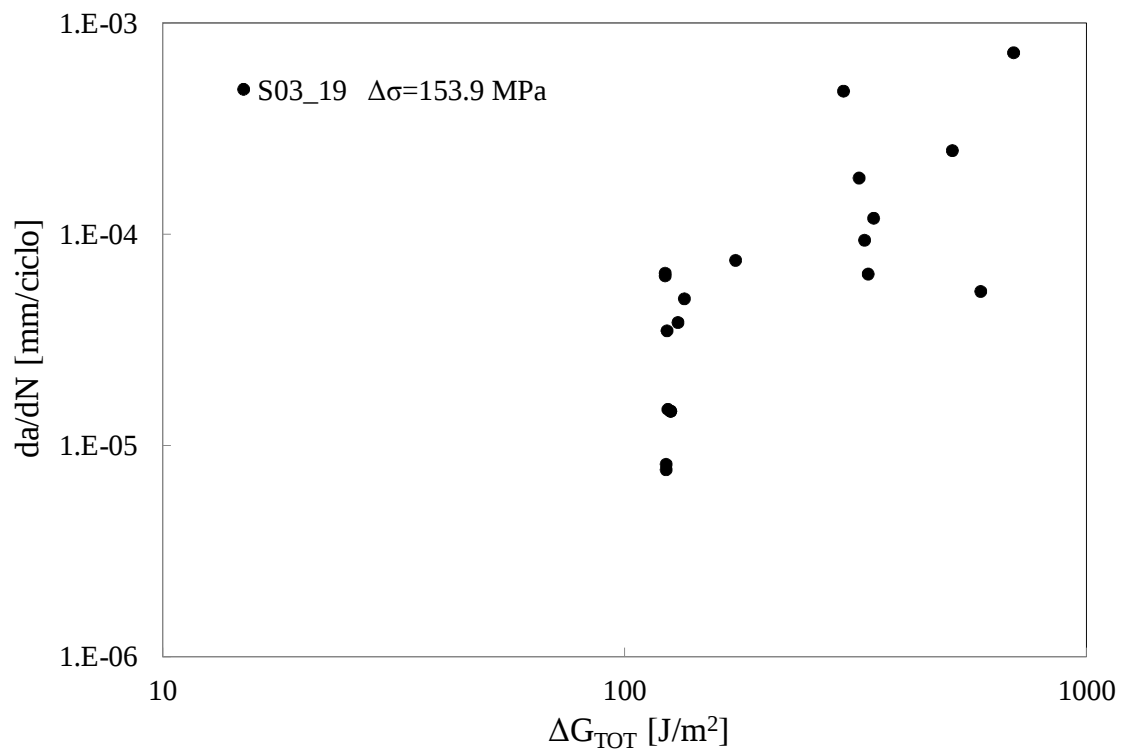
Figura 3.14: andamento delle componenti del SERR e relative linee di tendenza (polinomiali) lungo la seconda interfaccia al propagare della delaminazione, lunghezza di sovrapposizione $w=3$, $\Delta\sigma=153.9$ MPa (alto carico), analisi geometricamente NON LINEARI

N. CICLI	media 1-9; 8-16	da/dN	ΔG_I	ΔG_{II}	ΔG_{TOT}	ΔG_{eqv}
0	0		0	0	0	0
1200	0	0	0	0	0	0
2400	0.05925	4.94E-05	61.82542	73.41597	135.2414	101.6794
6000	0.1115	1.45E-05	61.21399	64.66297	125.877	94.43135
10800	0.18075	1.44E-05	62.23557	63.43084	126.0293	94.25265
13200	0.264	3.47E-05	62.51728	60.7661	124.0322	92.46875
15600	0.421	6.54E-05	63.50431	58.44056	122.8243	91.51122
18000	0.57275	6.32E-05	64.89556	57.51542	122.9001	91.91947
25200	0.6275	7.60E-06	65.48209	57.254	123.0189	92.18997
37200	0.725	8.12E-06	66.62361	56.78148	123.2994	92.75006
49200	0.901	1.47E-05	68.98236	55.9269	124.2272	94.02308
58800	1.2645	3.79E-05	75.31085	55.97854	130.7636	99.17871
68400	1.9835	7.49E-05	101.2291	72.61972	174.5996	131.5636
69600	2.553	4.75E-04	153.3641	144.2072	298.0743	223.2489
70800	2.85175	2.49E-04	201.7877	293.0644	513.7955	375.3481

72000	2.91575	5.33E-05	214.7219	347.8313	590.1848	429.7889
73200	3.13675	1.84E-04	205.4438	117.2859	322.7299	248.0676
74400	3.24925	9.37E-05	204.0705	126.5262	330.5972	252.4947
76800	3.40475	6.48E-05	204.1701	133.6803	337.8516	257.0645
79200	3.68925	1.19E-04	209.7519	136.2709	346.0262	263.4181
81600	5.4215	7.22E-04	448.8529	248.2058	697.0988	537.233

Tabella 3.4: provino S03_19

Con i valori di ΔG così calcolati e con i valori di da/dN sperimentali della propagazione della cricca è stato possibile costruire la curva di Paris in ΔG_{TOT} e in ΔG_{eqv} per il provino S03_19:

Figura 3.15: curva di Paris in ΔG_{TOT} per il provino S03_19

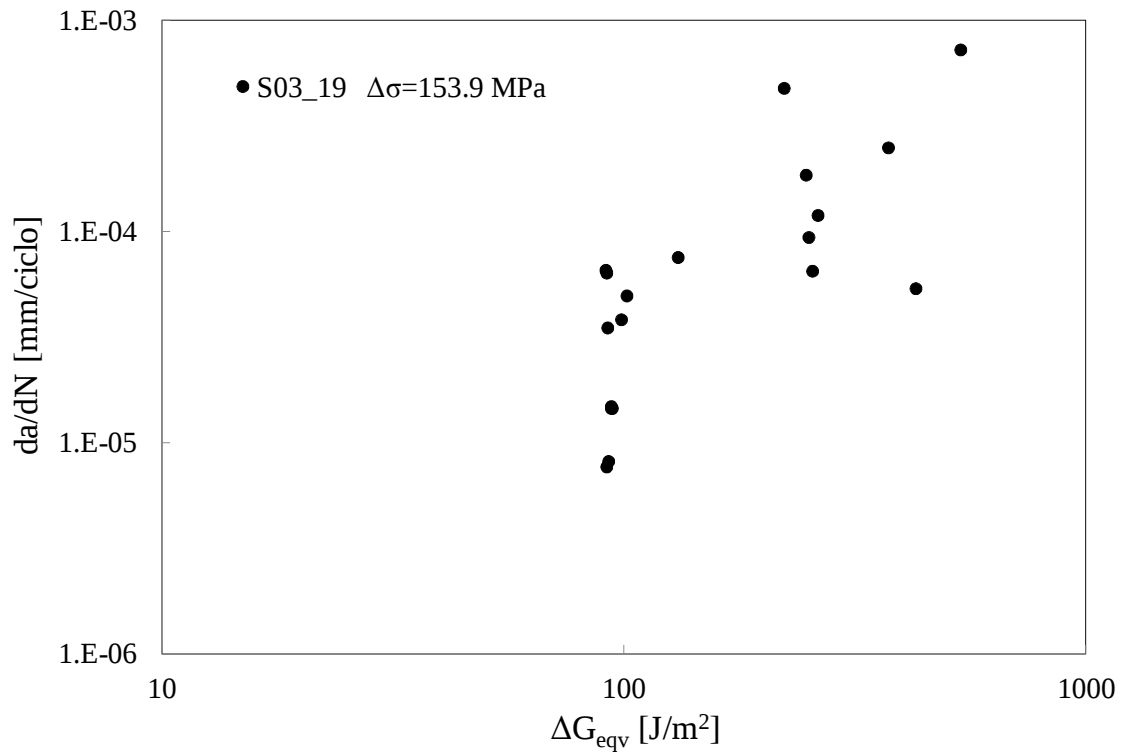


Figura 3.16: curva di Paris in ΔG_{eqv} per il provino S03_19

➤ **Provino S03_20 $\Delta\sigma=153.9$ MPa (alto carico):**

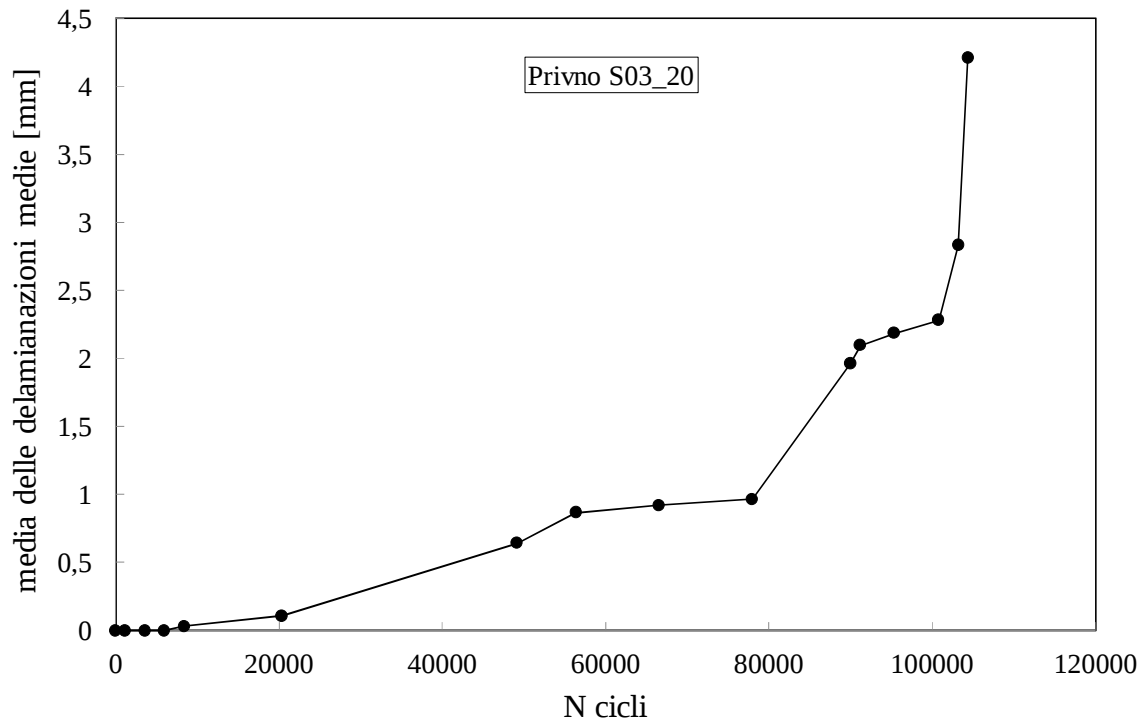
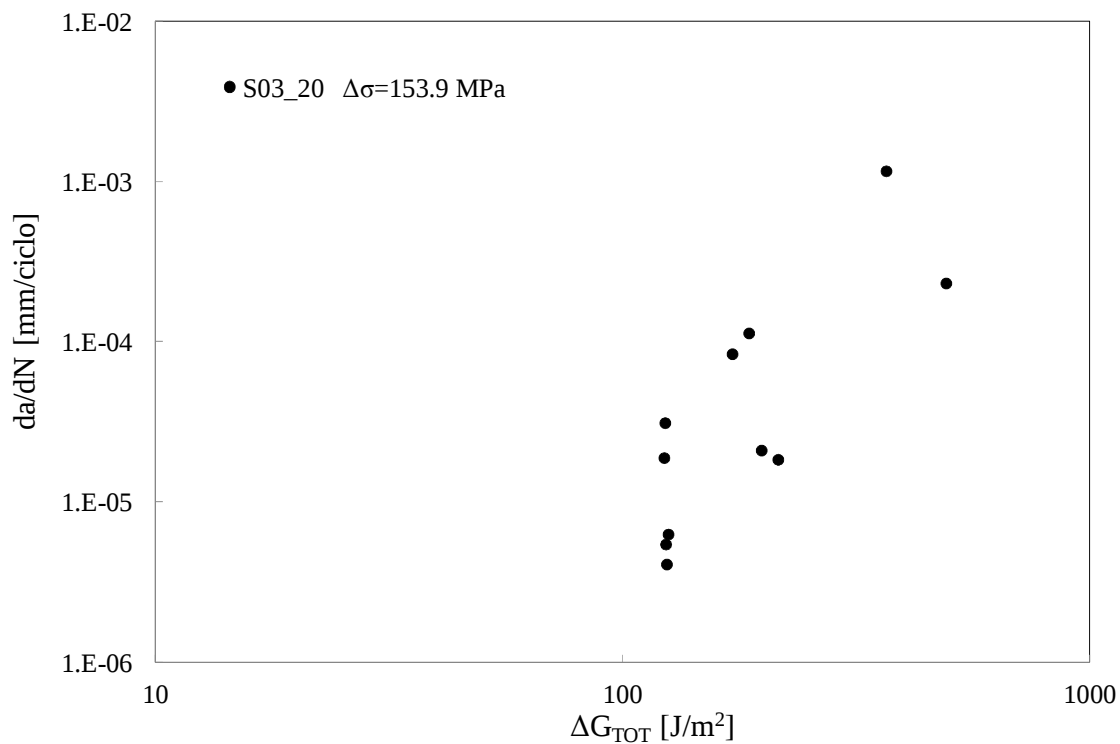


Figura 3.17: propagazione sperimentale della media delle delaminazioni medie ($\Delta\sigma=153.9$ MPa, alto carico)

N. CICLI	media 1-9; 8-16	da/dN	ΔG_I	ΔG_{II}	ΔG_{TOT}	ΔG_{eqv}
0	0		0	0	0	0
1200	0	0	0	0	0	0
3600	0	0	0	0	0	0
6000	0	0	0	0	0	0
8400	0.03225*	/	/	/	/	/
20400	0.1065	6.19E-06	61.21399	64.66297	125.877	94.43135
49200	0.6425	1.86E-05	65.64981	57.18267	123.0561	92.27027
56400	0.86525	3.09E-05	68.47192	56.08812	123.9698	93.72783
66600	0.92025	5.39E-06	69.26413	55.84604	124.3857	94.1924
78000	0.9665	4.06E-06	69.96168	55.67442	124.8312	94.63326
90000	1.9615	8.29E-05	99.95897	71.66077	172.4571	129.8813
91200	2.096	1.12E-04	108.4245	78.46404	187.0575	141.3671
95400	2.1835	2.08E-05	114.9172	84.52622	199.0692	150.7403
100800	2.282	1.82E-05	123.2935	93.77901	216.153	163.8076
103200	2.83275	2.29E-04	198.1371	278.7617	493.682	361.0817
104400	4.21025	1.15E-03	229.9971	138.297	368.306	281.9286

Tabella 3.5: provino S03_20 (*valore non realizzabile tramite analisi agli elementi finiti)


 Figura 3.18: curva di Paris in ΔG_{TOT} per il provino S03_20

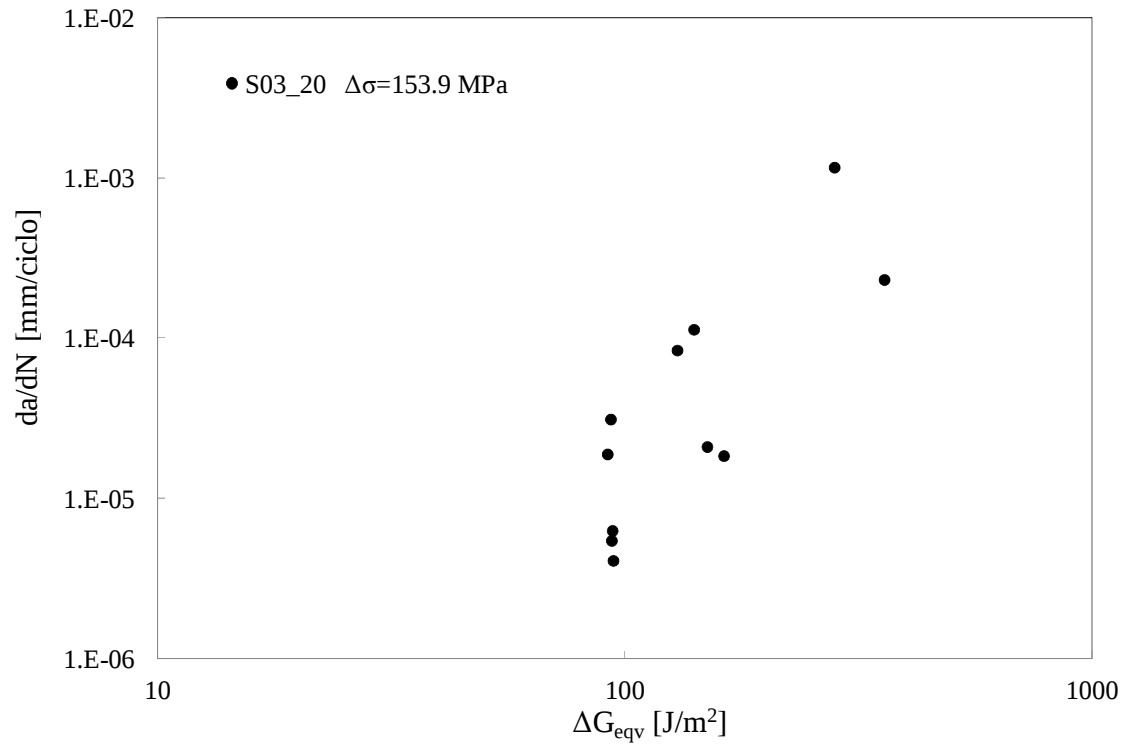


Figura 3.19: curva di Paris in ΔG_{eqv} per il provino S03_20

➤ **Provino S03_24 $\Delta\sigma=153.9$ MPa (alto carico):**

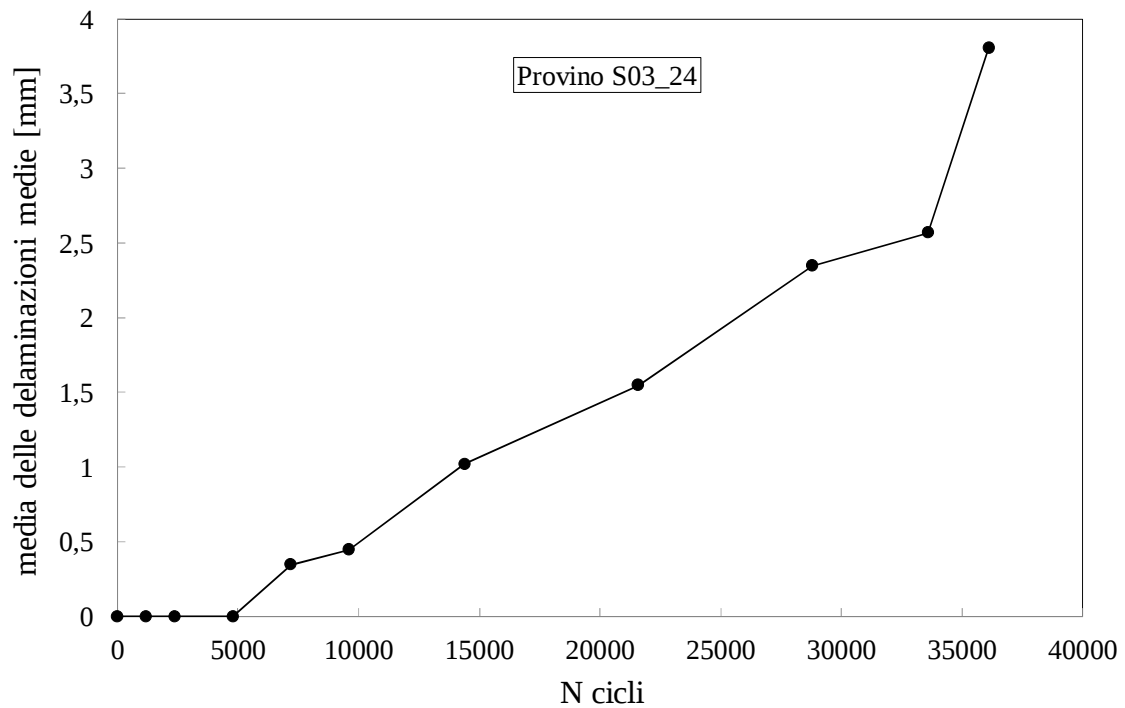
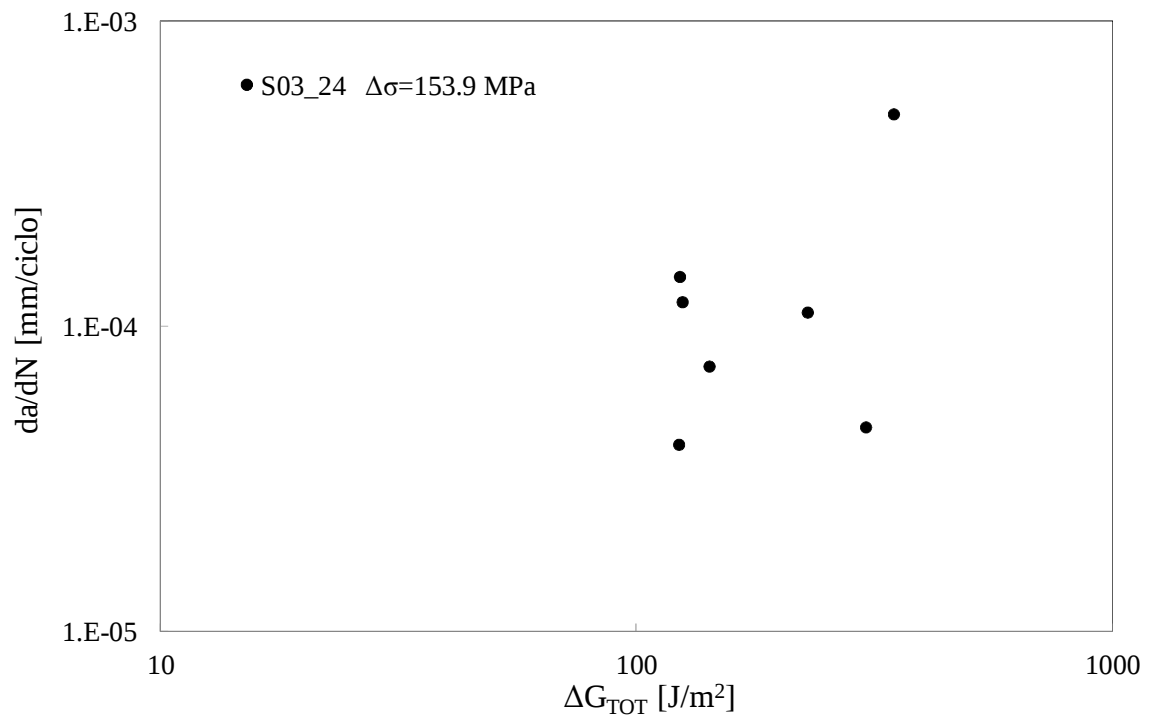


Figura 3.20: propagazione sperimentale della media delle delaminazioni medie ($\Delta\sigma=153.9$ MPa, alto carico)

N. CICLI	media 1-9; 8-16	da/dN	ΔG_I	ΔG_{II}	ΔG_{TOT}	ΔG_{eqv}
0	0		0	0	0	0
1200	0	0	0	0	0	0
2400	0	0	0	0	0	0
4800	0	0	0	0	0	0
7200	0.34625	1.44E-04	62.96822	59.25041	123.1225	92.62491
9600	0.44425	4.08E-05	63.69275	58.25636	122.7942	91.93018
14400	1.02	1.20E-04	70.80684	55.52759	125.4773	94.8641
21600	1.548	7.33E-05	82.5002	59.62417	142.7016	108.0034
28800	2.345	1.11E-04	129.3073	101.5841	229.7734	173.9385
33600	2.56875	4.66E-05	155.4774	148.8954	305.2356	228.5935
36111	3.806	4.93E-04	213.5458	135.7838	349.3344	266.0072

Tabella 3.6: provino S03_24

Si costruiscono quindi le curve di Paris:

Figura 3.21: curva di Paris in ΔG_{TOT} per il provino S03_24

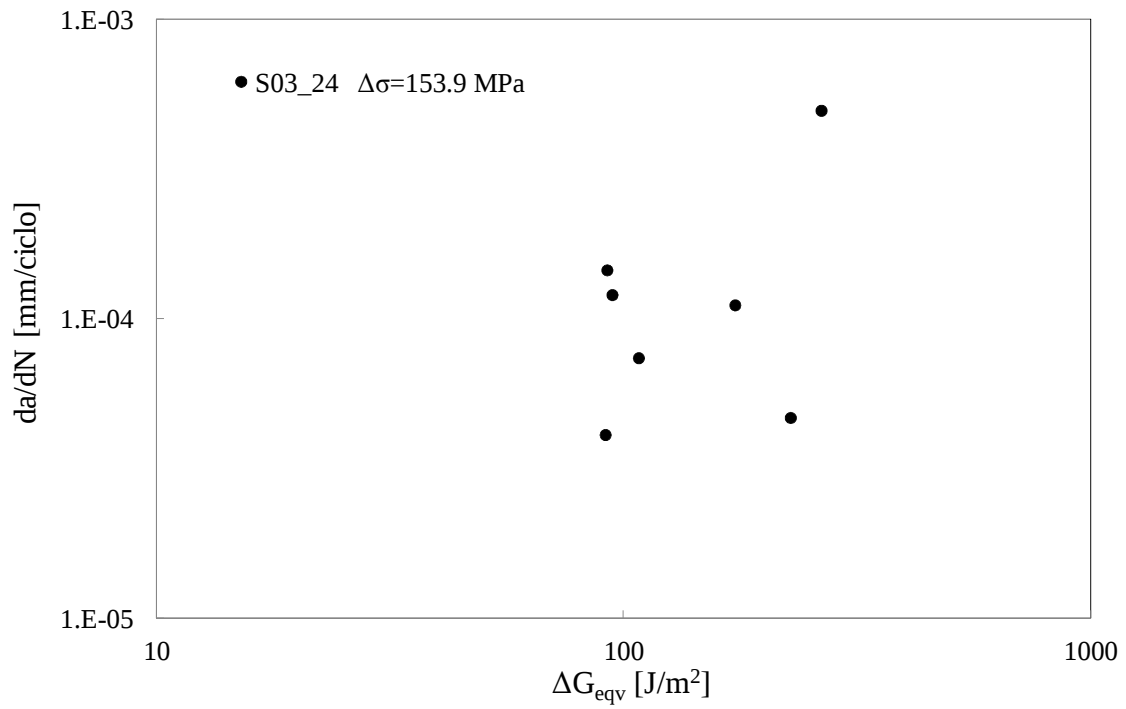


Figura 3.22: curva di Paris in ΔG_{eqv} per il provino S03_24

Unendo in un unico grafico i risultati relativi ai giunti con *overlap* pari a 3 mm si ottiene:

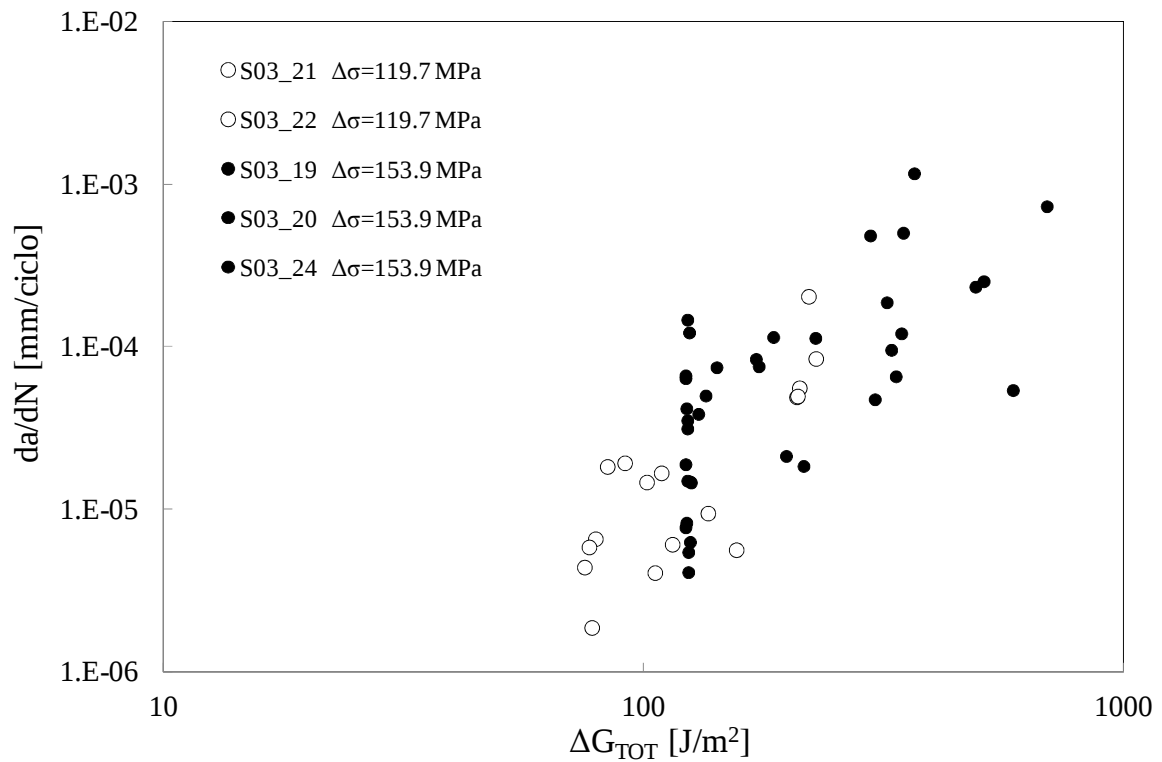


Figura 3.23: curva di Paris riassuntiva in ΔG_{TOT} per i giunti S03

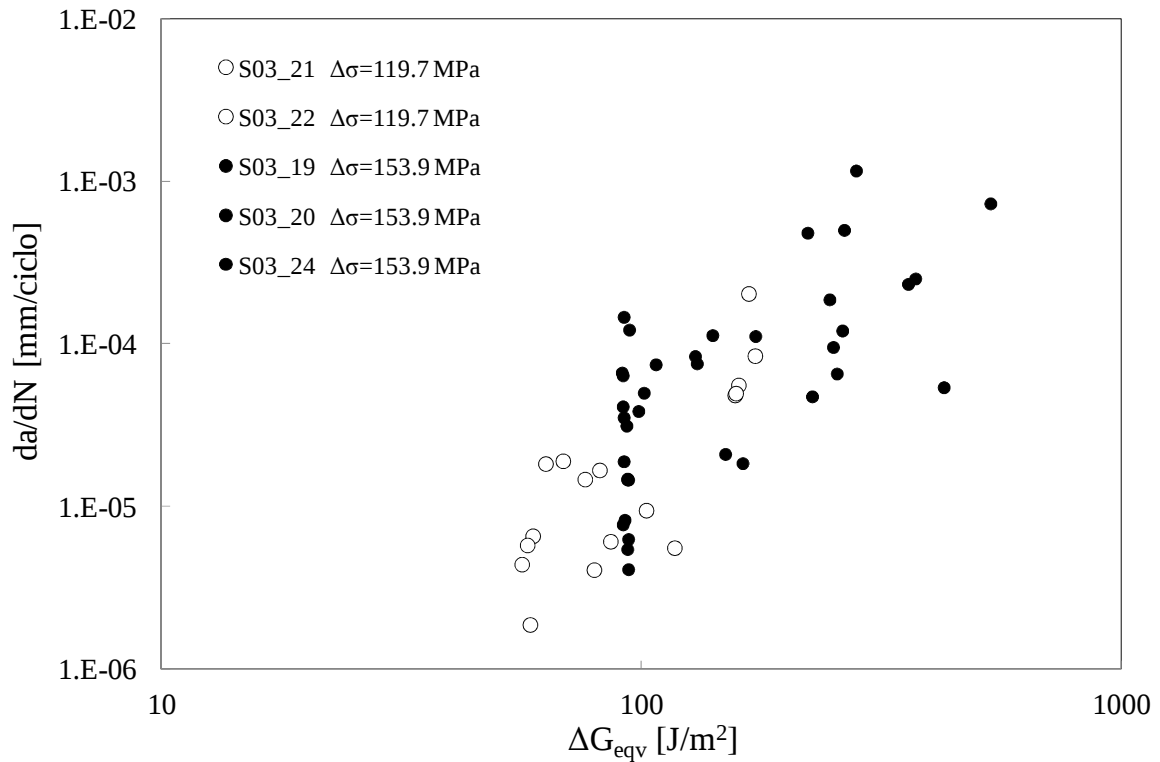


Figura 3.24: curva di Paris riassuntiva in ΔG_{eqv} per i giunti S03

Una prima osservazione su dati ancora incompleti, in quanto fin qui analizzati solo i giunti con lunghezza di sovrapposizione uguale a 3 mm, è l'opposta pendenza delle curve di Paris rispetto a quella delle stesse riportate in ([6] Polloni Simone, 2003-2004). Tale risultato è imputabile al cambio di trend nell'andamento delle componenti del SERR (capitolo 2).

Si può osservare inoltre una traslazione verso sinistra rispetto alla scala delle ascisse per la curva di Paris espressa in ΔG_{eqv} rispetto alla stessa espressa in ΔG_{TOT} .

Mancando comunque l'analisi dei risultati relativi alle lunghezze di sovrapposizione pari a 5 e 8 mm si rimandano ulteriori osservazioni e considerazioni ad elaborazioni effettuate.

Si passa quindi ad analizzare i dati relativi all'*overlap* 5 mm.

➤ **Provino S05_18 $\Delta\sigma=140$ MPa (basso carico):**

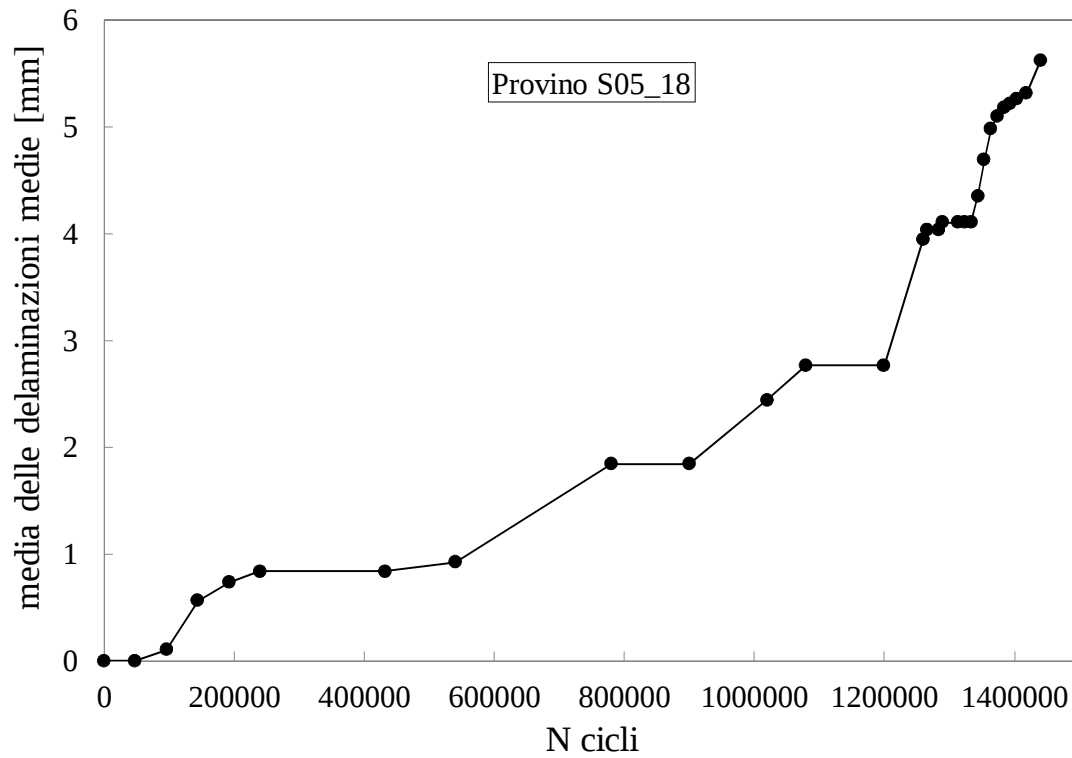


Figura 3.25: propagazione sperimentale della media delle delaminazioni medie ($\Delta\sigma=140$ MPa, basso carico)

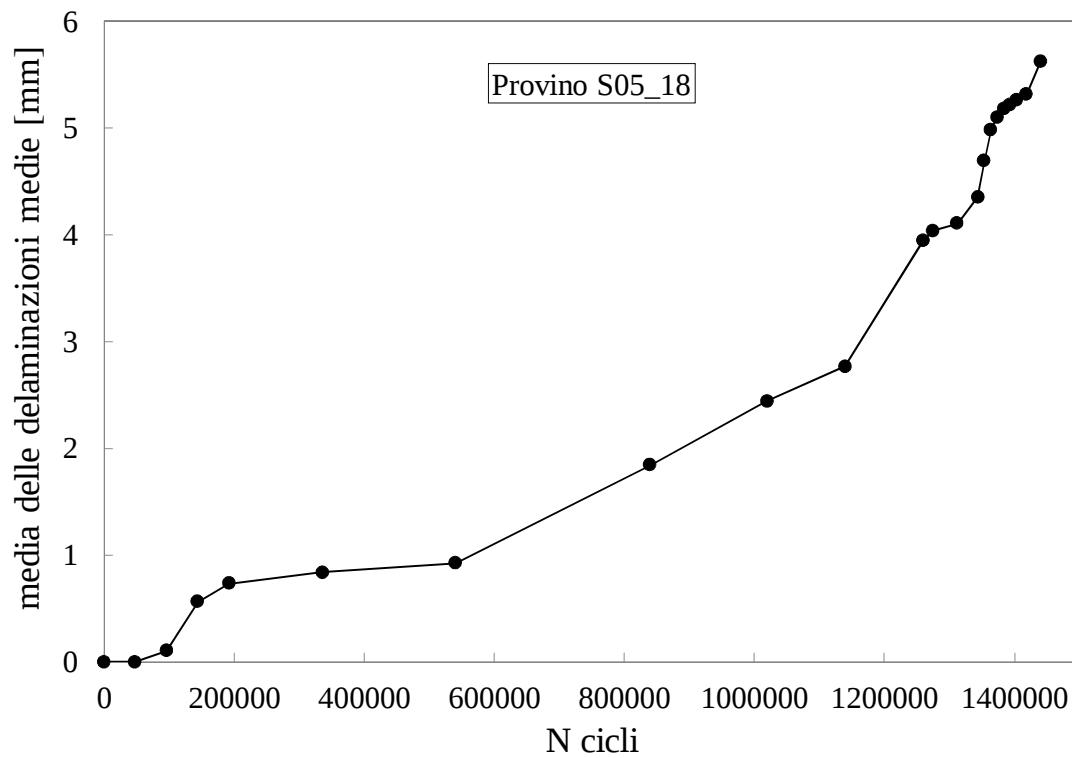


Figura 3.26: propagazione rielaborata della media delle delaminazioni medie ($\Delta\sigma=140$ MPa, basso carico)

Determinato l'andamento della media delle delaminazioni medie e quindi calcolata la velocità di propagazione della cricca tramite il rapporto incrementale è stato possibile valutare 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. Ancora una volta è stato necessario effettuare delle analisi mirate per il calcolo di ΔG in quanto la media delle delaminazioni medie è caratterizzata da lunghezze inferiori alle minime osservate dall'analisi sperimentale e quindi non considerate in precedenza.

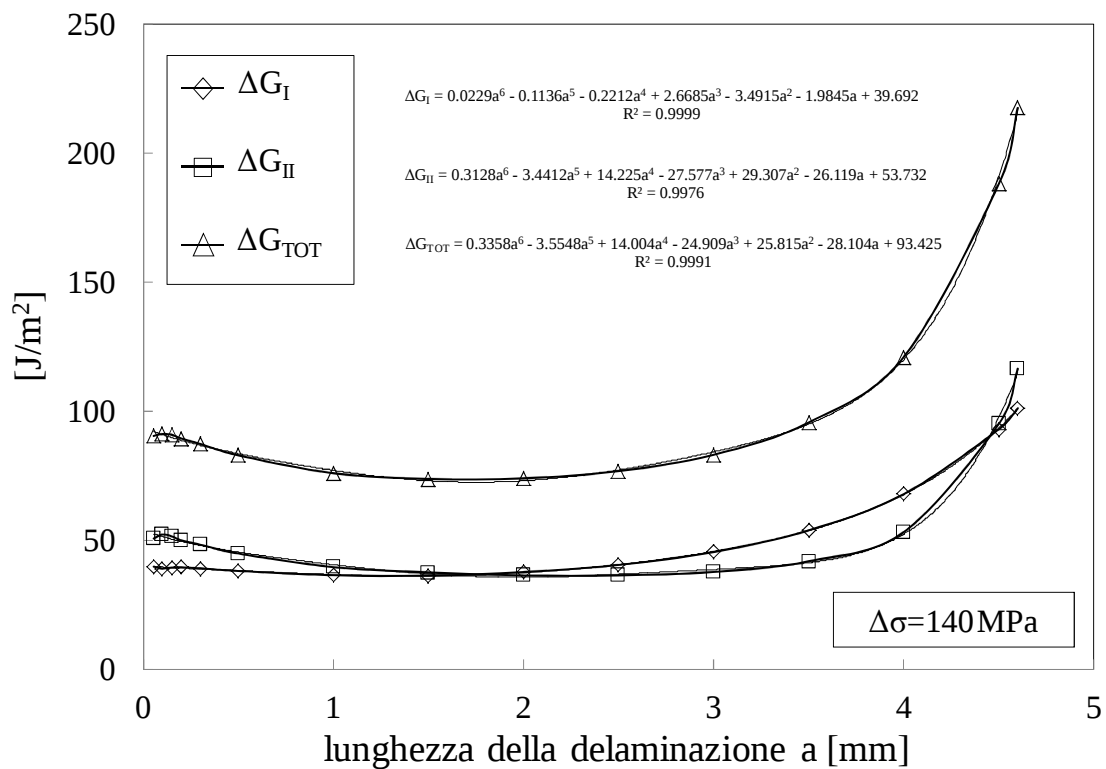


Figura 3.27: andamento delle componenti del SERR e relative linee di tendenza (polinomiali) lungo la prima interfaccia al propagare della delaminazione, lunghezza di sovrapposizione $w=5$, $\Delta\sigma=140 \text{ MPa}$ (basso carico), analisi geometricamente NON LINEARI

Per la propagazione lungo la seconda interfaccia l'aggiunta di punti nelle curve di ΔG corrispondenti a piccoli valori di cricca evidenzia un andamento non più approssimabile in maniera adeguata tramite l'utilizzo di una sola linea di tendenza e quindi è stata necessaria l'estrapolazione da più linee di tendenza.

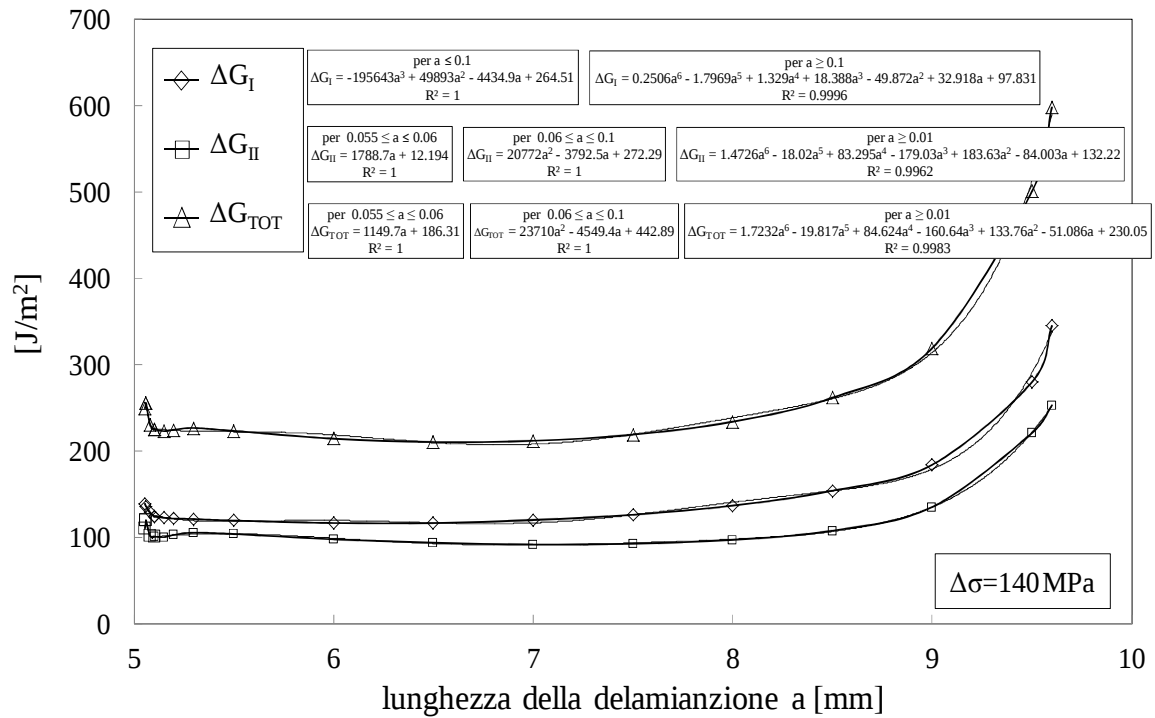


Figura 3.28: andamento delle componenti del SERR e relative linee di tendenza (polinomiali) lungo la seconda interfaccia al propagare della delaminazione, lunghezza di sovrapposizione $w=5$, $\Delta\sigma=140 \text{ MPa}$ (basso carico), analisi geometricamente NON LINEARI

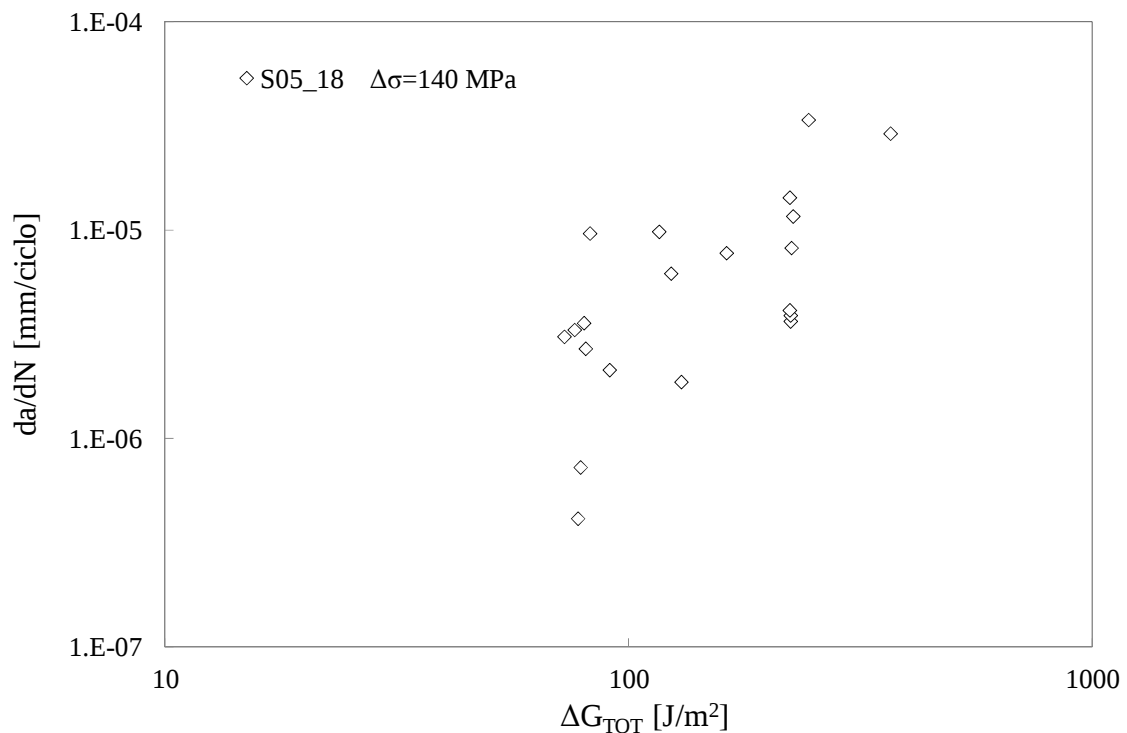
Riassumendo quindi i valori calcolati in tabella:

N. CICLI	media 1-9; 8-16	da/dN	ΔG_I	ΔG_{II}	ΔG_{TOT}	ΔG_{eqv}
0	0		0	0	0	0
48000	0	0	0	0	0	0
96000	0.102	2.13E-06	39.45606	51.34501	90.80201	68.48997
144000	0.5625	9.59E-06	37.91811	44.6451	82.5637	62.05942
192000	0.73375	3.57E-06	37.32555	42.89187	80.21766	60.25963
336000	0.838	7.24E-07	36.99936	41.89765	78.89709	59.24879
540000	0.9215	4.09E-07	36.76558	41.13292	77.89842	58.48508
840000	1.84425	3.08E-06	36.81389	35.71011	72.52549	54.3972
1020000	2.443	3.33E-06	40.01732	36.49044	76.52565	57.42147
1140000	2.76725	2.70E-06	42.88895	37.70821	80.63898	60.53112
1260000	3.94675	9.83E-06	65.61975	50.14233	116.1491	87.33889
1275000	4.03925	6.17E-06	68.99986	54.08117	123.5265	92.76285
1312000	4.10825	1.86E-06	71.78349	57.77401	130.0511	97.54685
1344000	4.356	7.74E-06	84.00061	78.26708	162.9709	121.7514

1354000	4.694	3.38E-05	108.132	134.6841	243.9189	182.838
1364000	4.985	2.91E-05	138.7188	226.8106	367.1117	279.4545
1374000	5.10175	1.17E-05	125.394	100.6836	226.0765	170.2334
1384000	5.18375	8.20E-06	121.9651	102.311	224.275	168.6377
1394000	5.22025	3.65E-06	120.9003	102.8606	223.7597	168.1842
1404000	5.259	3.88E-06	120.0251	103.3347	223.3587	167.8317
1419000	5.3205	4.10E-06	119.0851	103.8719	222.956	167.4773
1440000	5.62175	1.43E-05	118.8056	103.4843	222.2896	166.9815

Tabella 3.7: provino S05_18

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 S05_18:


 Figura 3.29: curva di Paris in ΔG_{TOT} per il provino S05_18

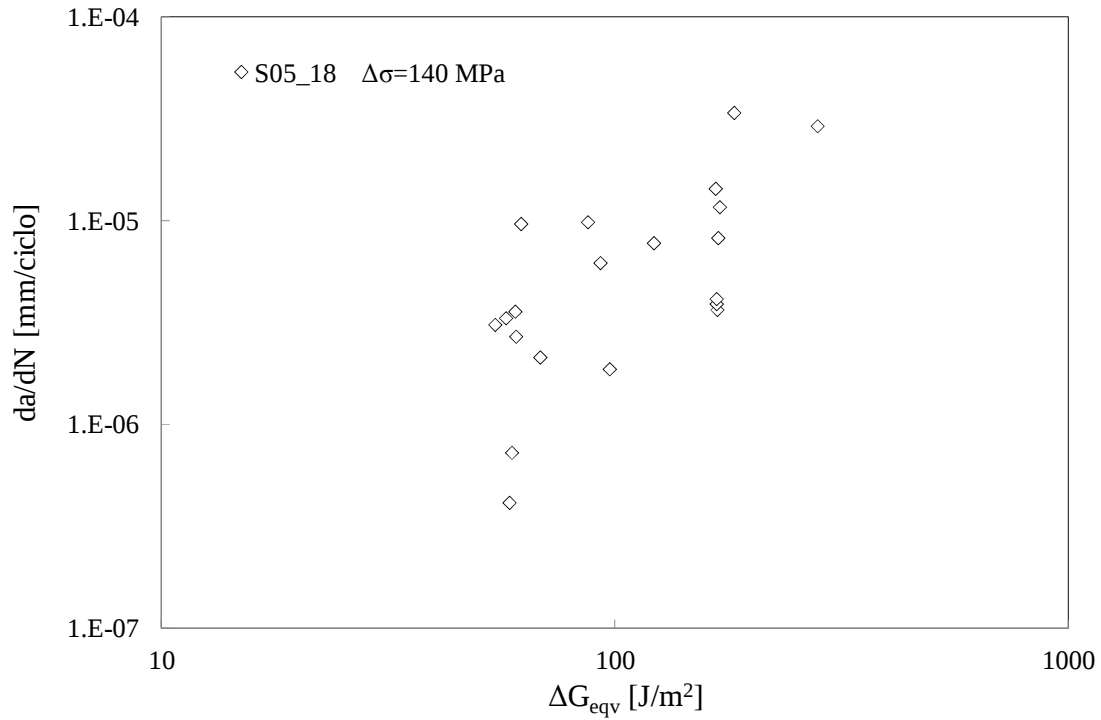


Figura 3.30: curva di Paris in ΔG_{eqv} per il provino S05_18

➤ **Provino S05_19 $\Delta\sigma=140$ MPa (basso carico):**

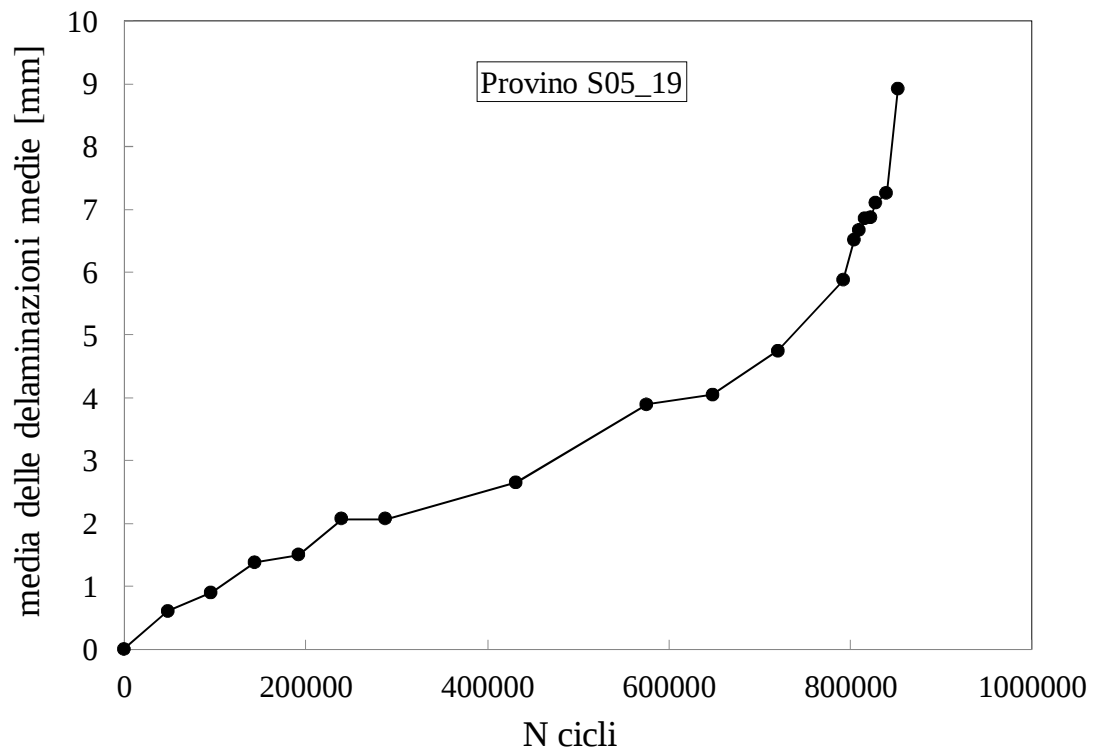


Figura 3.31: propagazione sperimentale della media delle delaminazioni medie ($\Delta\sigma=140$ MPa, basso carico)

Non presentando alcun intervallo temporale a propagazione nulla di cricca non è stata necessaria alcuna rielaborazione dei dati per questo provino.

N. CICLI	media 1-9; 8-16	da/dN	ΔG_I	ΔG_{II}	ΔG_{TOT}	ΔG_{eqv}
0	0		0	0	0	0
48000	0.6085	1.27E-05	37.75423	44.15583	81.91048	61.55762
96000	0.8985	6.04E-06	36.82722	41.34082	78.16801	58.69119
144000	1.384	1.01E-05	36.10432	37.52867	73.63246	55.23163
192000	1.4965	2.34E-06	36.1414	36.88543	73.02641	54.77202
240000	2.06925	1.19E-05	37.71147	35.64054	73.35692	55.02862
288000	2.07525	1.25E-07	37.74042	35.64563	73.39109	55.05449
432000	2.65125	4.00E-06	41.76147	37.25668	79.0496	59.32782
576000	3.8935	8.63E-06	63.83948	48.31774	112.5135	84.65494
648000	4.04925	2.16E-06	69.38876	54.57322	124.4141	93.41416
720000	4.74575	9.67E-06	112.8068	147.4987	261.4833	196.385
792000	5.87175	1.56E-05	119.6137	100.7818	220.3964	165.6989
804000	6.50875	5.31E-05	116.7191	92.91739	209.6446	157.903
810000	6.67375	2.75E-05	115.9684	91.76999	207.7493	156.5085
816000	6.8485	2.91E-05	115.9521	91.14591	207.1125	156.0663
822000	6.86925	3.46E-06	116.0188	91.11197	207.1457	156.0968
828000	7.10225	3.88E-05	117.9278	91.27283	209.2209	157.7495
840000	7.263	1.34E-05	120.5241	91.89014	212.4384	160.2756
852000	8.90925	1.37E-04	171.513	127.1452	298.712	225.6414

Tabella 3.8: provino S05_19

Si costruiscono quindi le curve di Paris:

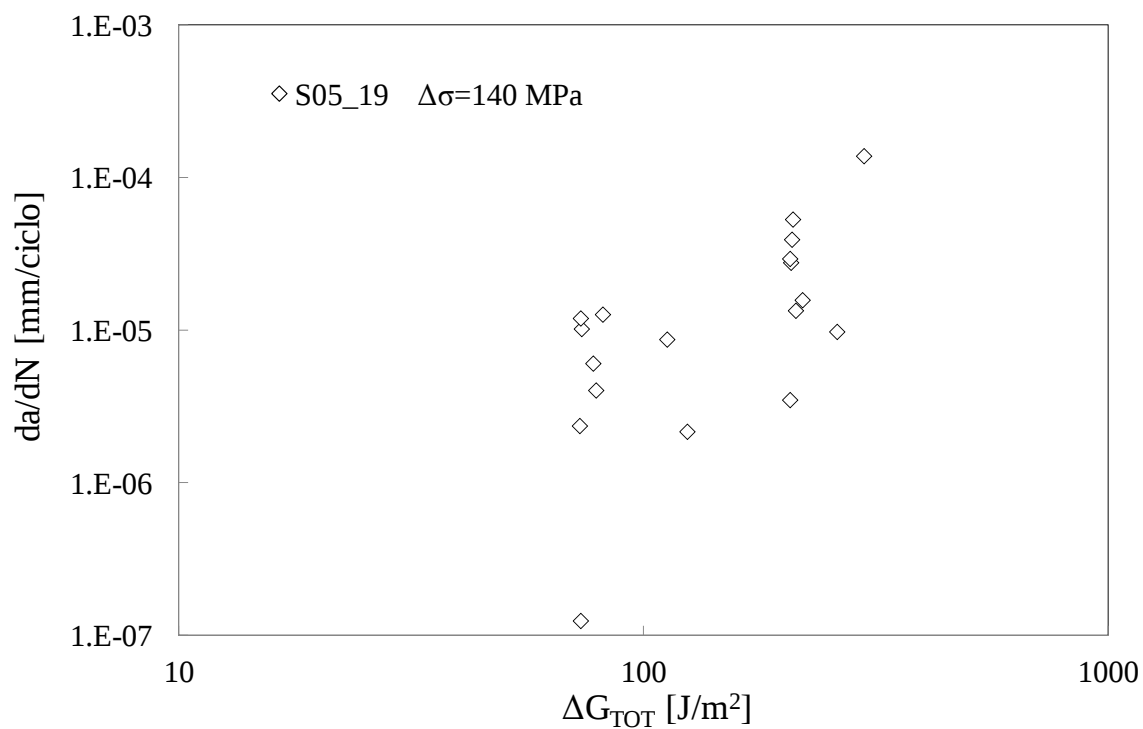


Figura 3.32: curva di Paris in ΔG_{TOT} per il provino S05_19

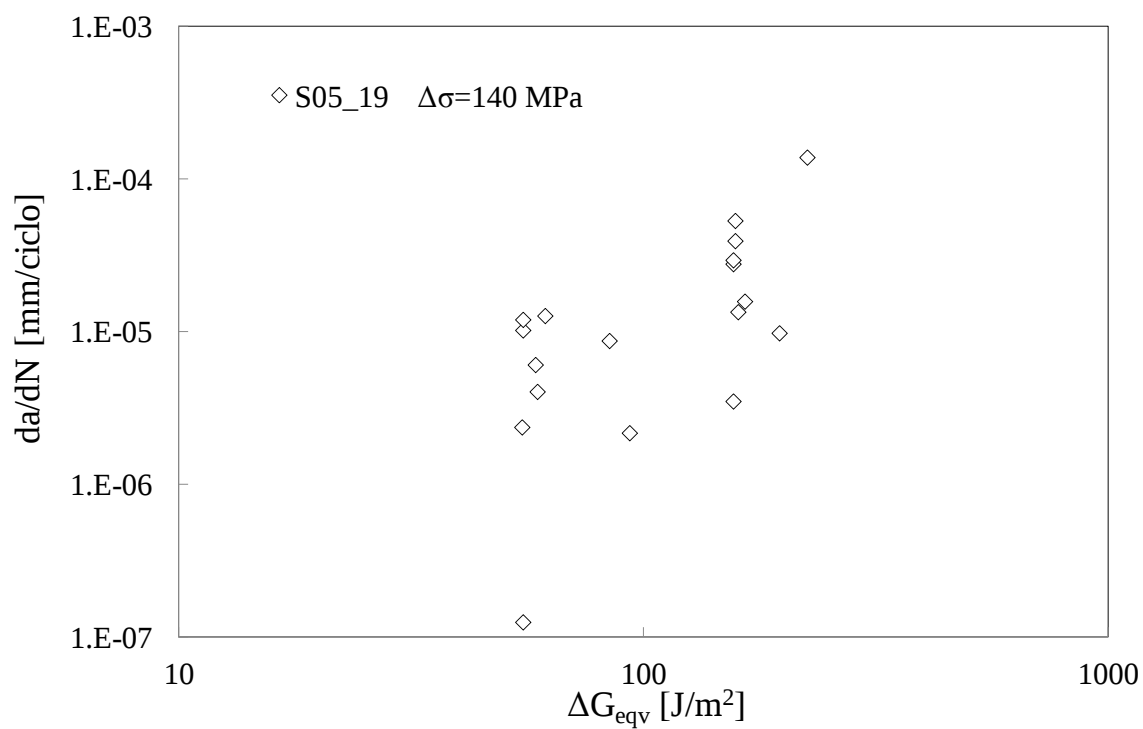
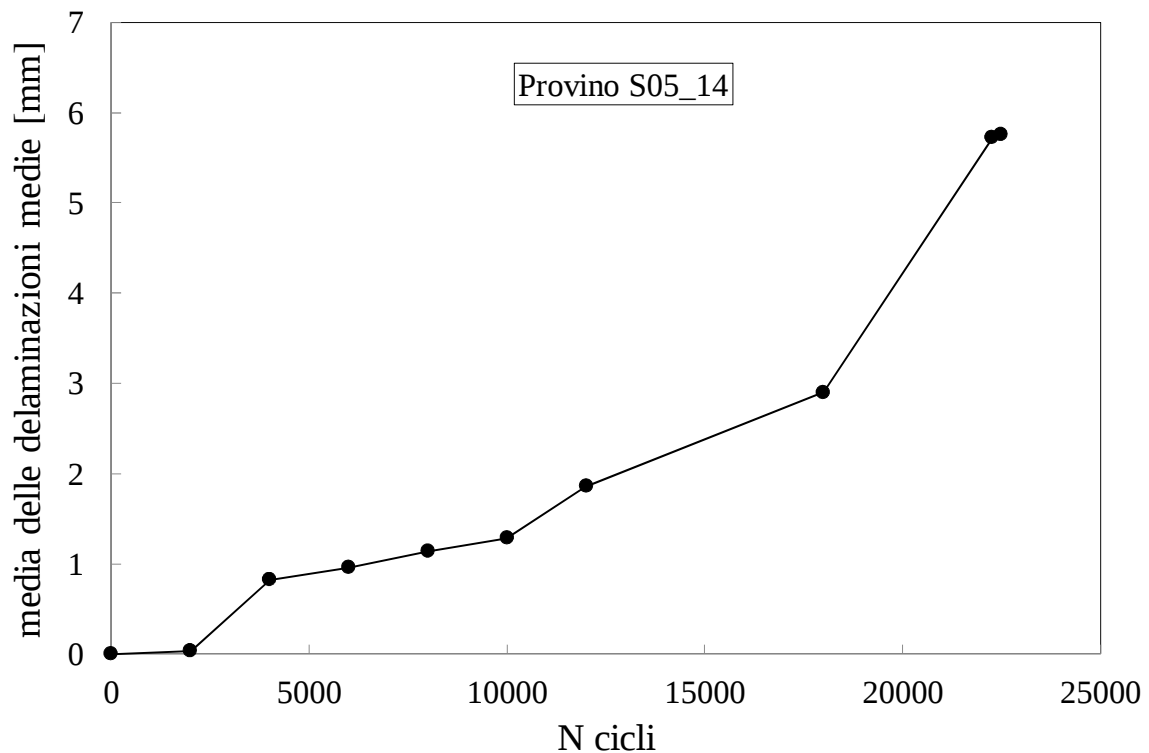


Figura 3.33: curva di Paris in ΔG_{eqv} per il provino S05_19

➤ **Provino S05_14 $\Delta\sigma=200$ MPa (alto carico):**Figura 3.34: propagazione sperimentale della media delle delaminazioni medie ($\Delta\sigma=200$ MPa, alto carico)

I provini soggetti ad alto carico non presentano alcun intervallo temporale a propagazione nulla di cricca; per questi dunque non è stata necessaria alcuna rielaborazione dei dati.

Il calcolo delle componenti del SERR alle relative lunghezze di cricca intesa come media delle delaminazioni medie richiede l'extrapolazione dalle linee di tendenza relative alla propagazione soggetta ad alto carico. In questo caso non sono state necessarie analisi aggiuntive in quanto tutte le varie misure della cricca ricadono all'interno di intervalli già considerati nelle analisi precedenti, nei quali inoltre il calcolo delle componenti del SERR tramite extrapolazione del valore dalle linee di tendenza è buona.

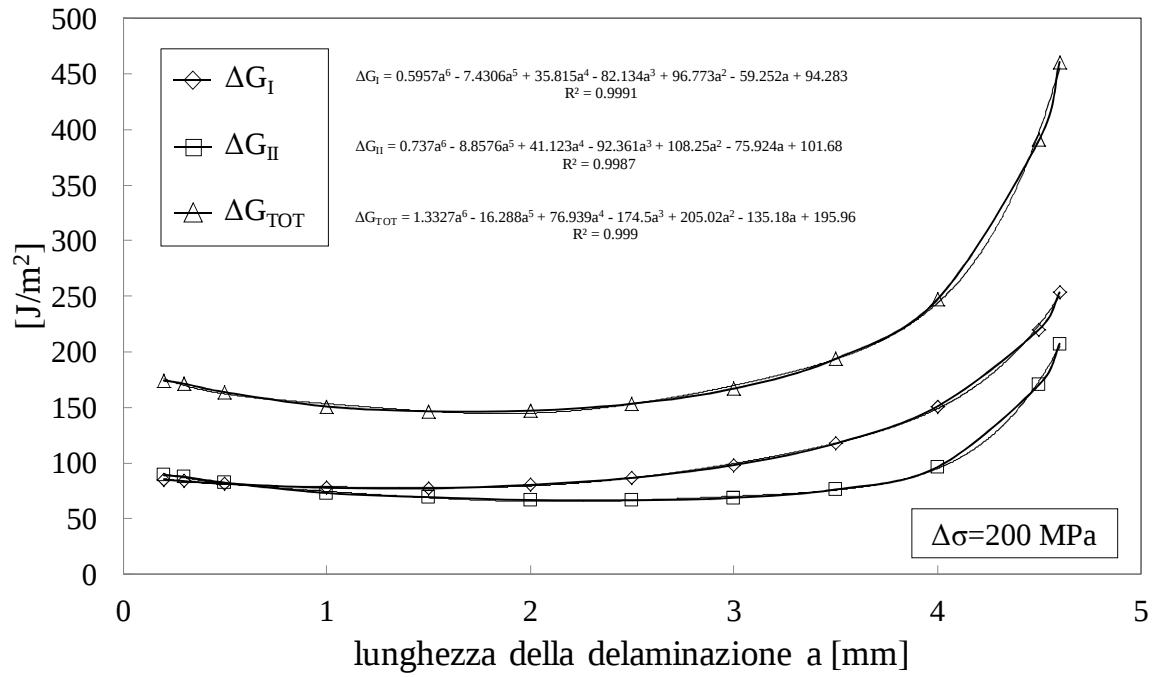


Figura 3.35: andamento delle componenti del SERR e relative linee di tendenza (polinomiali) lungo la prima interfaccia al propagare della delaminazione, lunghezza di sovrapposizione $w=5$, $\Delta\sigma=200 \text{ MPa}$ (alto carico), analisi geometricamente NON LINEARI

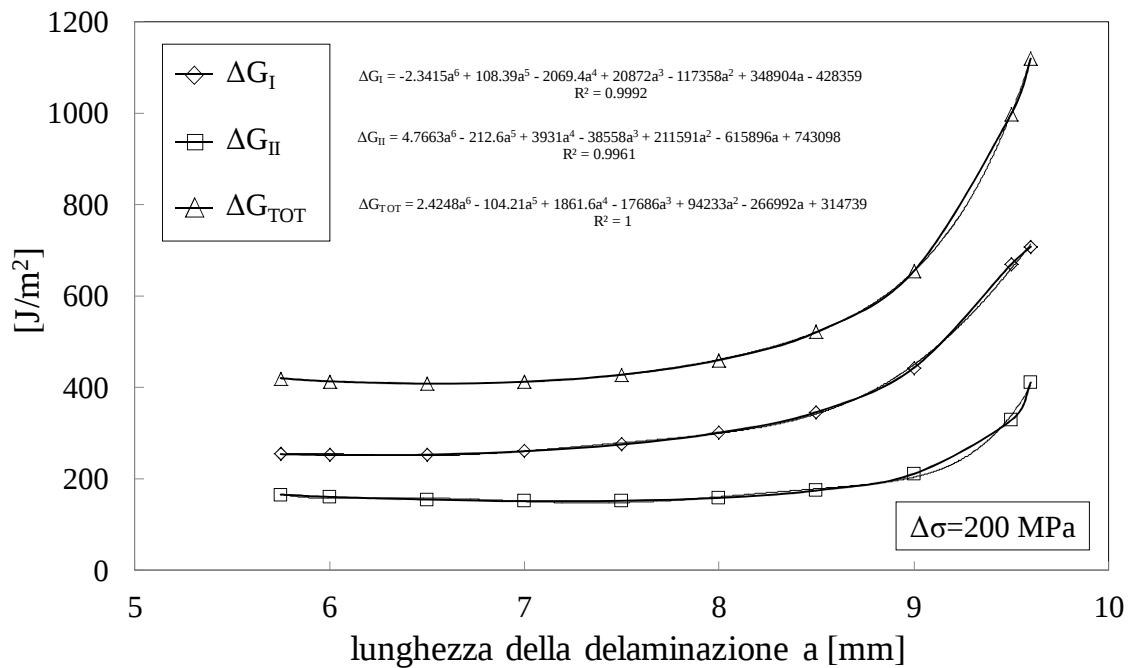


Figura 3.36: andamento delle componenti del SERR e relative linee di tendenza (polinomiali) lungo la seconda interfaccia al propagare della delaminazione, lunghezza di sovrapposizione $w=5$, $\Delta\sigma=200 \text{ MPa}$ (alto carico), analisi geometricamente NON LINEARI

Riassumendo quindi i valori calcolati in tabella:

N. CICLI	media 1-9; 8-16	da/dN	ΔG_I	ΔG_{II}	ΔG_{TOT}	ΔG_{eqv}
0	0		0	0	0	0
2000	0.0365*	/	/	/	/	/
4000	0.8235	3.94E-04	79.09003	76.77417	155.8536	116.9068
6000	0.959	6.78E-05	78.74952	75.13531	153.8718	115.4348
8000	1.1405	9.08E-05	78.30622	72.98381	151.2732	113.5143
10000	1.28625	7.29E-05	77.96069	71.28279	149.2232	112.0073
12000	1.8625	2.88E-04	78.27223	66.14431	144.3799	108.567
18000	2.903	1.73E-04	96.59612	69.45554	166.0017	125.6478
22262	5.72375	6.62E-04	252.2986	169.743	421.9894	320.5684
22500	5.76225	1.62E-04	253.7553	166.4349	420.1334	319.6792

Tabella 3.9: provino S05_14 (*valore non realizzabile tramite analisi agli elementi finiti)

Si possono costruire quindi le curve di Paris:

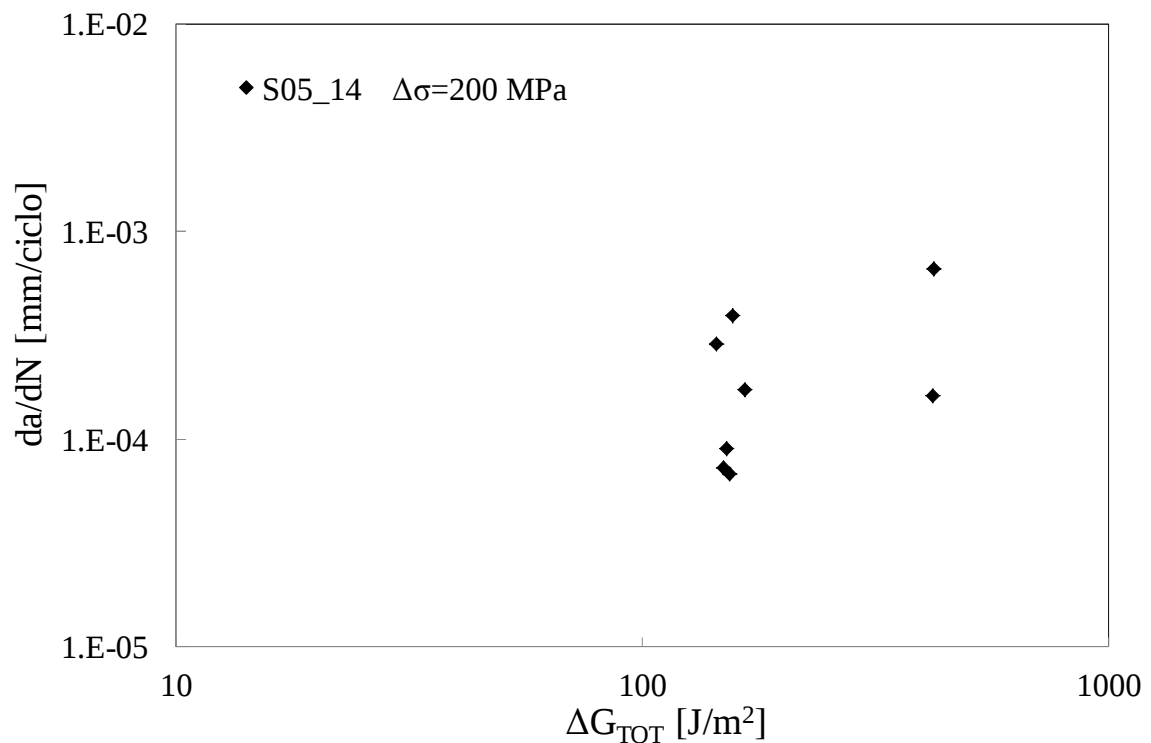


Figura 3.37: curva di Paris in ΔG_{TOT} per il provino S05_14

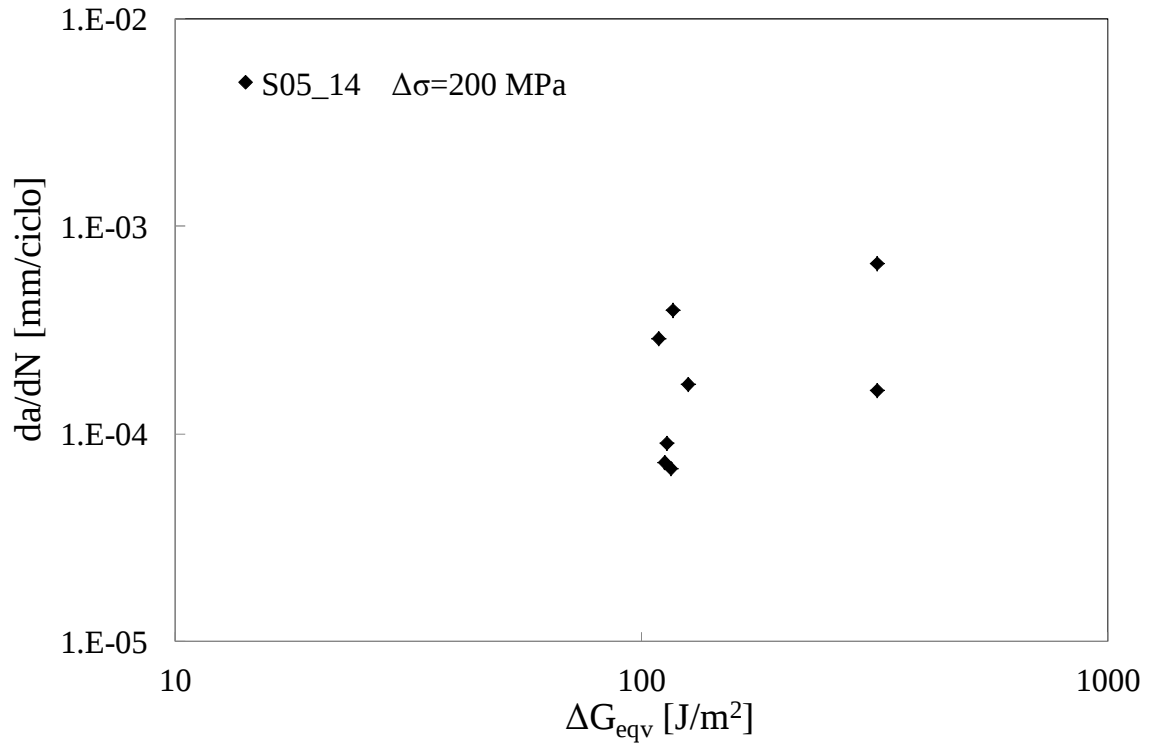


Figura 3.38: curva di Paris in ΔG_{eqv} per il provino S05_14

➤ **Provino S05_17 $\Delta\sigma=200$ MPa (alto carico):**

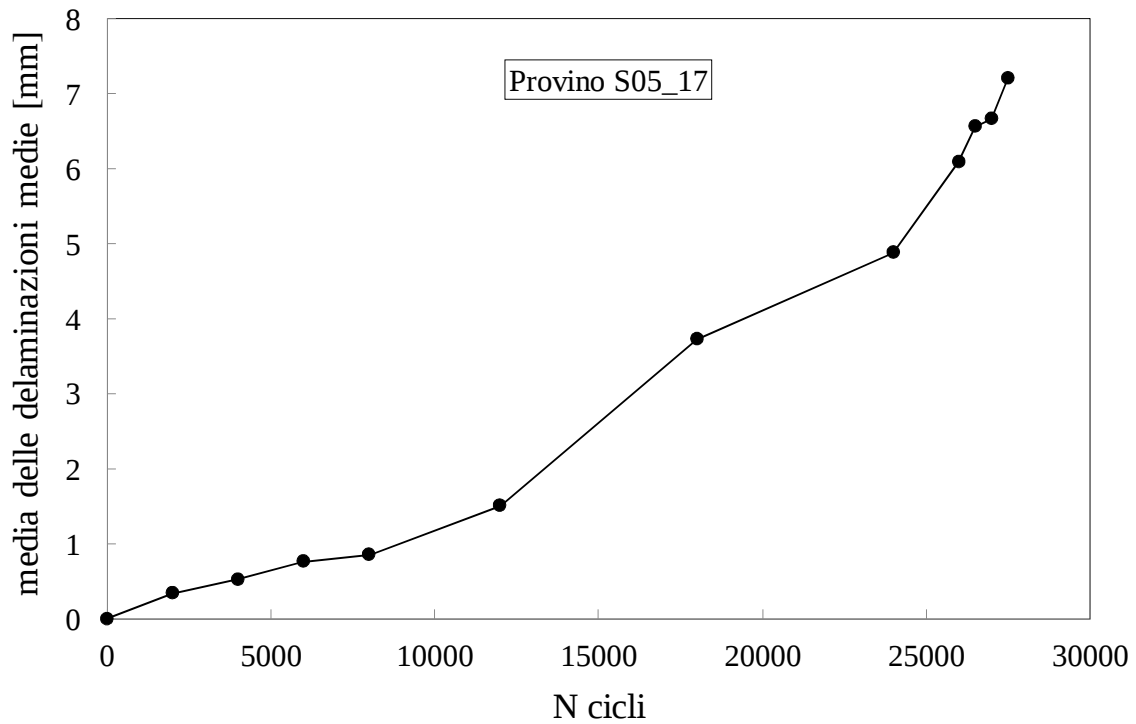
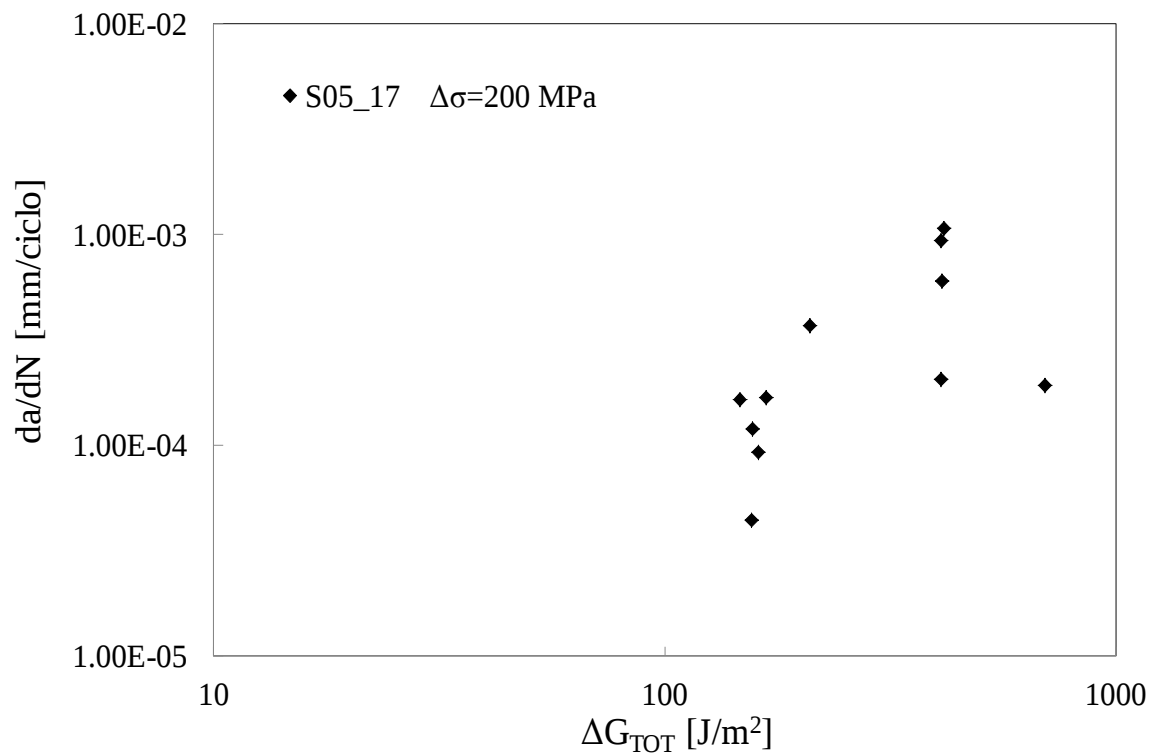


Figura 3.39: propagazione sperimentale della media delle delaminazioni medie ($\Delta\sigma=200$ MPa, alto carico)

N. CICLI	media 1-9; 8-16	da/dN	ΔG_I	ΔG_{II}	ΔG_{TOT}	ΔG_{eqv}
0	0		0	0	0	0
2000	0.337	1.69E-04	82.59251	85.34553	167.9332	125.9648
4000	0.52225	9.26E-05	80.42142	81.12731	161.5422	121.1623
6000	0.76225	1.20E-04	79.26521	77.54544	156.801	117.6127
8000	0.8505	4.41E-05	79.01878	76.44217	155.4499	116.6064
12000	1.508	1.64E-04	77.6088	68.87548	146.458	109.9934
18000	3.7246	3.69E-04	128.9692	80.95042	209.9376	160.1858
24000	4.88225	1.93E-04	357.936	338.4056	696.7886	522.3931
26000	6.095	6.06E-04	254.1068	157.8146	411.8115	314.5685
26500	6.56425	9.39E-04	251.0901	158.3974	409.2507	312.3612
27000	6.66675	2.05E-04	252.3325	157.3028	409.3601	312.7379
27500	7.20575	1.08E-03	268.1257	149.1588	416.7236	321.4427

Tabella 3.10: provino S05_17

Figura 3.40: curva di Paris in ΔG_{TOT} per il provino S05_17

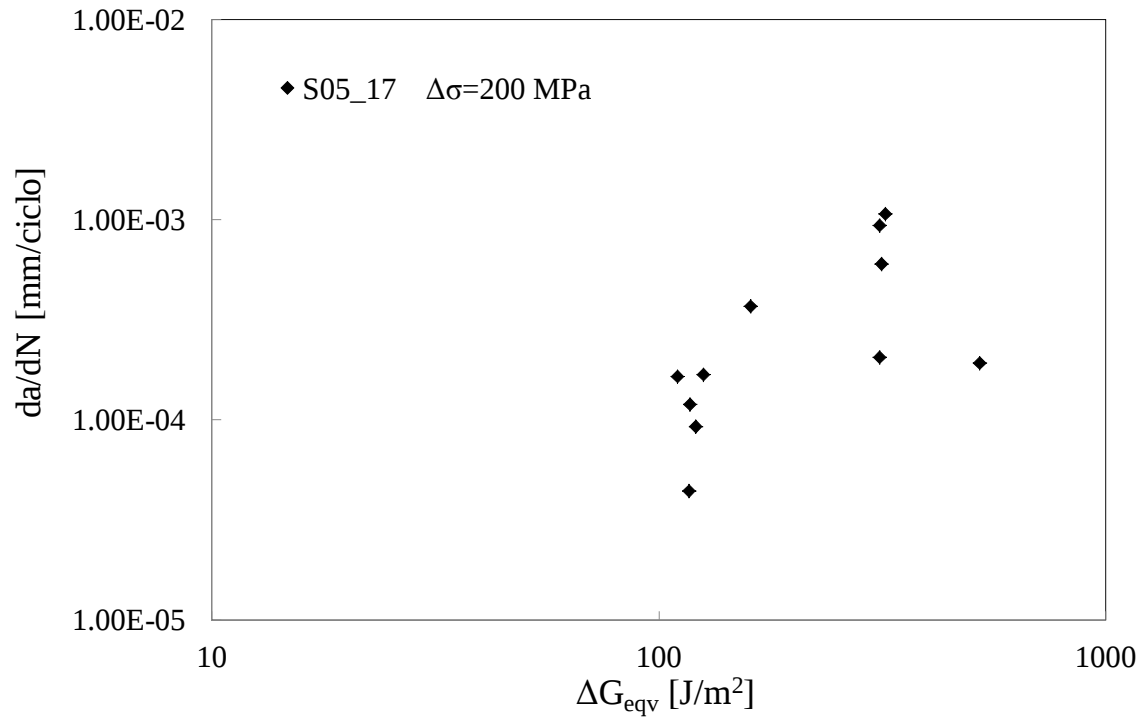


Figura 3.41: curva di Paris in ΔG_{eqv} per il provino S05_17

Unendo in un unico grafico i risultati relativi ai giunti con overlap pari a 5 mm si ottiene:

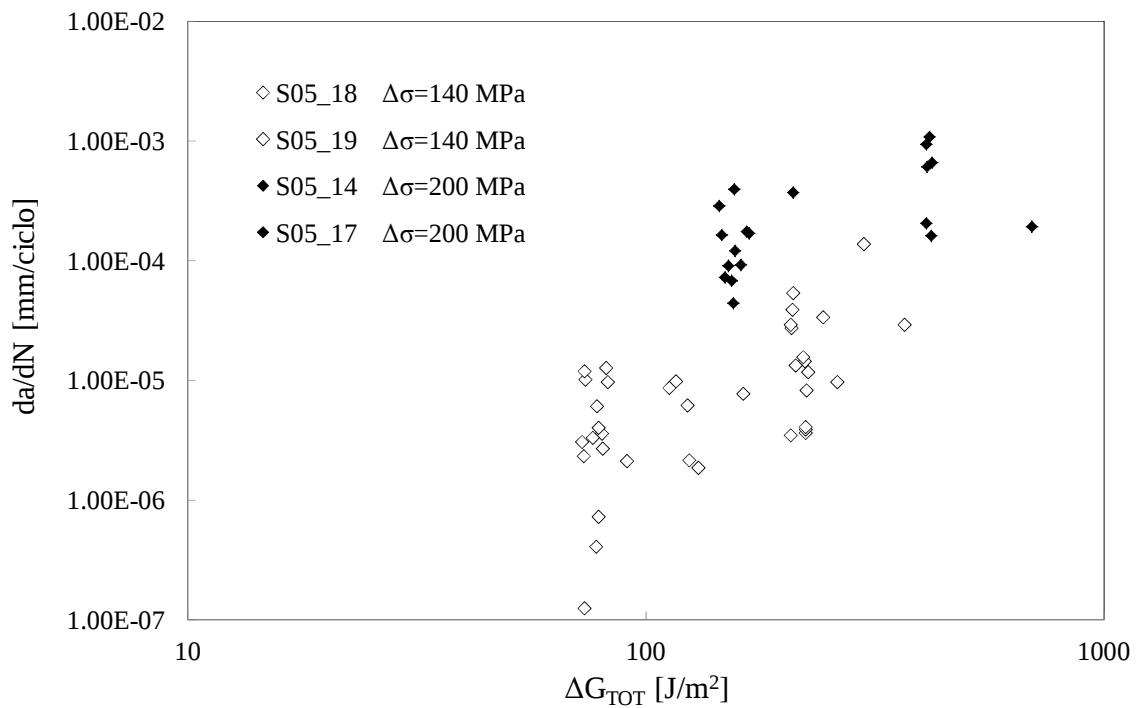


Figura 3.42: curva di Paris riassuntiva in ΔG_{TOT} per i giunti S05

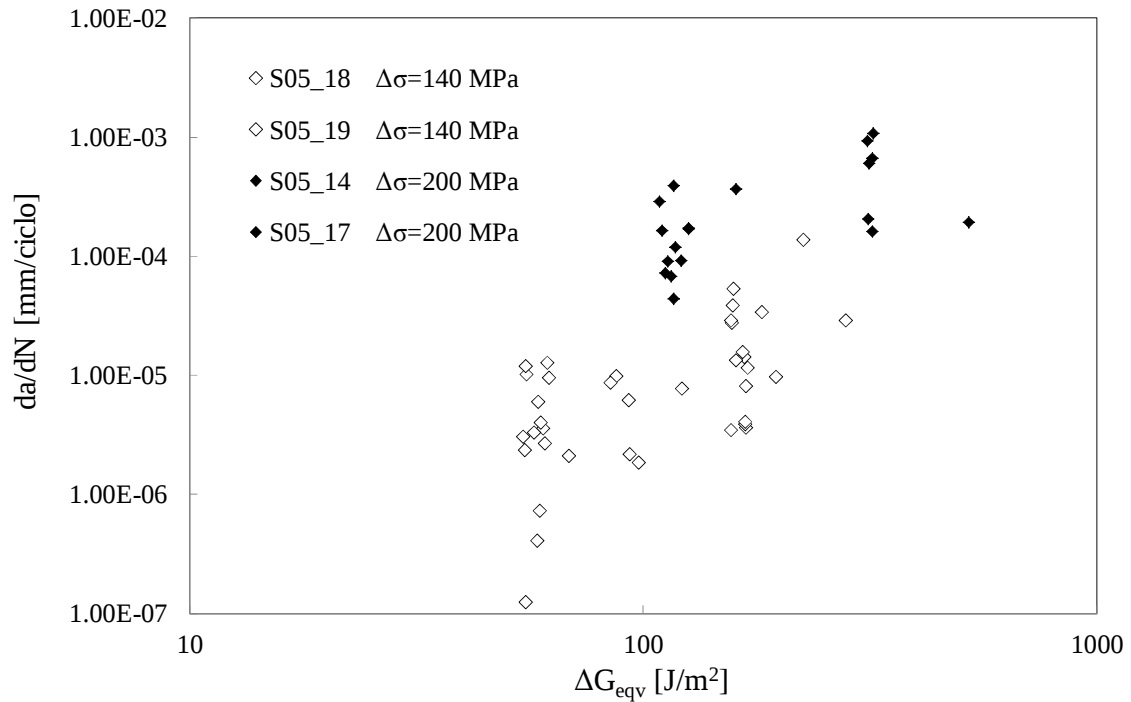


Figura 3.43: curva di Paris riassuntiva in ΔG_{eqv} per i giunti S05

Si passa quindi ad analizzare i dati relativi all'*overlap* 8 mm per ultimare questa prima analisi.

Dai grafici relativi alle propagazioni dei provini con lunghezza di sovrapposizione pari a 8 mm e soggetti a basso carico, registrate tramite osservazioni al microscopio dei bordi del giunto, si vede come le delaminazioni e quindi la media delle delaminazioni inneschino già dai primi cicli propagando rapidamente verso i punti interni della giunzione. Segue poi una fase di stasi in cui l'avanzare delle cricche rallenta o quasi si arresta finché si raggiunge la fase finale della vita del campione in cui le delaminazioni ricominciano ad avanzare rapidamente fino alla separazione della giunzione. Questo ha un ovvio riscontro anche sulle velocità di propagazione, calcolate come rapporto incrementale, in quanto risultano essere quasi nulle per gran parte della vita del provino per poi aumentare considerevolmente nella fase finale. Tale comportamento dei giunti con *overlap* 8 mm scompare quasi del tutto per carichi più elevati per i quali infatti non si esibiscono intervalli temporali in cui la cricca non è propagata.

➤ **Provino S08_18 $\Delta\sigma=202.5$ MPa (basso carico):**

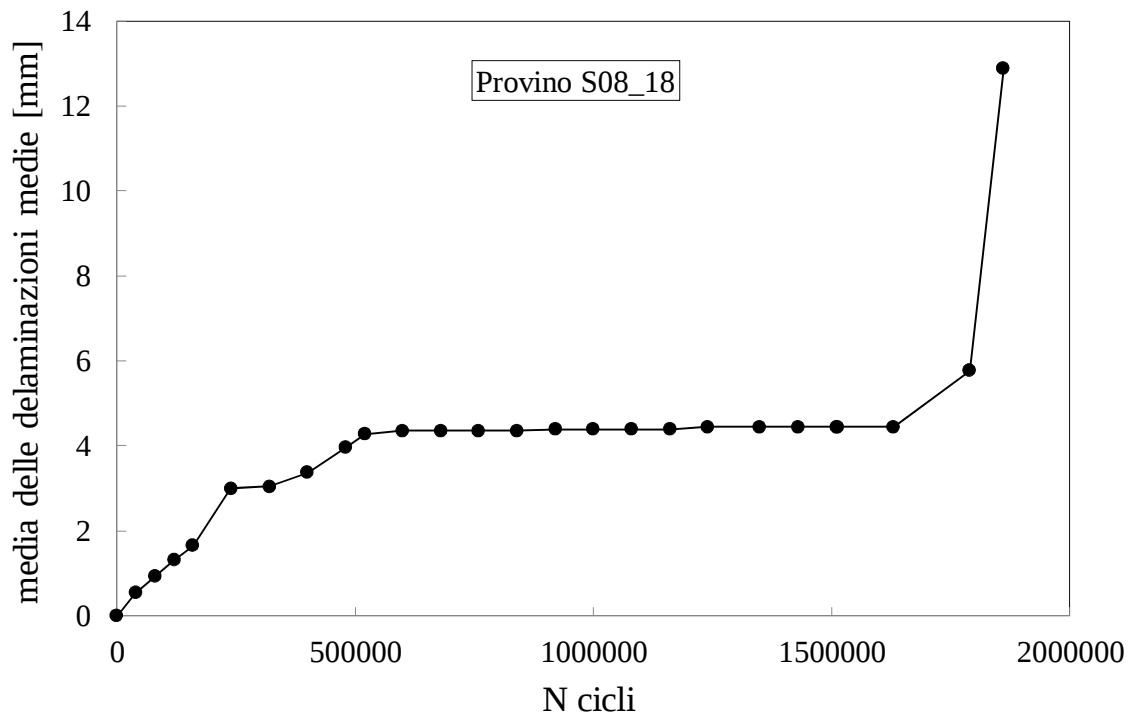


Figura 3.44: propagazione sperimentale della media delle delaminazioni medie ($\Delta\sigma=202.5$ MPa, basso carico)

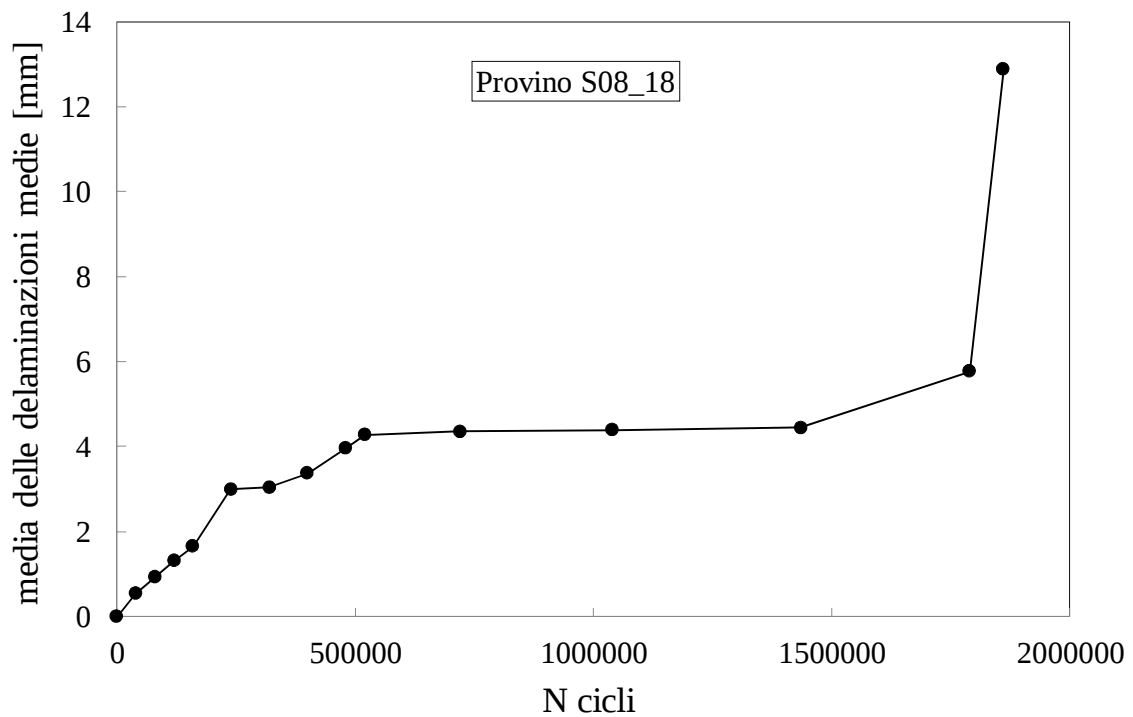


Figura 3.45: propagazione rielaborata della media delle delaminazioni medie ($\Delta\sigma=202.5$ MPa, basso carico)

Come si può vedere dai precedenti grafici la rielaborazione dei dati non migliora la situazione in quanto rimangono comunque molti intervalli caratterizzati da piccole variazioni della lunghezza di cricca.

Assunto comunque questo andamento per la media delle delaminazioni medie e quindi calcolata la velocità di propagazione della cricca tramite il rapporto incrementale si sono valutati i valori di ΔG_I , ΔG_{II} , ΔG_{TOT} per ogni lunghezza di cricca tramite l'extrapolazione dalle relative linee di tendenza per l'interfaccia di propagazione interessata.

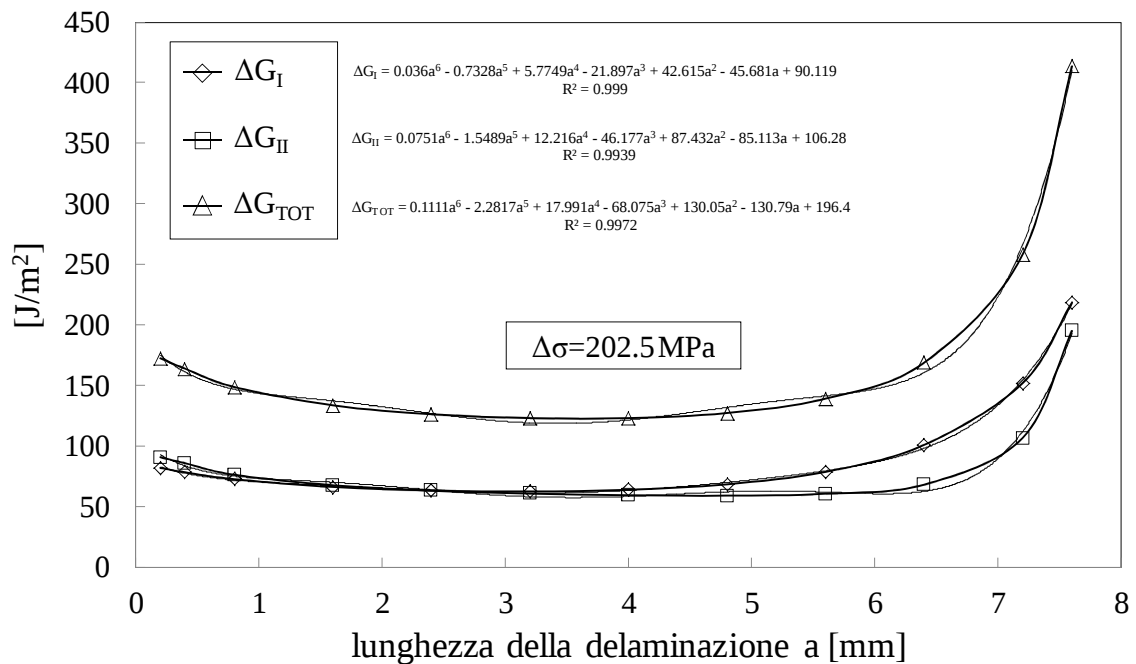


Figura 3.46: andamento delle componenti del SERR e relative linee di tendenza (polinomiali) lungo la prima interfaccia al propagare della delaminazione, lunghezza di sovrapposizione $w=8$, $\Delta\sigma=202.5 MPa$ (basso carico), analisi geometricamente NON LINEARI

Per quanto riguarda gli S08 soggetti a basso carico non sono state necessarie analisi aggiuntive sia per quanto riguarda la prima che la seconda interfaccia in quanto tutte le varie misure della cricca ricadono all'interno di intervalli già considerati nelle analisi precedenti, per i quali l'andamento approssimato ottenuto tramite le linee di tendenza è buono.

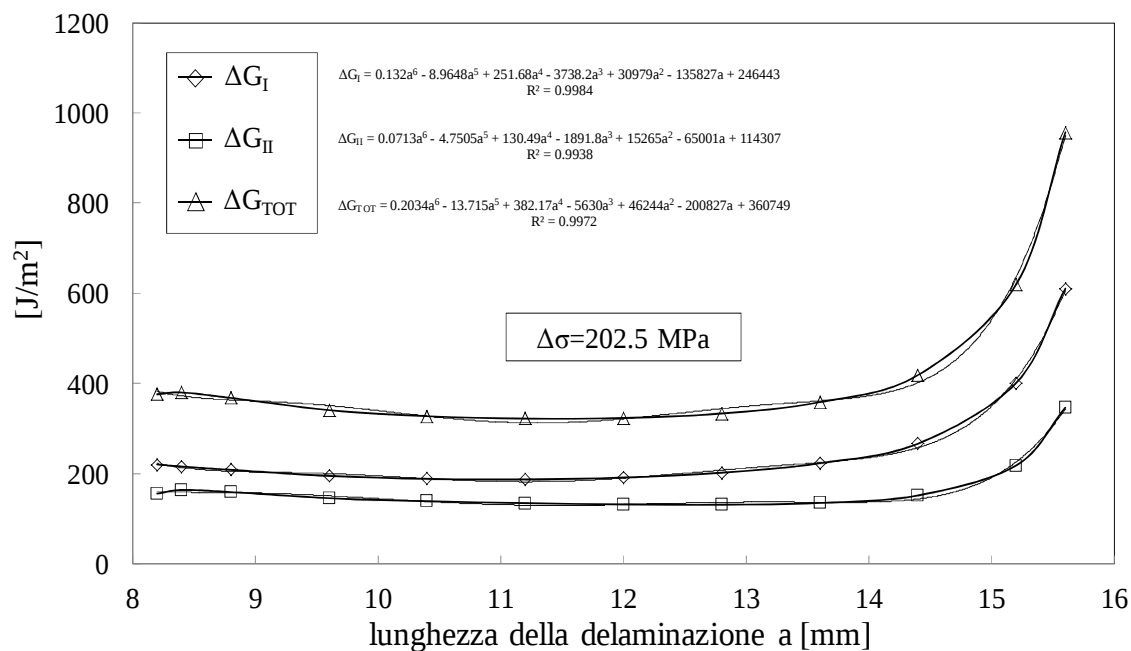


Figura 3.47: andamento delle componenti del SERR e relative linee di tendenza (polinomiali) lungo la seconda interfaccia al propagare della delaminazione, lunghezza di sovrapposizione $w=8$, $\Delta\sigma=202.5$ MPa (basso carico), analisi geometricamente NON LINEARI

Riassumendo quindi i valori calcolati in tabella:

N. CICLI	media 1-9; 8-16	da/dN	ΔG_I	ΔG_{II}	ΔG_{TOT}	ΔG_{eqv}
0	0		0	0	0	0
40000	0.537	1.34E-05	74.93467	79.58477	154.5233	115.9246
80000	0.92575	9.72E-06	70.74469	73.74753	144.4988	108.3848
120000	1.3045	9.47E-06	68.57033	71.42148	140.0012	105.0084
160000	1.65375	8.73E-06	66.95124	69.53907	136.5024	102.38
240000	2.993	1.67E-05	61.34538	58.95189	120.3183	90.23485
320000	3.0445	6.44E-07	61.25821	58.6631	119.9427	89.95502
400000	3.37075	4.08E-06	61.14658	57.45506	118.6248	88.97996
480000	3.96075	7.38E-06	63.04964	58.09333	121.1693	90.90792
520000	4.27525	7.86E-06	65.10423	59.51856	124.651	93.52968
720000	4.3505	3.76E-07	65.68526	59.90491	125.6188	94.25914
1040000	4.38575	1.10E-07	65.96799	60.08704	126.0839	94.60986
1435000	4.4495	1.61E-07	66.49551	60.4149	126.9397	95.25564
1790000	5.77275	3.73E-06	81.76211	61.13158	142.9364	107.9149
1860310	12.888	1.01E-04	209.9117	135.9969	346.8513	263.3801

Tabella 3.11: provino S08_18

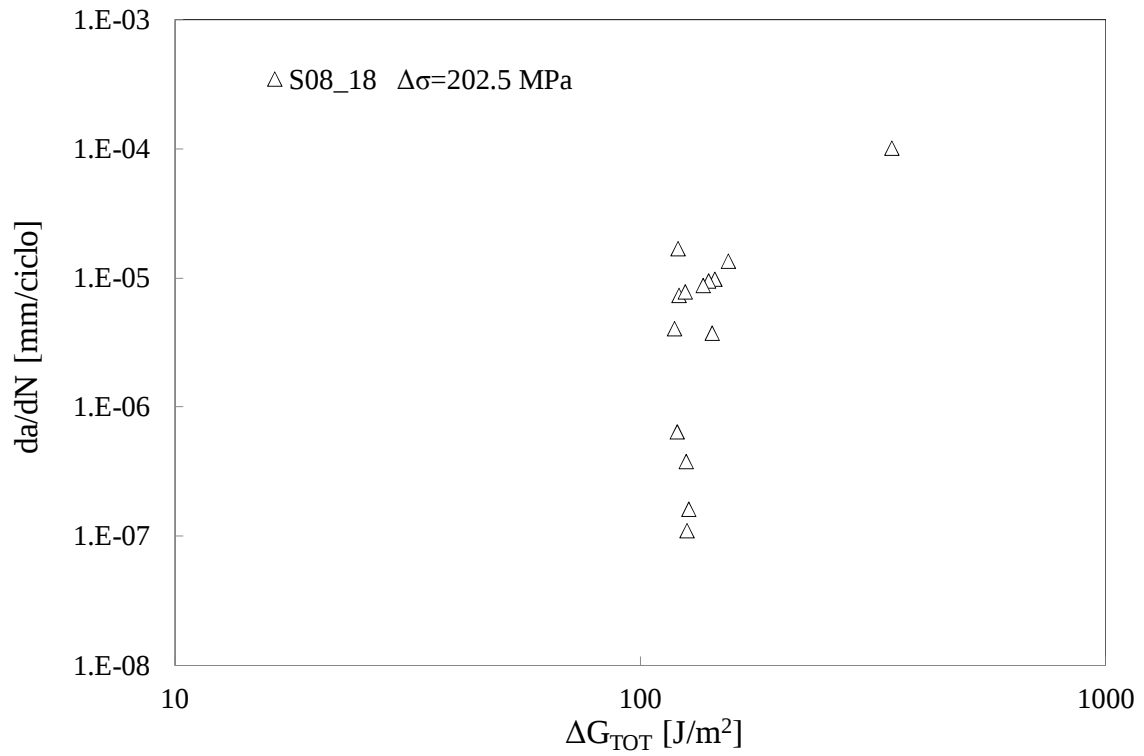


Figura 3.48: curva di Paris in ΔG_{TOT} per il provino S08_18

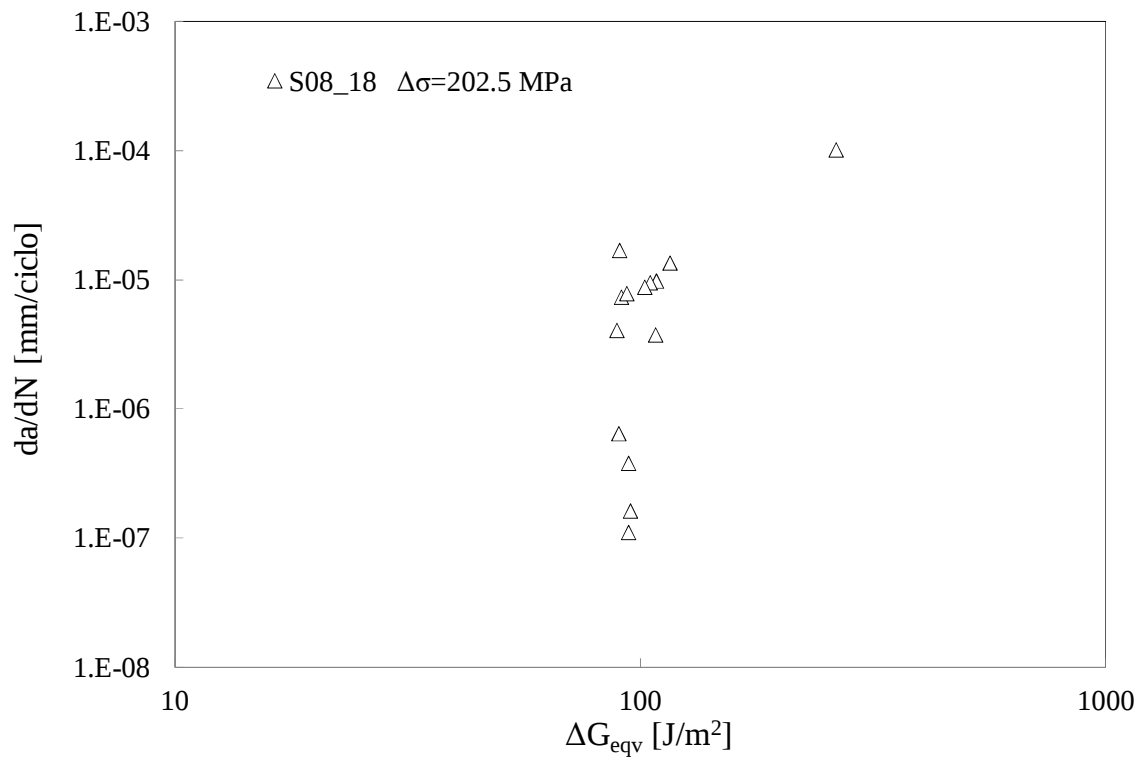


Figura 3.49: curva di Paris in ΔG_{eqv} per il provino S08_18

➤ **Provino S08_19 $\Delta\sigma=202.5$ MPa (basso carico):**

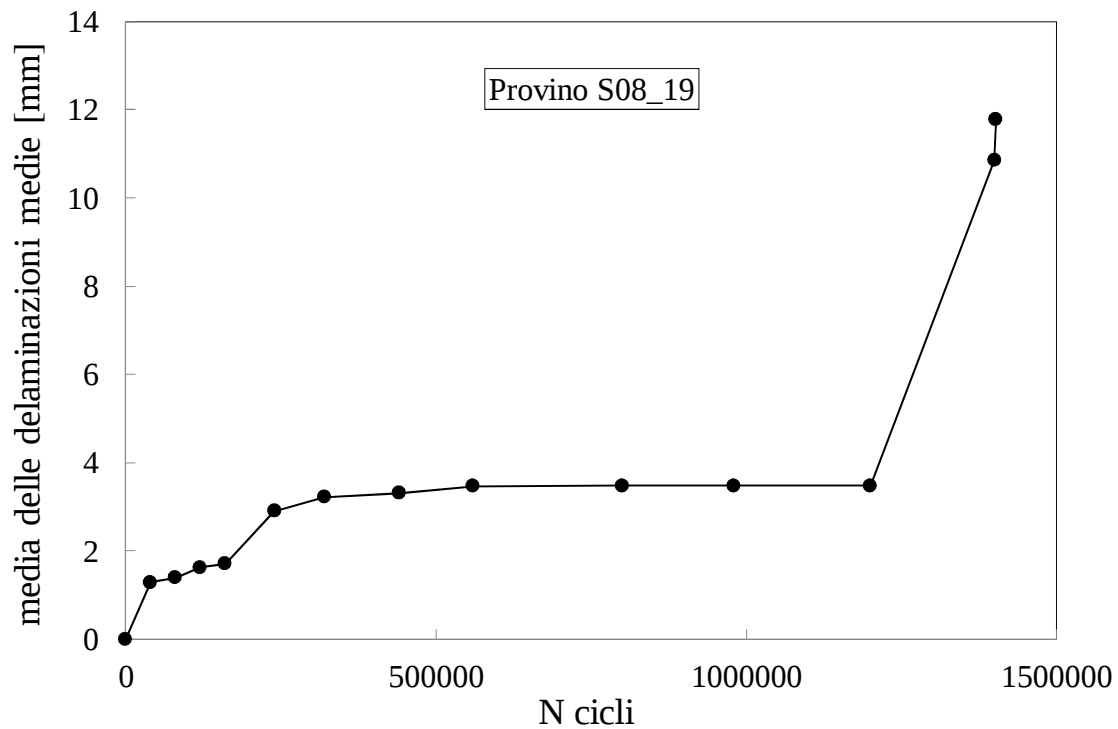


Figura 3.50: propagazione sperimentale della media delle delaminazioni medie ($\Delta\sigma=202.5$ MPa, basso carico)

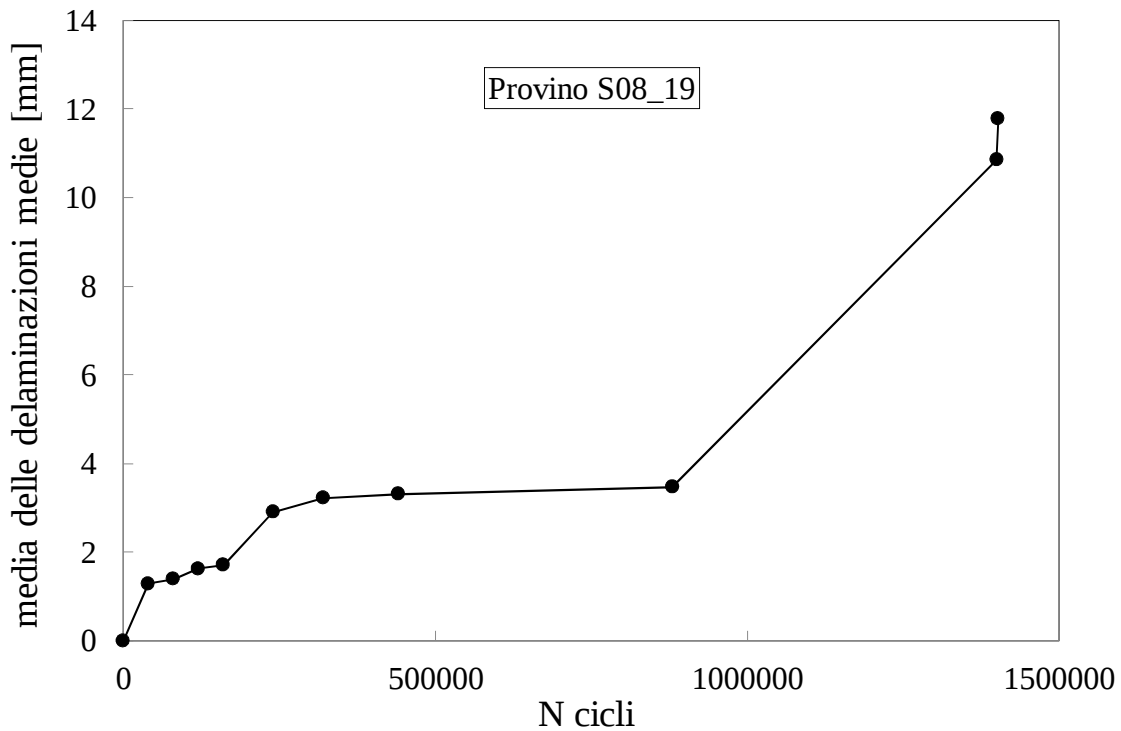
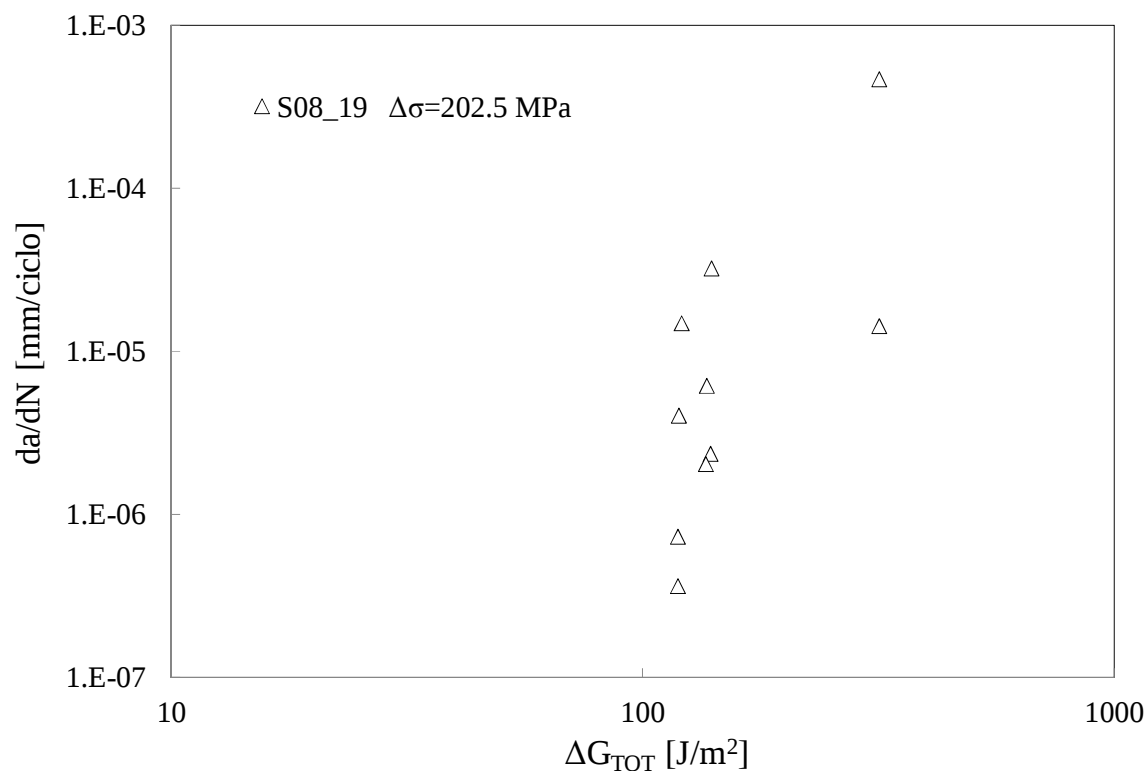


Figura 3.51: propagazione rielaborata della media delle delaminazioni medie ($\Delta\sigma=202.5$ MPa, basso carico)

N. CICLI	media 1-9; 8-16	da/dN	ΔG_I	ΔG_{II}	ΔG_{TOT}	ΔG_{eqv}
0	0		0	0	0	0
40000	1.294	3.24E-05	68.62088	71.47397	140.1042	105.0857
80000	1.3875	2.34E-06	68.17849	71.00614	139.1947	104.4028
120000	1.6315	6.10E-06	67.05448	69.67446	136.7408	102.5593
160000	1.71275	2.03E-06	66.67568	69.16633	135.8545	101.8929
240000	2.89975	1.48E-05	61.54657	59.53474	121.1018	90.81934
320000	3.2205	4.01E-06	61.09957	57.87225	118.9942	89.25075
440000	3.30775	7.27E-07	61.10567	57.60013	118.7286	89.05523
880000	3.46725	3.63E-07	61.26988	57.31722	118.6108	88.97326
1400000	10.84725	1.42E-05	184.1269	132.8105	316.9294	239.7802
1402000	11.77425	4.64E-04	186.6849	130.4196	317.2279	240.3243

Tabella 3.12: provino S08_19

Figura 3.52: curva di Paris in ΔG_{TOT} per il provino S08_19

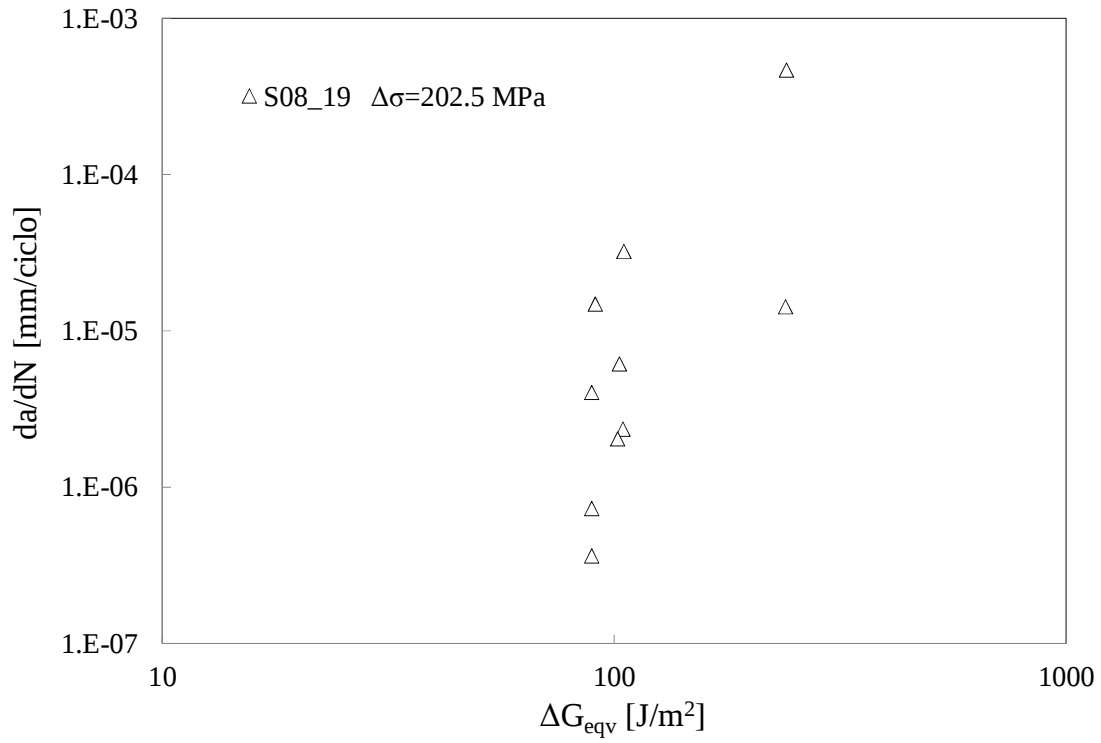


Figura 3.53: curva di Paris in ΔG_{eqv} per il provino S08_19

➤ **Provino S08_20 $\Delta\sigma=202.5$ MPa (basso carico):**

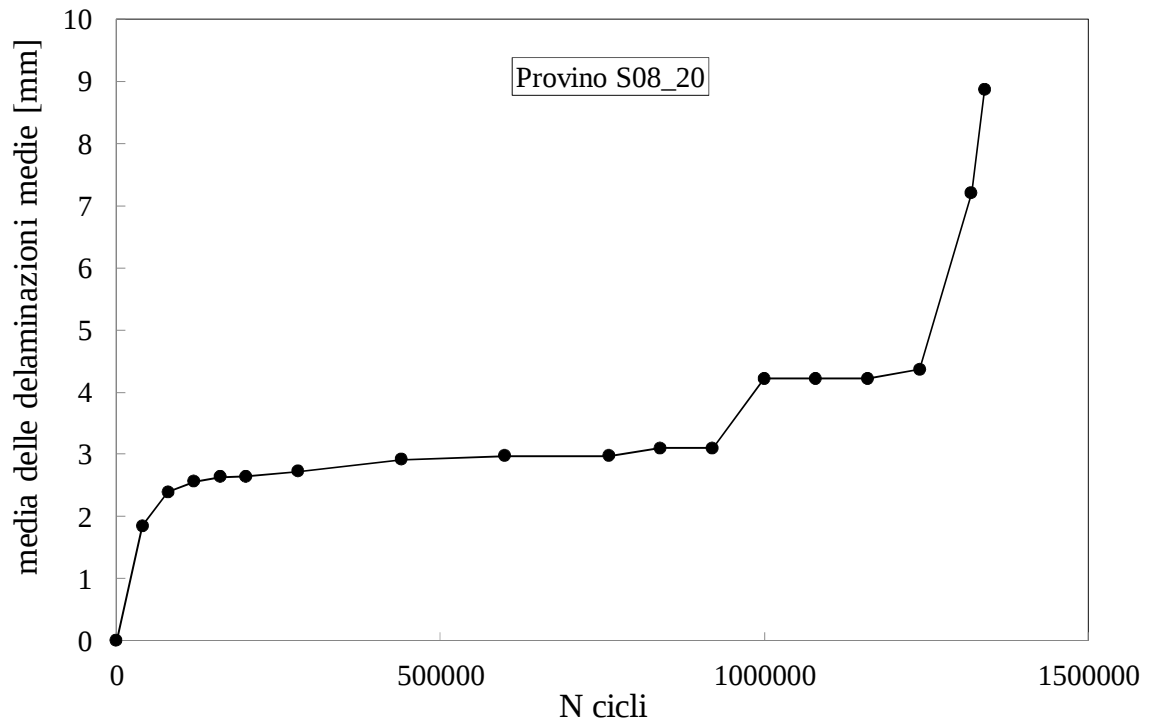
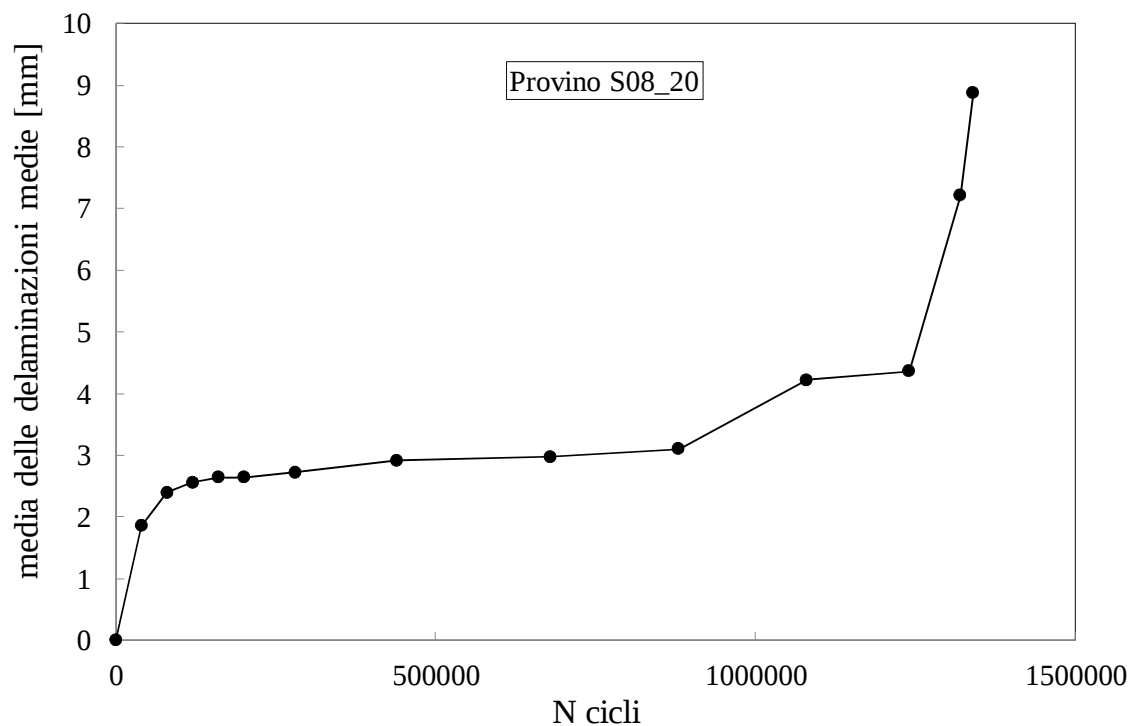


Figura 3.54: propagazione sperimentale della media delle delaminazioni medie ($\Delta\sigma=202.5$ MPa, basso carico)


 Figura 3.55: propagazione rielaborata della media delle delaminazioni medie ($\Delta\sigma=202.5$ MPa, basso carico)

N. CICLI	media 1-9; 8-16	da/dN	ΔG_I	ΔG_{II}	ΔG_{TOT}	ΔG_{eqv}
0	0		0	0	0	0
40000	1.85075	4.63E-05	66.01957	68.21432	134.2474	100.6844
80000	2.3945	1.36E-05	63.39482	63.6318	127.044	95.27007
120000	2.56	4.14E-06	62.67756	62.17219	124.8682	93.63782
160000	2.6365	1.91E-06	62.37671	61.52399	123.9196	92.92699
200000	2.64025	9.38E-08	62.36255	61.49284	123.8743	92.89307
280000	2.72425	1.05E-06	62.0616	60.81332	122.8944	92.15936
440000	2.91375	1.18E-06	61.51294	59.44255	120.9761	90.72548
680000	2.9735	2.49E-07	61.38293	59.06755	120.4714	90.34898
880000	3.097	6.18E-07	61.18782	58.3946	119.6041	89.70313
1080000	4.21575	5.59E-06	64.66763	59.21958	123.9151	92.9753
1240000	4.36375	9.25E-07	65.79077	59.97336	125.7929	94.39037
1320000	7.20675	3.55E-05	153.7745	113.0501	266.9057	201.6724
1340000	8.86725	8.3E-05	205.1054	157.738	362.8427	273.6785

Tabella 3.13: provino S08_20

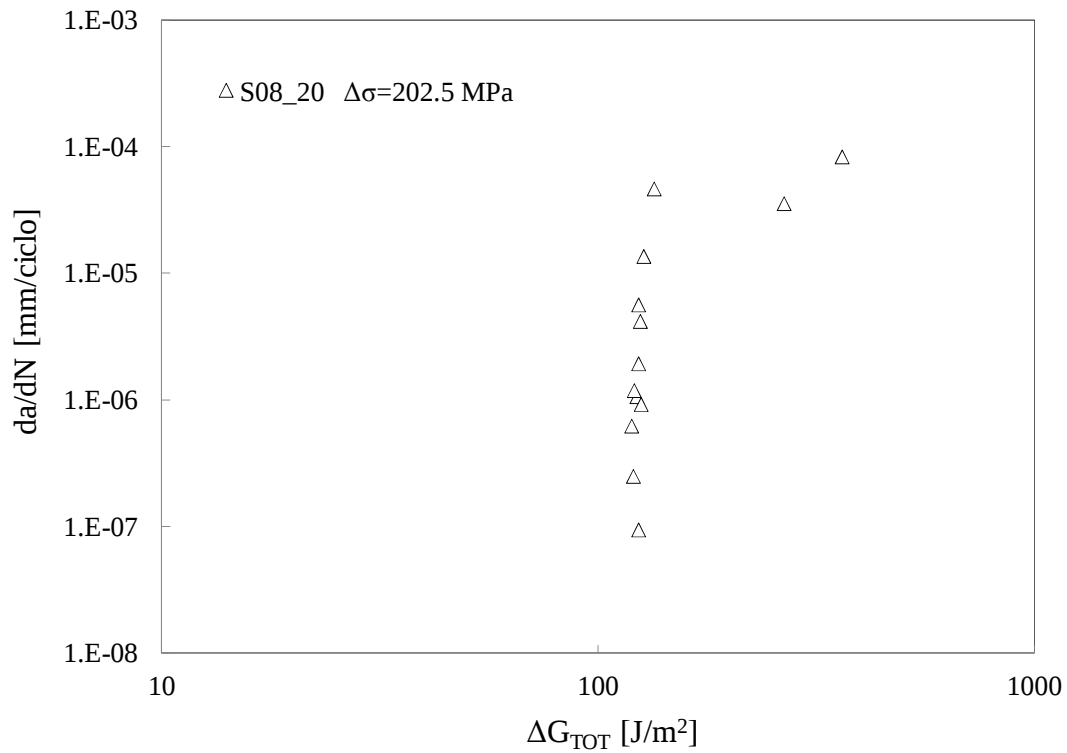


Figura 3.56: curva di Paris in ΔG_{TOT} per il provino S08_20

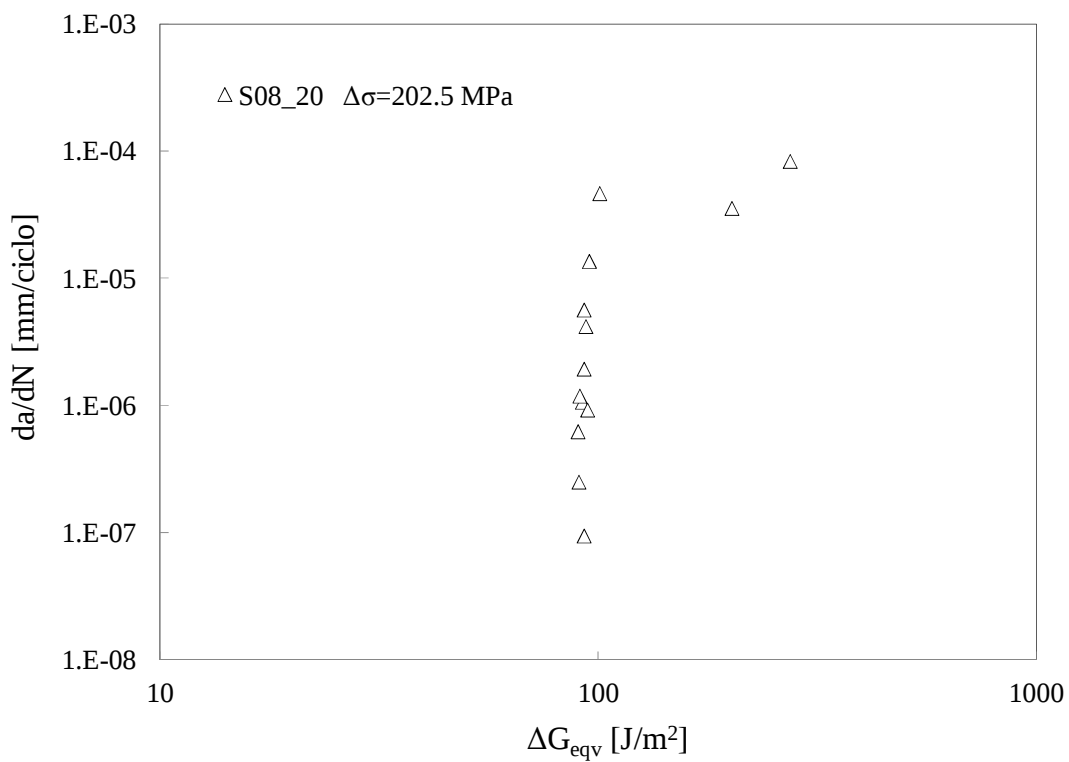


Figura 3.57: curva di Paris in ΔG_{eqv} per il provino S08_20

Dalle precedenti curve di Paris relative ai provini con lunghezza di sovrapposizione pari a 8 mm 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 le continue variazioni della velocità di propagazione combinate con valori pressoché costanti di ΔG producono dei tratti tendenzialmente verticali nelle curve di Paris.

➤ **Provino S08_16 $\Delta\sigma=282.6$ MPa (alto carico):**

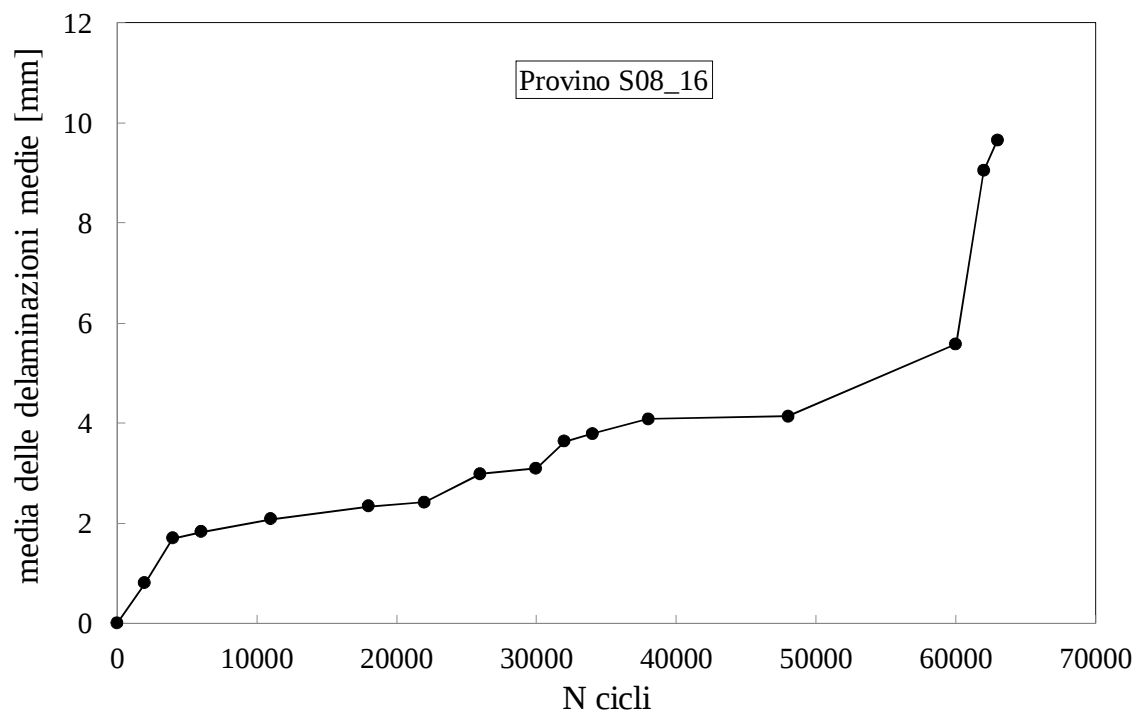


Figura 3.58: propagazione sperimentale della media delle delaminazioni medie ($\Delta\sigma=282.6$ MPa, basso carico)

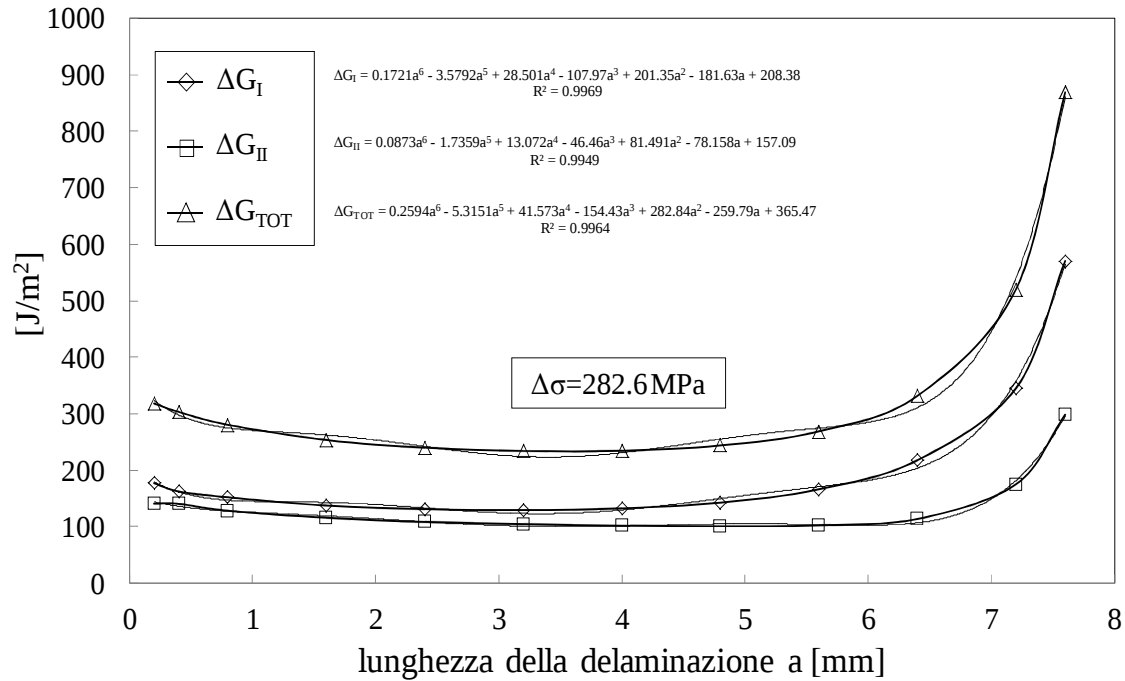


Figura 3.59: andamento delle componenti del SERR e relative linee di tendenza (polinomiali) lungo la prima interfaccia al propagare della delaminazione, lunghezza di sovrapposizione $w=8$, $\Delta\sigma=282.6 \text{ MPa}$ (alto carico), analisi geometricamente NON LINEARI

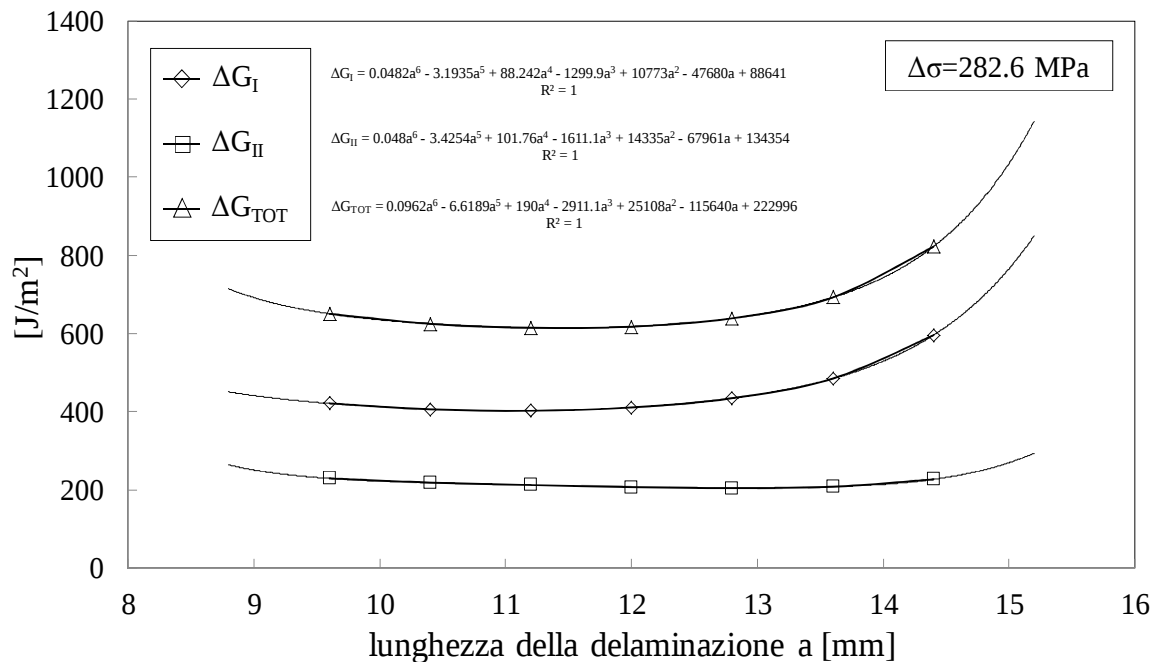


Figura 3.60: andamento delle componenti del SERR e relative linee di tendenza (polinomiali) lungo la seconda interfaccia al propagare della delaminazione, lunghezza di sovrapposizione $w=8$, $\Delta\sigma=282.6 \text{ MPa}$ (alto carico), analisi geometricamente NON LINEARI

Per quanto riguarda gli S08 soggetti ad alto carico sarebbero state necessarie analisi aggiuntive per la seconda interfaccia nella sua parte iniziale, dove però non è stato possibile condurre delle analisi con esiti positivi a causa della non convergenza delle stesse, come riportato nel capitolo precedente. Bisogna quindi “fidarsi” dell’andamento delle linee di tendenza e dei valori da queste estrapolati che sembrano essere comunque accettabili per valori non troppo distanti dagli ultimi calcolati dato il carattere abbastanza pianeggiante dell’andamento delle componenti del SERR nella parte iniziale della seconda interfaccia.

Riassumendo quindi i valori calcolati in tabella:

N. CICLI	media 1-9; 8-16	da/dN	ΔG_I	ΔG_{II}	ΔG_{TOT}	ΔG_{eqv}
0	0		0	0	0	0
2000	0.80325	4.02E-04	147.156	127.6946	274.8484	206.4825
4000	1.6965	4.47E-04	142.459	118.1531	260.6059	196.0258
6000	1.826	6.48E-05	141.2942	116.5438	257.8309	193.9724
11000	2.086	5.20E-05	138.0744	113.0766	251.1425	188.9853
18000	2.33775	3.60E-05	134.1709	109.6267	243.7875	183.4659
22000	2.42025	2.06E-05	132.8199	108.5261	241.3353	181.6208
26000	2.98475	1.41E-04	124.8902	102.3826	227.258	171.0119
30000	3.09975	2.87E-05	123.94	101.5727	225.4969	169.6891
32000	3.637	2.69E-04	124.3585	100.2345	224.5725	169.0925
34000	3.78925	7.61E-05	126.0485	100.537	226.5636	170.6572
38000	4.08525	7.40E-05	131.15	101.7331	232.8582	175.5912
48000	4.13475	4.95E-06	132.2062	101.9858	234.1667	176.619
60000	5.58175	1.21E-04	169.136	103.8512	272.9448	208.6435
62000	9.044	1.73E-03	439.1298	248.2562	687.3888	528.7899
63000	9.64925	6.05E-04	419.8138	228.1679	647.9869	500.1565

Tabella 3.14: provino S08_16

Con i valori così calcolati si possono costruire quindi le curve di Paris:

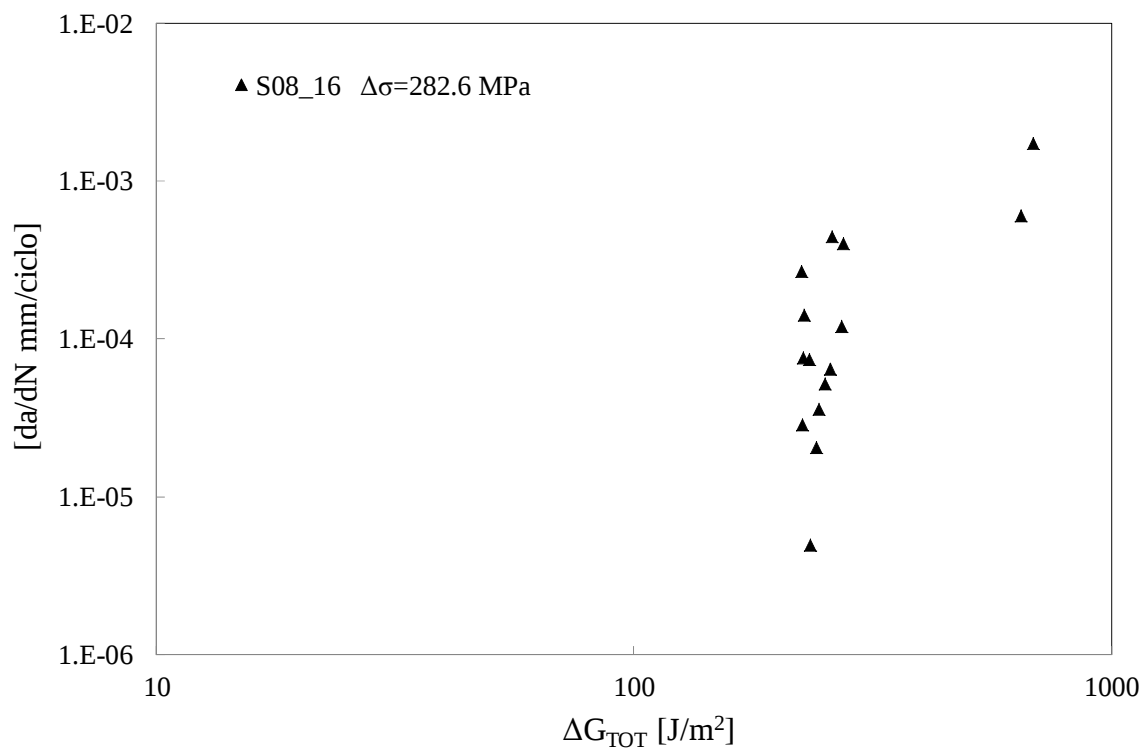


Figura 3.61: curva di Paris in ΔG_{TOT} per il provino S08_16

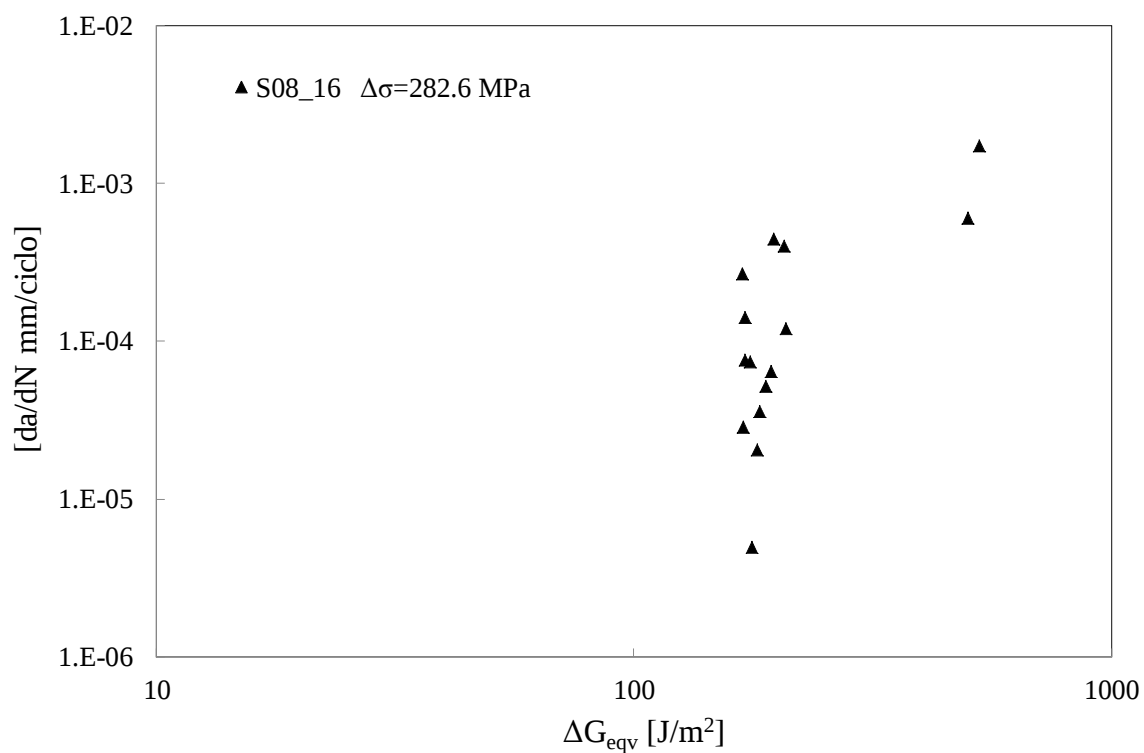
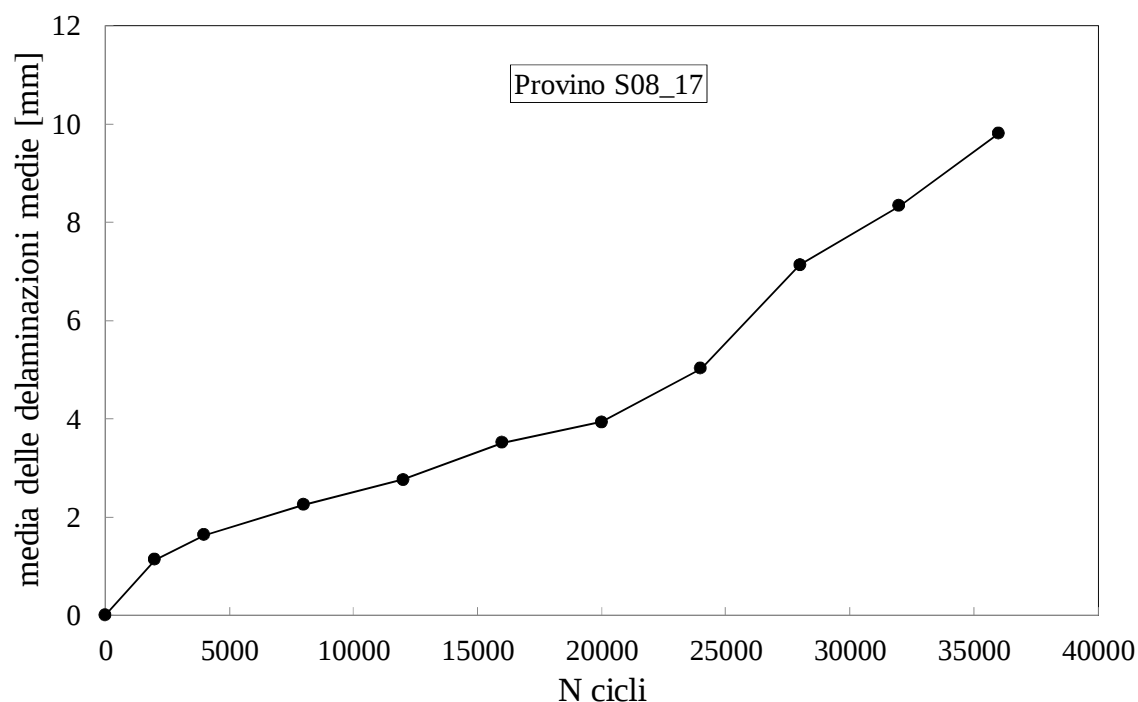


Figura 3.62: curva di Paris in ΔG_{eqv} per il provino S08_16

➤ **Provino S08_17 $\Delta\sigma=282.6$ MPa (alto carico):**Figura 3.63: propagazione sperimentale della media delle delaminazioni medie ($\Delta\sigma=282.6$ MPa, basso carico)

N. CICLI	media 1-9; 8-16	da/dN	ΔG_I	ΔG_{II}	ΔG_{TOT}	ΔG_{eqv}
0	0		0	0	0	0
2000	1.14075	5.70E-04	144.6552	123.9832	268.6348	201.8765
4000	1.637	2.48E-04	142.889	118.8582	261.7412	196.8619
8000	2.2515	1.54E-04	135.5614	110.8009	246.3527	185.3938
12000	2.7605	1.27E-04	127.5464	104.4458	231.979	174.5691
16000	3.5215	1.90E-04	123.54	100.189	223.7096	168.4061
20000	3.939	1.04E-04	128.3511	101.0606	229.3883	172.8704
24000	5.0255	2.72E-04	155.5907	105.4573	261.0127	198.193
28000	7.13325	5.27E-04	330.6117	168.8313	499.3779	387.6834
32000	8.3375	3.01E-04	480.0925	315.1652	795.2581	604.9943
36000	9.80175	3.66E-04	416.2482	225.4753	641.729	495.4709

Tabella 3.15: provino S08_17

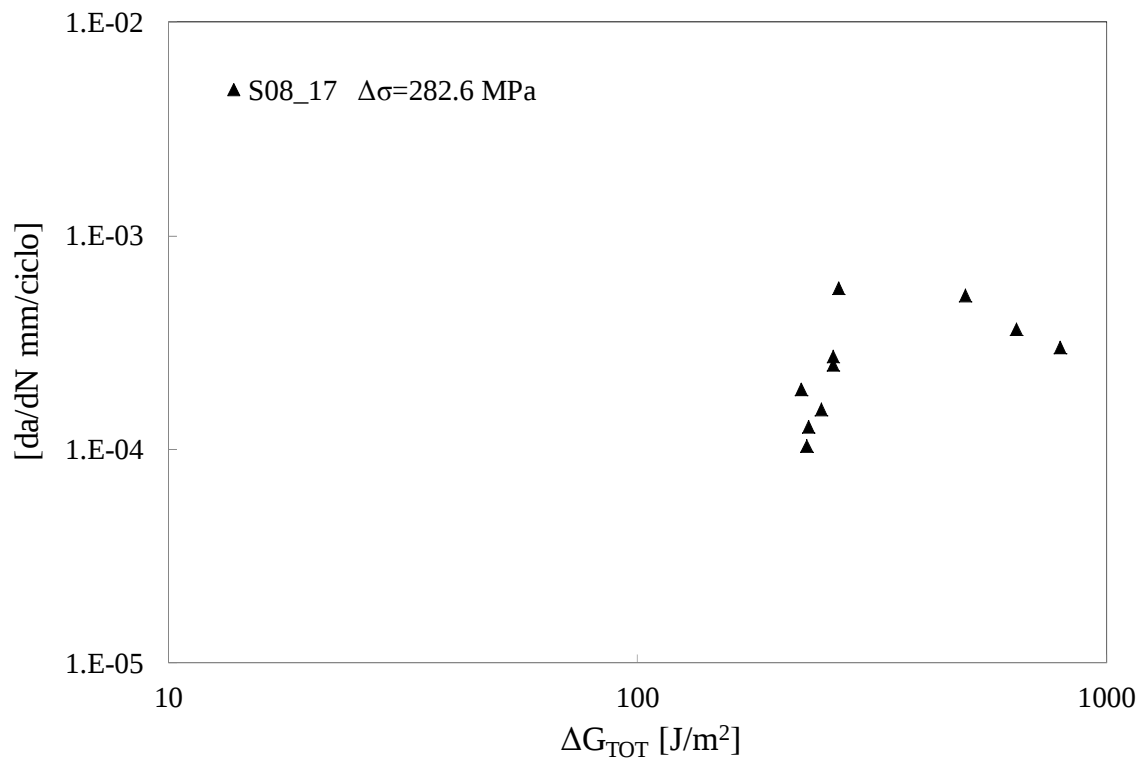


Figura 3.64: curva di Paris in ΔG_{TOT} per il provino S08_17

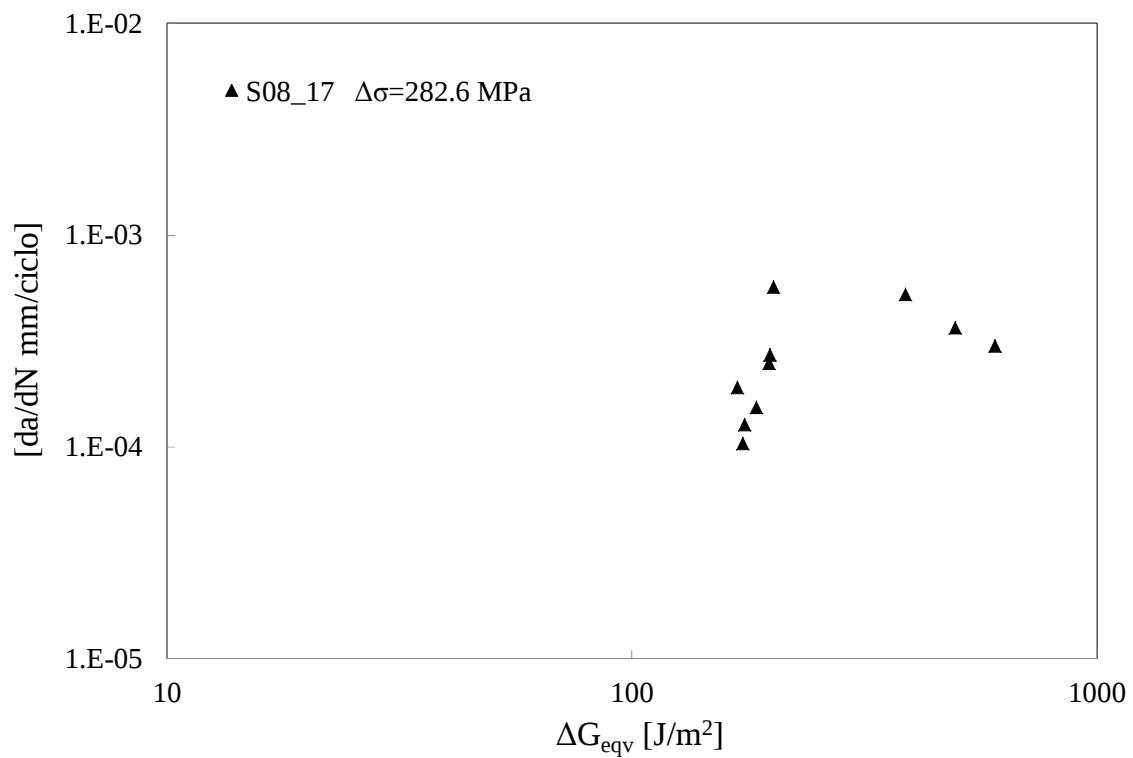


Figura 3.65: curva di Paris in ΔG_{eqv} per il provino S08_17

Riunendo in un unico grafico i risultati relativi ai giunti con overlap pari a 8 mm si ottiene:

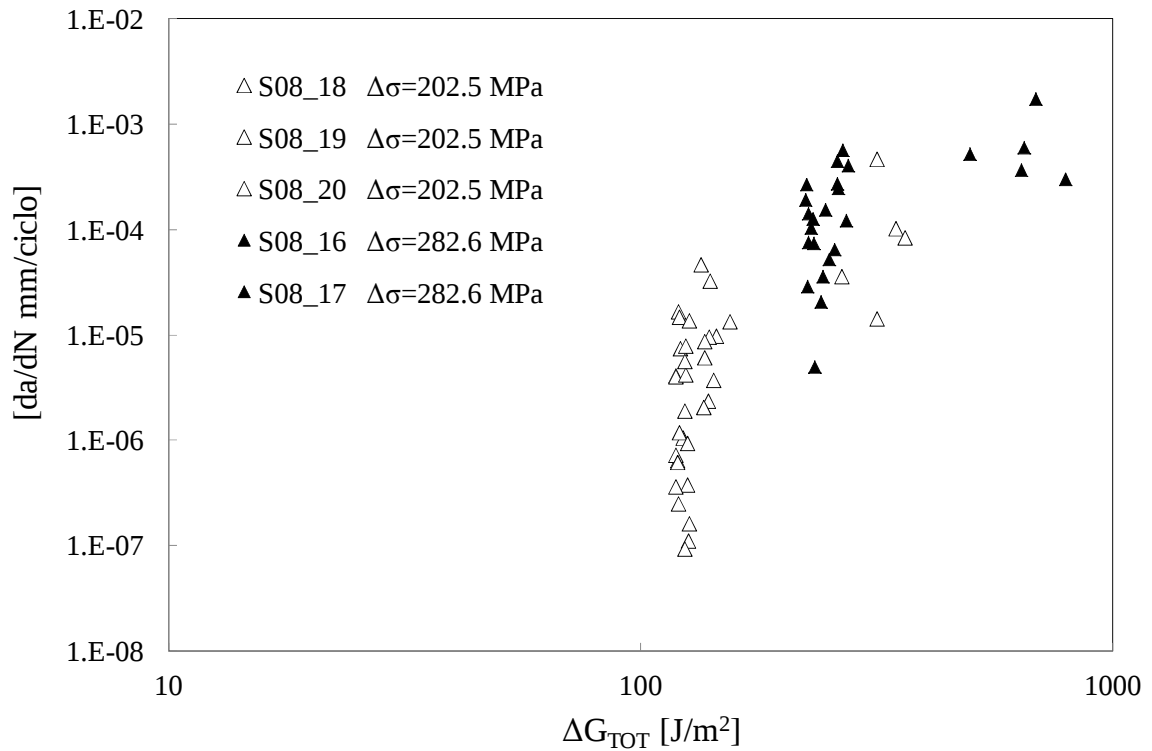


Figura 3.66: curva di Paris riassuntiva in ΔG_{TOT} per i giunti S08

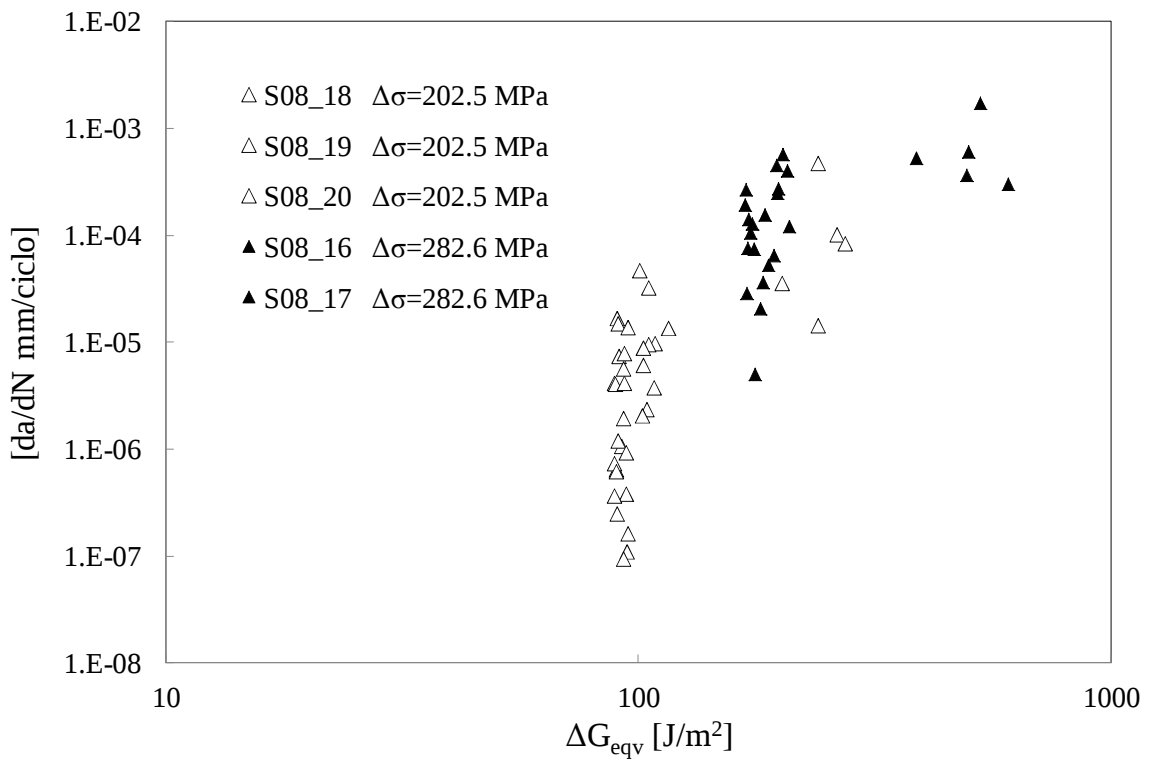


Figura 3.67: curva di Paris riassuntiva in ΔG_{eqv} per i giunti S08

Si può a questo punto costruire la curva di Paris completa di tutti i provini analizzati:

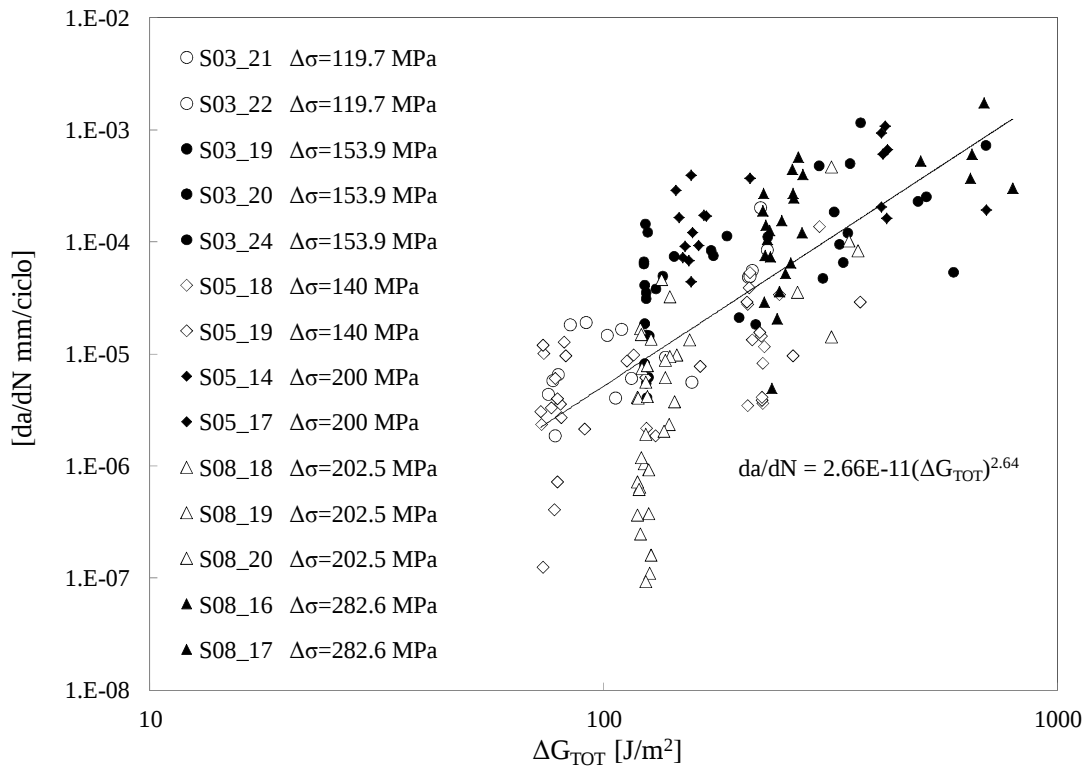


Figura 3.68: curva di Paris riassuntiva in ΔG_{TOT}

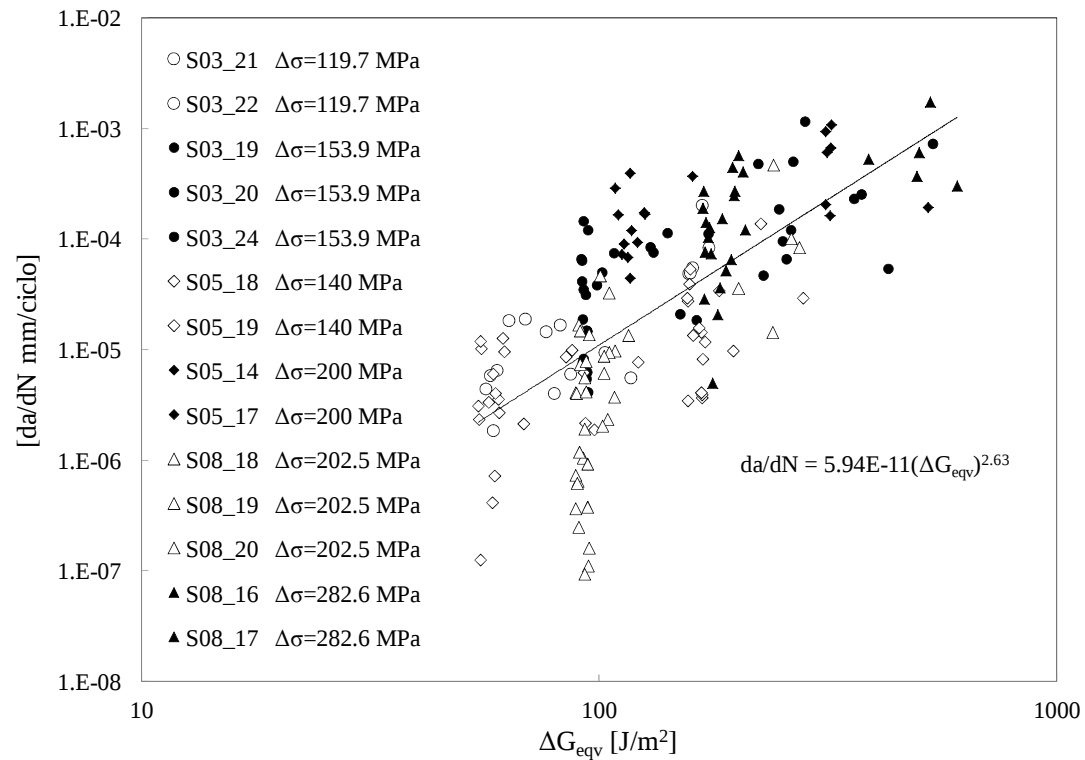


Figura 3.69: curva di Paris riassuntiva in ΔG_{eqv}

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. Una distinzione simile si può notare anche per quanto riguarda la lunghezza di sovrapposizione; infatti nel passaggio di *overlap* da 3 a 8 mm i punti si muovono da sinistra a destra. Questo è ovviamente 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*.

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.

3.3 ANALISI DELL'AREA DI DANNEGGIAMENTO

Giunti a questo punto si sono prese in considerazione anche le analisi ultrasoniche effettuate da Polloni Simone e riportate in ([6] Polloni Simone, 2003-2004) sui provini S03_24, S05_14, S05_19, S08_20, due dei quali sottoposti a basso carico e due ad alto. Per questi provini è stata analizzata l'area di danneggiamento interna della zona di giunzione durante tutta la vita del giunto con l'intento di fornire una migliore descrizione del fenomeno che porta a cedimento.

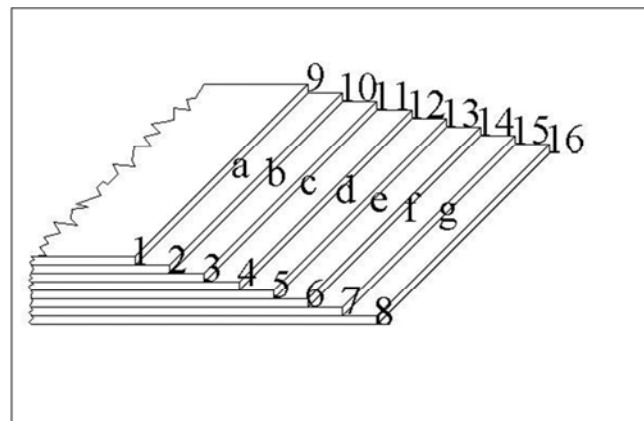


Figura 3.70: numerazione della zona di giunzione

Si considererà in questa sezione il danneggiamento nelle aree della zona di giunzione denominate con le lettere “a-b-c-d-e-f-g”.

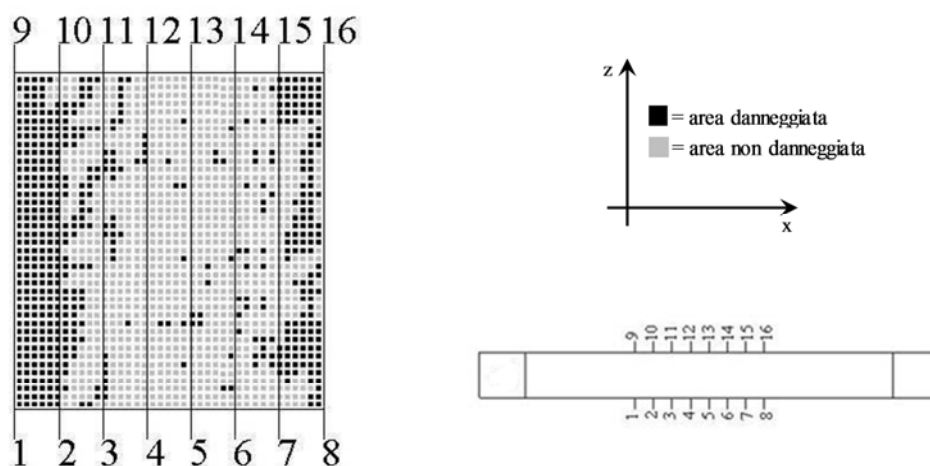


Figura 3.71: tipica immagine ultrasonica dell'area di danneggiamento

Le zone scure indicano le zone delaminate.

In questo lavoro l'analisi dell'area di danneggiamento ha come scopo quello di ridurre l'elevata dispersione dei risultati ottenuti mediante la media delle delaminazioni medie, inoltre tale descrizione del fenomeno della propagazione è probabilmente più attendibile rispetto alle misurazioni al microscopio delle cricche ai bordi del provino. Una possibile modalità di calcolo dell'area danneggiata è quella di considerare un fronte lineare di delaminazione e da questo definire un parametro monodimensionale in grado di descrivere e quantificare in modo affidabile il danneggiamento della giunzione per correlarlo poi con le componenti del SERR calcolate tramite le analisi agli elementi finiti (capitolo 2):

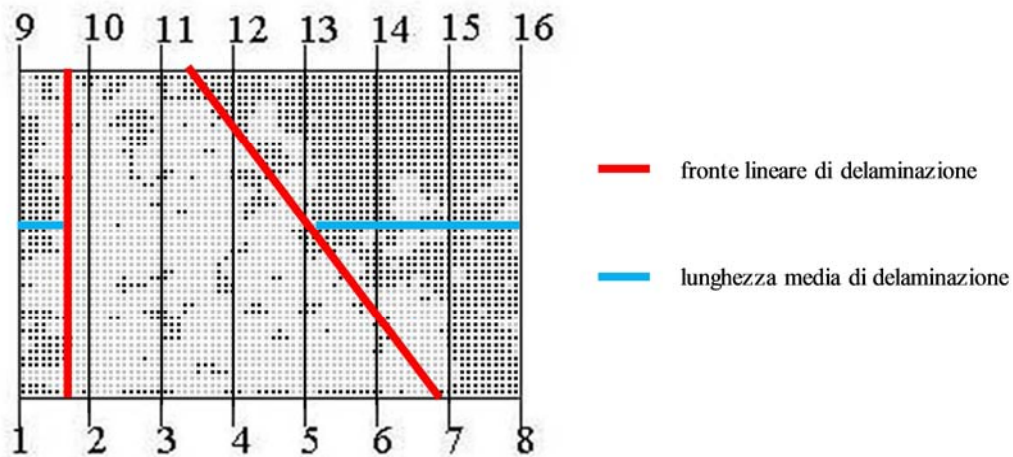


Figura 3.72: fronte lineare di delaminazione e lunghezza media di delaminazione

Per definire un parametro monodimensionale confrontabile anche con la media delle delaminazioni medie è stata calcolata la media delle aree medie di danneggiamento propagate dai punti 1-9 e dai punti 8-16 ed è stata divisa per la larghezza del provino esaminato formalizzando così il secondo approccio utilizzato per l'analisi delle propagazioni.

➤ **Provino S08_20 $\Delta\sigma=202.5$ MPa (basso carico):**

I dati più interessanti relativi a quest'indagine riportati in ([6] Polloni Simone, 2003-2004) sono per il provino S08_20. Come discusso in precedenza, se si considera la media delle delaminazioni medie i provini con *overlap* 8 mm soggetti a basso carico esibiscono durante la vita a fatica una fase in cui la propagazione delle cricche rallenta fino quasi ad arrestarsi.

Se invece si considerano gli andamenti medi del danneggiamento delle aree si vede come questi non presentano alcun intervallo temporale in cui l'area di delaminazione non sia avanzata:

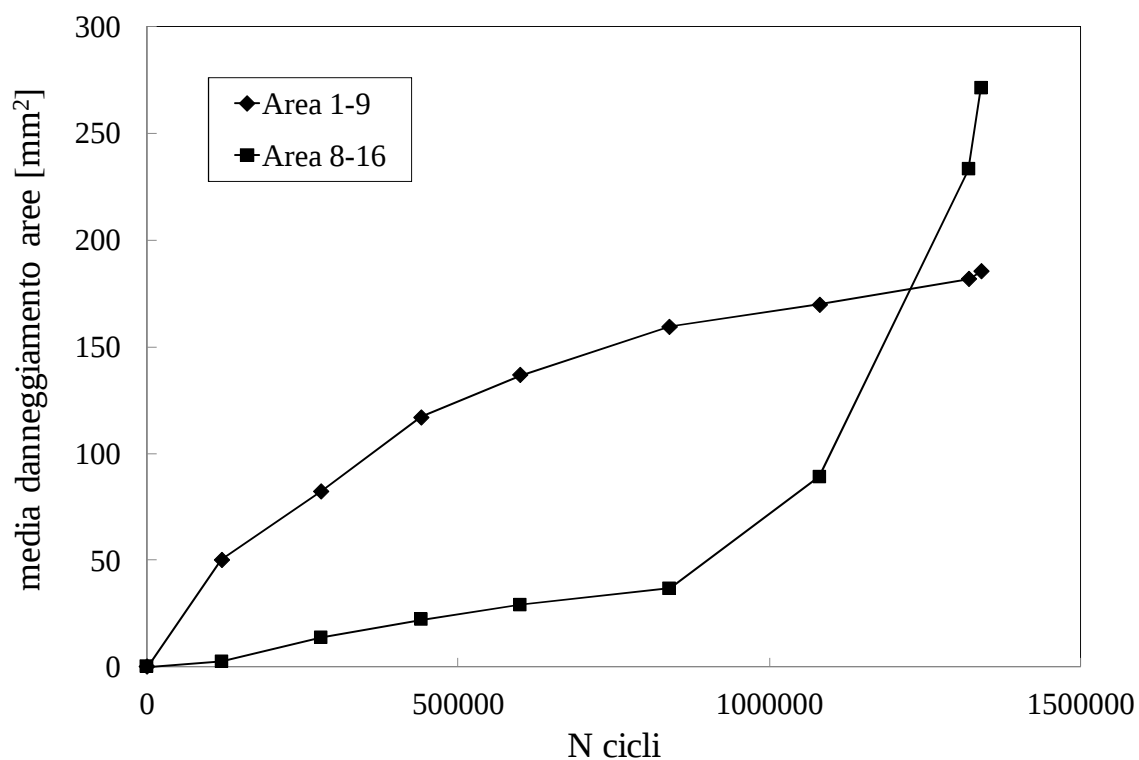


Figura 3.73: media danneggiamento aree 1-9, 8-16

Si calcola quindi la media delle aree medie di danneggiamento e la si divide per la larghezza del provino che per l'S08_20 è pari a 23,22 mm, ottenendo così una lunghezza di cricca con la quale si possono estrapolare i valori delle componenti del SERR come fatto in precedenza per la media delle delaminazioni medie.

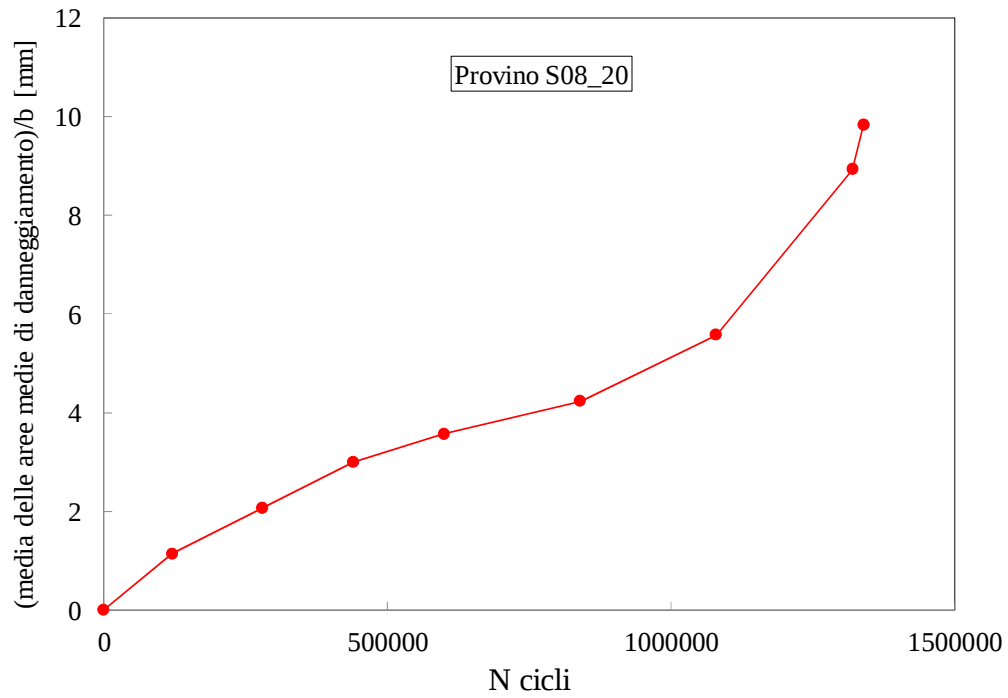


Figura 3.74: andamento della media delle aree medie di danneggiamento al variare del numero di cicli, $w=8$ mm, $\Delta\sigma=202.5$ MPa (basso carico)

Confrontando questo “nuovo” andamento con il precedente:

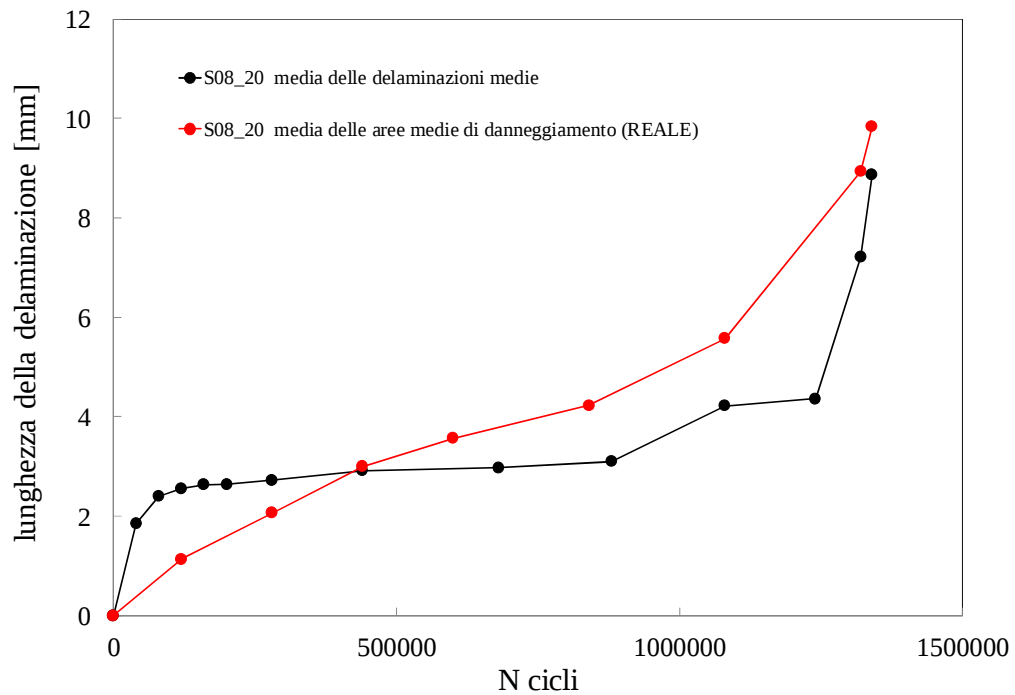


Figura 3.75: confronto tra la media delle aree medie di danneggiamento con la media delle delaminazioni medie (rielaborata) per il provino S08_20

Il confronto evidenzia molto bene come nei frangenti in cui le misurazioni al microscopio delle delaminazioni effettuate ai bordi del provino, con le quali si calcola la media delle delaminazioni medie, riportino avanzamenti nulli di cricca mentre la media delle aree medie di danneggiamento presenta andamento sempre crescente. In sostanza quando apparentemente sembra che la cricca stia ferma, se osservata dall'esterno, in realtà lungo la larghezza del provino il fronte di delaminazione sta avanzando. Questo sembrerebbe decretare l'inettitudine della media delle delaminazioni medie a descrivere la dinamica ed evoluzione del danneggiamento di questo tipo di giunti. Le analisi ultrasoniche sembrano quindi essere quelle più idonee al fine di valutare un parametro in grado di descrivere l'evoluzione e l'avanzare della cricca. D'altro canto il limite di questo metodo è il tempo richiesto per tali analisi; si parla infatti di parecchie ore contro il molto meno tempo richiesto dalle analisi al microscopio, aspetto che non va comunque sottovalutato e che impedisce perciò di scartare l'utilizzo della media delle delaminazioni medie. È doveroso osservare che la maggior differenza tra i due approcci si registra principalmente nel caso appena esposto dei provini S08 mentre, come verrà riportato successivamente, per le altre lunghezze di sovrapposizione l'accordo tra i due approcci migliora.

Ritornando dunque alla curva della propagazione ottenuta (Figura 3.74) il procedimento successivo è del tutto analogo a quanto fatto nel paragrafo precedente.

Si riassumono i valori calcolati nella seguente tabella:

N. CICLI	Media aree (REALE)	da/dN	ΔG_I	ΔG_{II}	ΔG_{TOT}	ΔG_{eqv}
0	0		0	0	0	0
120000	1.139018	9.49E-06	69.41074	72.28498	141.7039	106.2864
280000	2.068217	5.81E-06	64.95906	66.50141	131.4756	98.59988
440000	2.997416	5.81E-06	61.33722	58.92617	120.2845	90.20962
600000	3.566925	3.56E-06	61.47517	57.2811	118.7805	89.10423
840000	4.226357	2.75E-06	64.74393	59.27226	124.0441	93.0725
1080000	5.575194	5.62E-06	78.72982	61.8769	140.6466	105.96
1320000	8.9323	1.40E-05	204.638	157.45	362.0869	273.1034
1340000	9.831525	4.50E-05	197.4386	147.53	344.9592	260.5317

Tabella 3.16: provino S08_20

Si possono ora confrontare le due curve di Paris relative al provino S08_20 calcolate tramite la media delle delaminazioni medie e la media delle aree medie di danneggiamento:

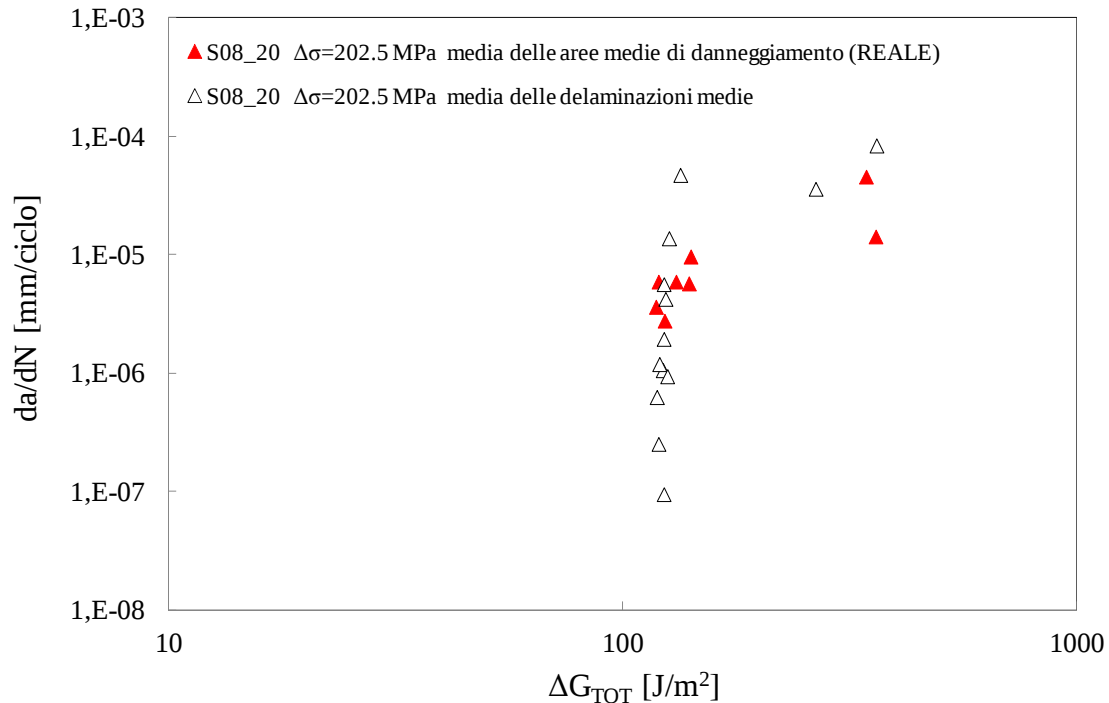


Figura 3.78: confronto tra le curve di Paris per il provino S08_20 in ΔG_{TOT}

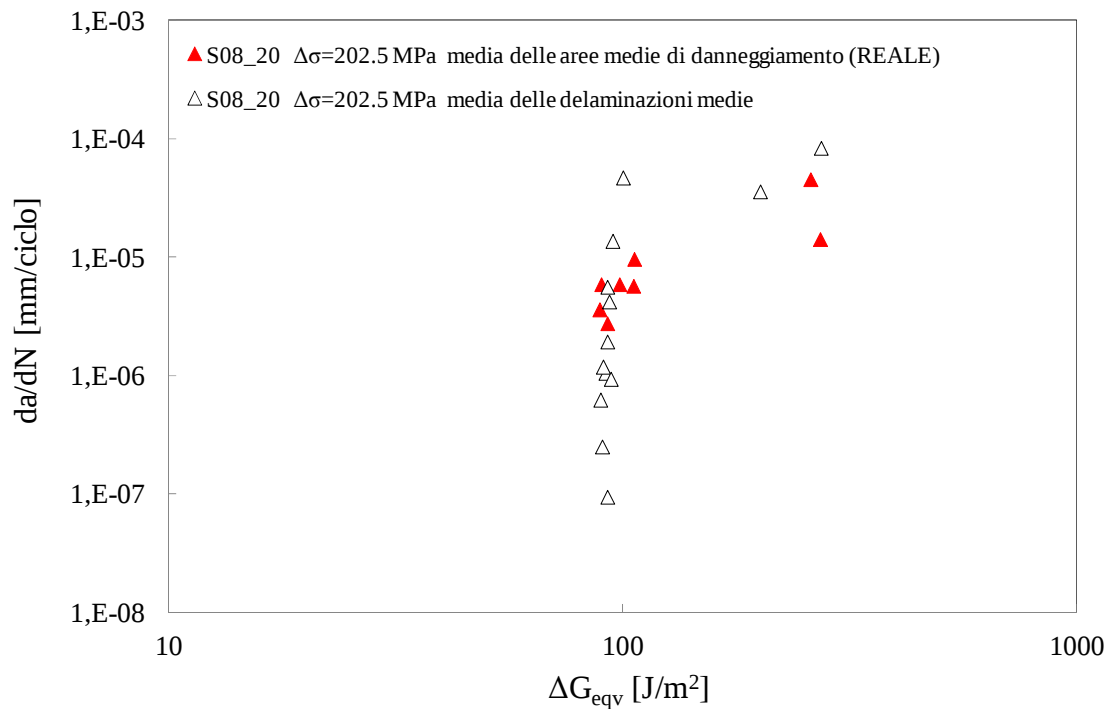


Figura 3.79: confronto tra le curve di Paris per il provino S08_20 in ΔG_{eqv}

Dai precedenti grafici si vede facilmente come la dispersione dei risultati sia notevolmente diminuita, inoltre quel trend verticale dovuto ad intervalli temporali con propagazioni quasi nulle di cricca (osservata dai bordi) è praticamente scomparso essendo ora l'andamento della media delle aree medie di danneggiamento sempre crescente e privo di rilevazioni a valori di cricca costanti.

➤ **Provino S05_19 $\Delta\sigma=140$ MPa (basso carico):**

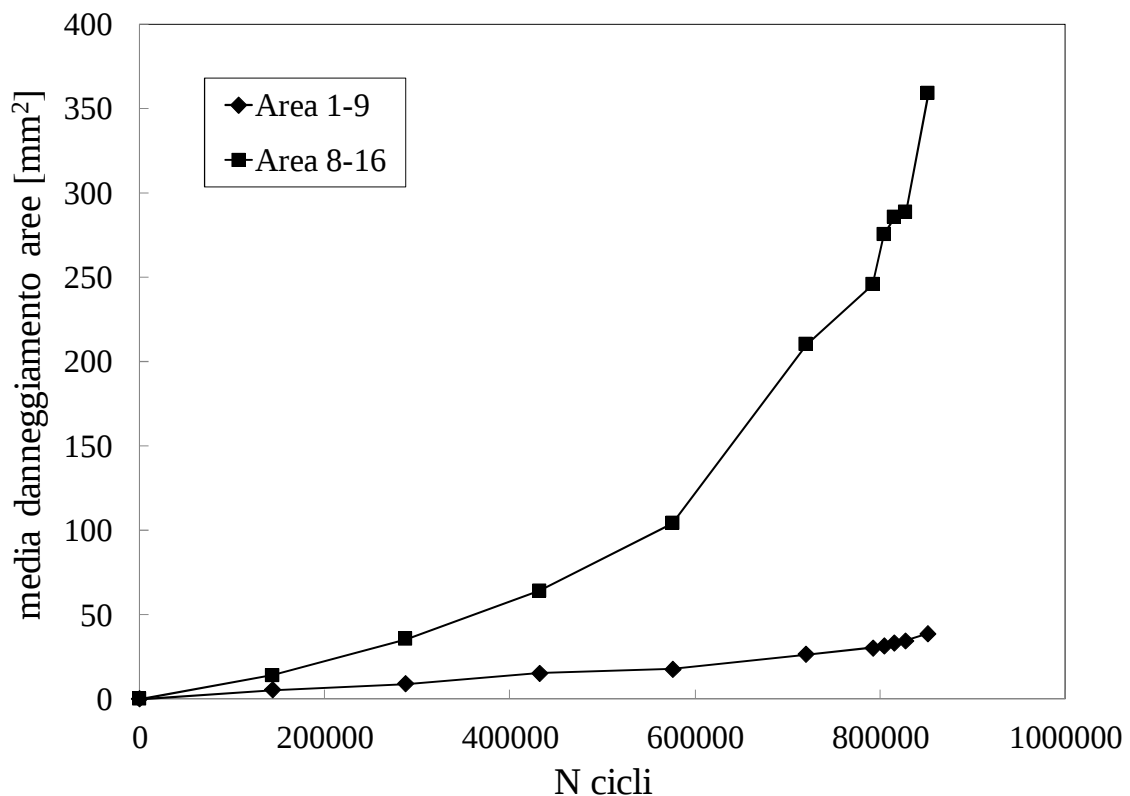


Figura 3.80: media danneggiamento aree 1-9, 8-16

Si calcola quindi la media delle aree medie di danneggiamento e la si divide per la larghezza del provino che per l'S05_19 è pari a 23,74 mm ottenendo così una lunghezza di cricca con la quale si possono estrapolare i valori delle componenti del SERR come fatto in precedenza per la media delle delaminazioni medie.

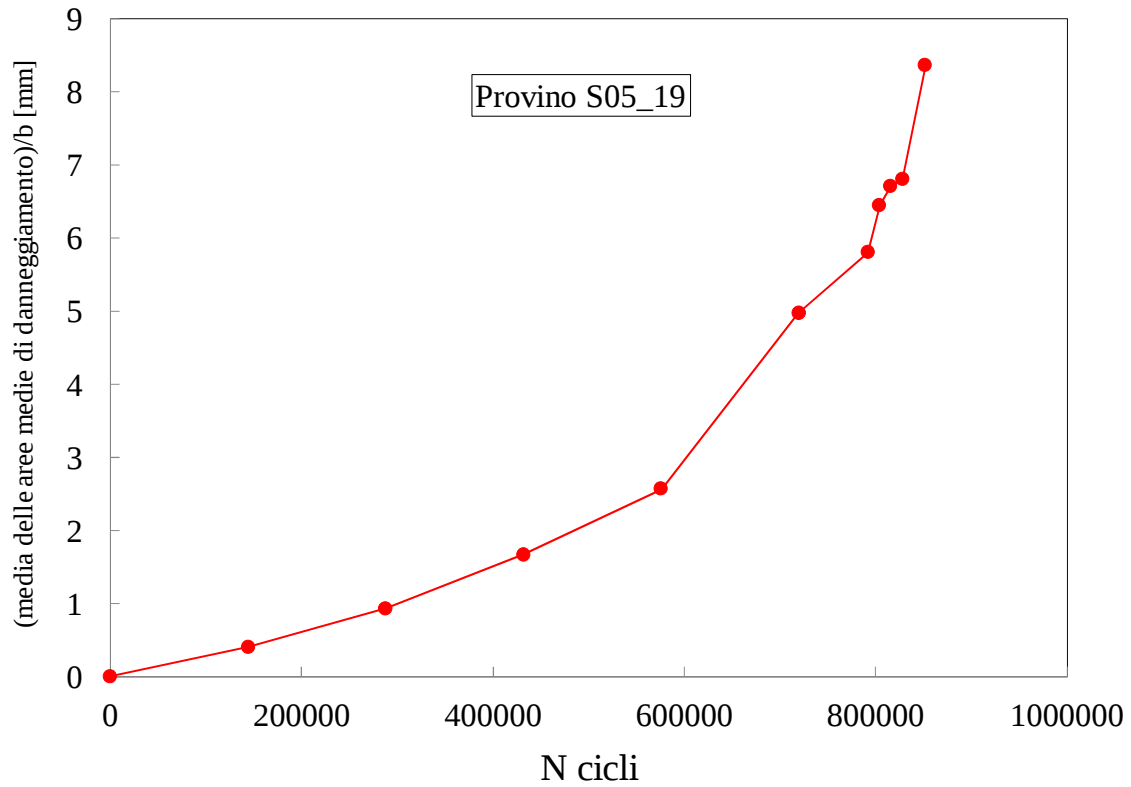


Figura 3.81: andamento della media delle aree medie di danneggiamento al variare del numero di cicli, $w=5$ mm, $\Delta\sigma=140$ MPa (basso carico)

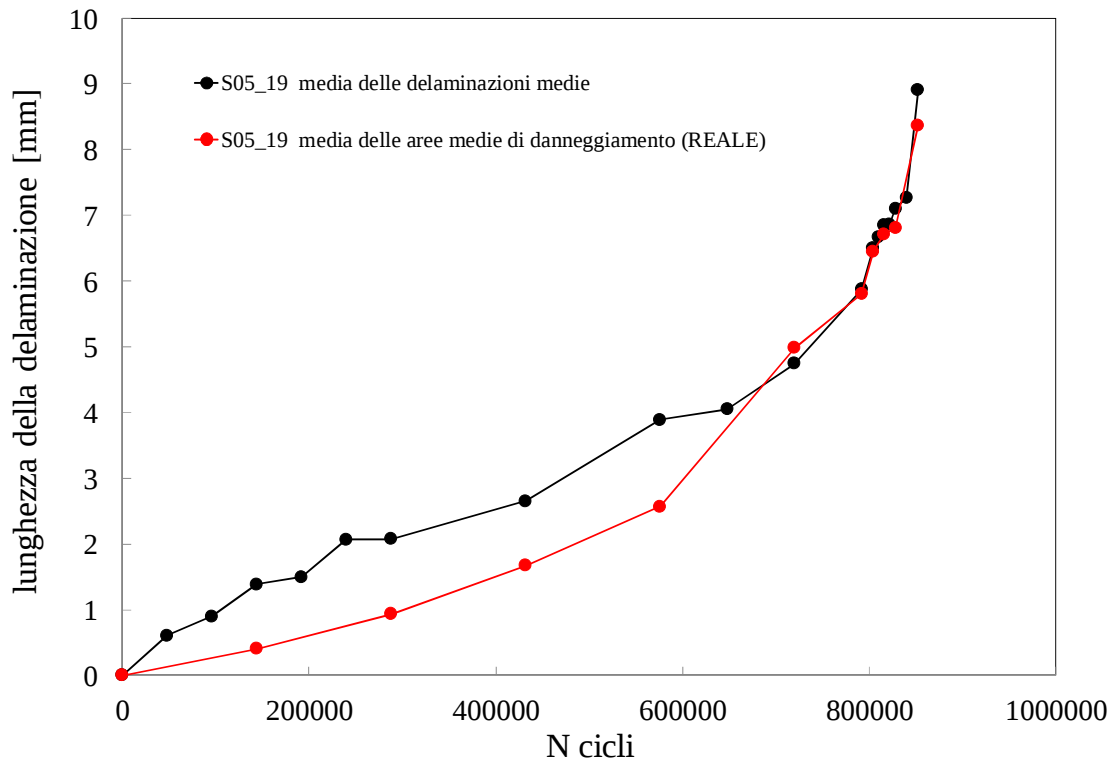


Figura 3.82: confronto tra la media delle aree medie di danneggiamento con la media delle delaminazioni medie per il provino S05_19

Si può osservare ora dal grafico in Figura 3.82, come menzionato in precedenza, che l'accordo tra i due approcci è sicuramente migliore per l'*overlap* 5 mm rispetto agli S08.

Riassumendo quindi i calcoli in tabella:

N. CICLI	Media aree (REALE)	da/dN	ΔG_I	ΔG_{II}	ΔG_{TOT}	ΔG_{eqv}
0	0		0	0	0	0
144000	0.405276	2.81E-06	36.30508	39.28131	75.58599	56.71909
288000	0.937508	3.70E-06	37.70651	35.6397	73.3511	55.02422
432000	1.67177	5.10E-06	45.50406	38.59373	84.168	63.2153
576000	2.566595	6.21E-06	55.05738	41.89325	97.15912	73.15984
720000	4.97957	1.68E-05	77.13784	65.94212	143.6659	107.529
792000	5.806122	1.15E-05	119.4922	101.6092	221.1019	166.1876
804000	6.450505	5.37E-05	117.0882	93.44579	210.5412	158.5643
816000	6.714195	2.20E-05	115.8805	91.57112	207.4634	156.3008
828000	6.803917	7.48E-06	115.8613	91.24728	207.1221	156.0628
852000	8.370682	6.53E-05	150.4639	103.6003	254.1156	192.7092

Tabella 3.17: provino S05_19

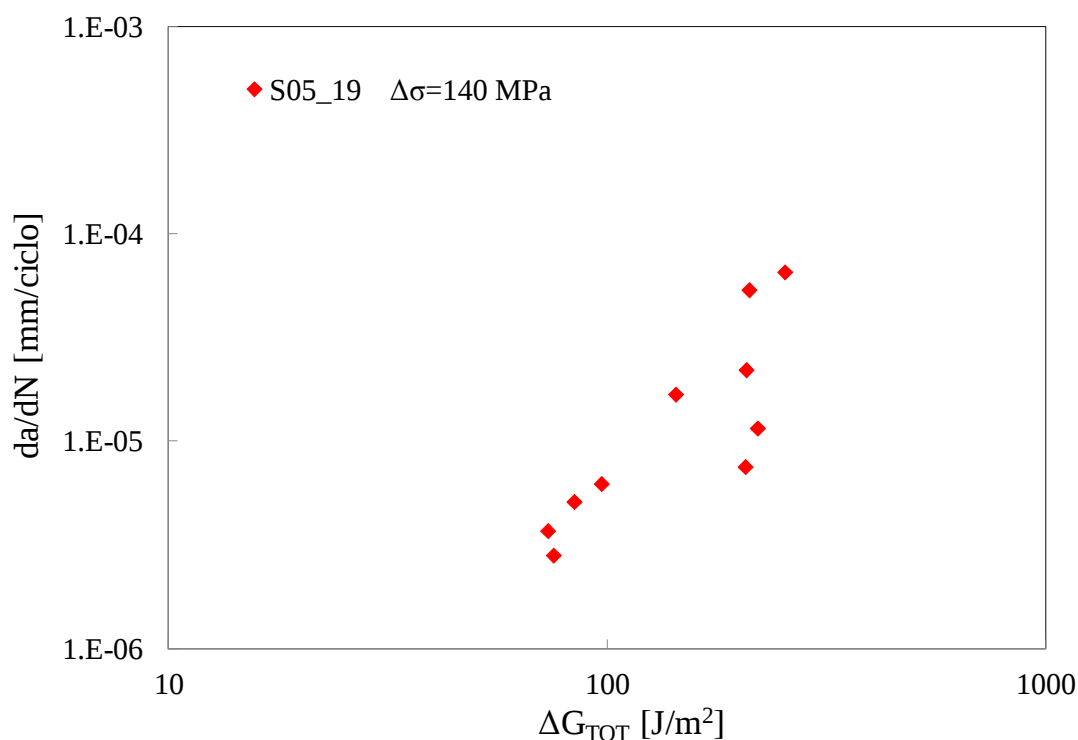


Figura 3.83: curva di Paris in ΔG_{TOT} per il provino S05_19

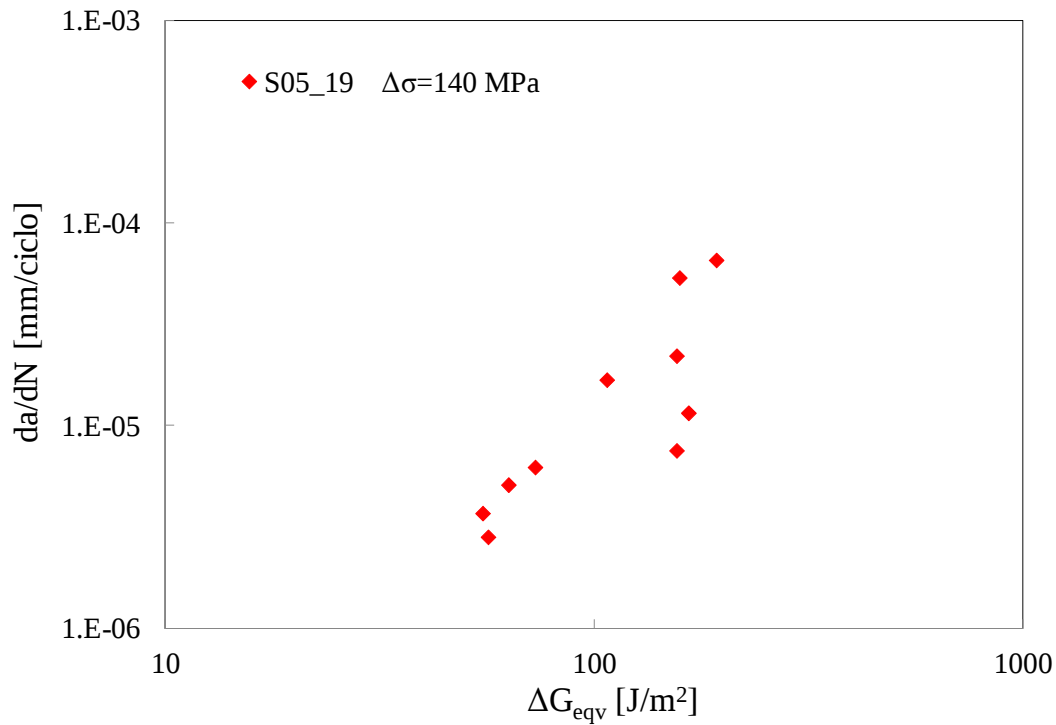


Figura 3.84: curva di Paris in ΔG_{eqv} per il provino S05_19

Si confrontano quindi le due curve di Paris relative al provino S05_19 calcolate tramite la media delle delaminazioni medie e la media delle aree medie di danneggiamento:

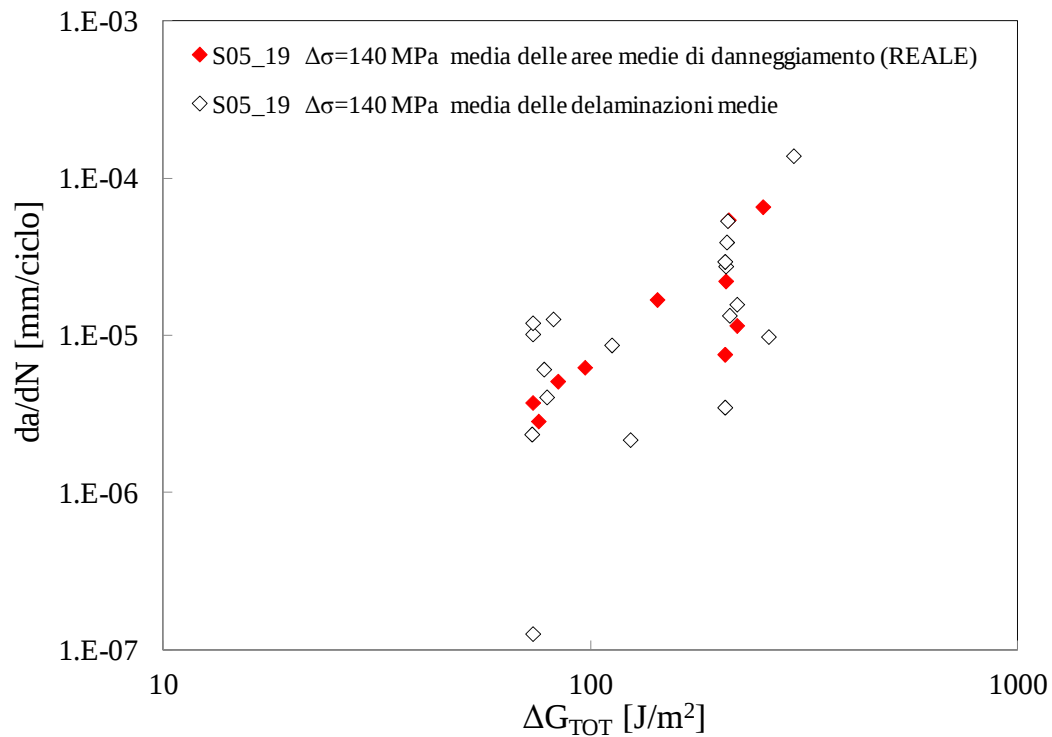


Figura 3.85: confronto tra le curve di Paris per il provino S05_19 in ΔG_{TOT}

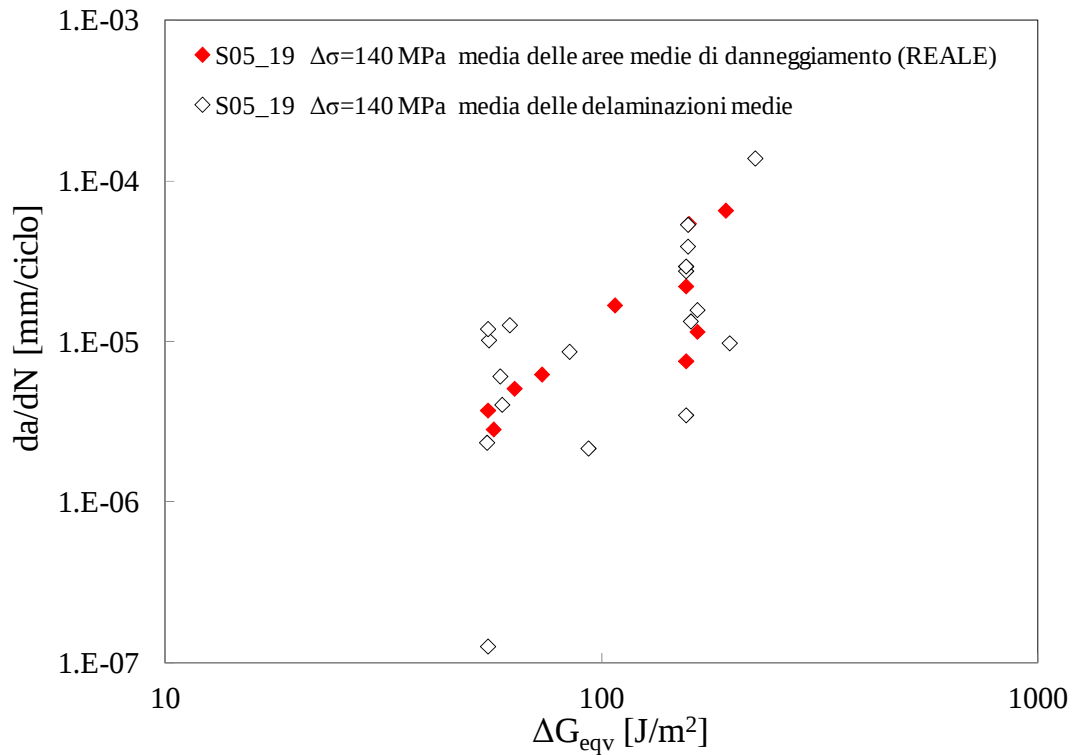


Figura 3.86: confronto tra le curve di Paris per il provino S05_19 in ΔG_{eqv}

➤ **Provino S05_14 $\Delta\sigma=200$ MPa, Provino S03_24 $\Delta\sigma=200$ MPa (alto carico) :**

Questi due provini vengono discussi assieme ed in maniera abbreviata in quanto i dati a nostra disposizione, cioè le misurazioni effettuate, sono poche e quindi la curva di Paris risulta essere troppo scarna per caratterizzare la vita a fatica di tali giunti. Il motivo principale di questa scarsità di misurazioni è dovuto senz'altro alla quantità di tempo richiesta per queste analisi e non bisogna dimenticare inoltre che tali giunti sono soggetti ad alto carico ed appunto per questo motivo la loro durata in termini di vita a fatica è senza dubbio inferiore. Questi due aspetti combinati possono giustificare la carenza di rilevazioni ultrasoniche. Tuttavia, come già detto in precedenza, gli andamenti della media delle aree medie di danneggiamento per quanto riguarda i provini con *overlap* 5 e 8 mm sono approssimabili con esiti più che buoni dall'andamento della media delle delaminazioni medie.

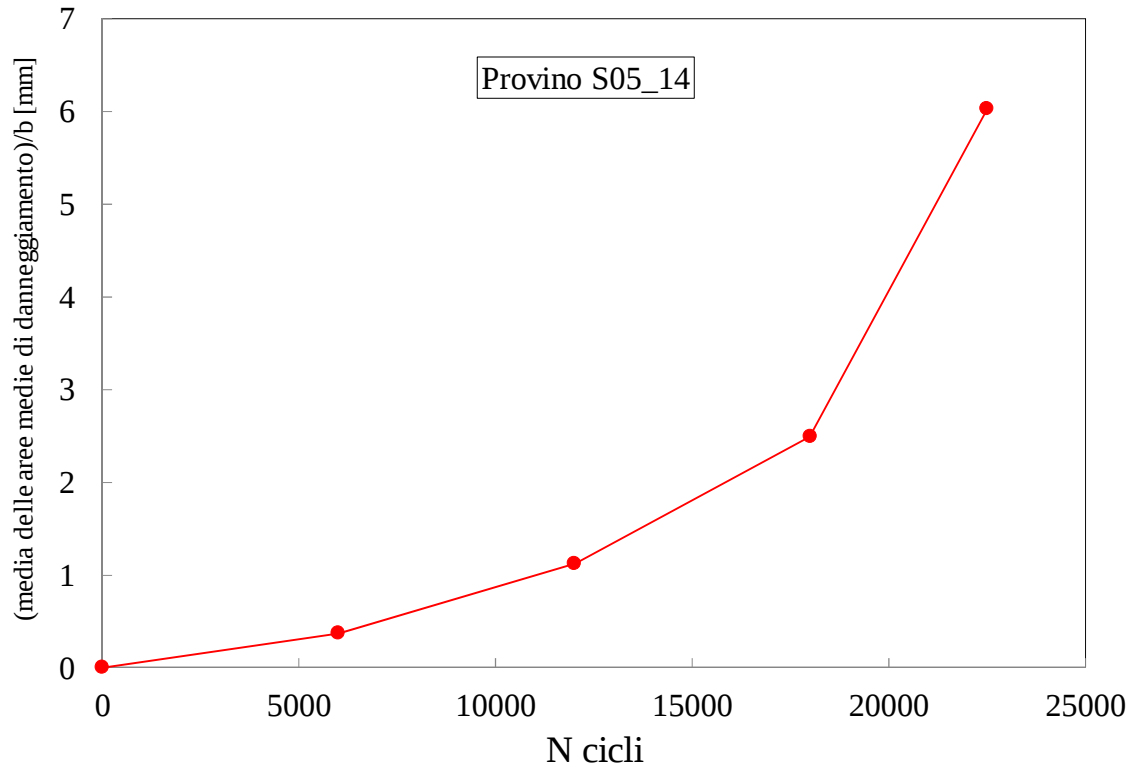


Figura 3.87: andamento della media delle aree medie di danneggiamento al variare del numero di cicli, $w=5$ mm, $\Delta\sigma=200$ MPa (alto carico)

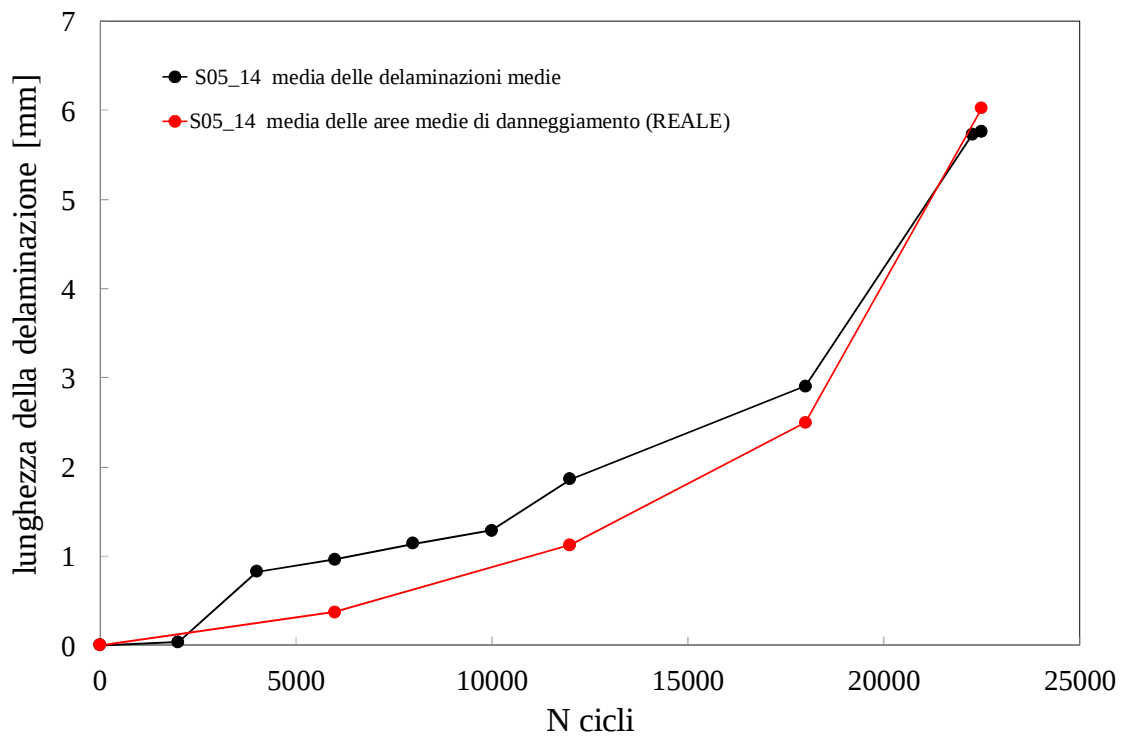


Figura 3.88: confronto tra la media delle aree medie di danneggiamento con la media delle delaminazioni medie per il provino S05_19

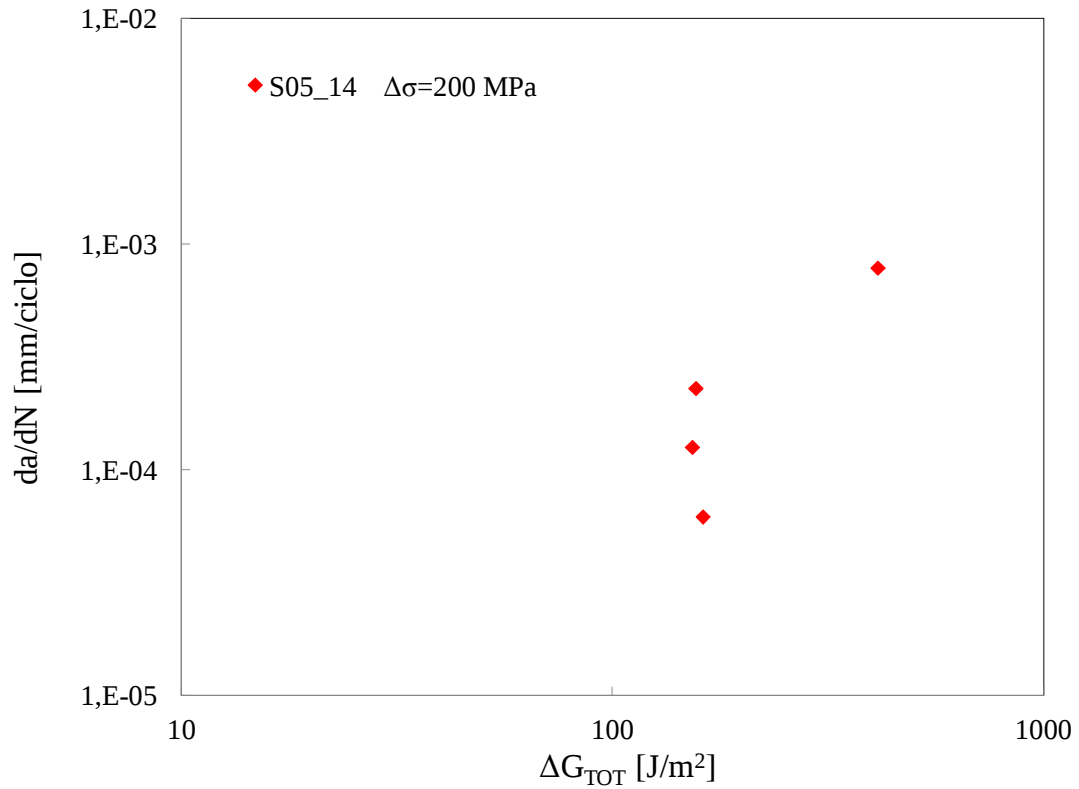


Figura 3.89: curva di Paris in ΔG_{TOT} per il provino S05_14

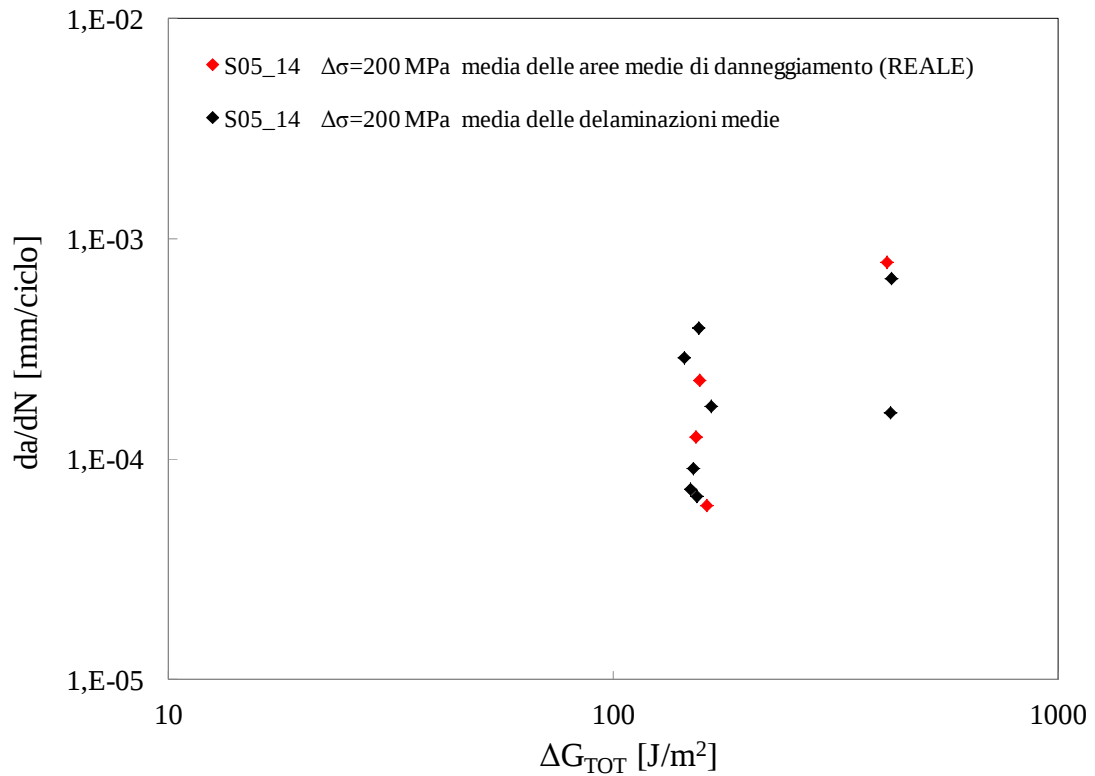


Figura 3.90: confronto tra le curve di Paris per il provino S05_14 in ΔG_{TOT}

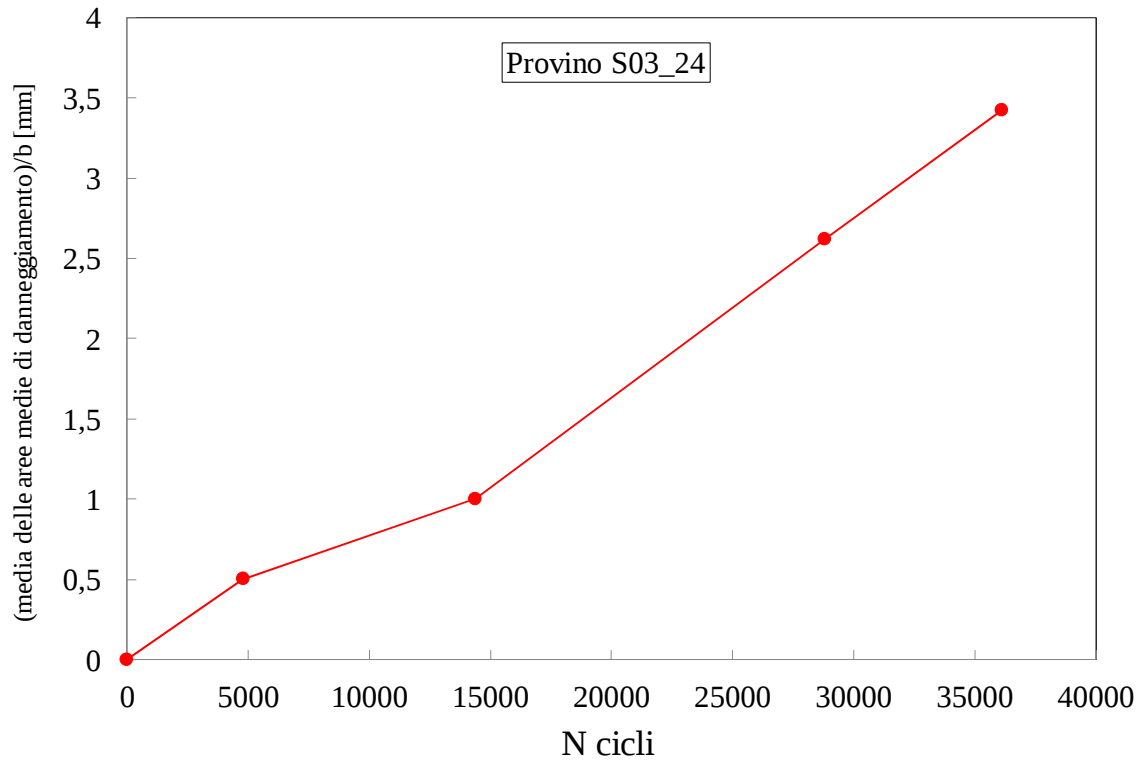


Figura 3.91: andamento della media delle aree medie di danneggiamento al variare del numero di cicli, $w=3$ mm, $\Delta\sigma=153.9$ MPa (alto carico)

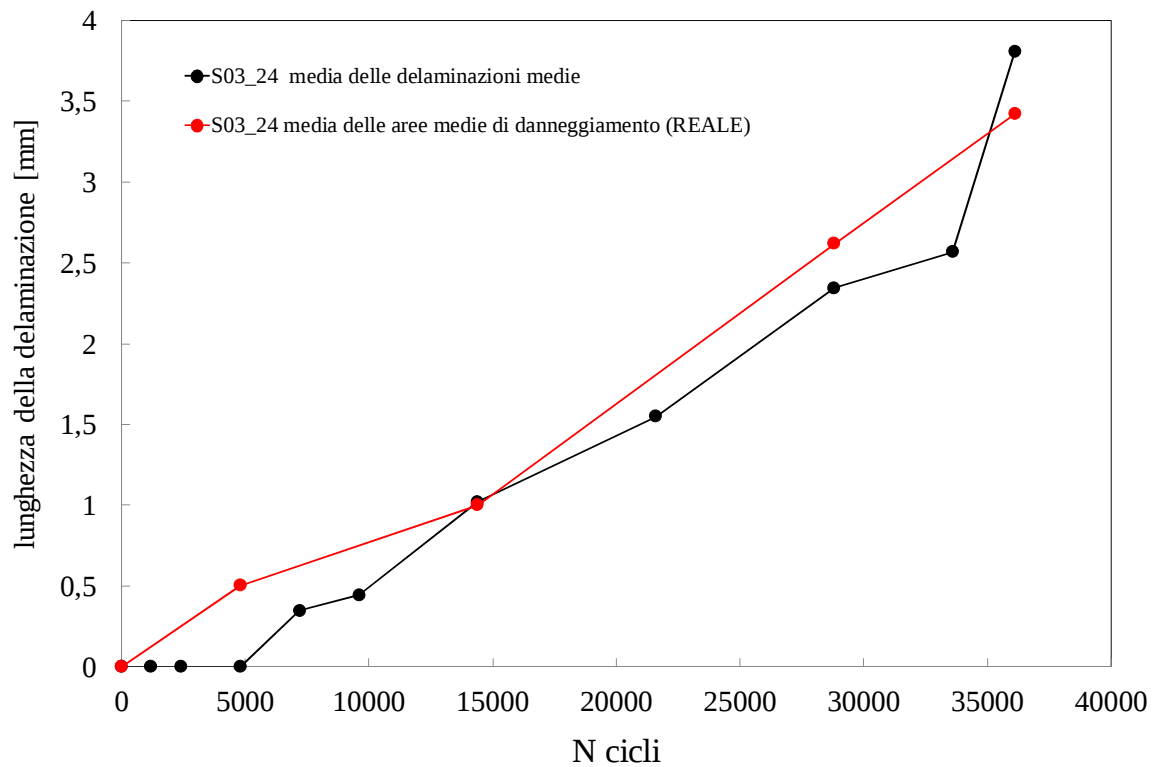


Figura 3.92: confronto tra la media delle aree medie di danneggiamento con la media delle delaminazioni medie per il provino S03_24

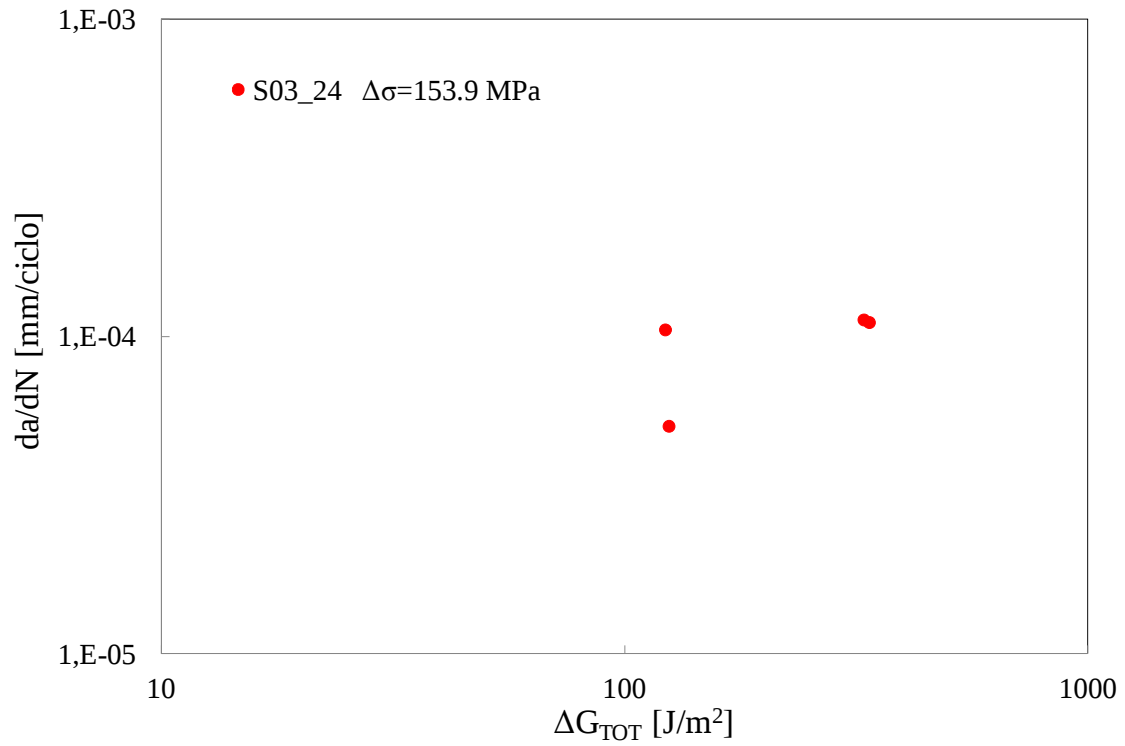


Figura 3.93: curva di Paris in ΔG_{TOT} per il provino S03_24

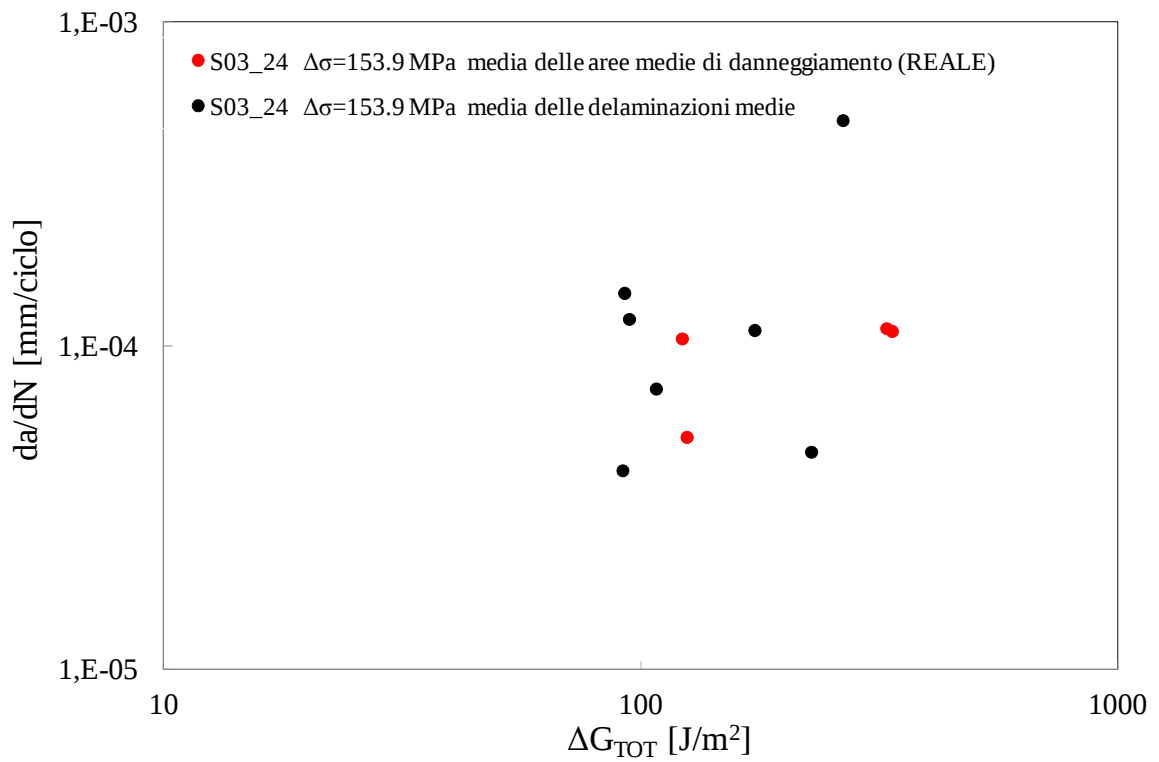


Figura 3.94: confronto tra le curve di Paris per il provino S03_24 in ΔG_{TOT}

Osservando i due grafici riportanti i confronti tra le curve di Paris ottenute con i due diversi approcci si può vedere come i punti relativi alla media delle aree medie di danneggiamento siano ben compresi nella dispersione dei punti relativi alla media delle delaminazioni medie e come siano inoltre inferiori in numero e quindi non descrivono in maniera propriamente completa la vita a fatica del giunto . Queste considerazioni, unite al buon accordo esibito dai grafici delle propagazioni in funzione del numero di cicli (Figura 3.90, Figura 3.92) hanno spinto verso l'accantonamento dei dati ultrasonici relativi a questi ultimi due provini. Ciò non deve però intendersi come inutilità delle analisi dell'area di danneggiamento; infatti queste hanno confermato in buona parte il trend calcolato tramite la media delle delaminazioni medie per le lunghezze di sovrapposizione 3 e 5 mm, mentre per quanto riguarda l'*overlap* 8 mm hanno evidenziato come in realtà all'interno del provino il fronte di delaminazione continui ad aumentare anche quando da osservazioni al microscopio effettuate sui bordi del provino si è riscontrato un arresto della propagazione. La scarsità dei dati sull'area di danneggiamento in nostro possesso ha perciò spinto ad un loro utilizzo mirato per ottenere in ogni caso un risultato finale coerente e non un insieme di risultati vari di comodo.

Di più gran interesse e quindi oggetto delle successive considerazioni è il risultato ottenuto per la lunghezza di sovrapposizione pari a 8 mm. Infatti l'analisi dell'area di danneggiamento ha prodotto una considerevole diminuzione della dispersione dei risultati nella curva di Paris; inoltre ha portato alla scomparsa di quei tratti tendenzialmente verticali conseguenti al non avanzamento delle delaminazioni misurato sui bordi del provin. Tale "inconveniente" si è riscontrato per tutti i provini S08 sottoposti a basso carico. In questi casi dunque la media delle aree medie di danneggiamento sembra descrivere in modo più inerente alla realtà la dinamica del danneggiamento della zona di giunzione. Da qui l'idea di tentare una "trasformazione" degli andamenti della media delle delaminazioni medie relativi agli altri provini S08 soggetti a basso carico tramite una funzione di trasferimento ricavata dai dati dell'analisi dell'area di danneggiamento del giunto S08_20 che è anche l'unico dato in nostro possesso per quanto riguarda quest'*overlap*.

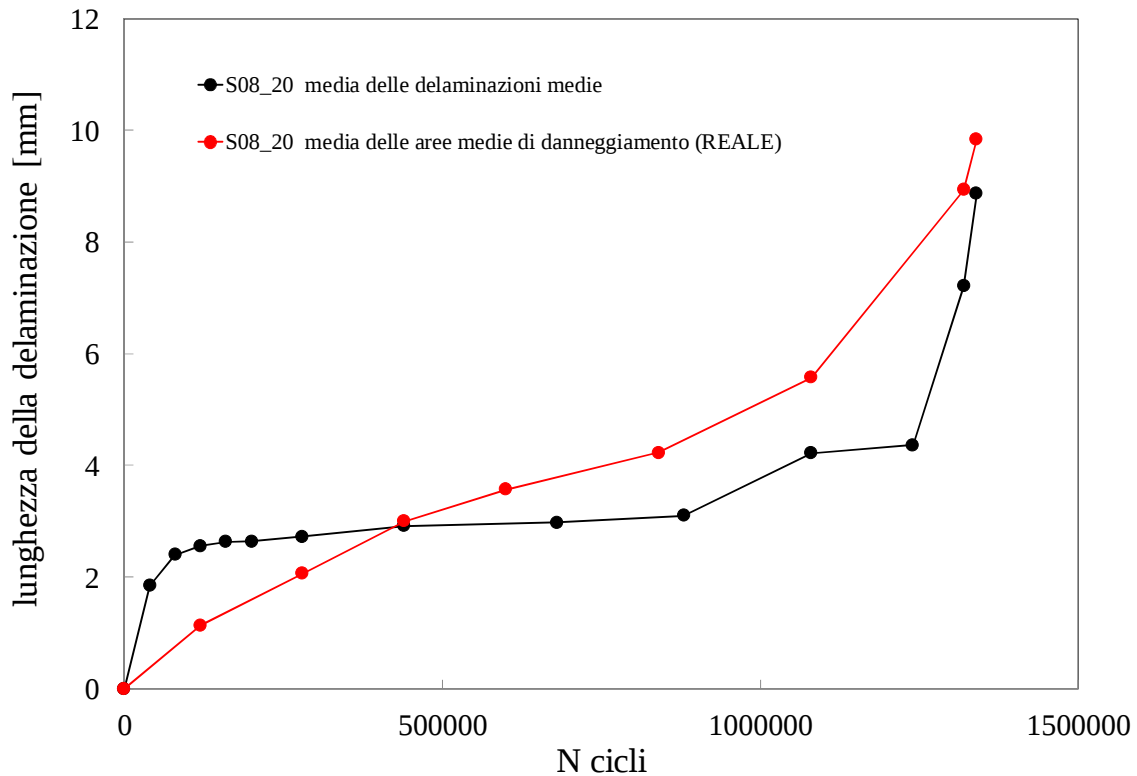


Figura 3.95: confronto tra la media delle aree medie di danneggiamento con la media delle delaminazioni medie (rielaborata) per il provino S08_20

Quello che si sta tentando di ottenere ora è la riduzione di quei tratti pressoché orizzontali ottenuti con la media delle delaminazioni medie per sostituirli con un andamento tendenzialmente crescente come evidenziato dalle rilevazioni ultrasoniche. Si vede come inizialmente la media delle delaminazioni medie sovrastimi il danneggiamento che vi è all'interno della giunzione, mentre nella fase che porta a cedimento il provino lo sottostimi. Si può ottenere una possibile funzione di trasferimento che esegue queste “trasformazioni” visualizzando, per il provino S08_20, l'andamento del rapporto tra la media delle aree medie di danneggiamento, rapportata alla larghezza del provino, e le media delle delaminazioni medie in funzione del numero di cicli a propagazione N_p normalizzato rispetto al numero di cicli a rottura N_f . Nel seguente grafico il primo rapporto per comodità sarà identificato dalla variabile y , mentre il secondo dalla variabile x nelle varie equazioni di trasferimento.

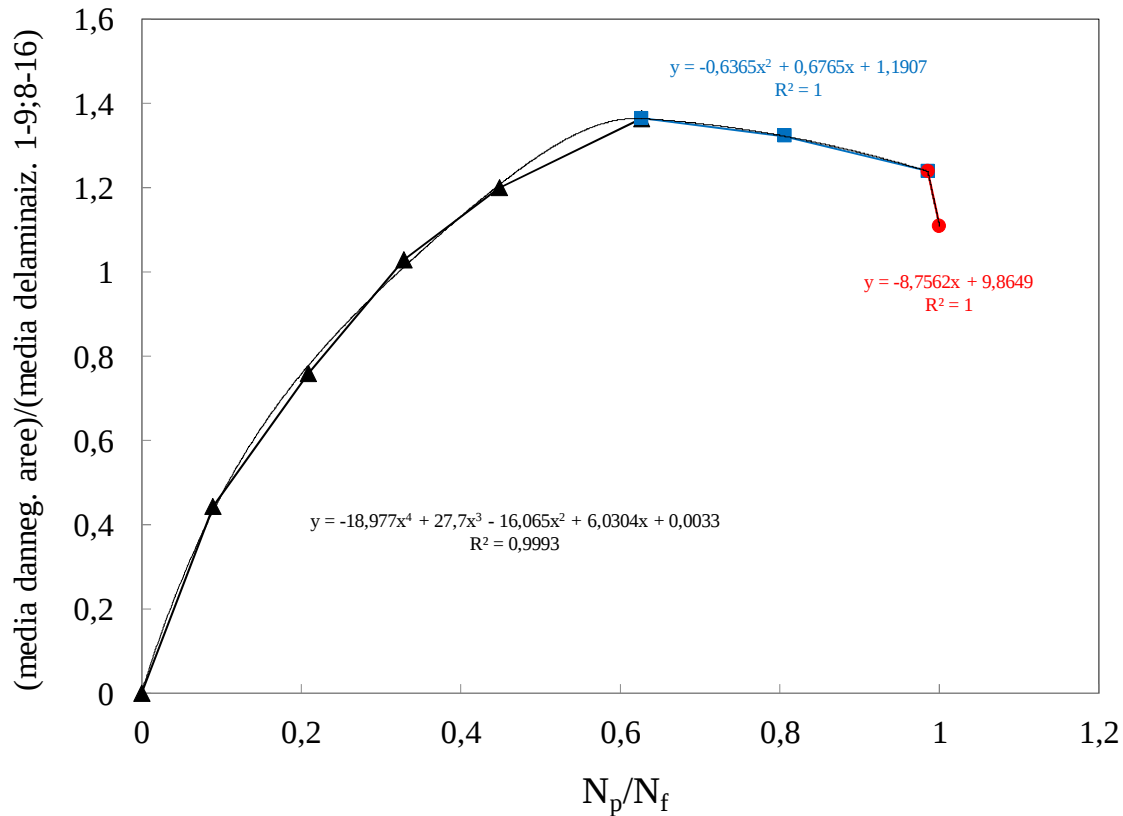


Figura 3.96: funzione di trasferimento per i provini S08 sottoposti a basso carico

In questo modo data una propagazione “reale” della media delle delaminazioni medie si può ricavare, tramite la funzione di trasferimento calcolata comunque utilizzando dati sperimentali, una propagazione “ipotizzata” della media delle aree medie di danneggiamento. In funzione quindi del rapporto N_p/N_f l'utilizzo dell'opportuna equazione di trasferimento restituisce l'ipotetico andamento della media delle aree medie di danneggiamento una volta inserito l'andamento reale, cioè misurato, dalla media delle delaminazioni medie.

➤ **Provino S08_19 $\Delta\sigma=202.5$ MPa (basso carico):**

segundo il procedimento appena esposto si ottiene per il provino S08_19:

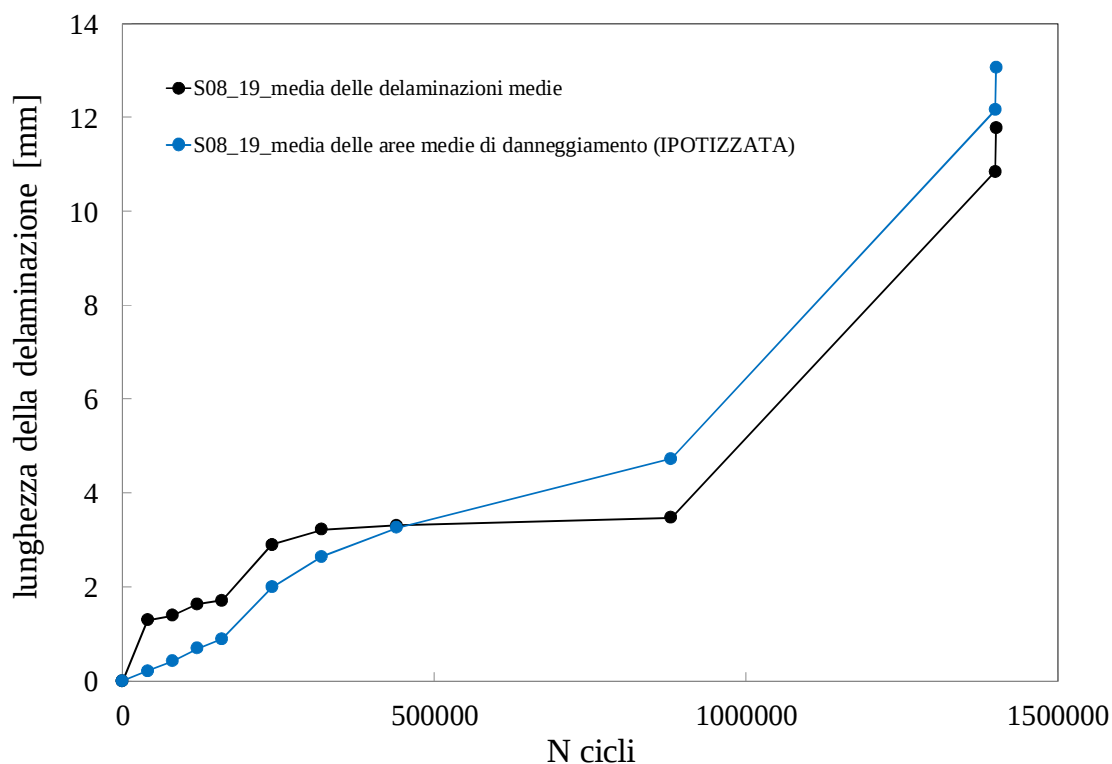


Figura 3.97: confronto tra la media delle aree medie di danneggiamento (ipotizzata) con la media delle delaminazioni medie (rielaborata) per il provino S08_19

N. CICLI	Media aree (IPOTIZ.)	da/dN	ΔG_I	ΔG_{II}	ΔG_{TOT}	ΔG_{eqv}
0	0		0	0	0	0
40000	0.210799	5.27E-06	82.18912	91.81433	174.0054	130.6357
80000	0.416306	5.14E-06	77.07197	83.01611	160.0912	120.1212
120000	0.682151	6.65E-06	72.98288	76.671	149.6587	112.2631
160000	0.89102	5.22E-06	71.00564	74.05842	145.0704	108.8141
240000	1.99357	1.38E-05	65.3253	67.11552	132.4554	99.33666
320000	2.642927	8.12E-06	62.35249	61.47064	123.8421	92.86891
440000	3.26045	5.15E-06	61.09516	57.73747	118.8552	89.14819
880000	4.731259	3.34E-06	69.0496	61.72687	130.8078	98.18486
1400000	12.16184	1.43E-05	193.5099	132.4197	326.214	247.3098
1402000	13.05411	4.46E-04	213.5211	136.2033	350.9153	266.5667

Tabella 3.18: provino S08_19

Si possono ora costruire le curve di Paris “ipotizzate”:

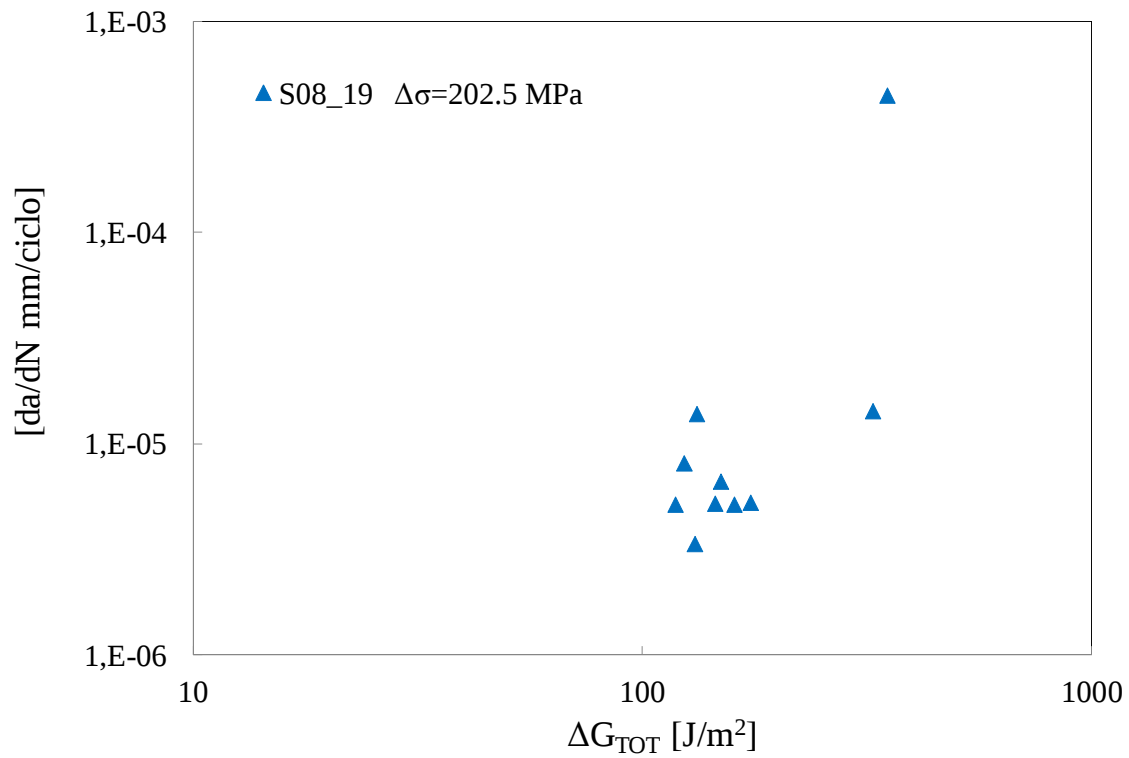


Figura 3.98: curva di Paris in ΔG_{TOT} ipotizzata per il provino S08_19

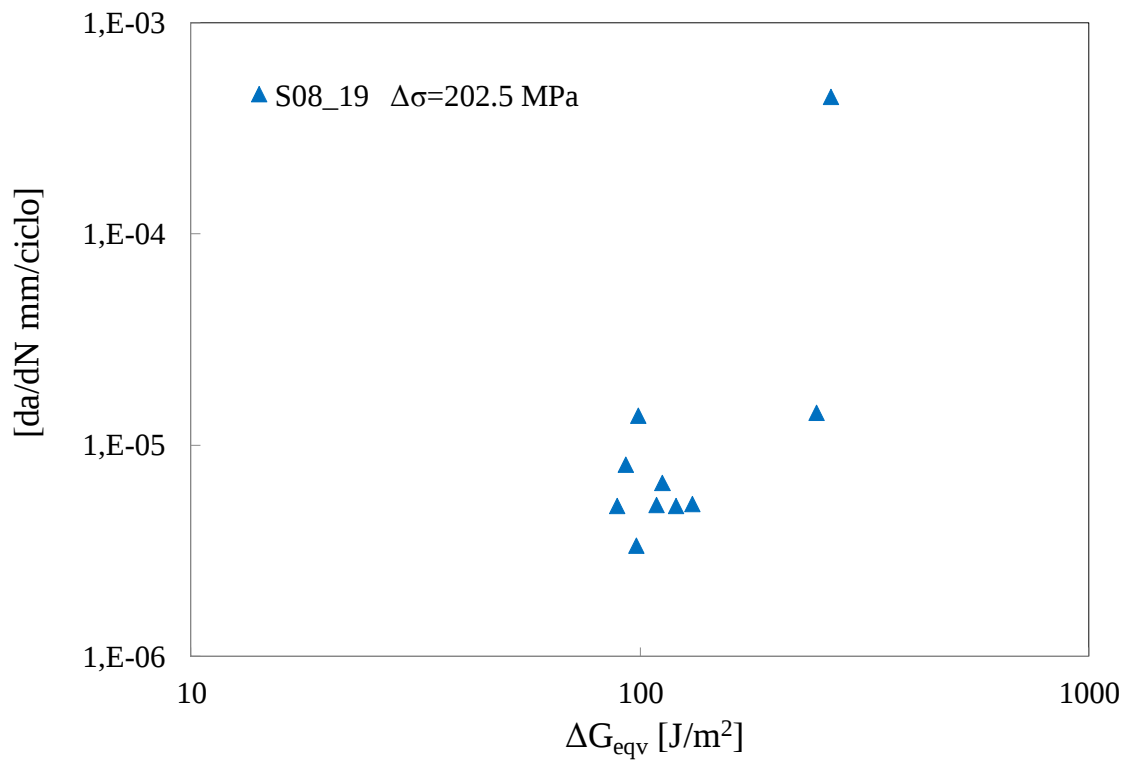


Figura 3.99: curva di Paris in ΔG_{eqv} ipotizzata per il provino S08_19

Si confrontano ora gli andamenti appena ottenuti con la media delle delaminazioni medie:

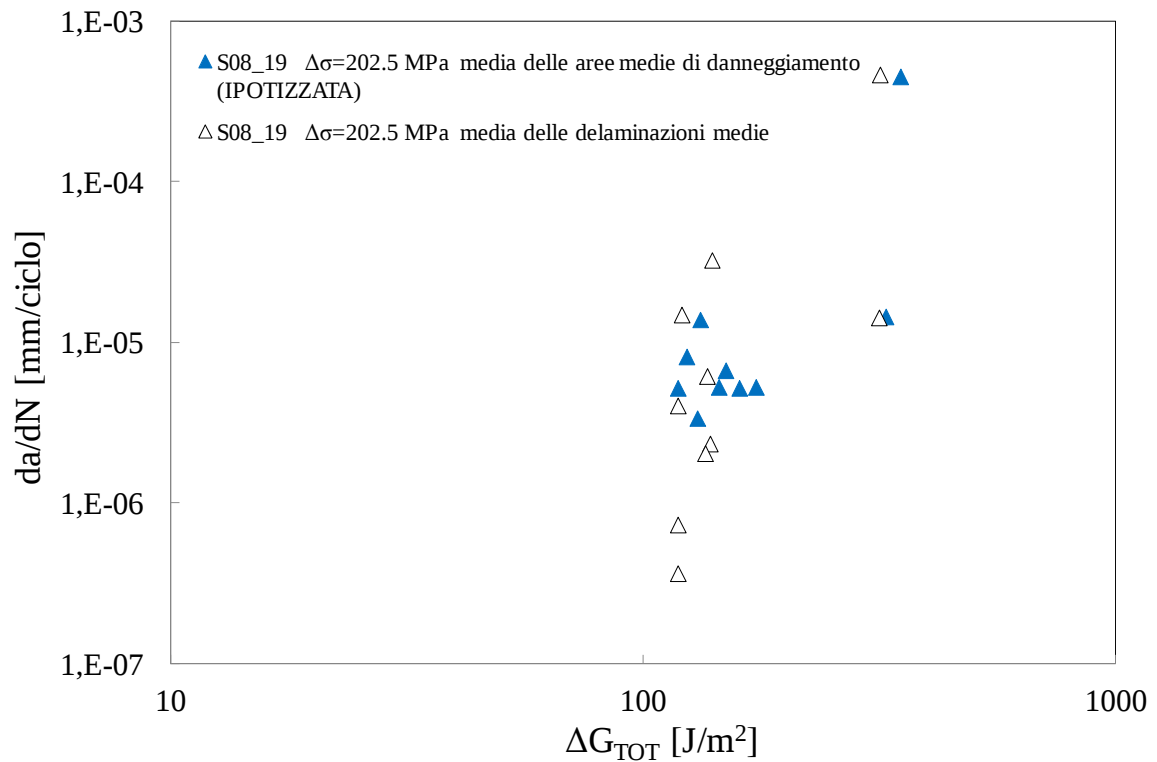


Figura 3.100: confronto tra le curve di Paris per il provino S08_19 in ΔG_{TOT}

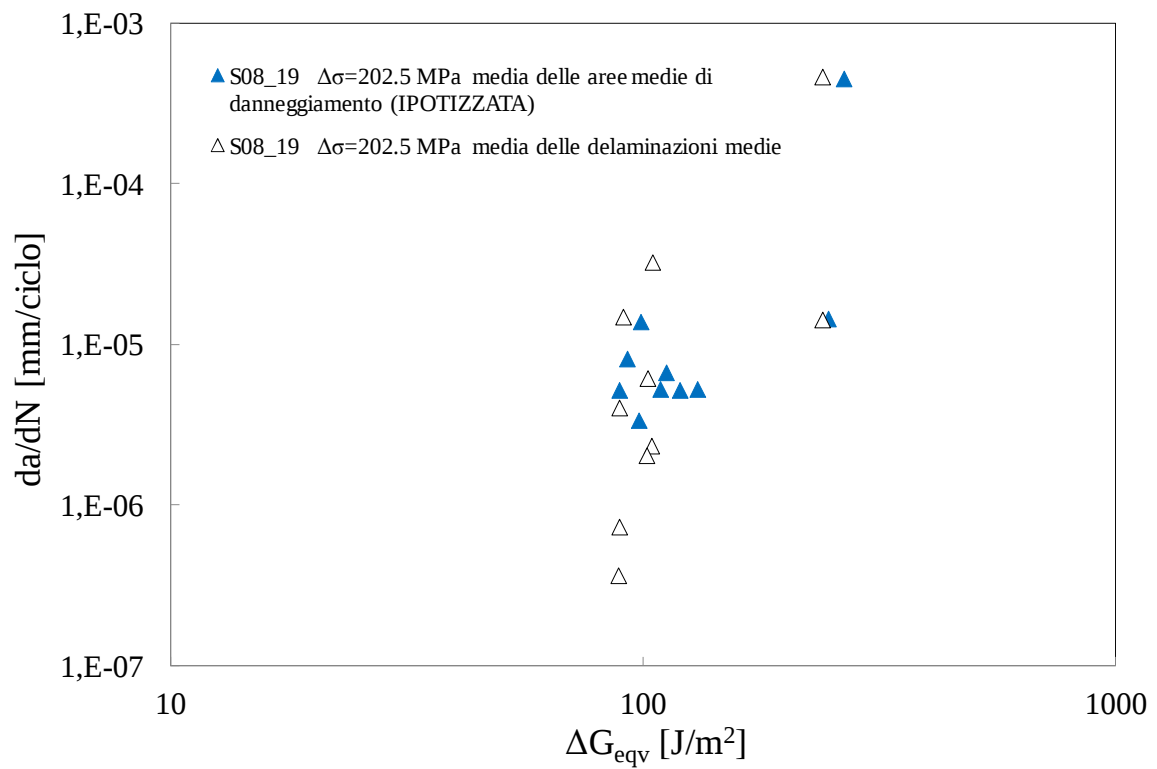


Figura 3.101: confronto tra le curve di Paris per il provino S08_19 in ΔG_{eqv}

➤ **Provino S08_18 $\Delta\sigma=202.5$ MPa (basso carico):**

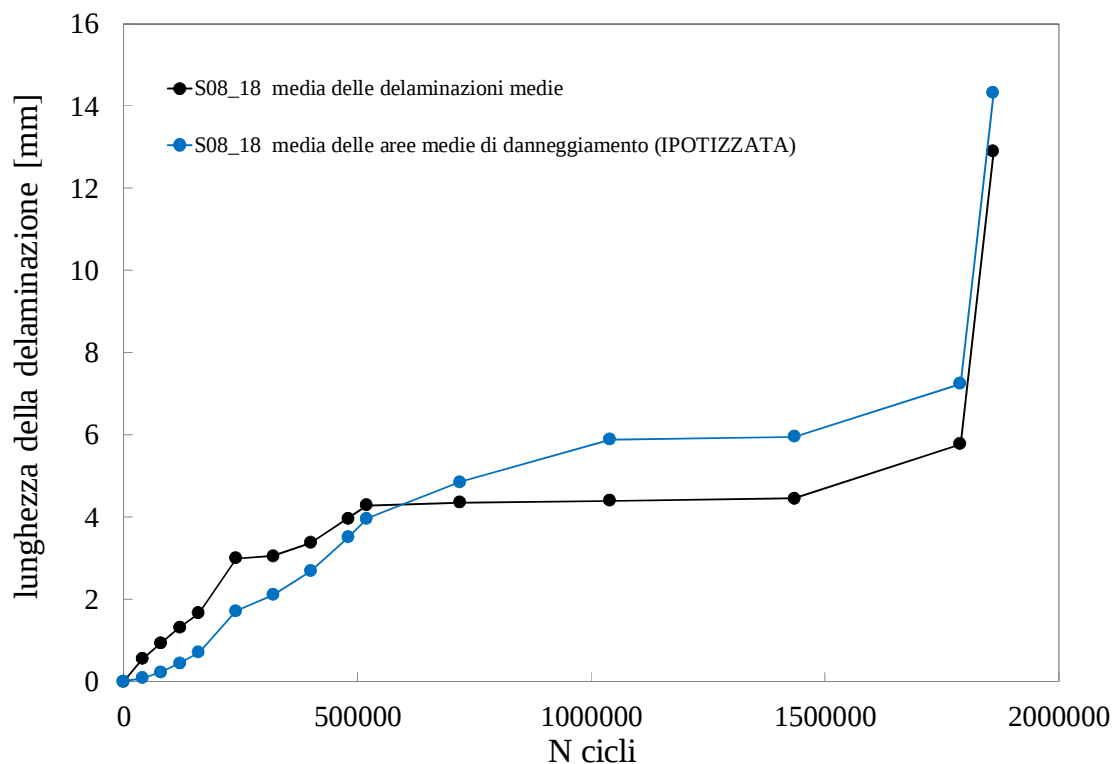


Figura 3.102: confronto tra la media delle aree medie di danneggiamento (ipotizzata) con la media delle delaminazioni medie (rielaborata) per il provino S08_18

N. CICLI	Media aree (IPOTIZ.)	da/dN	ΔG_I	ΔG_{II}	ΔG_{TOT}	ΔG_{eqv}
0	0		0	0	0	0
40000	0.067676	1.69E-06	87.21602	100.9063	188.1236	141.3408
80000	0.21798	3.76E-06	81.9722	91.42997	173.4042	130.1806
120000	0.434565	5.41E-06	76.71317	82.4267	159.1431	119.4062
160000	0.695286	6.52E-06	72.83331	76.45951	149.2977	111.9916
240000	1.703334	1.26E-05	66.71985	69.22718	135.9595	101.9718
320000	2.103232	5.00E-06	64.7872	66.20551	131.008	98.24837
400000	2.674291	7.14E-06	62.2368	61.21309	123.469	92.58954
480000	3.497261	1.03E-05	61.32333	57.29509	118.6423	88.99801
520000	3.952202	1.14E-05	63.00305	58.06188	121.0913	90.84912
720000	4.841394	4.45E-06	70.13493	62.1217	132.2888	99.31386
1040000	5.886496	3.27E-06	83.77828	60.73882	144.5617	109.3061
1435000	5.945006	1.48E-07	84.91471	60.58135	145.5417	110.1394
1790000	7.241894	3.65E-06	158.0385	118.1064	276.2274	208.5522
1860310	14.31358	1.01E-04	250.7747	138.6662	394.6949	300.1489

Tabella 3.19: provino S08_18

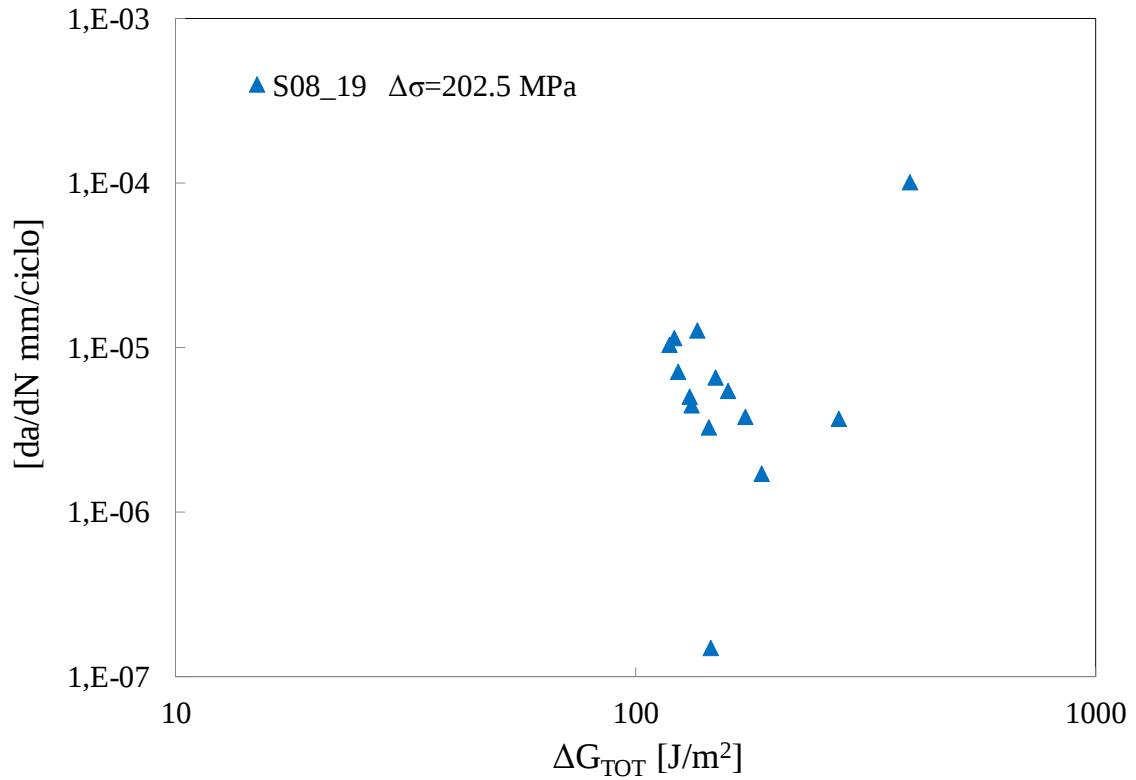


Figura 3.103: curva di Paris in ΔG_{TOT} ipotizzata per il provino S08_18

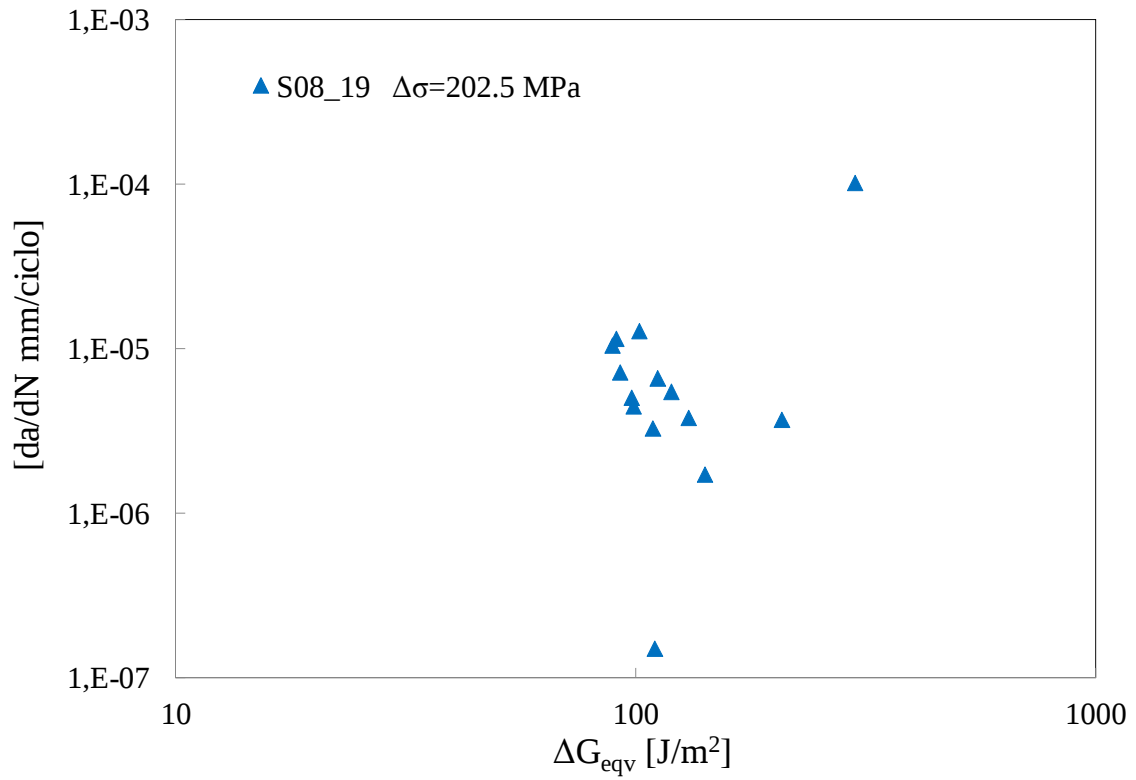


Figura 3.104: curva di Paris in ΔG_{eqv} ipotizzata per il provino S08_18

Si confrontano ora gli andamenti appena ottenuti con la media delle delaminazioni medie:

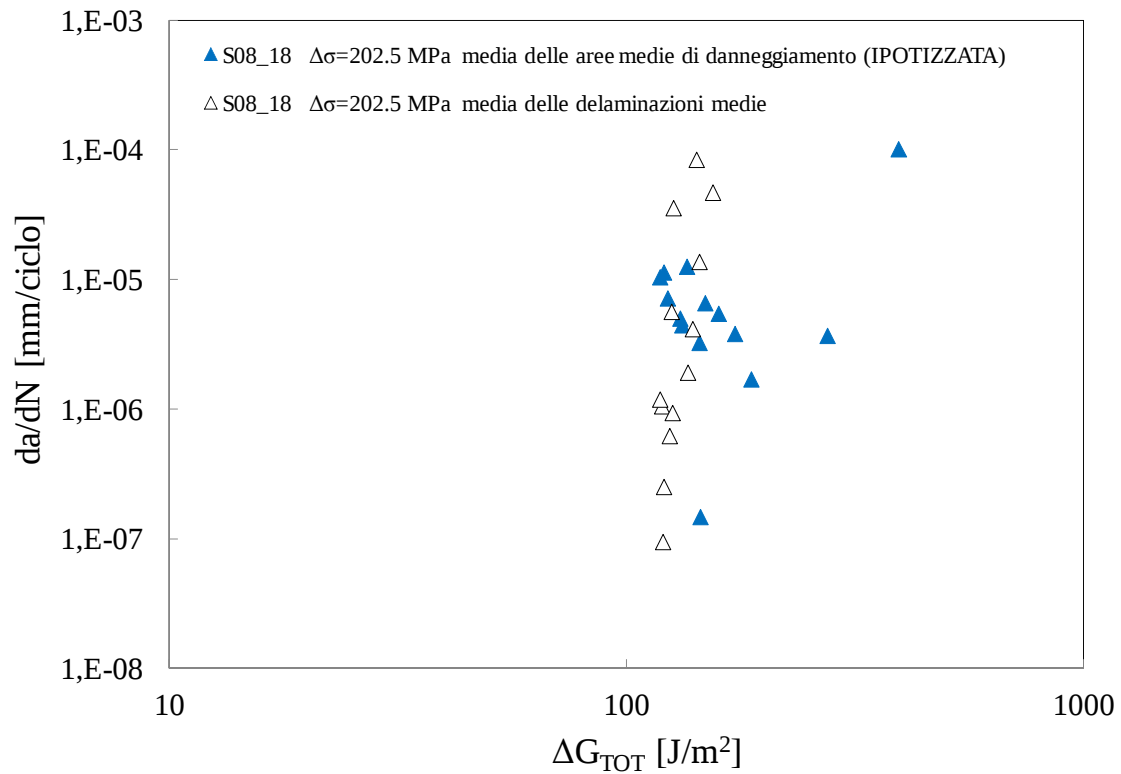


Figura 3.105: confronto tra le curve di Paris per il provino S08_18 in ΔG_{TOT}

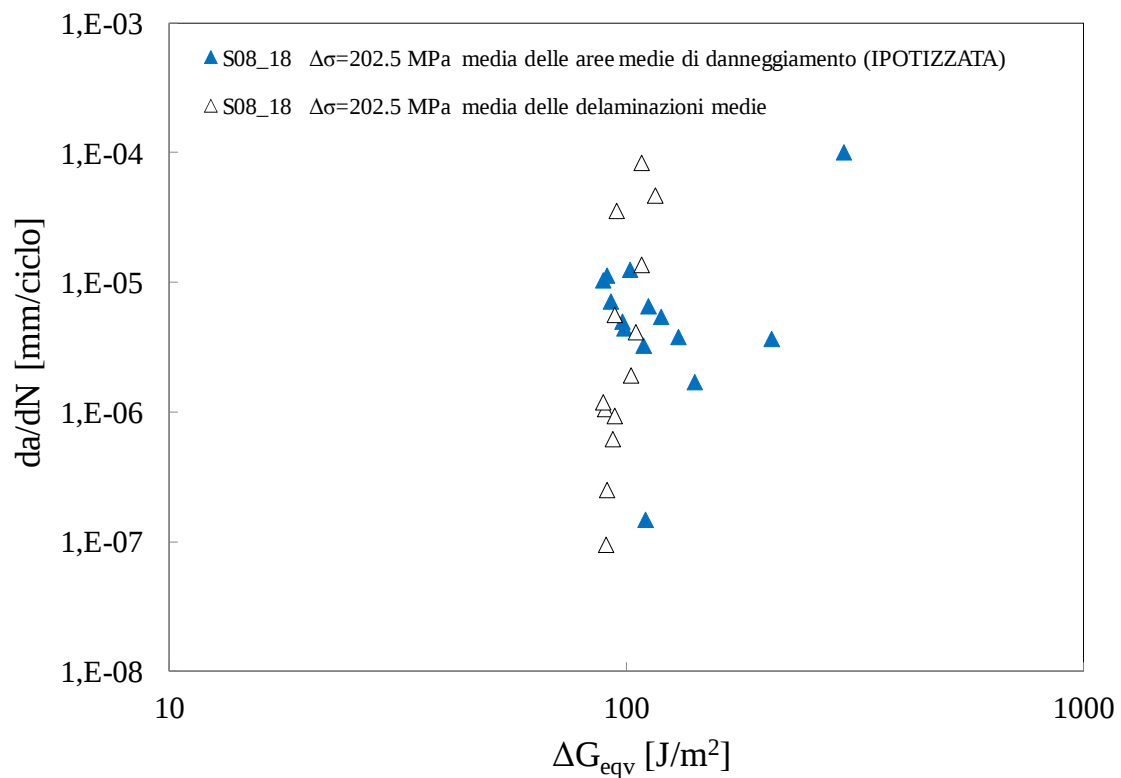


Figura 3.106: confronto tra le curve di Paris per il provino S08_18 in ΔG_{eqv}

Si riassumono ora in un'unica curva di Paris le medie delle aree medie di danneggiamento:

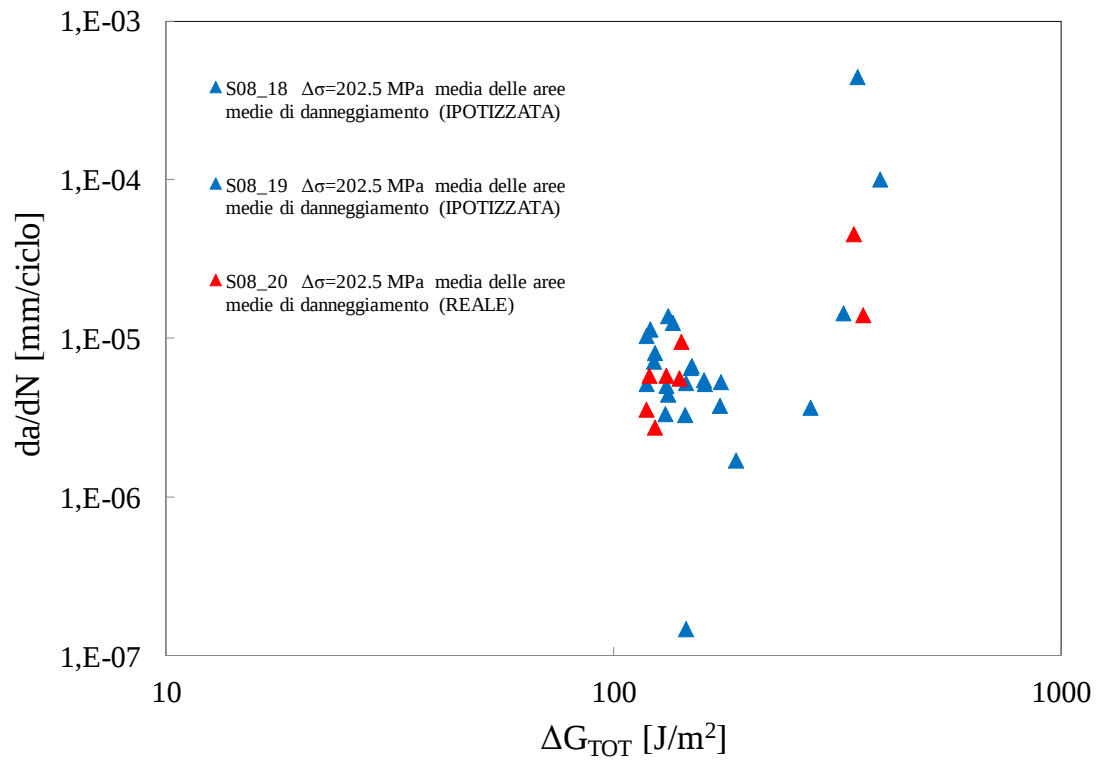


Figura 3.107: curva di Paris riassuntiva per i provini S08 in ΔG_{TOT}

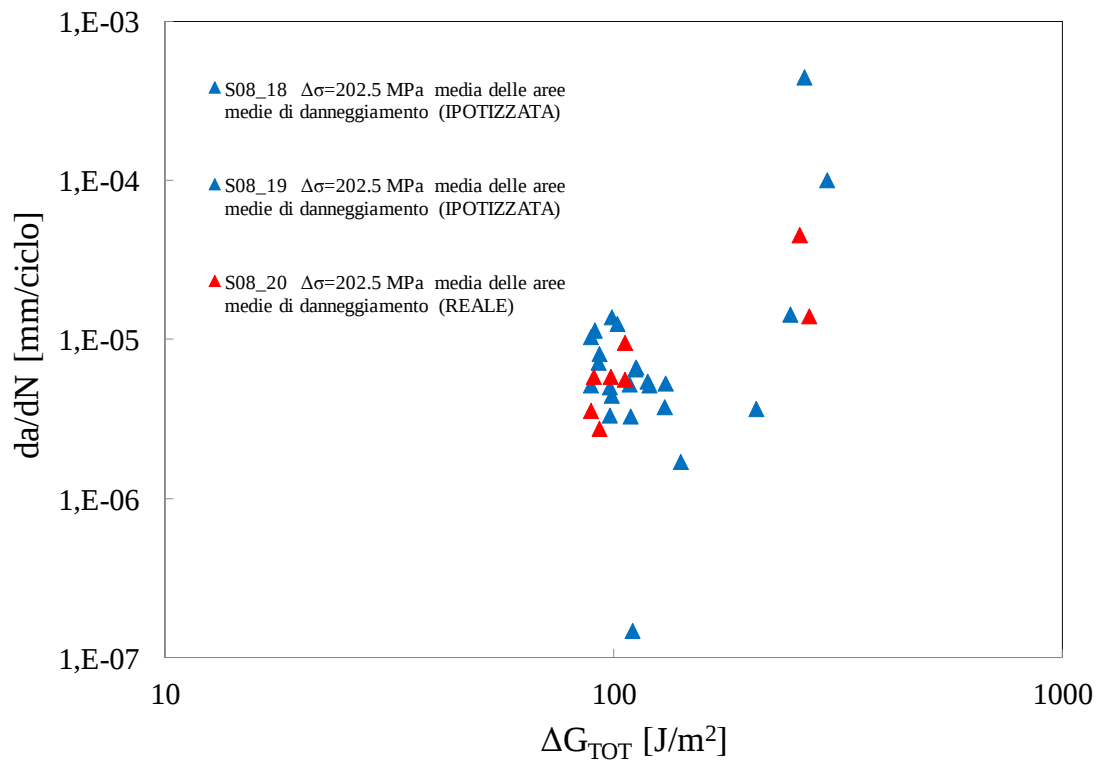


Figura 3.108: curva di Paris riassuntiva per i provini S08 in ΔG_{eqv}

E quindi ora tutti i confronti in un unico grafico:

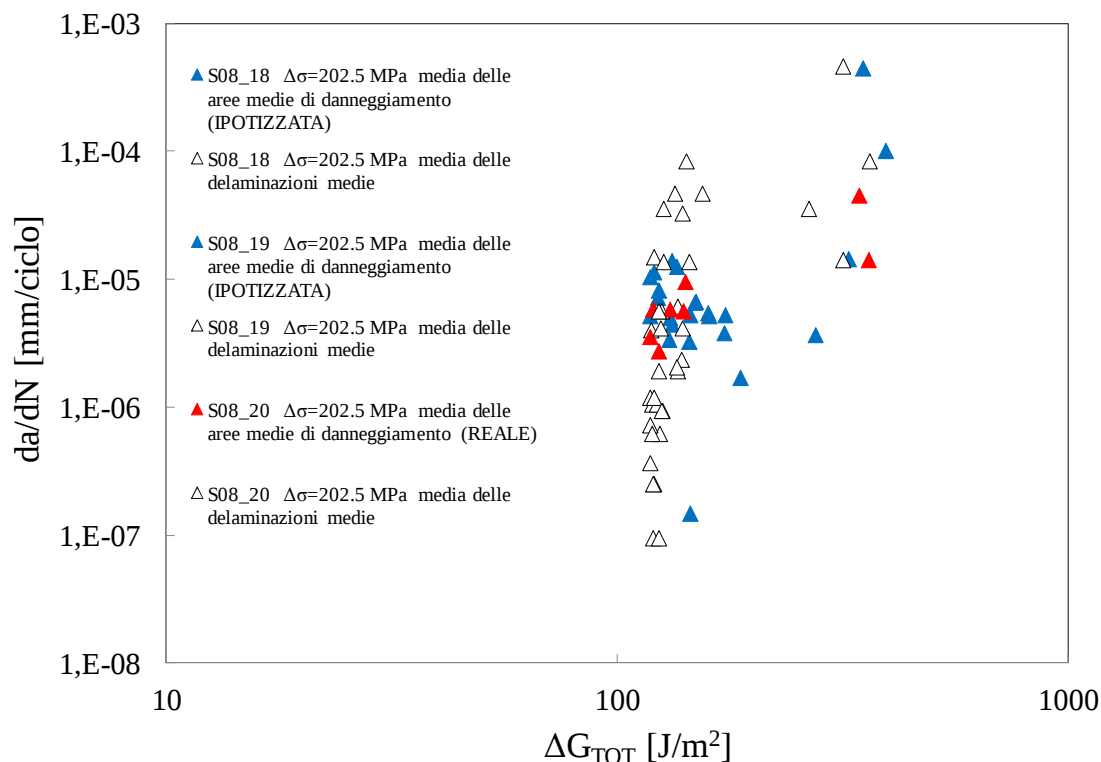


Figura 3.109: confronto riassuntivo tra le curve di Paris per i provini S08 in ΔG_{TOT}

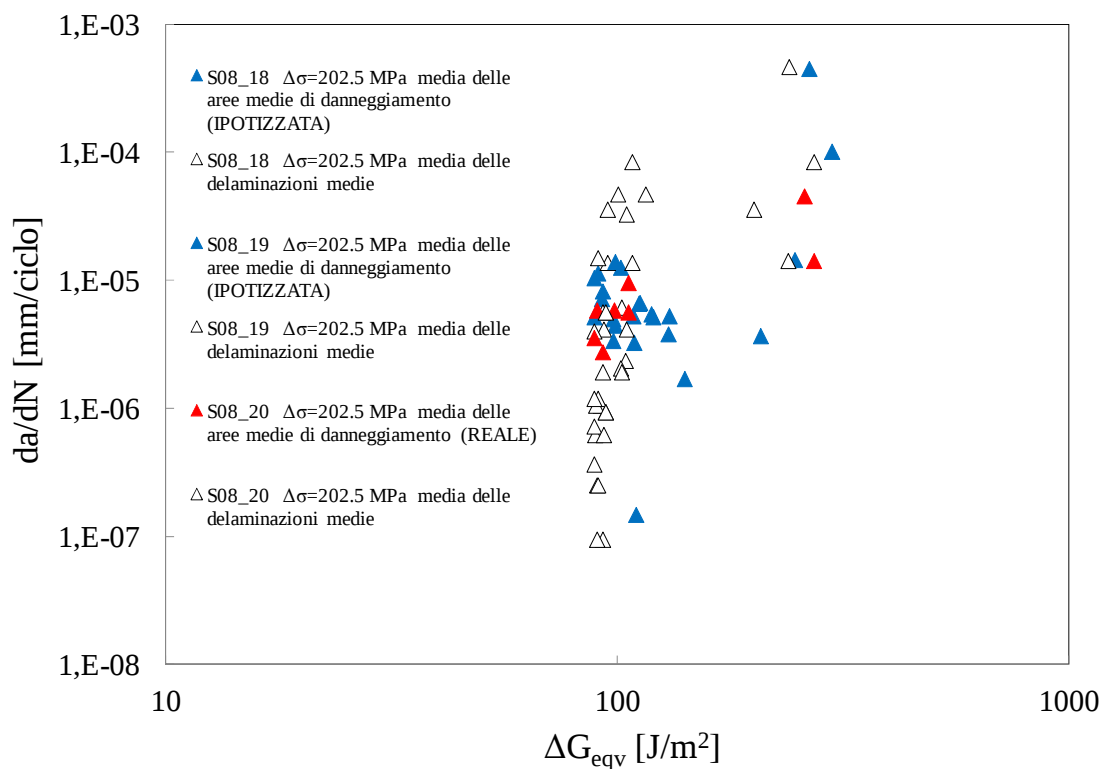


Figura 3.110: confronto riassuntivo tra le curve di Paris per i provini S08 in ΔG_{eqv}

Gli ultimi due grafici evidenziano una buona diminuzione della dispersione. Si parla però di una diminuzione “ipotizzata” essendo i punti in blu non derivati da dati sperimentali.

Il procedimento di “trasformazione” è stato eseguito anche per il secondo provino con lunghezza di sovrapposizione pari a 5 mm soggetto a basso carico (S05_18) avendo a disposizione i dati ultrasonici per l’S05_19 ([6] Polloni Simone, 2003-2004) , ma il grado elevato di similitudine trovato nei risultati ed il fatto che la funzione di trasferimento ottenuta per gli S05 necessita di un’approssimazione tramite 5 equazioni di trasferimento ha portato al non utilizzo di questi in quanto la rielaborazione dei dati sperimentali sembra essere troppo spinta. A questo punto si può costruire una curva di Paris riassuntiva nella quale si sostituiscono i dati relativi alla media delle delaminazioni medie con quelli relativi alla media delle aree medie di danneggiamento per i giunti S08 sottoposti a basso carico e per il solo giunto S05_19, sottoposto sempre a basso carico; si ricorda che l’indicatore “rosso” indica che il dato riportato è proveniente da misurazioni sperimentali ([6] Polloni Simone, 2003-2004) e quindi reale, mentre l’indicatore blu indica l’ipotetica distribuzione dei dati ottenuta tramite la trasformazione descritta precedentemente:

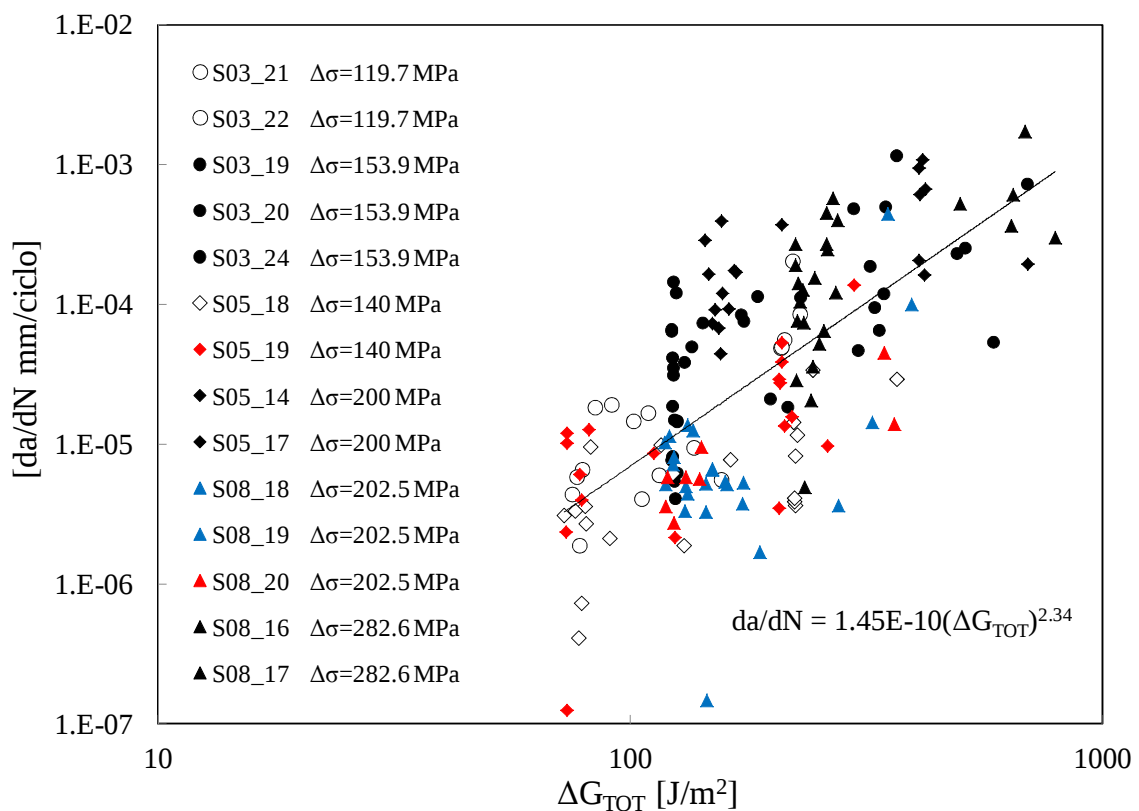
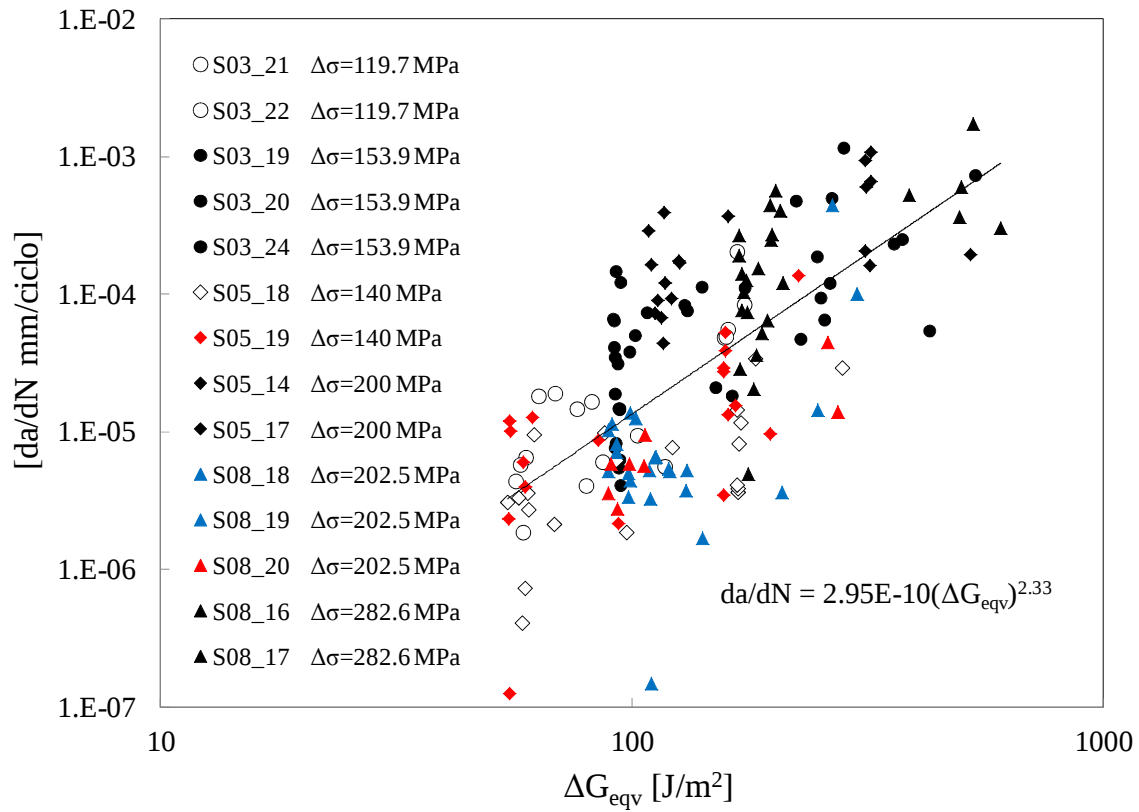


Figura 3.111: curva di Paris riassuntiva in ΔG_{TOT}

Figura 3.112: curva di Paris riassuntiva in ΔG_{eqv}

Si può notare come ora la dispersione sia leggermente diminuita, anche se comunque ancora elevata, grazie soprattutto alla scomparsa dei tratti tendenzialmente verticali di propagazioni a ΔG praticamente costante.

3.4 ALTRE FORMULAZIONI DI ΔG_{eqv}

Poiché probabilmente gli ultimi due grafici rappresentano quanto di meglio si può ottenere in relazione alla curva di Paris dai dati sperimentali in possesso in questo momento, per tentare di raggiungere una ulteriore compattazione dei dati sono state analizzate delle altre formulazioni per il calcolo del ΔG_{eqv} reperite in letteratura ([9] N. Blanco, 2004):

❖ Ramkumar and Whitcomb (1985):

$$\frac{da}{dN} = C_I \cdot \left(\frac{G_I}{G_{Ic}} \right)^{r_I} + C_{II} \cdot \left(\frac{G_{II}}{G_{IIc}} \right)^{r_{II}} \quad (3.2)$$

❖ Gustafson and Hojo (1987):

$$\frac{da}{dN} = C_I \cdot (\Delta G_I)^{r_I} + C_{II} \cdot (\Delta G_{II})^{r_{II}} \quad (3.3)$$

❖ Russel and Street (1989):

$$\frac{da}{dN} = \left(\frac{G_I}{G_I + G_{II}} \cdot C_I + \frac{G_{II}}{G_I + G_{II}} \cdot C_{II} \right) \left(\frac{\Delta G_I}{G_{Ic}} + \frac{\Delta G_{II}}{G_{IIc}} \right)^{\left(\frac{G_I}{G_I + G_{II}} r_I + \frac{G_{II}}{G_I + G_{II}} r_{II} \right)} \quad (3.4)$$

Dove i termini col pedice I derivano da sollecitazioni di puro Modo I e allo stesso modo i termini col pedice II da sollecitazioni di puro Modo II.

I valori di G_{Ic} , G_{IIc} , C_I e r_I per il materiale in tessuto prepreg SEAL - TEXIPREG® CC 206 – ET442 costituito da resina epossidica tenacizzata CIBA 5021 rinforzata con un tessuto di fibra di carbonio T300 twill 2x2 lay-up $[0]_{24}$ sono stati reperiti dai lavori precedenti di tesi ([3] Indrio M., 2001-2002), ([11] Lunardon Giulia, 2004-2005), ([12] Olivier Loic, 2005). Per quanto riguarda C_{II} e r_{II} sono disponibili in letteratura solamente dati per laminati unidirezionali; rapportando quindi questi dati con C_I e r_I trovati in letteratura si può ricavare “grezzamente” C_{II} e r_{II} per i laminati in tessuto. Per quanto riguarda l’equazione (3.2) e la (3.4) le costanti C_I e C_{II} devono essere ricavate dalle curve di Paris relative a sollecitazioni di Modo I puro e Modo II puro normalizzate rispettivamente a G_{Ic} e G_{IIc} ; gli esponenti rimangono ovviamente costanti. È stato dunque necessario ricostruire la curva di Paris presente in ([11] Lunardon Giulia, 2004-2005) relativa al Modo I puro normalizzandola ora rispetto a ΔG_{Ic} e ricavando così la costante $C_{I,norm}$ (Figura 3.113) (Figura 3.114). Per caratterizzare il Modo II si è dovuto ancora una volta ricorrere al

rapporto tra $C_{I,norm}$ e i dati disponibili in letteratura relativi ai laminati unidirezionali ricavando così $C_{II,norm}$.

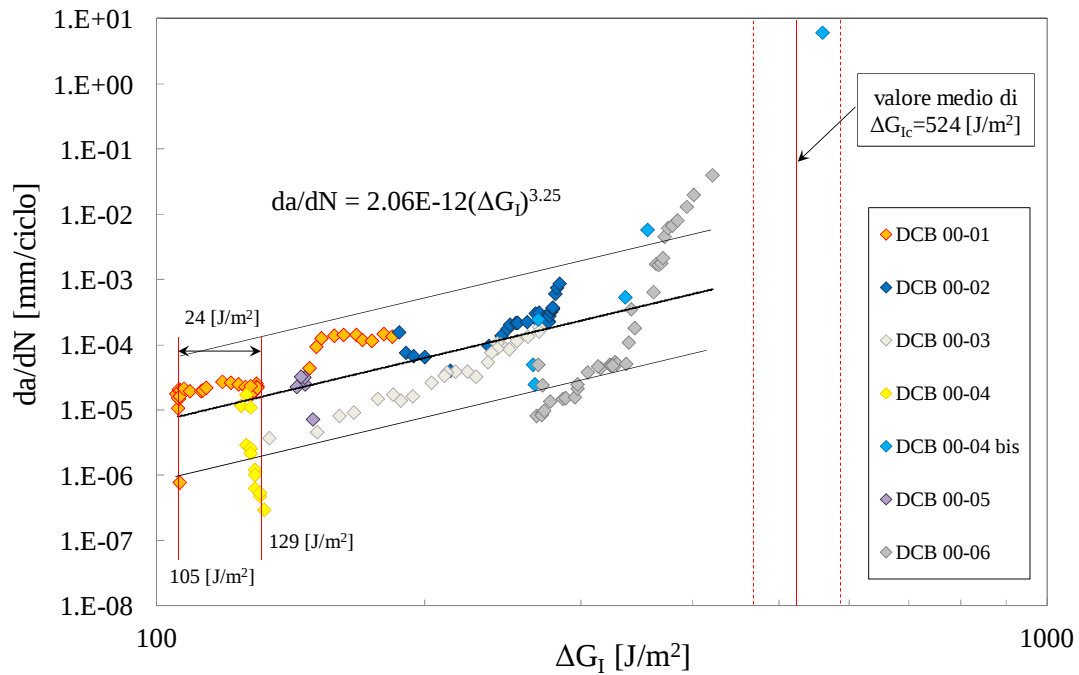


Figura 3.113: curva di Paris per puro Modo I ([11] Lunardon Giulia, 2004-2005)

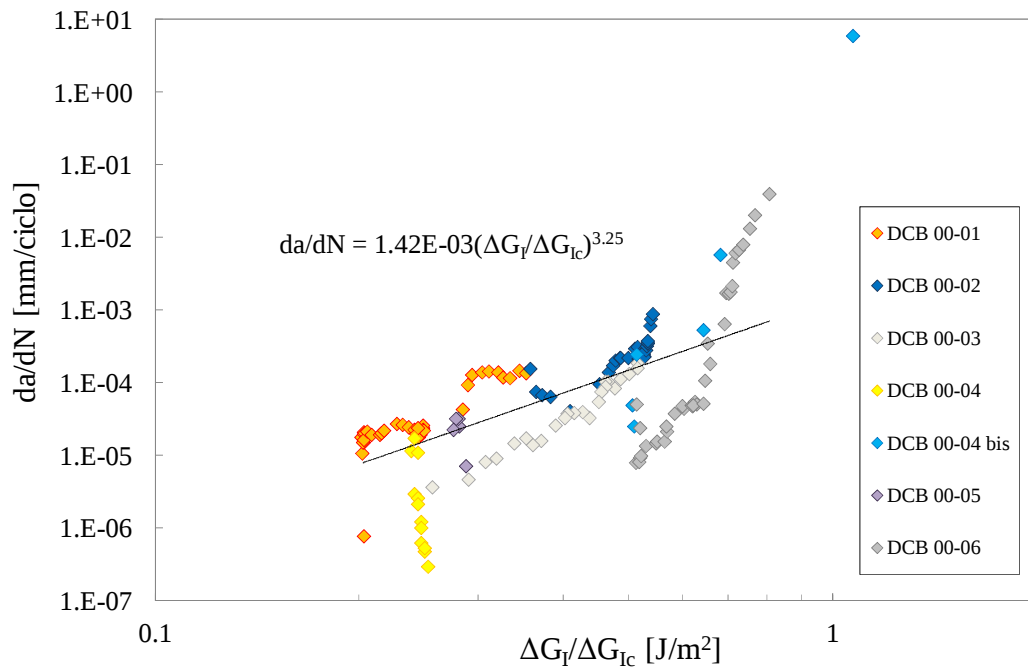


Figura 3.114: curva di Paris per puro Modo I normalizzata rispetto a ΔG_{Ic}

Riassumendo i risultati dei calcoli effettuati in tabella con riferimento all'espressione canonica della curva di Paris:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta G)^r \quad (3.5)$$

	WOVEN				UD	
	C	r	G _c	C _{norm}	C	r
Modo I	2.06E-12	3.25	522	1.42E-03	3.68E-19	7.03
Modo II	1.84E-11*	2.68*	1874	0.1269*	3.29E-18	5.8

Tabella 3.20: tabella riassuntiva dei coefficienti della curva di Paris validi per velocità di propagazione da/dN espressa in [mm/ciclo] e per ΔG espresso in [J/m²] per puro Modo I e puro Modo II (* valori estrapolati)

È possibile a questo punto risolvere le equazioni proposte in precedenza. A tal riguardo si osserva come non sia possibile risalire da queste all'espressione canonica della curva di Paris e quindi isolare un ΔG_{eqv} ed un coefficiente C. Ciò si traduce nell'impossibilità di effettuare un confronto diretto come fatto finora per le curve di Paris espresse in ΔG_{TOT} ed in ΔG_{eqv,Q&R}. Per poter fornire una valutazione sui risultati delle precedenti equazioni è necessario perciò confrontare le velocità di propagazione da/dN da queste calcolate con le velocità di propagazione sperimentali e verificare il loro grado di approssimazione. Tale confronto si effettua anche per il da/dN calcolato tramite l'equazione (3.1) proposta dal Prof. M. Quaresimin e dall'Ing. M. Ricotta.

Vengono di seguito riportati i grafici illustranti tali raffronti considerando dapprima come velocità di propagazione da/dN sperimentale quella calcolata tramite la media delle delaminazioni medie soltanto e successivamente quella calcolata con gli stessi dati sostituendo con la media delle aree medie di danneggiamento i dati relativi ai provini S08 a basso carico e all'S05_19.

Si osserva che se i punti così determinati giacessero su una retta inclinata di 45° e passante per l'origine degli assi l'accordo esistente tra i valori calcolati “carta e penna” e quelli sperimentali sarebbe perfetto. Nei successivi grafici le bande identificano una dispersione di +/- 100% rispetto al “perfetto accordo”; ciò significa che se ipoteticamente si riscontra un punto di “perfetto accordo” per un da/dN pari a 1E-04, si assume come buona

approssimazione di tal valore un range compreso tra $0.5E-04$, e cioè la metà del valore, e $2E-04$, e cioè il doppio. Una tale assunzione potrebbe sembrare esagerata, ma se si prende in considerazione la curva di Paris di puro Modo I (Figura 3.113) ottenuta usando lo stesso tipo di provini e lo stesso tipo di sollecitazione si può notare come si riscontri una dispersione che comprende due ordini di grandezza. Dunque se si assume la metà o il doppio del valore corrispondente al “perfetto accordo” non si commette in realtà un errore così elevato appunto perché la dispersione dei dati sperimentali spazia verosimilmente tra due ordini di grandezza nei riguardi della velocità di propagazione. Questa elevata dispersione, riscontrata anche nelle curve di Paris precedentemente calcolate, è probabilmente dovuta al fatto che la propagazione della cricca non sempre avviene tra strati di materiale caratterizzati dalla stessa orientazione delle fibre che lo costituiscono per la natura stessa del materiale composito che presenta un intrecciamento di strati con fibre diversamente orientate nello spazio:

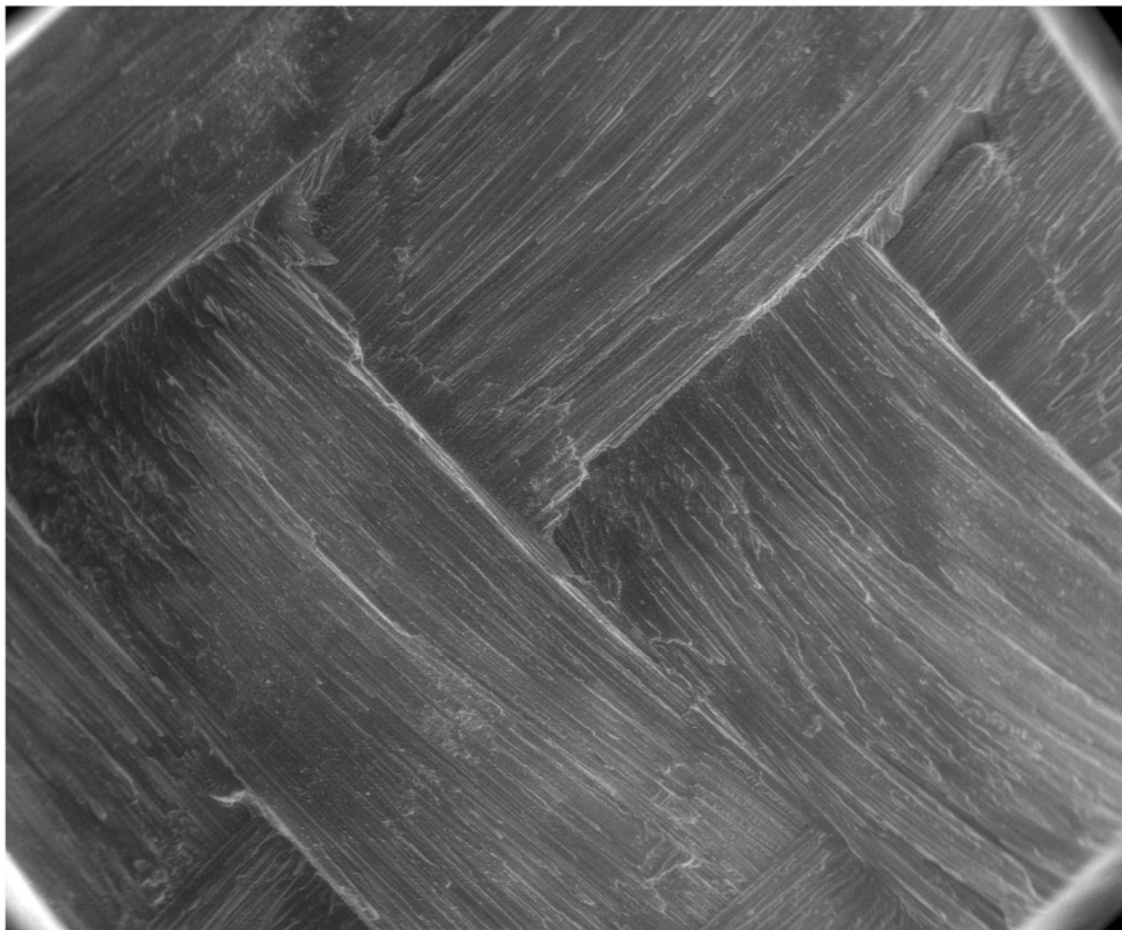


Figura 3.115: panoramica materiale composito vista dal SEM ([11] Lunardon Giulia, 2004-2005)

Nel caso specifico dei giunti stepped-lap:

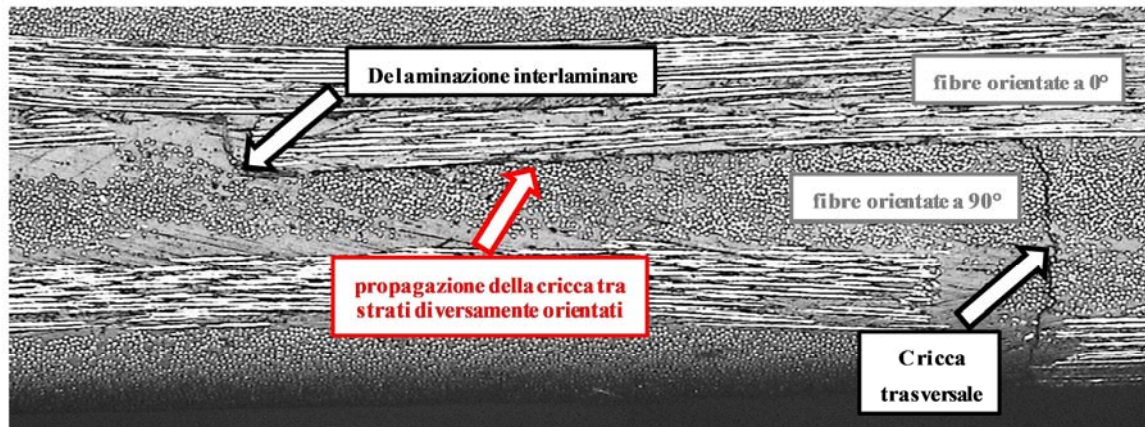


Figura 3.116: propagazione della delaminazione in una giunzione stepped-lap in materiale composito ([1] Cristanini Simone, 2002-2003)

- da/dN sperimentale [mm/ciclo] → media delle delaminazioni medie

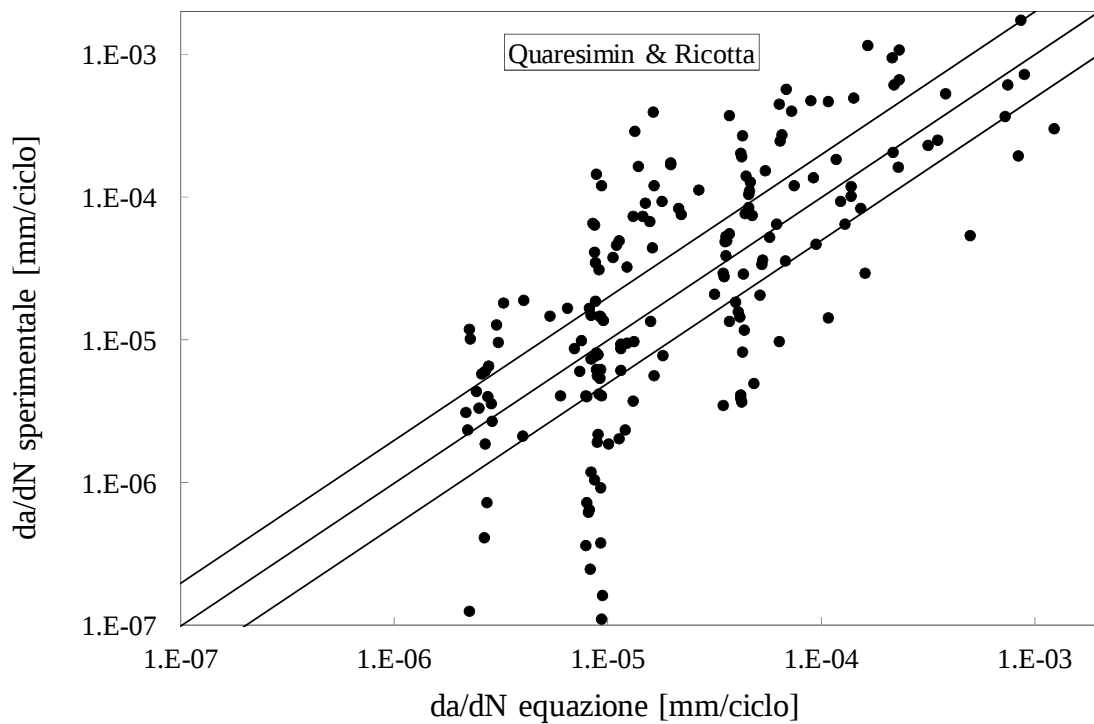


Figura 3.117: confronto della velocità di propagazione da/dN sperimentale (media delle delaminazioni medie) con la velocità di propagazione calcolata tramite equazione (3.1)

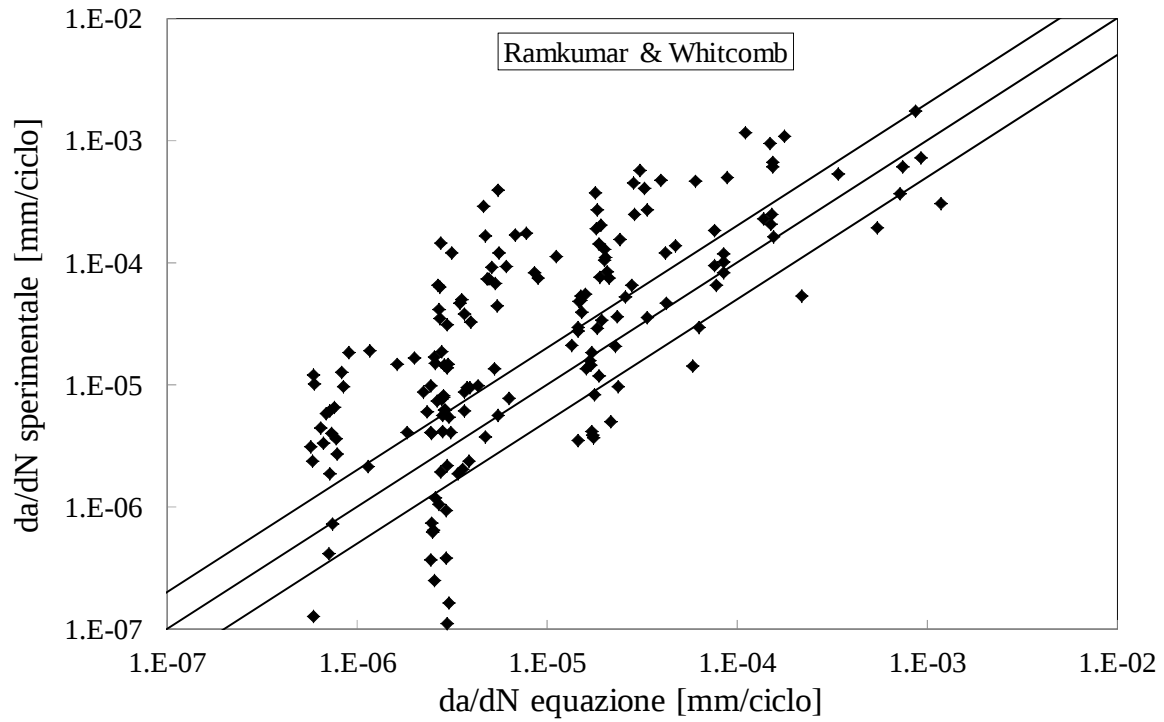


Figura 3.118: confronto della velocità di propagazione da/dN sperimentale (media delle delaminazioni medie) con la velocità di propagazione calcolata tramite equazione (3.2)

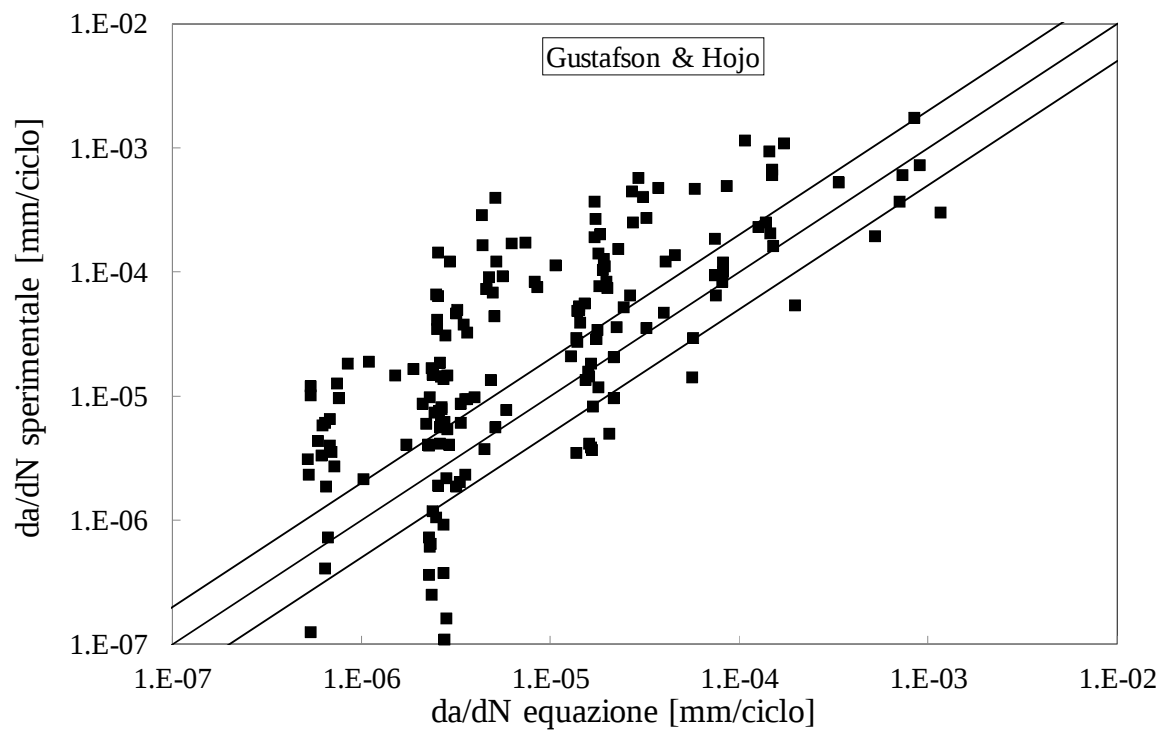


Figura 3.119: confronto della velocità di propagazione da/dN sperimentale (media delle delaminazioni medie) con la velocità di propagazione calcolata tramite equazione (3.3)

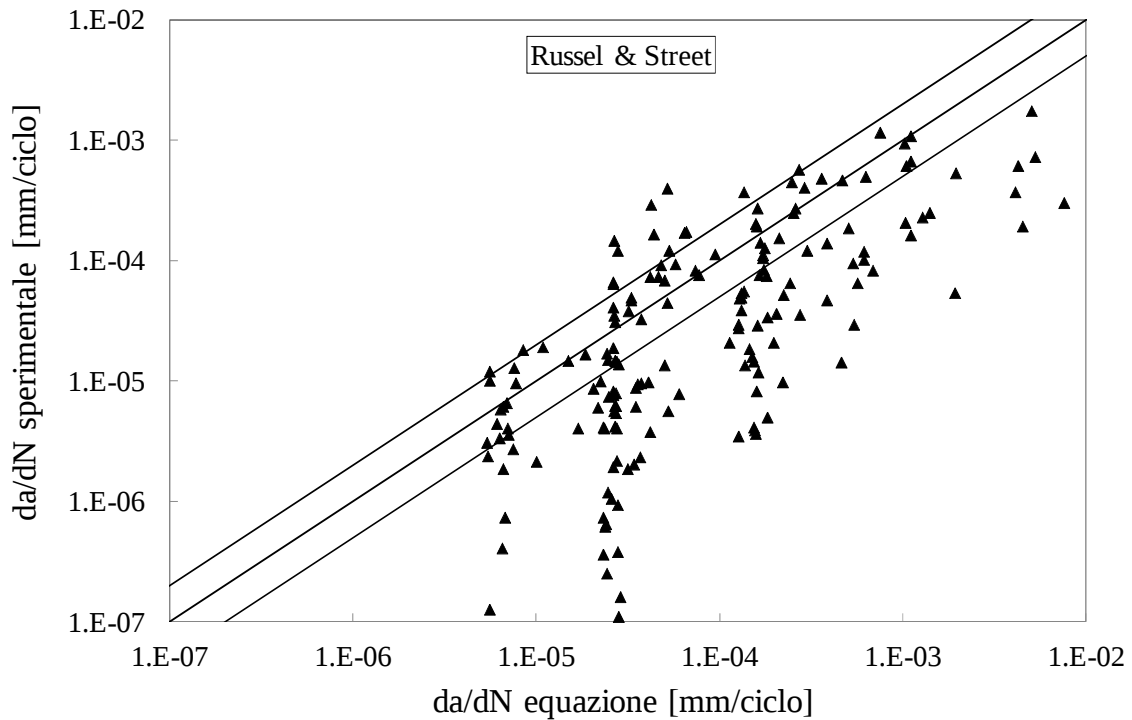


Figura 3.120: confronto della velocità di propagazione da/dN sperimentale (media delle delaminazioni medie) con la velocità di propagazione calcolata tramite equazione (3.4)

È stato a questo punto calcolato il numero dei punti compresi nella banda di dispersione:

MEDIA DELLE DELAMINAZIONI MEDIE			
Punti in banda			
Quaresimin & Ricotta	Ramkumar & Whitcomb	Gustafson & Hojo	Russel & Street
67	43	45	56
38.72832%	24.85549%	26.0115607%	32.36994%

Tabella 3.21: tabella riassuntiva dei confronti tra le velocità di propagazioni sperimentali e quelle calcolate via equazioni per la media delle delaminazioni medie

Si osserva inoltre che i punti giacenti al di sotto della banda sono punti in vantaggio di sicurezza in quanto la velocità di propagazione calcolata tramite l'equazione è maggiore di quanto si registra sperimentalmente mentre i punti giacenti sopra la banda sono perciò in svantaggio di sicurezza. Le equazioni di Ramkumar & Whitcomb e di Gustafson & Hojo

risultano quindi essere tendenzialmente in svantaggio di sicurezza, la formulazione del ΔG_{eqv} proposta da Quaresimin & Ricotta è abbastanza in accordo con i dati sperimentali ed infine l'equazione di Russel & Street risulta essere globalmente in vantaggio di sicurezza.

- da/dN sperimentale [mm/ciclo] → media delle delaminazioni medie con media delle aree medie di danneggiamento per i provini S08 sottoposti a basso carico e per il provino S05_19

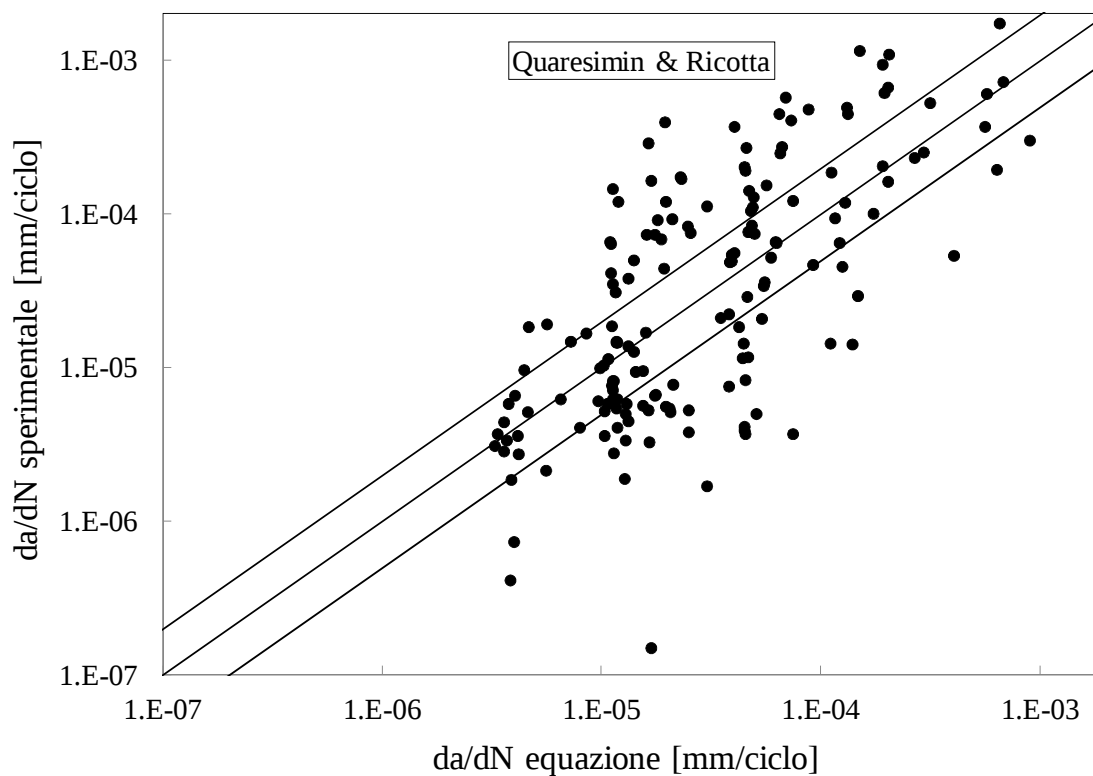


Figura 3.121: confronto della velocità di propagazione da/dN sperimentale (media delle delaminazioni medie con media delle aree medie di danneggiamento per gli S08 soggetti a basso carico e per il provino S05_19) con la velocità di propagazione calcolata tramite equazione (3.1)

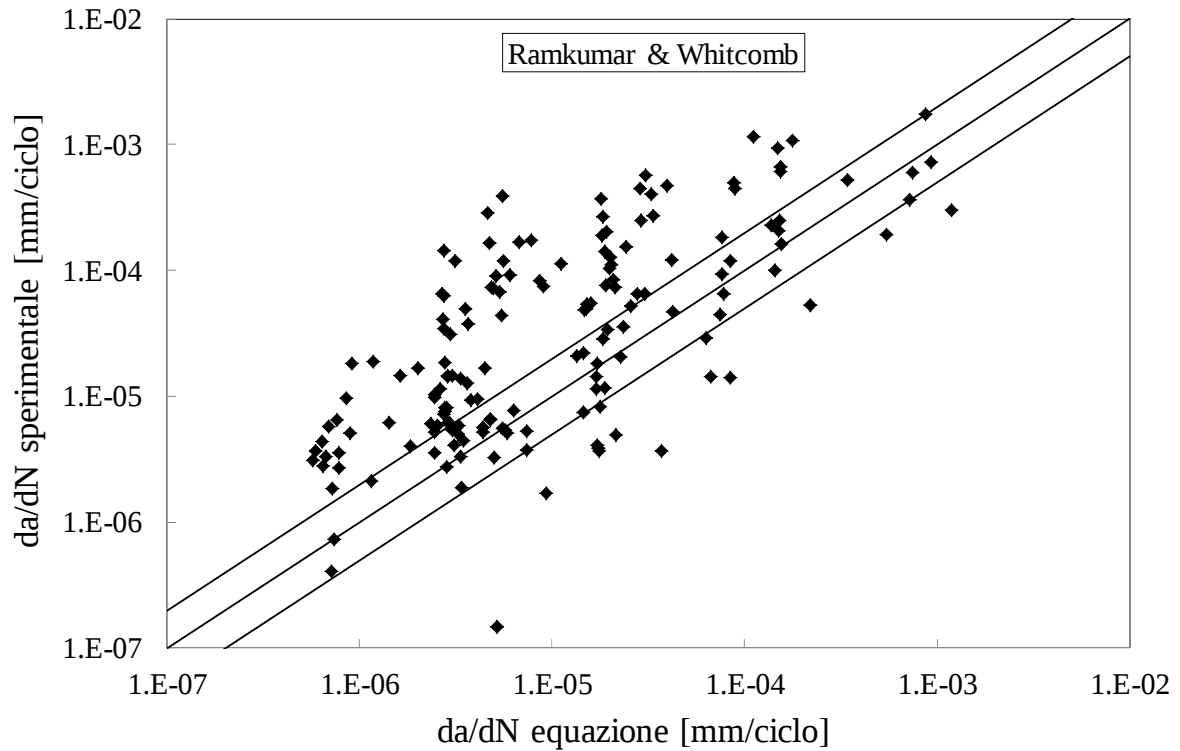


Figura 3.122: confronto della velocità di propagazione da/dN sperimentale (media delle delaminazioni medie con media delle aree medie di danneggiamento per gli S08 soggetti a basso carico e per il provino S05_19) con la velocità di propagazione calcolata tramite equazione (3.2)

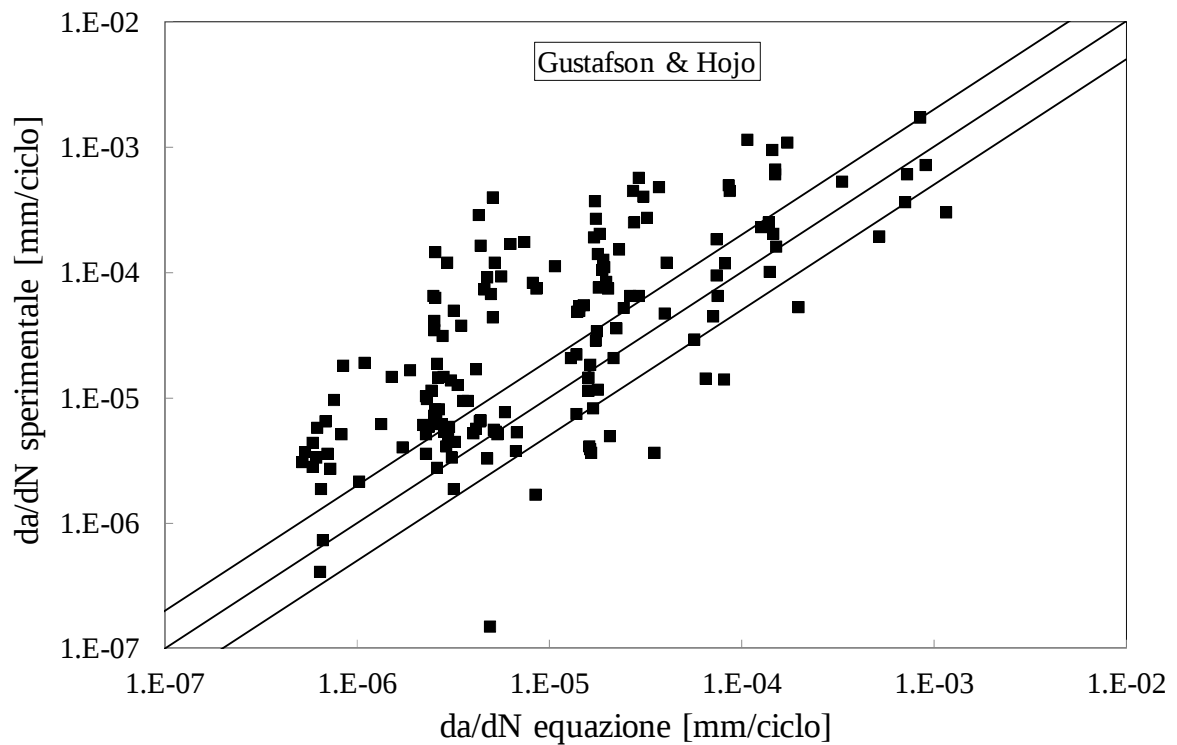


Figura 3.123: confronto della velocità di propagazione da/dN sperimentale (media delle delaminazioni medie con media delle aree medie di danneggiamento per gli S08 soggetti a basso carico e per il provino S05_19) con la velocità di propagazione calcolata tramite equazione (3.3)

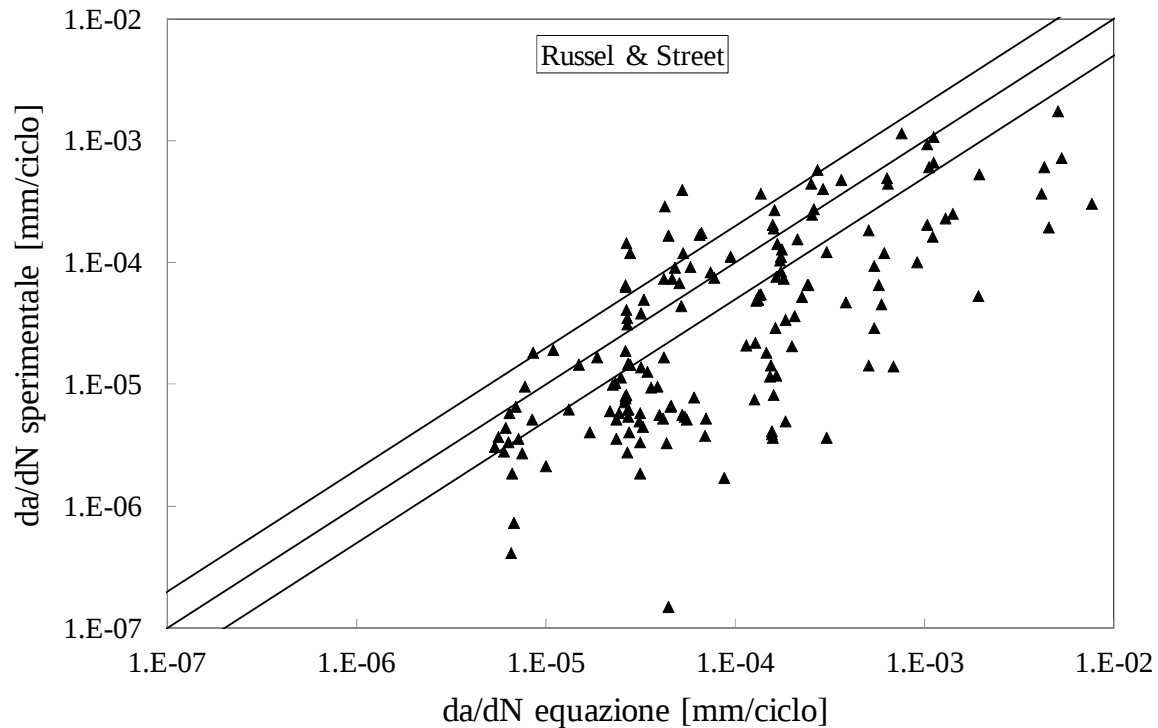


Figura 3.124: confronto della velocità di propagazione da/dN sperimentale (media delle delaminazioni medie con media delle aree medie di danneggiamento per gli S08 soggetti a basso carico e per il provino S05_19) con la velocità di propagazione calcolata tramite equazione (3.4)

MEDIA DELLE DELAMINAZIONI MEDIE CON MEDIA DELLE AREE MEDIE DI DANNEGGIAMENTO PER I PROVINI S08 SOGGETTI A BASSO CARICO E PER IL PROVINO S05_19

Punti in banda			
Quaresimin & Ricotta	Ramkumar & Whitcomb	Gustafson & Hojo	Russel & Street
63	48	49	50
39.375%	30%	30.625%	31.25%

Tabella 3.22: tabella riassuntiva dei confronti tra le velocità di propagazioni sperimentali e quelle calcolate via equazioni per la media delle delaminazioni medie con media delle aree medie di danneggiamento per gli S08 soggetti a basso carico e per il provino S05_19

Come si evince dai valori riportati in tabella la percentuale di punti in banda aumenta nel considerare la media delle aree medie di danneggiamento per i provini sopra citati.

Capitolo 4: ANALISI NUMERICHE SUL BI-MATERIALE

4.1 INTRODUZIONE

Nella sezione finale del capitolo precedente si è identificata come possibile causa dell'elevata dispersione dei dati sperimentali la natura intrinseca del materiale composito essendo questo costituito da strati contenenti fibre diversamente orientate nello spazio. Si è deciso quindi di indagare quest'aspetto al fine di ricercare una sua possibile influenza sulla propagazione della cricca. Dalle rilevazioni sperimentali ([1] Cristanini Simone, 2002-2003) si è osservato che le delaminazioni propagano principalmente tra le varie interfacce della zona di giunzione dove si riscontra un'elevata alternanza dell'orientazione delle fibre costituenti i vari strati del materiale:



Figura 4.1: propagazione della delaminazione in una giunzione stepped-lap in materiale composito ([11] Lunardon, 2004-2005)

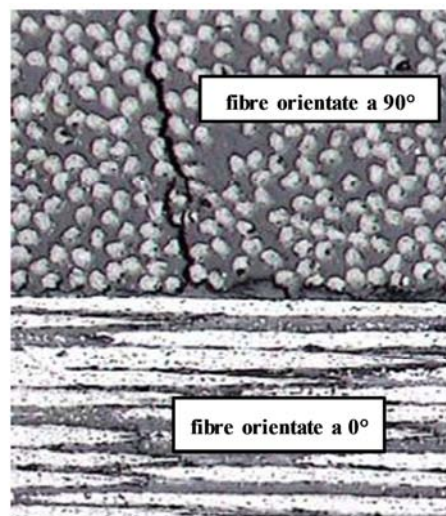


Figura 4.2: cricca tra strati di materiale con fibre diversamente orientate nello spazio ([1] Cristanini, 2002-2003)

Pertanto la cricca non propaga attraverso un materiale omogeneo con caratteristiche ortotrope come considerato per tutte le analisi agli elementi finiti eseguite fin qui, bensì strati di materiale con proprietà diverse.

4.2 DETERMINAZIONE DELLE PROPRIETÀ DEL MATERIALE

Alcune delle proprietà da attribuire per i diversi strati di materiale sono state reperite in letteratura ([13] Broutman, 1990), ([14] Duo Paolo, 2008-2009); è stata poi necessaria una leggera rielaborazione di questi ed un completamento opportuno dei parametri da assegnare in modo da rispettare il vincolo imposto dal codice Ansys 14.0 che la matrice di rigidezza sia definita positiva.

	MATERIALE CON FIBRE ORIENTATE A 0°	MATERIALE CON FIBRE ORIENTATE A 90°	MATERIALE ORTOTROPO
E_x [MPa]	160000	13000	58050
E_y [MPa]	12000	12000	6000
E_z [MPa]	13000	160000	58650
ν_{XY}	0.17	0.17	0.3
ν_{YZ}	0.2	0.018	0.3
ν_{XZ}	0.17	0.018	0.06
G_{XY} [MPa]	500	500	500
G_{YZ} [MPa]	500	500	500
G_{XZ} [MPa]	7170	7170	3300

Tabella 4.1: proprietà del materiale al variare dell'orientazione spaziale delle fibre

4.3 REALIZZAZIONE MODELLO FEM

Definite le proprietà dei vari strati di materiali, prima di imbattersi nella realizzazione di un giunto vero e proprio, sono state condotte delle analisi preliminari in cui le diverse proprietà dei materiali con le fibre orientate a 0° e 90° sono state assegnate

alternativamente al giunto di sinistra (SX) e al giunto di destra (DX) esaurendo tutte le possibili combinazioni:

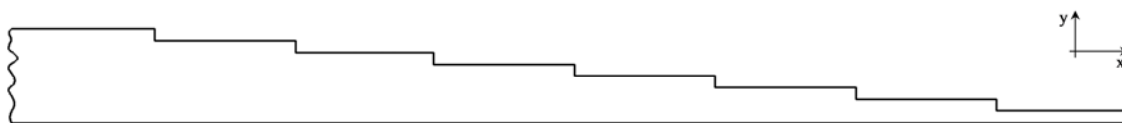


Figura 4.3: giunto SX (zona di giunzione)



Figura 4.4: giunto DX (zona di giunzione)

I risultati di queste analisi sono stati valutati solamente da un punto di vista qualitativo al fine di ricercare possibili variazioni dei valori della componenti del SERR dovute alla differenza di materiale nell'interfaccia di propagazione della cricca.

Gli esiti di queste analisi preliminari hanno evidenziato differenze abbastanza apprezzabili in termini di ΔG e hanno perciò spinto verso la modellazione di un giunto analizzato in ([6] Polloni Simone, 2003-2004). La scelta è ricaduta sul giunto S05_17, soggetto ad alto carico, in quanto dalle immagini delle propagazioni riportate sempre in ([6] Polloni Simone, 2003-2004) è stato possibile ricostruire la tessitura del materiale composito attraverso cui è propagata la delaminazione che ha portato a cedimento il giunto. Considerata quindi solo tale propagazione di cricca ed essendo simmetrica e simultanea nel modello FEM realizzato la tessitura costruita verrà riproposta anche per la parte opposta della scalinatura. La zona di giunzione utilizzata, come per le analisi geometricamente non lineari precedenti, è quella già danneggiata nei soli tratti verticali in accordo con l'analisi sperimentale ([1] Cristanini Simone, 2002-2003):



Figura 4.5: schematizzazione del nuovo modello con la "zona di giunzione danneggiata"

La propagazione risulta quindi ancora una volta così schematizzabile, con la differenza che ora non si considera più “a” come media delle delaminazioni medie o media delle aree medie di danneggiamento ma si considera la cricca vera propagata dal punto 8 (Figura 4.7):

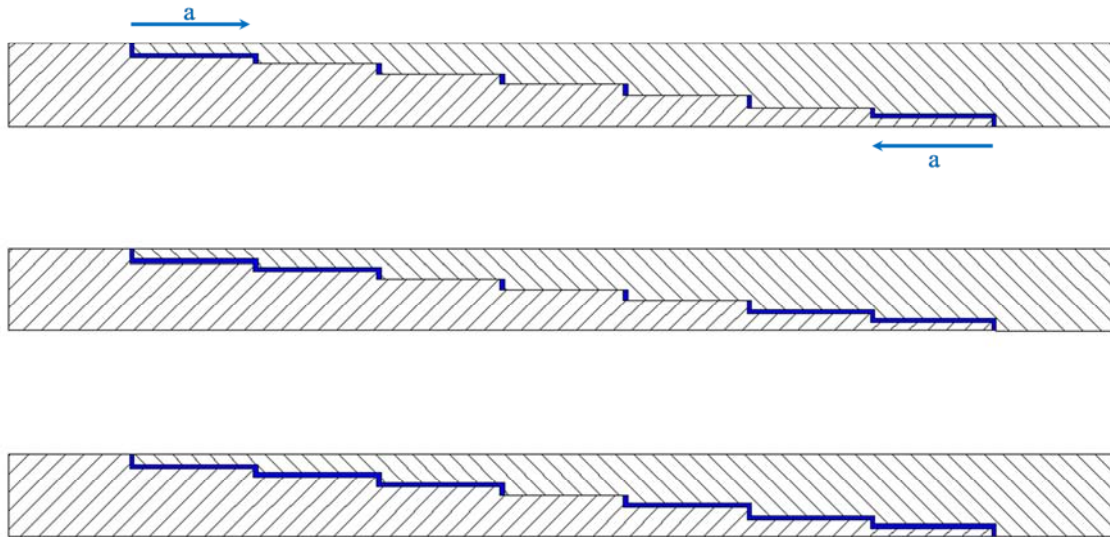


Figura 4.6: schematizzazione della propagazione della delaminazione nella zona di giunzione

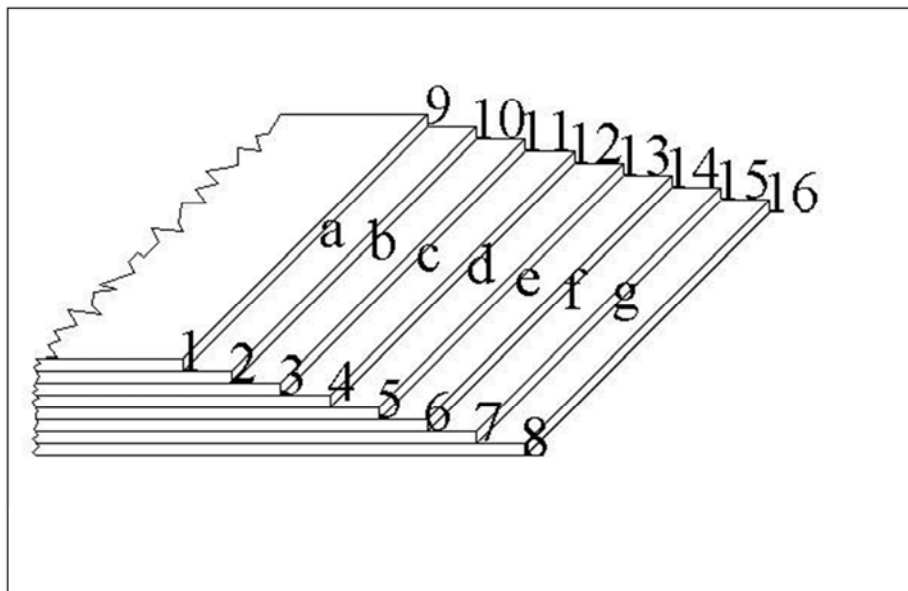


Figura 4.7: numerazione della zona di giunzione



Figura 4.8: punti di giunzione 7, 5, 6 ([6] Polloni Simone, 2003-2004)



Figura 4.9: delaminazione innescata nel punto 8 ([6] Polloni Simone, 2003-2004)

È doveroso far presente che il carattere ondulatorio degli strati di materiale è stato sostituito nel modello agli elementi finiti da sezioni rettangolari per ovvi motivi di semplicità di realizzazione.

Dalle immagini precedenti si riesce grosso modo a ricostruire un quarto della tessitura della zona di giunzione e cioè dal punto 8 al punto 5 con riferimento alla Figura 4.7. Tale struttura del materiale, come detto in precedenza, verrà riproposta per caratterizzare la zona di giunzione anche dal punto 1 al punto 4 per ragioni di simmetria della propagazione.

Per completare la tessitura nella zona di giunzione è stato quindi creato un modulo base caratterizzato dall'alternanza degli strati con le fibre a 0° (verdi) e a 90° (rossi):

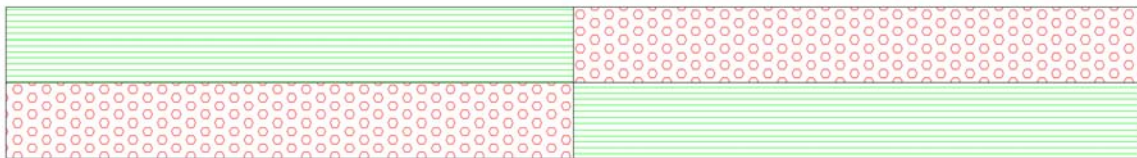


Figura 4.10: modulo base della tessitura

Tramite un opportuno completamento si arriva infine alla definizione di metà della zona di giunzione caratterizzata dall'alternanza dei diversi strati di materiale che approssima quella reale del provino S05_17, se pur in maniera semplificata e con alcune assunzioni sul completamento della stessa tramite il modulo base (Figura 4.11) derivanti anche dall'analisi di quanto riportato in ([14] Duo Paolo, 2008-2009).

Il completamento della zona di giunzione si ottiene ricopiando a destra ed anti-simmetricamente tale tessitura.

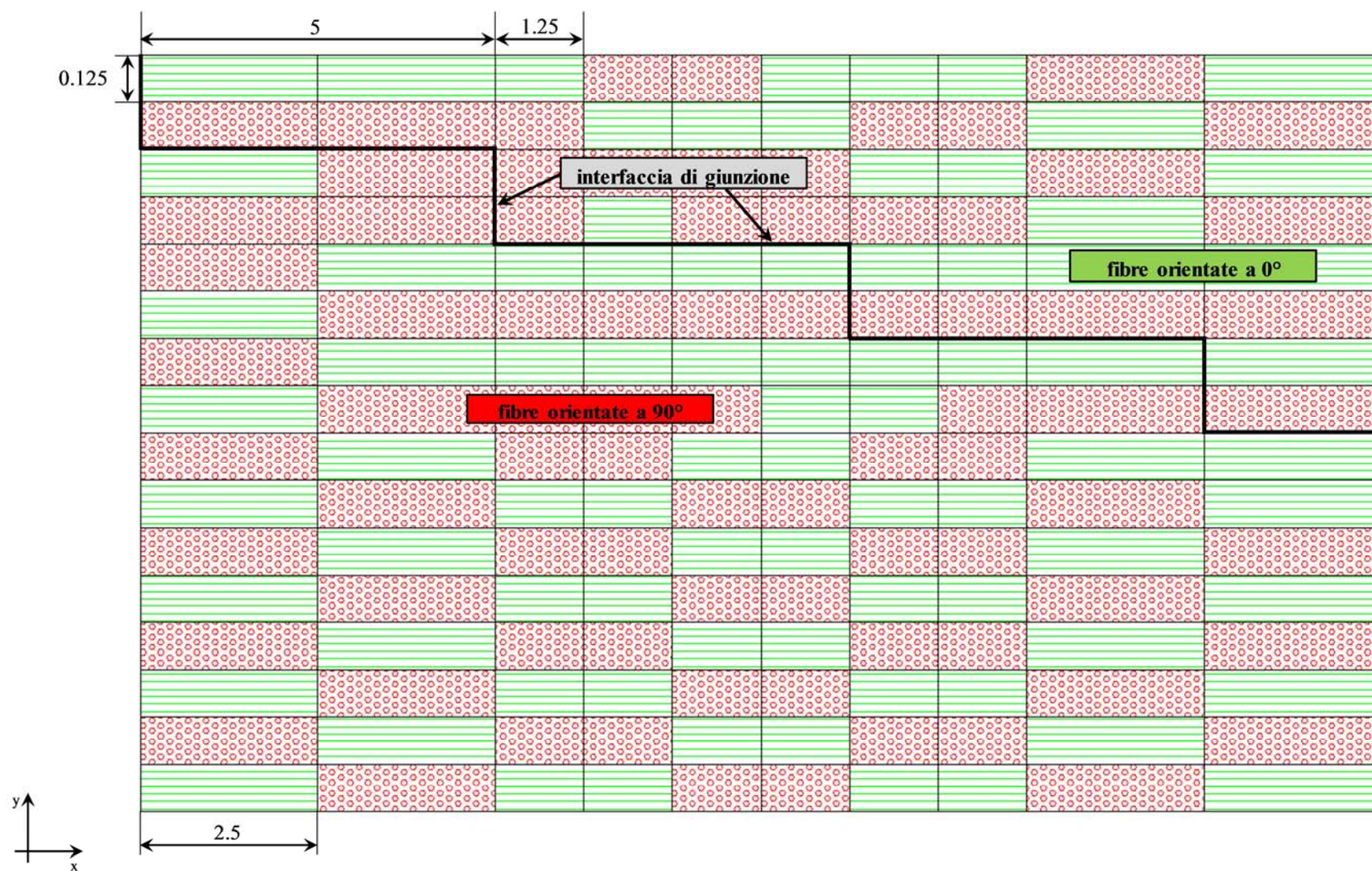


Figura 4.11: rappresentazione della tessitura di metà della zona di giunzione

Per realizzare questa tessitura nel modello FEM è stato necessario costruire un reticolo prima della creazione delle aree ed è stato realizzato un file log apposito riportato in appendice B. La costruzione del reticolo è avvenuta separatamente per il giunto SX e per il giunto DX come lo è stata per quest'ultimi (capitolo 2). Una volta realizzate tutte le aree il processo di meshatura delle aree deve esser effettuato manualmente e solo allora è possibile lanciare l'APDL che va a realizzare i vari set di *coupled degrees of freedom* per i nodi giacenti sull'interfaccia di giunzione (capitolo 2). Per poter confrontare i risultati di queste analisi ora anche da un punto di vista quantitativo si è deciso di condurre analisi geometricamente non lineari e quindi rapportare le componenti del SERR così ottenute con quelle calcolate in precedenza per il materiale ortotropo (capitolo 2). Ultimata l'analisi si procede richiamando l'ultima parte del programma creato che restituisce in output i valori necessari per calcolare le componenti ΔG_I e ΔG_{II} ed i valori degli spostamenti nodali all'estremo di applicazione del carico. Si osserva che per le parti esterne del giunto e cioè quelle comprese tra la zona di giunzione e le tab di afferraggio si è adottato ancora una volta il materiale ortotropo in quanto un'operazione come quella descritta precedentemente e cioè la costruzione di un reticolo non è realizzabile ingegneristicamente parlando. Tuttavia per far sì che il passaggio non fosse troppo brusco il reticolo è stato esteso pre e post-zona di giunzione per una lunghezza pari al doppio del modulo base .

4.4 ANALISI FEM GEOMETRICAMENTE NON LINEARI

Sono dunque state condotte diverse analisi geometricamente non lineari per caratterizzare la propagazione lungo la prima interfaccia dove si sono riscontrate due diverse configurazioni per quanto riguarda l'orientazione delle fibre costituenti gli strati del materiale a cavallo dell'interfaccia di giunzione:

- 1) Fibre a 0° per lo strato di materiale del giunto SX – fibre a 90° per lo strato di materiale del giunto di DX;
- 2) Fibre a 90° per lo strato di materiale del giunto SX – fibre a 90° per lo strato di materiale del giunto di DX.

Si riportano di seguito i risultati di tali analisi confrontati con l'andamento delle componenti del SERR calcolate per il giunto con lunghezza di sovrapposizione pari a 5 mm in materiale ortotropo soggetto ad alto carico:

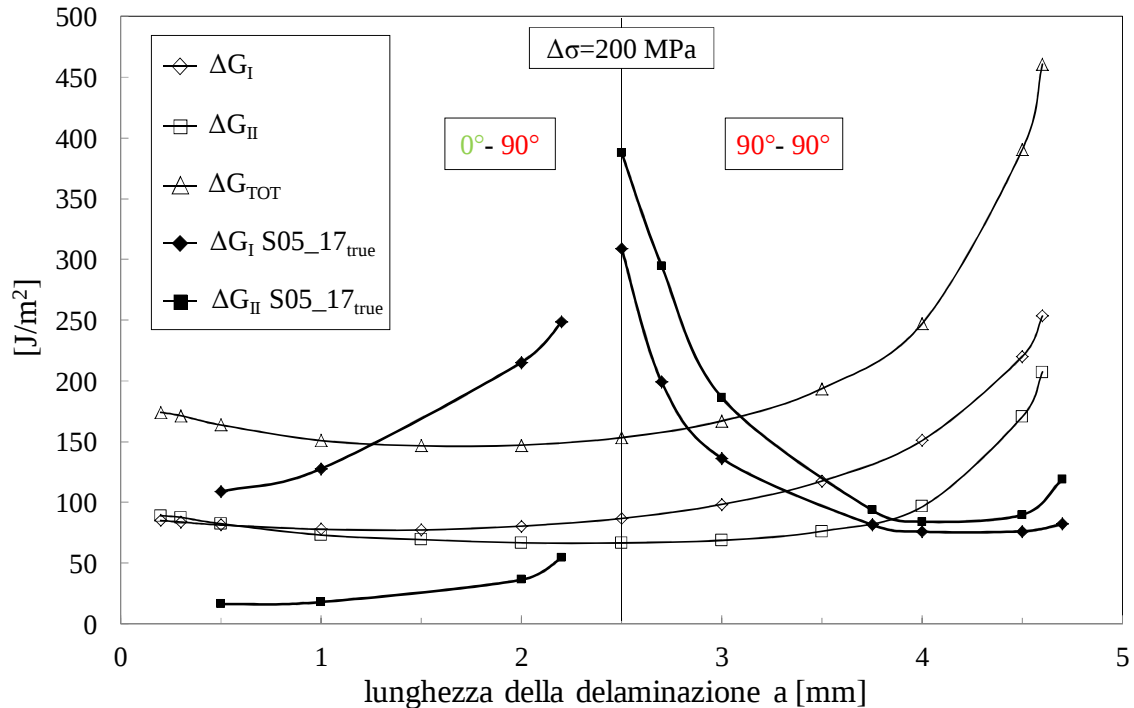


Figura 4.12: confronto tra gli andamenti delle componenti del SERR calcolate per materiale omogeneo ortotropo e per il caso di bi-materiale lungo la prima interfaccia al propagare della delaminazione, lunghezza di sovrapposizione $w=5$, $\Delta\sigma=200$ MPa (alto carico), analisi geometricamente NON LINEARI

Si osserva immediatamente come l'andamento delle componenti del SERR calcolate nella configurazione bi-materiale nella zona di giunzione cambi notevolmente aspetto. Per quanto riguarda i primi 2.5 mm nei quali si ha propagazione tra fibre a 0° e fibre a 90° si registra un trend simile anche se ora ΔG_I è notevolmente maggiore rispetto a ΔG_{II} e anche rispetto al ΔG_I calcolato con materiale ortotropo; inoltre all'avvicinarsi della propagazione verso il cambio di orientazione delle fibre degli strati all'interfaccia, che si ha per 2.5 mm, si registra un rapido aumento mentre nell'ipotesi di materiale ortotropo le componenti del SERR sono abbastanza stazionarie. Nella propagazione della cricca attraverso un'interfaccia costituita da strati di materiale con fibre orientate a 0° e a 90° risulta essere il Modo I il fattore che più influenza la dinamica del danneggiamento. Ancor più interessante è quanto riscontrato nella propagazione tra strati di materiale entrambi con fibre orientate a 90° ; infatti per questa configurazione l'andamento è praticamente opposto

rispetto a quello ottenuto per il materiale ortotropo e cioè decrescente, con un accenno di cambio di trend a ridosso del passaggio della delaminazione tra prima e seconda interfaccia; inoltre si nota come sia ora il Modo II il fattore predominante nella dinamica del danneggiamento. L'andamento decrescente di ΔG_I e ΔG_{II} sembrerebbe indicare che una volta criccata l'interfaccia 90° - 90° , istante a cui corrisponde il picco dei valori di ΔG_I e ΔG_{II} , all'avanzare della propagazione attraverso questi due strati di materiale il giunto ne risenta sempre meno, come si verificava tra l'altro per le prime analisi effettuate, realizzate con il modello a "zona di giunzione integra". Tali andamenti delle componenti del SERR si possono spiegare considerando un ulteriore banco di analisi agli elementi finiti; infatti nella fase di meshatura di una di queste analisi è stata sbagliata l'assegnazione delle proprietà allo strato di materiale evidenziato nella figura successiva:

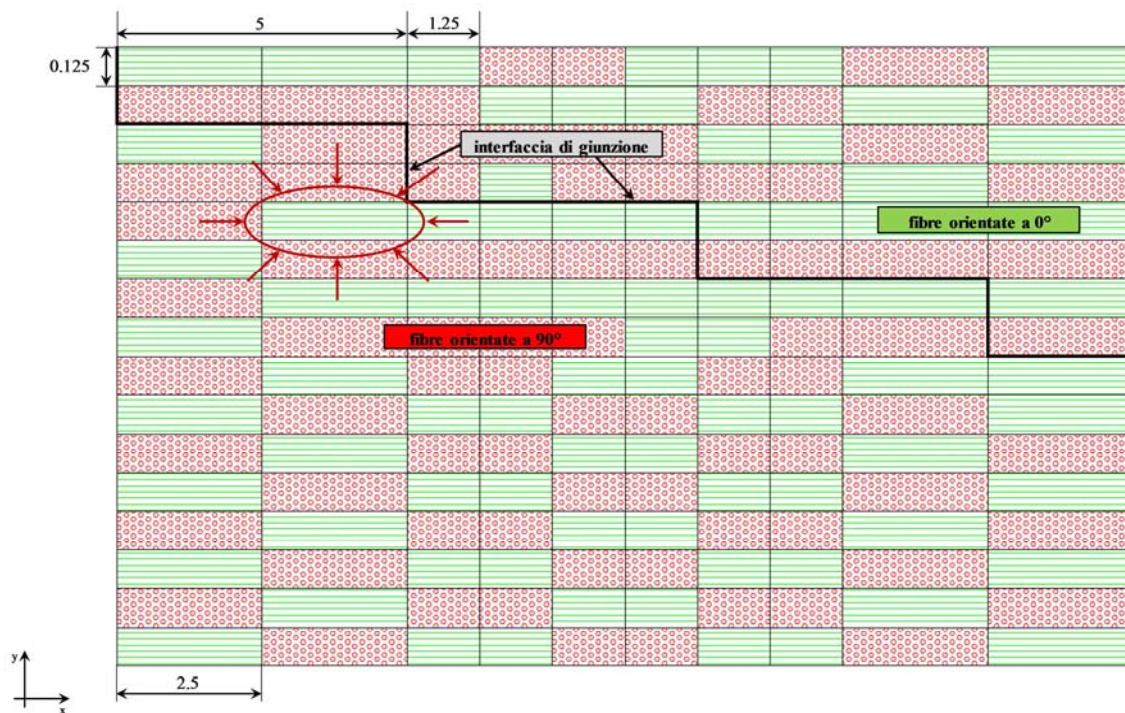


Figura 4.13: rappresentazione della tessitura di metà della zona di giunzione

A tale area anziché le proprietà relative alle fibre orientate a 0° sono state assegnate quelle relative alle fibre orientate a 90° (Figura 4.14) comportando un aumento del valore delle componenti del SERR. Si è deciso pertanto di condurre altre analisi "sbagliate" per indagare il comportamento della giunzione al propagare della delaminazione tra strati di materiale con fibre diversamente orientate nello spazio con questa configurazione errata di assegnazione delle proprietà del materiale (Figura 4.15).

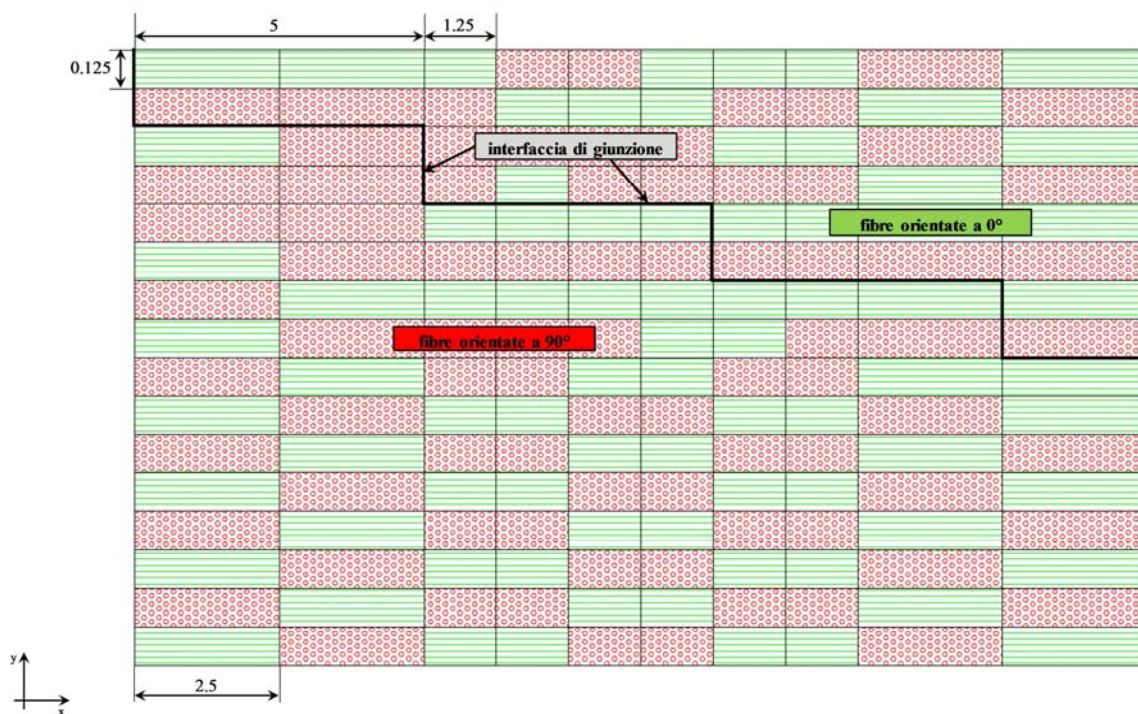
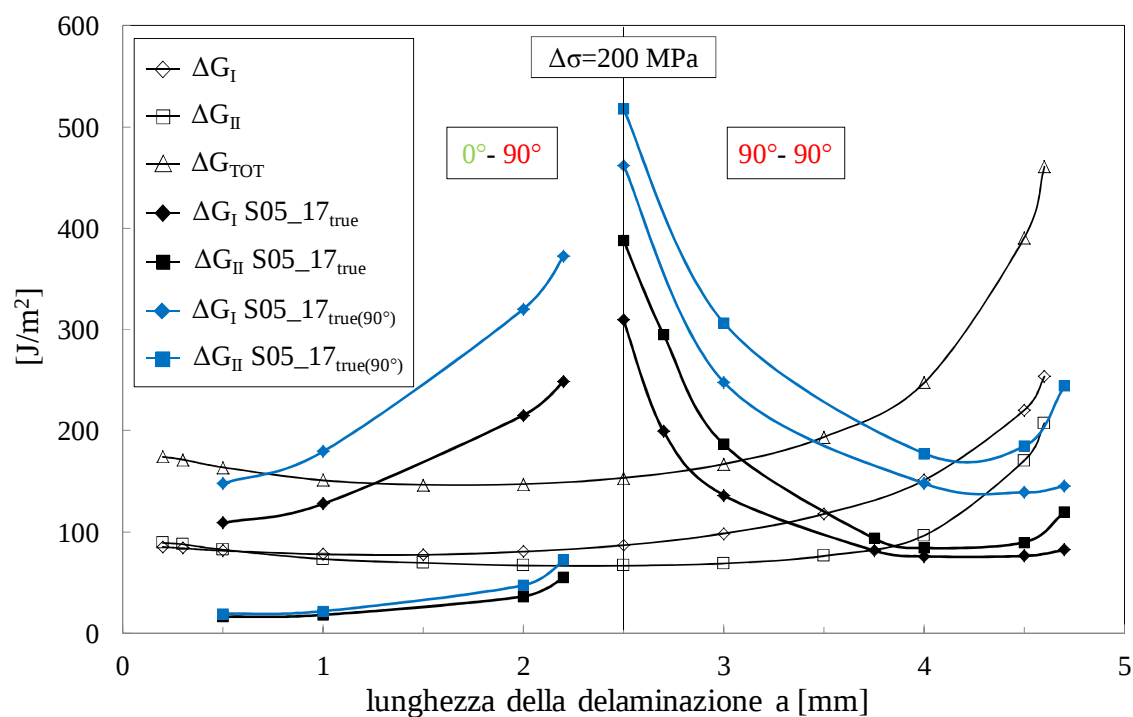


Figura 4.14: rappresentazione della tessitura di metà della zona di giunzione con errore di meshatura


 Figura 4.15: confronto tra gli andamenti delle componenti del SERR calcolate per materiale omogeneo ortotropo, per il caso di bi-materiale e per il caso di bi-materiale con errore nell'assegnazione delle proprietà lungo la prima interfaccia al propagare della delaminazione, lunghezza di sovrapposizione $w=5$, $\Delta\sigma=200$ MPa (alto carico), analisi geometricamente NON LINEARI

Quello che si ottiene dai risultati di queste analisi è sostanzialmente una traslazione in alto delle curve di ΔG_I e ΔG_{II} . Ciò porta ad osservare che lo strato a 0° ora mancante assorbiva parte della sollecitazione durante la propagazione della cricca tra gli strati entrambi con le fibre orientate a 90° . Infatti tanto più gli strati del materiale presentano fibre orientate in direzione dell'applicazione del carico tanto più la resistenza di questi aumenta.

Da questi risultati si può dedurre quindi che lo strato a 0° , ora mancante, assorbiva sempre più una quota parte maggiore della sollecitazione al propagare della delaminazione giustificando così l'andamento decrescente delle componenti del SERR misurate all'avanzare dell'apice della cricca lungo il tratto di interfaccia caratterizzato da strati di materiale con orientazione diverse delle fibre che li costituiscono. Per verificare quanto appena detto è stato rilevato l'andamento delle forze in corrispondenza del nodo iniziale della seconda interfaccia come evidenziato nella figura seguente:

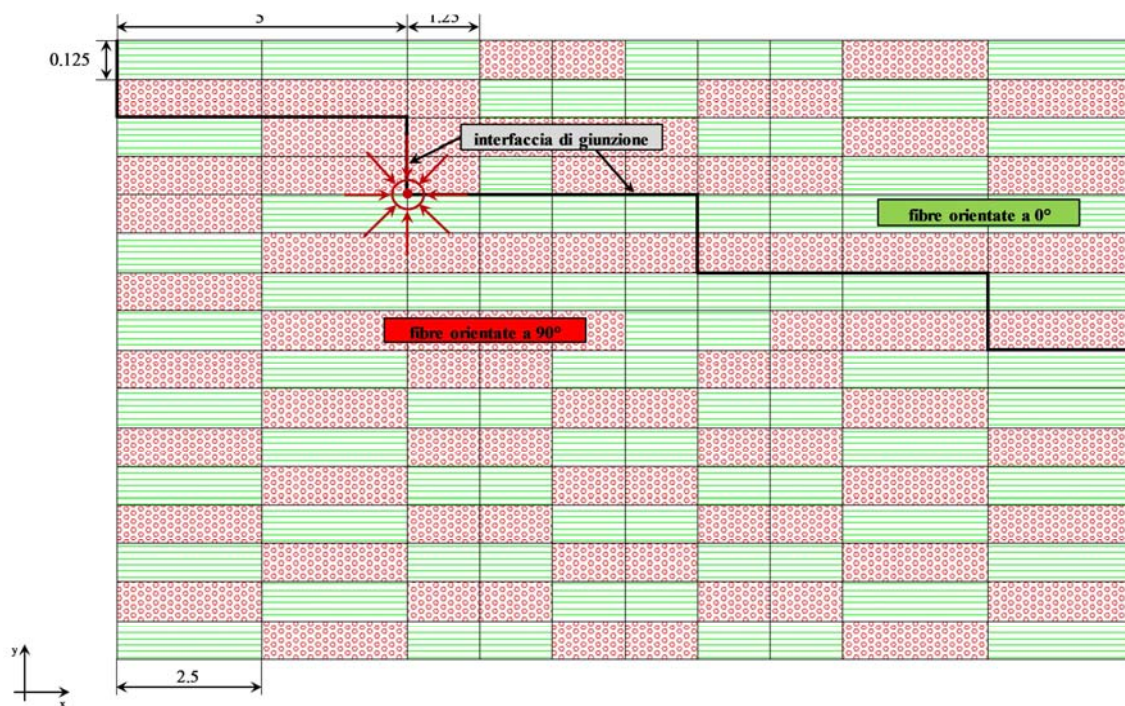


Figura 4.16: nodo di rilevazione delle forze

Come evidenziato dal grafico successivo l'andamento di tali forze è tendenzialmente crescente.

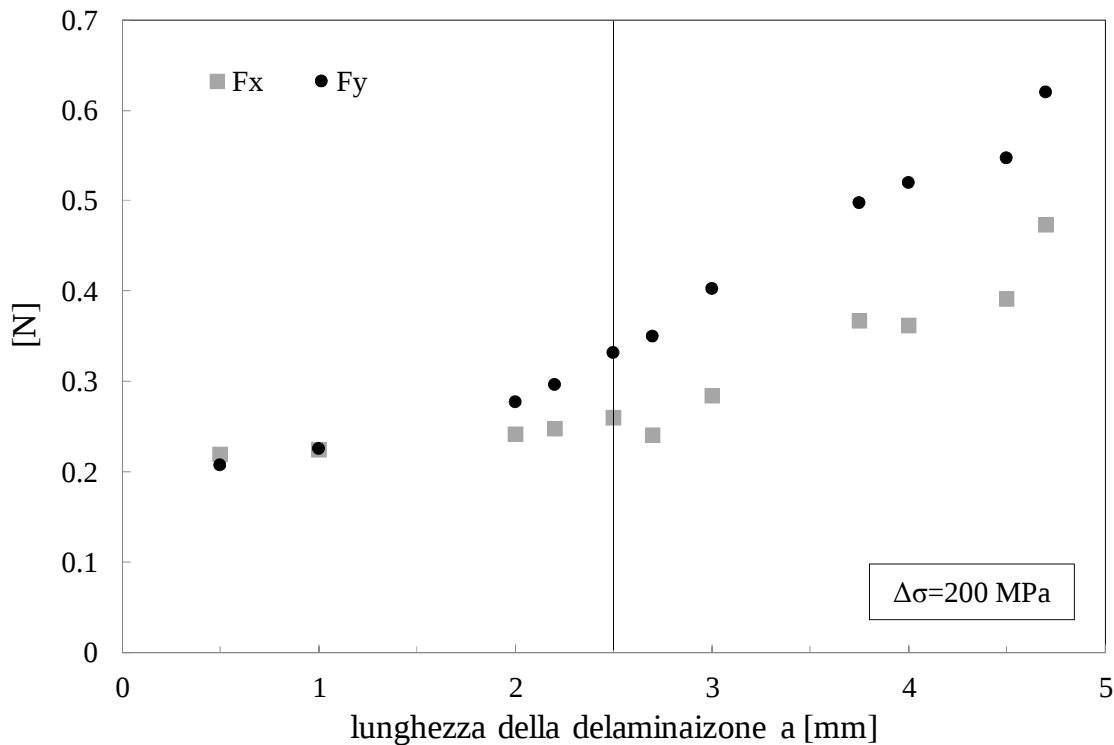


Figura 4.17: andamento delle forze in corrispondenza del nodo iniziale della seconda interfaccia

Il fatto che aumentino le forze in corrispondenza del nodo posizionato all'inizio della seconda interfaccia potrebbe giustificare l'innescio e quindi la successiva propagazione di una cricca a partire proprio da questo punto, provocando magari contemporaneamente l'arresto della delaminazione che fino a quell'istante stava avanzando in corrispondenza dell'interfaccia precedente. Questo fenomeno, consistente nel discontinuo avanzare delle cricche nella zona di giunzione del provino, si può osservare frequentemente nelle analisi sperimentali riportate in ([6] Polloni Simone, 2003-2004).

In conclusione il tentativo di approssimare la tessitura del materiale composito nelle analisi agli elementi finiti mette in luce come questa non sia una strada percorribile nella ricerca di un metodo in grado di caratterizzare questo tipo di giunti in quanto qualsiasi variazione nella tessitura stessa, anche minima, provoca variazioni nelle componenti del SERR che si traducono appunto nell'elevata dispersione dei risultati sperimentali (capitolo 3). Non bisogna dimenticare che i giunti stepped-lap oltre ad essere costituiti da strati di materiale

con le fibre diversamente orientate nello spazio presentano zone più o meno ricche di resina, caratteristica propria del materiale (non considerata in questa trattazione), che sicuramente influenzano ulteriormente la propagazione e quindi il comportamento della giunzione.

Capitolo 5: ANALISI NUMERICHE SU GIUNTI STEPPED-LAP CON MESH GROSSOLANE

5.1 INTRODUZIONE

In questo capitolo ci si propone di realizzare una metodologia di calcolo “semplificata” che permetta comunque di ottenere dei risultati con un buon grado di approssimazione. Tale metodologia si basa sul calcolo della componente del SERR ΔG_{TOT} tramite la misurazione degli spostamenti nodali all’estremo di applicazione del carico.

Infatti per il calcolo di ΔG_{TOT} , oltre alla tecnica utilizzata precedentemente del VCCT, tramite la quale con una singola analisi si possono ottenere i valori di ΔG_I e ΔG_{II} per una certa propagazione della cricca (capitolo 2) e quindi effettuare la somma di questi due contributi pervenendo così alla componente totale dello *Strain Energy Release Rate*, si possono utilizzare gli spostamenti nodali all’estremo di applicazione della forza. Con questi si può risalire alla variazione di cedevolezza globale del campione permettendo così il calcolo di $\Delta G_{TOT,ext}$ tramite la seguente relazione:

$$\Delta G_{TOT,ext} = \frac{P^2}{2B} \frac{\partial c}{\partial a} \quad (5.1)$$

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 appunto la variazione di cedevolezza del giunto al propagare della cricca lungo l’interfaccia di giunzione. Questa equazione, oltre a fornire una verifica del risultato ottenuto tramite la tecnica del VCCT, la quale utilizza parametri strettamente locali, permette di effettuare una misurazione di quanto succede localmente, e cioè all’apice della cricca, tramite l’utilizzo di parametri globali come il carico applicato e la variazione di cedevolezza globale del pezzo.

Come già menzionato, parlando di frattura interlaminare è consuetudine prendere in considerazione la quota di rilascio dell’energia di deformazione G (*Strain Energy Release Rate*, *SEER*), che è un valore basato su considerazioni energetiche ed è sia matematicamente ben definito e sia fisicamente ben misurabile per via sperimentale.

5.2 QUOTA DI RILASCIO DELL'ENERGIA DI DEFORMAZIONE

L'approccio energetico, che affonda le sue radici nelle trattazioni di Griffith ([17] Griffith A.A., 1924), è basato sul primo principio della termodinamica tenendo presente in relazione alla frattura, da un lato l'energia di deformazione del sistema disponibile per la crescita della cricca, e dall'altro l'energia consumata per estendere una cricca già esistente. Griffith trovò che la causa dominante del consumo di energia durante la propagazione della cricca in sistemi fragili è l'energia necessaria per la creazione di un'ulteriore superficie di frattura. Nei materiali compositi numerosi micro-meccanismi di assorbimento di energia contribuiscono ad ottenere questo risultato macroscopico: la formazione di fratture sulla superficie della cricca principale; la deformazione plastica della matrice nella regione all'apice della cricca; micro-cricche e cricche secondarie; il *bridging effect*, cioè l'effetto ponte di fibre che collegano la superficie della cricca.

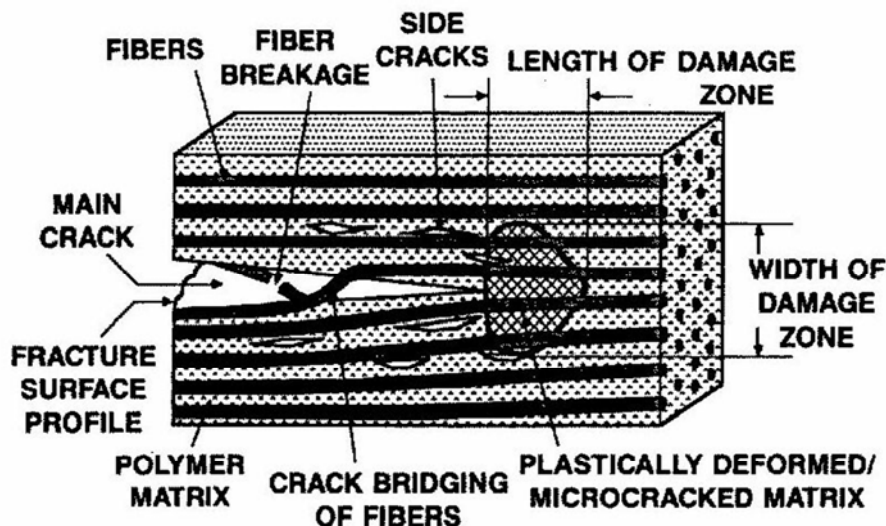


Figura 5.1: Principali meccanismi di assorbimento di energia in presenza di frattura interlaminare in compositi unidirezionali ([18] Pagano N. J.)

Per un corpo criccato si può definire un'energia potenziale H come:

$$H = W - U \quad (5.2)$$

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

Se G_c è il lavoro richiesto per creare un'unità di area criccata, è possibile formulare un criterio per la crescita della cricca:

$$\delta H \geq G_c \delta A \quad (5.3)$$

Dove δA è l'incremento di area criccata, e quindi il secondo membro esprime l'energia necessaria per formare una nuova superficie di frattura.

La condizione limite si presenta quando l'energia netta fornita eguaglia l'energia richiesta, cioè quando:

$$\delta H = G_c \delta A \quad (5.4)$$

L'equilibrio diventa invece instabile quando l'energia netta fornita eccede il lavoro necessario alla frattura o analogamente la resistenza alla propagazione della cricca:

$$\delta H > G_c \delta A \quad (5.5)$$

la quota di rilascio dell'energia di deformazione G può essere definita come:

$$G = \frac{\delta H}{\delta A} \quad (5.6)$$

ed in termini di G il criterio di frattura potrebbe essere così formulato:

$$G \geq G_c \quad (5.7)$$

La maggior parte dei provini utilizzati nelle prove di frattura interlaminare presentano uno spessore costante h . Il valore dell'area della nuova cricca superficiale δA è quindi $\delta A = h \delta a$, dove δa è l'incremento della lunghezza della cricca che è misurato durante le prove di frattura. La quota di rilascio dell'energia di deformazione G può essere espressa come:

$$G = \frac{\delta H}{h \delta A} \quad (5.8)$$

Consideriamo ora una piastra criccata di spessore B sottoposta ad un carico P , e la relazione tra carico P e spostamento u (*spostamento nel punto di applicazione del carico*) per una cricca di lunghezza a e di lunghezza $a + \delta a$. Fintanto che non c'è una propagazione della cricca, esiste una determinata proporzionalità tra carico e spostamento:

$$u = CP \quad (5.9)$$

Dove C è la cedevolezza del corpo criccato. Il lavoro fornito dal movimento del carico P è:

$$W = \int_0^u P du \quad (5.10)$$

E l'energia elastica accumulata nel corpo è:

$$U = \frac{1}{2} Pu = \frac{1}{2} CP^2 \quad (5.11)$$

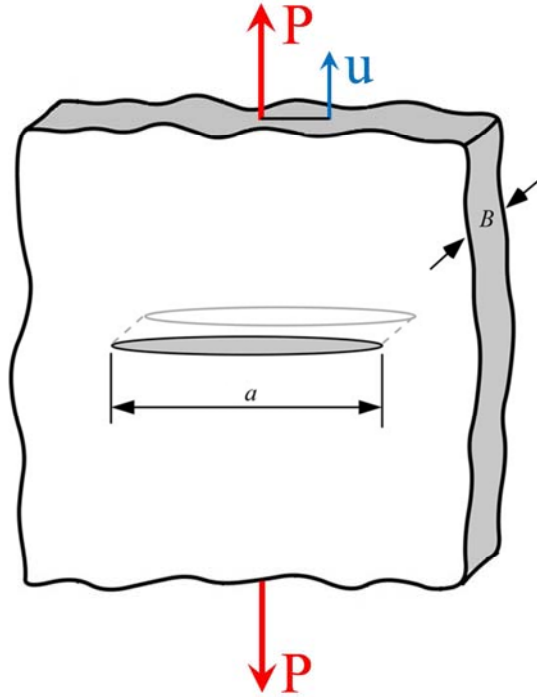


Figura 5.2: piastra criccata

Se ora invece consideriamo una crescita infinitesima della cricca δa , utilizzando le equazioni (5.2) (5.8) e la (5.10) otteniamo:

$$G = \frac{\delta(W - U)}{B \delta A} = \frac{\delta(\int_0^u P du - U)}{B \delta A}$$

$$G = \frac{1}{B} \left(P \frac{du}{da} - \frac{dU}{da} \right) \quad (5.12)$$

Sostituendo quindi $u=CP$ nell'equazione precedente si ottiene:

$$G = \frac{1}{B} \left(P^2 \frac{\partial C}{\partial a} + PC \frac{\partial P}{\partial a} - \frac{1}{2} P^2 \frac{\partial C}{\partial a} - CP \frac{\partial P}{\partial a} \right) \quad (5.13)$$

Da cui risulta appunto la (5.1):

$$G = \frac{P^2}{2B} \frac{\partial c}{\partial a}$$

Quindi a questo parametro energetico, che descrive cosa sta succedendo localmente all'apice della cricca, si può pervenire tramite l'utilizzo di parametri globali come la forza applicata, lo spessore del campione e la variazione di cedevolezza globale del pezzo che si ottiene dalla misurazione degli spostamenti nel punto di applicazione della forza.

5.3 ANALISI FEM GEOMETRICAMENTE NON LINEARI

In tutte le analisi condotte nel capitolo 2 è stato sempre effettuato il calcolo del $\Delta G_{TOT,ext}$ tramite la (5.1) ed è stato confrontato con il ΔG_{TOT} ottenuto dalla somma delle componenti ΔG_I e ΔG_{II} calcolate tramite la tecnica del VCCT.

- *Overlap* $w=3$ mm

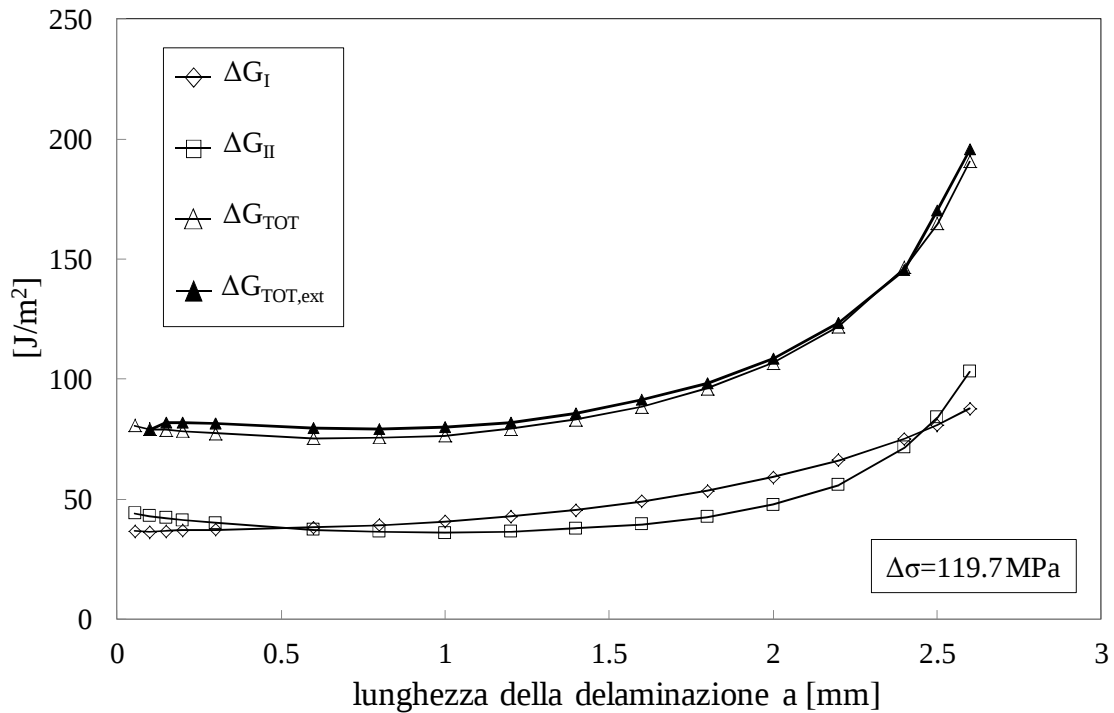


Figura 5.3: andamento delle componenti del SERR e confronto tra il ΔG_{TOT} calcolato come somma delle componenti ΔG_I ΔG_{II} ed il ΔG_{TOT} calcolato tramite l'eq.ne (5.1) lungo la prima interfaccia al propagare della delaminazione, lunghezza di sovrapposizione $w=3$, $\Delta\sigma=119.7$ MPa (basso carico), analisi geometricamente NON LINEARI

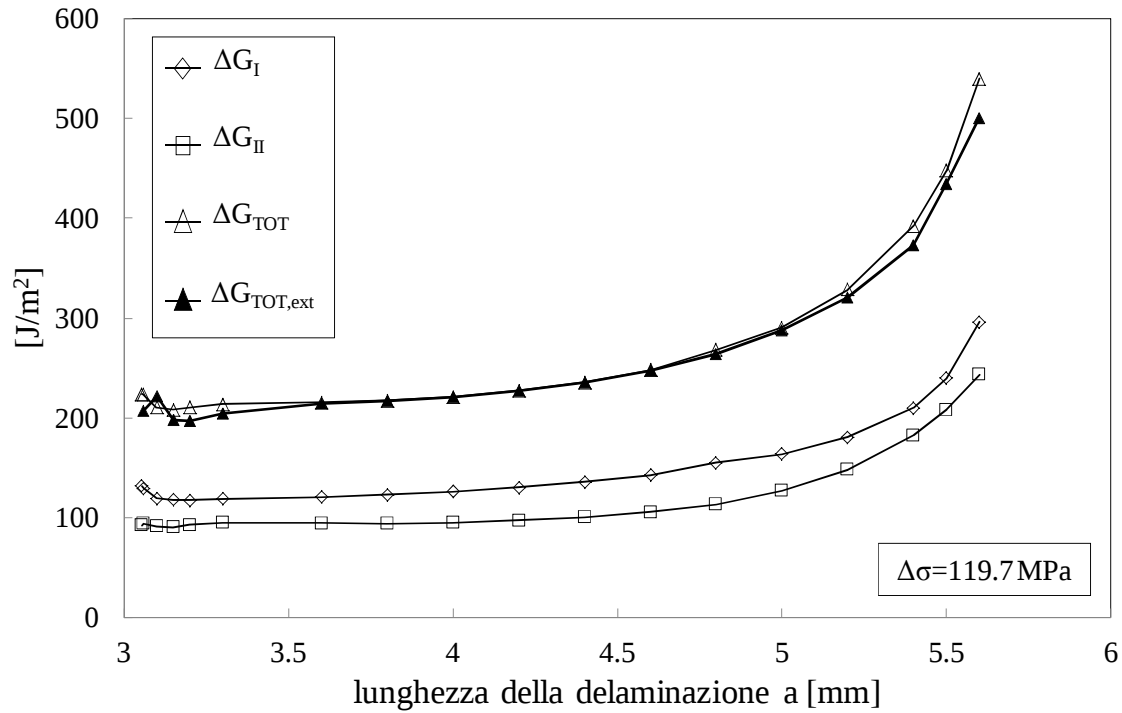


Figura 5.4: andamento delle componenti del SERR e confronto tra il ΔG_{TOT} calcolato come somma delle componenti ΔG_I , ΔG_{II} ed il ΔG_{TOT} calcolato tramite l'eq.ne (5.1) lungo la seconda interfaccia al propagare della delaminazione, lunghezza di sovrapposizione $w=3$, $\Delta\sigma=119.7$ MPa (basso carico), analisi geometricamente NON LINEARI

Si osserva che l'accordo tra i due approcci migliora sensibilmente al diminuire dell'intervallo di propagazione considerato nel calcolo della variazione di cedevolezza globale del campione $\frac{\partial c}{\partial a}$. Inoltre si precisa che tale variazione di cedevolezza è stata calcolata misurando gli incrementi dello spostamento nodale in corrispondenza dell'interfaccia interessata dalla propagazione della delaminazione.

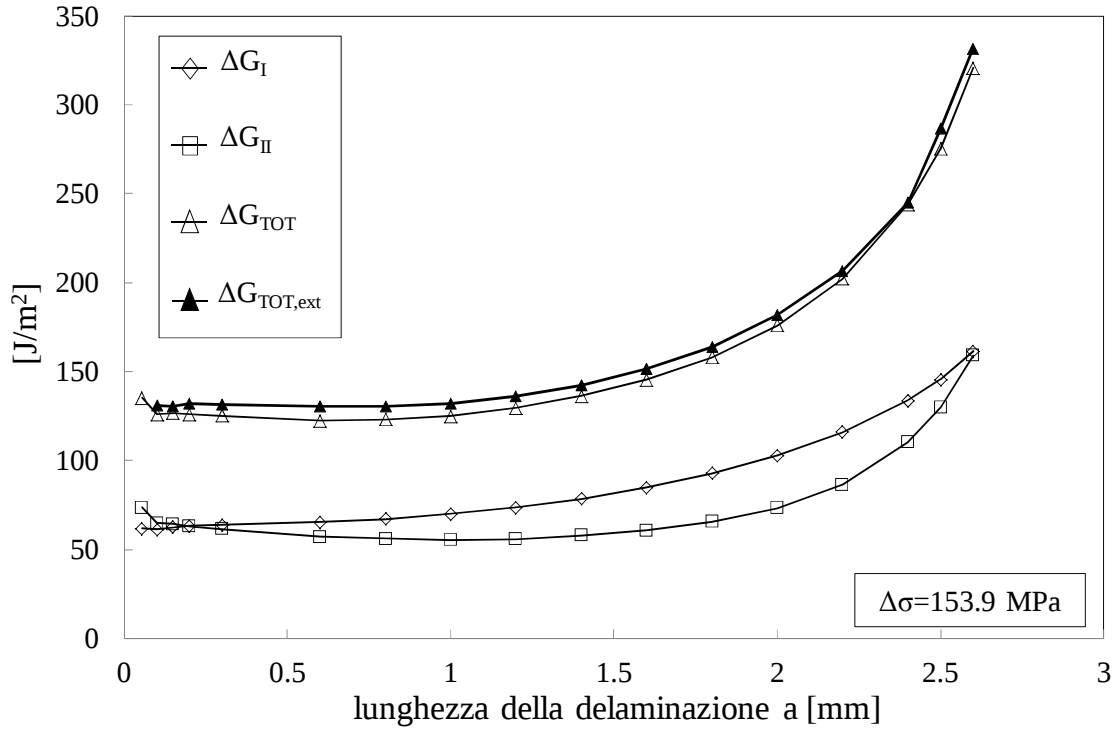


Figura 5.5: andamento delle componenti del SERR e confronto tra il ΔG_{TOT} calcolato come somma delle componenti ΔG_I e ΔG_{II} ed il ΔG_{TOT} calcolato tramite l'eq.ne (5.1) lungo la prima interfaccia al propagare della delaminazione, lunghezza di sovrapposizione $w=3$, $\Delta\sigma=153.9$ MPa (alto carico), analisi geometricamente NON LINEARI

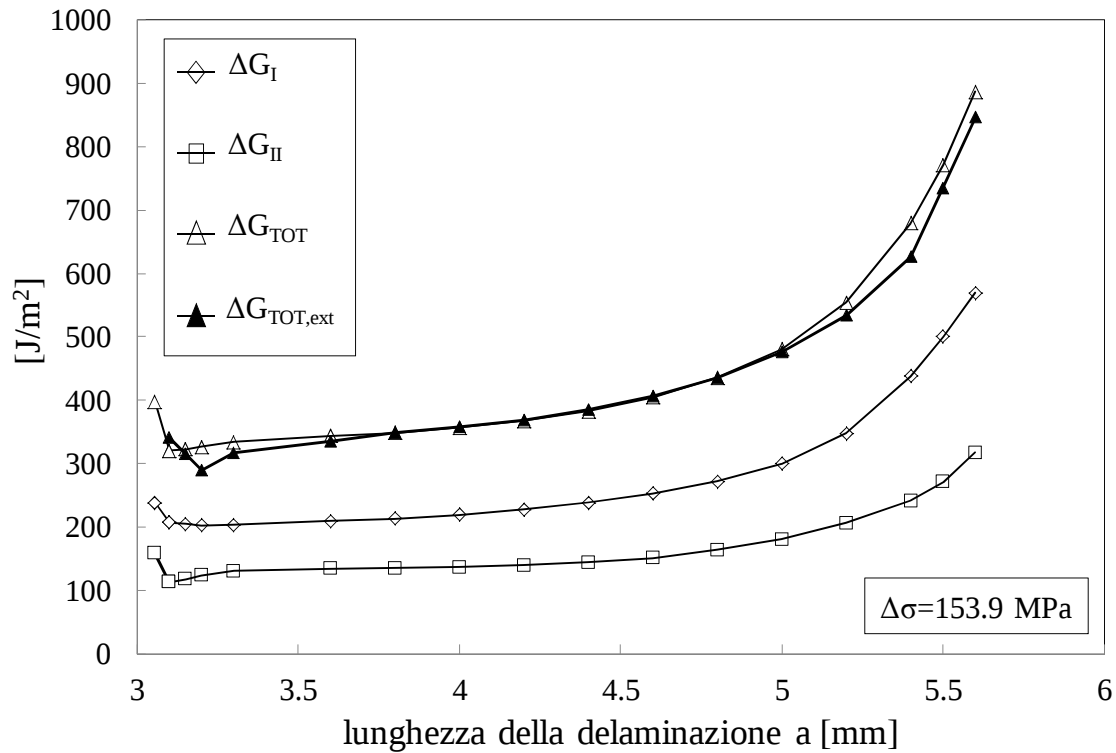


Figura 5.6: andamento delle componenti del SERR e confronto tra il ΔG_{TOT} calcolato come somma delle componenti ΔG_I e ΔG_{II} ed il ΔG_{TOT} calcolato tramite l'eq.ne (5.1) lungo la prima interfaccia al propagare della delaminazione, lunghezza di sovrapposizione $w=3$, $\Delta\sigma=153.9$ MPa (alto carico), analisi geometricamente NON LINEARI

- *Overlap* $w=5$ mm

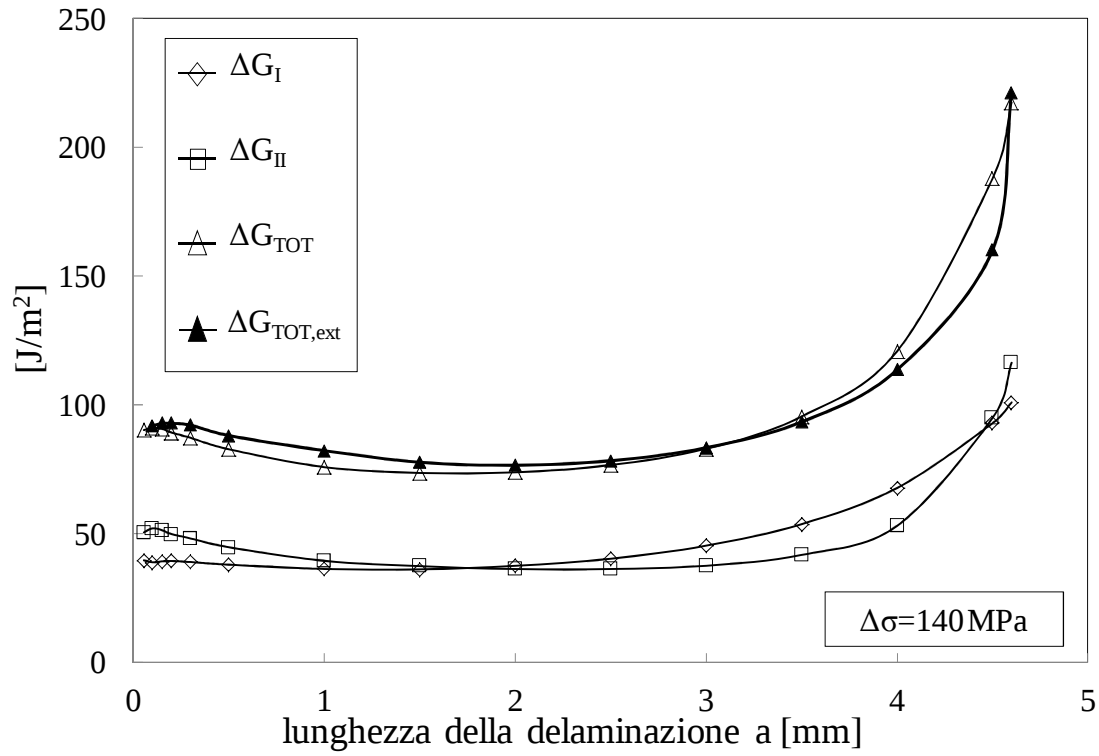


Figura 5.7: andamento delle componenti del SERR e confronto tra il ΔG_{TOT} calcolato come somma delle componenti ΔG_I ΔG_{II} ed il ΔG_{TOT} calcolato tramite l'eq.ne (5.1) lungo la prima interfaccia al propagare della delaminazione, lunghezza di sovrapposizione $w=5$, $\Delta\sigma=140$ MPa (basso carico), analisi geometricamente NON LINEARI

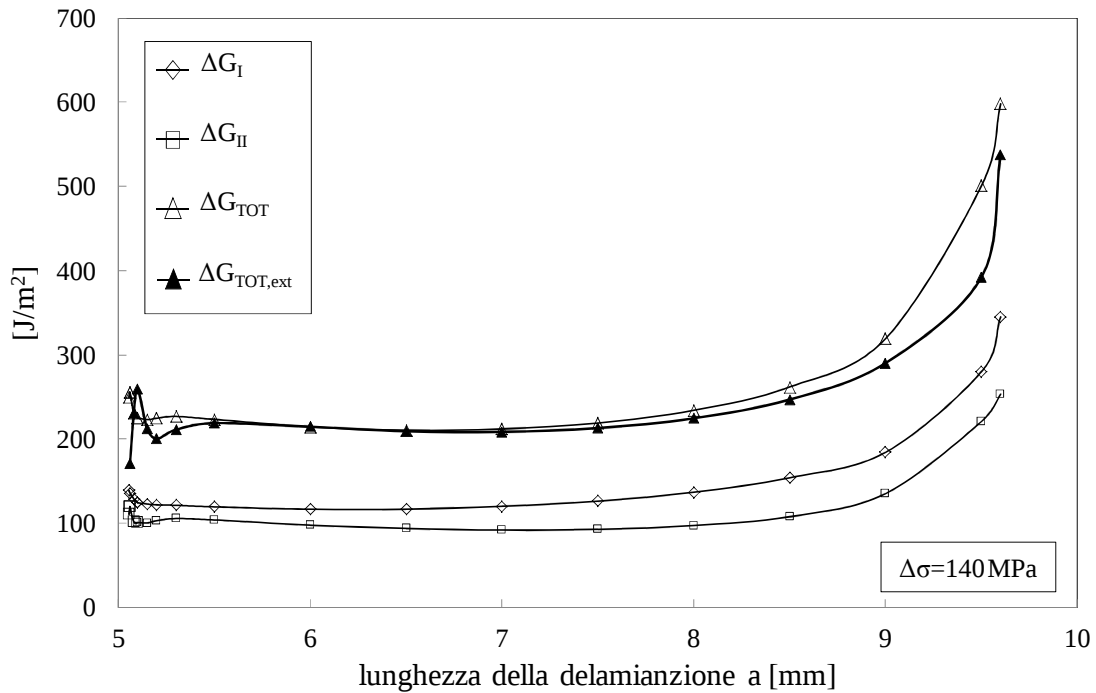


Figura 5.8: andamento delle componenti del SERR e confronto tra il ΔG_{TOT} calcolato come somma delle componenti ΔG_I ΔG_{II} ed il ΔG_{TOT} calcolato tramite l'eq.ne (5.1) lungo la seconda interfaccia al propagare della delaminazione, lunghezza di sovrapposizione $w=5$, $\Delta\sigma=140$ MPa (basso carico), analisi geometricamente NON LINEARI

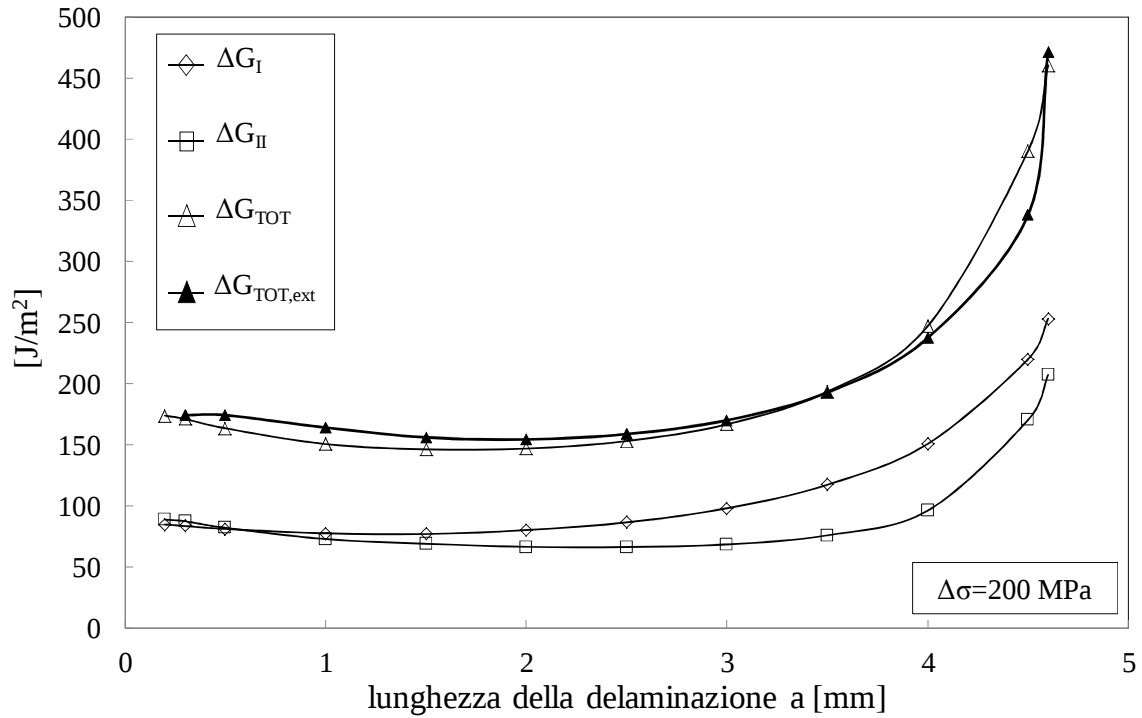


Figura 5.9: andamento delle componenti del SERR e confronto tra il ΔG_{TOT} calcolato come somma delle componenti ΔG_I , ΔG_{II} ed il ΔG_{TOT} calcolato tramite l'eq.ne (5.1) lungo la prima interfaccia al propagare della delaminazione, lunghezza di sovrapposizione $w=5$, $\Delta\sigma=200$ MPa (alto carico), analisi geometricamente NON LINEARI

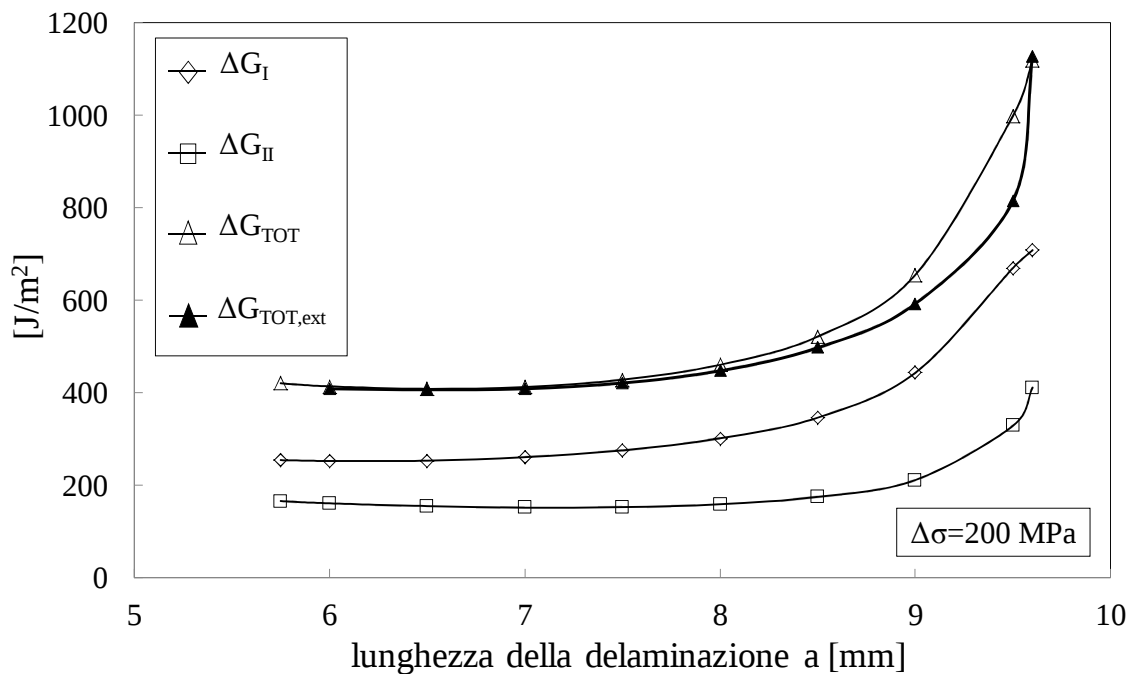


Figura 5.10: andamento delle componenti del SERR e confronto tra il ΔG_{TOT} calcolato come somma delle componenti ΔG_I , ΔG_{II} ed il ΔG_{TOT} calcolato tramite l'eq.ne (5.1) lungo la seconda interfaccia al propagare della delaminazione, lunghezza di sovrapposizione $w=5$, $\Delta\sigma=200$ MPa (alto carico), analisi geometricamente NON LINEARI

- *Overlap* $w=8$ mm

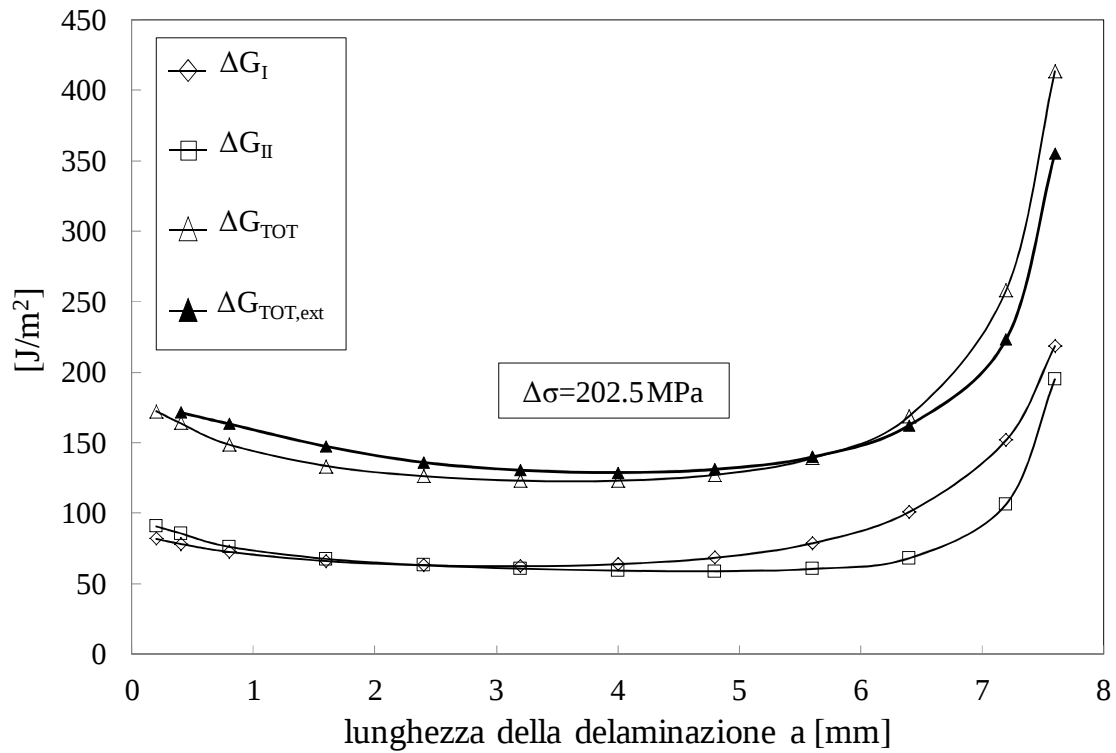


Figura 5.11: andamento delle componenti del SERR e confronto tra il ΔG_{TOT} calcolato come somma delle componenti ΔG_I ΔG_{II} ed il ΔG_{TOT} calcolato tramite l'eq.ne (5.1) lungo la prima interfaccia al propagare della delaminazione, lunghezza di sovrapposizione $w=8$, $\Delta\sigma=202.5$ MPa (basso carico), analisi geometricamente NON LINEARI

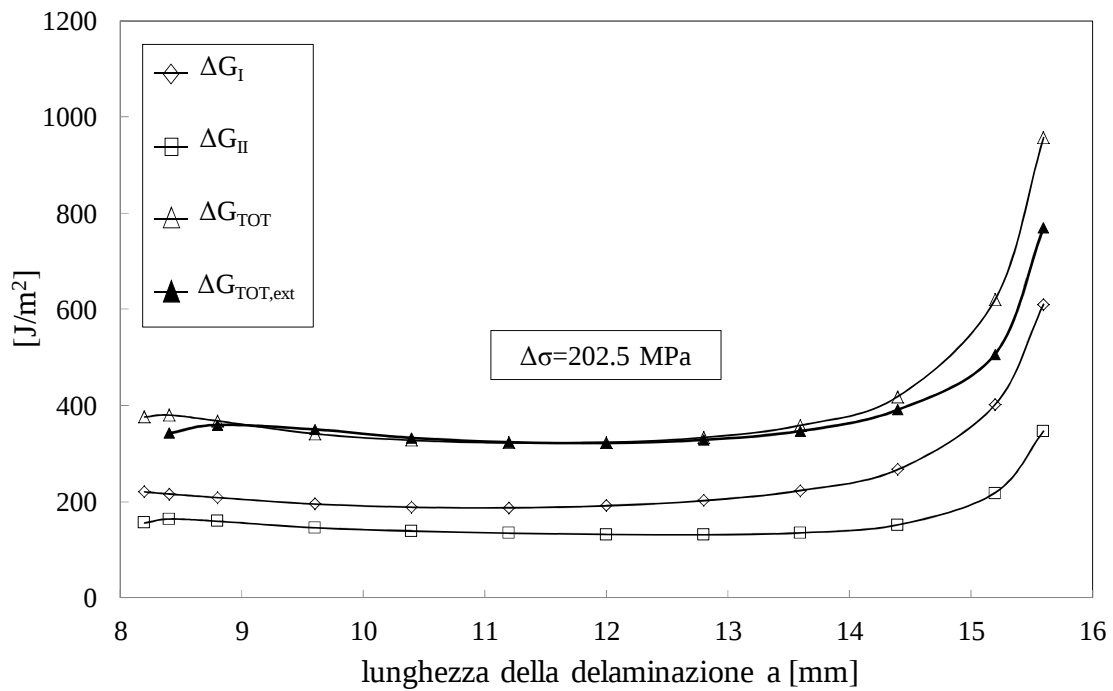


Figura 5.12: andamento delle componenti del SERR e confronto tra il ΔG_{TOT} calcolato come somma delle componenti ΔG_I ΔG_{II} ed il ΔG_{TOT} calcolato tramite l'eq.ne (5.1) lungo la seconda interfaccia al propagare della delaminazione, lunghezza di sovrapposizione $w=8$, $\Delta\sigma=202.5$ MPa (basso carico), analisi geometricamente NON LINEARI

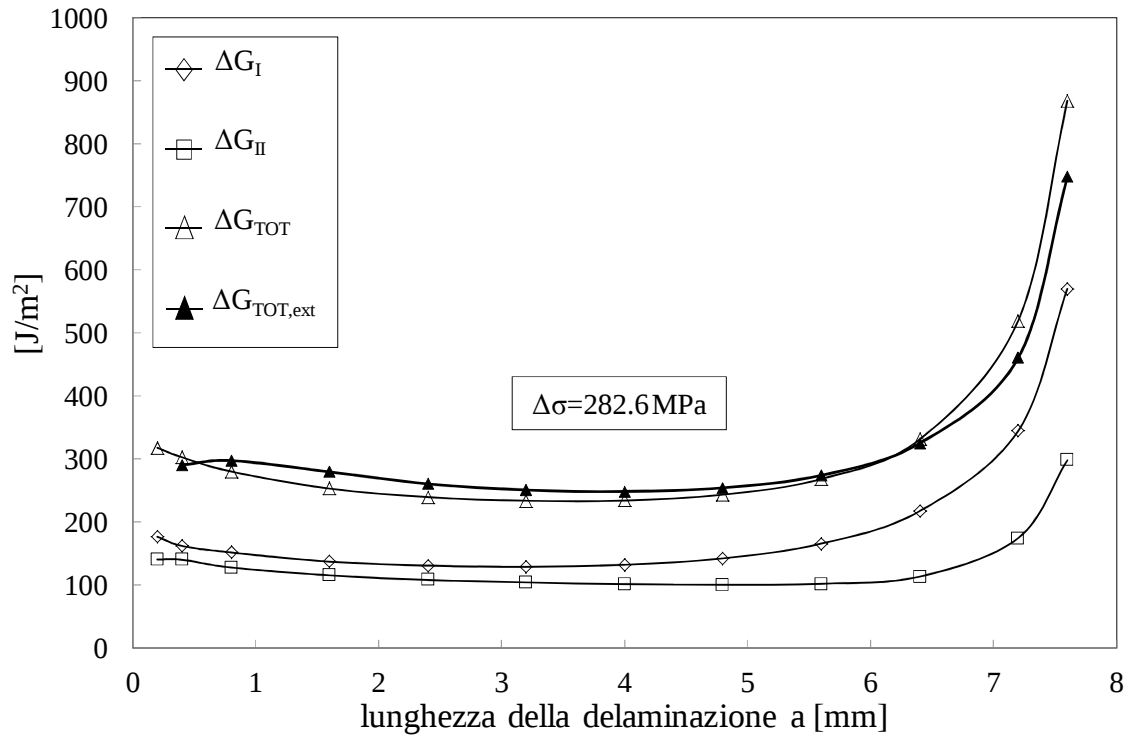


Figura 5.13: andamento delle componenti del SERR e confronto tra il ΔG_{TOT} calcolato come somma delle componenti ΔG_I , ΔG_{II} ed il ΔG_{TOT} calcolato tramite l'eq.ne (5.1) lungo la prima interfaccia al propagare della delaminazione, lunghezza di sovrapposizione $w=8$, $\Delta\sigma=282.6$ MPa (alto carico), analisi geometricamente NON LINEARI

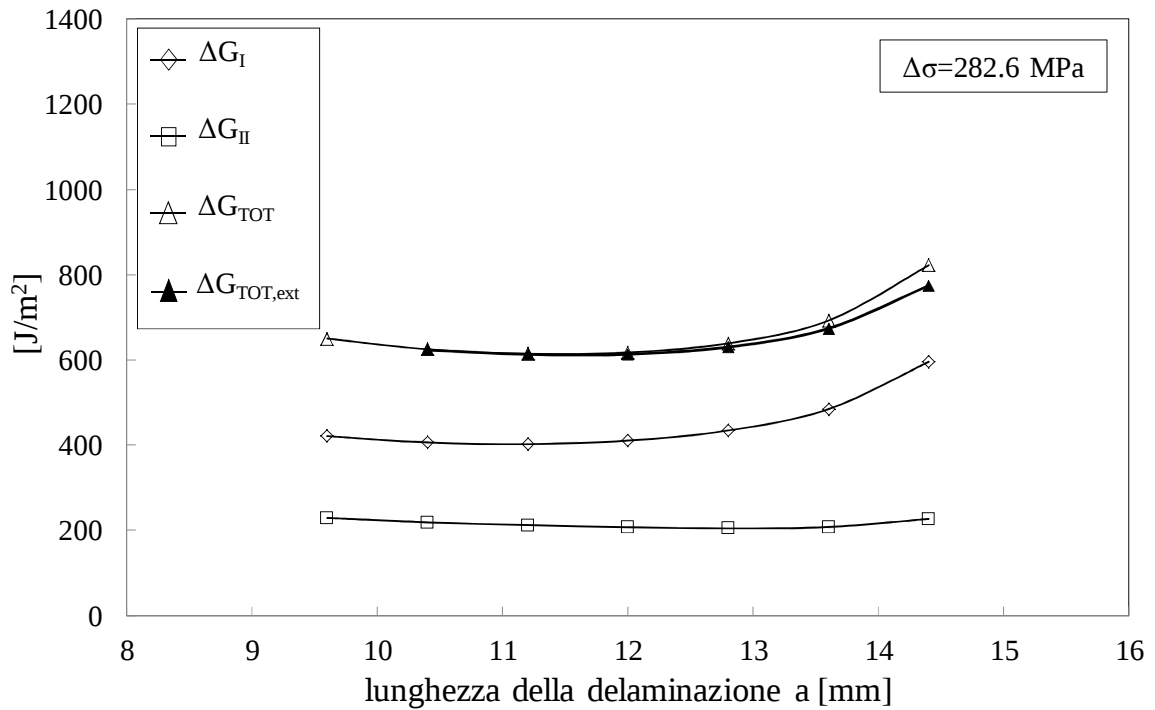


Figura 5.14: andamento delle componenti del SERR e confronto tra il ΔG_{TOT} calcolato come somma delle componenti ΔG_I , ΔG_{II} ed il ΔG_{TOT} calcolato tramite l'eq.ne (5.1) lungo la seconda interfaccia al propagare della delaminazione, lunghezza di sovrapposizione $w=8$, $\Delta\sigma=282.6$ MPa (alto carico), analisi geometricamente NON LINEARI

Nei precedenti grafici si può notare come esista un buon accordo tra i due approcci per valori di delaminazione nella parte centrale dell'interfaccia interessata dalla propagazione mentre per valori piccoli ed elevati i risultati tendono a discostarsi. Il motivo di questa differenza potrebbe risiedere nell'elevata deformazione che si verifica all'apice della cricca quando questa si è appena innescata o è prossima al cambio di interfaccia.

In ogni caso piccole variazioni possono essere considerate accettabili ricordando l'elevata dispersione dei dati sperimentali (capitolo 3,4).

Verificata quindi la buona approssimazione dei risultati dell'equazione (5.1) nei riguardi di ΔG_{TOT} e consapevoli che ragionare in termini di ΔG_{eqv} anziché ΔG_{TOT} non porta alcun beneficio nei riguardi di una possibile riduzione di dispersione dei risultati sperimentali o aumenti sensibili di durata di vita a fatica (capitolo 3), si è deciso di condurre delle analisi FEM geometricamente non lineari variando l'element size, in particolare aumentandolo. Questo perché, essendo i termini che l'equazione (5.1) necessita per la corretta risoluzione ricavabili da semplici misurazioni degli spostamenti nodali all'estremo di applicazione del carico, oltre al carico stesso e lo spessore (unitario nel caso di *plane strain*), non è più necessaria ora una mesh così raffinata come invece era richiesto in precedenza per l'applicazione della VCCT per seguire fedelmente il comportamento locale all'apice della cricca e calcolare quindi correttamente i contributi ΔG_I e ΔG_{II} . Infatti per il calcolo dei soli spostamenti nodali all'estremo di applicazione del carico è lecito adottare nel complesso una mesh decisamente più rada. Si realizzano quindi degli APDL ad hoc variando di volta in volta l'element size globale.

Si richiamano ora in tabella i valori ottenuti con la mesh raffinate e quindi i valori calcolati tramite la tecnica della VCCT per il giunto con *overlap* pari a 3 mm soggetto a basso carico, al quale si riferiscono anche tutti i successivi confronti:

delaminazione a [mm]	ΔG_I [J/m²]	ΔG_{II} [J/m²]	ΔG_{TOT} [J/m²]	$\Delta G_{TOT,ext}$ [J/m²]	Variazione %
0.055	36.59	44.03	80.63		
0.1	36.13	42.94	79.07	78.65	0.54
0.15	36.64	42.21	78.85	81.96	3.80
0.2	37.06	41.23	78.26	81.96	4.48
0.3	37.25	40.05	77.30	81.34	4.96
0.6	38.13	37.09	75.21	79.68	5.61

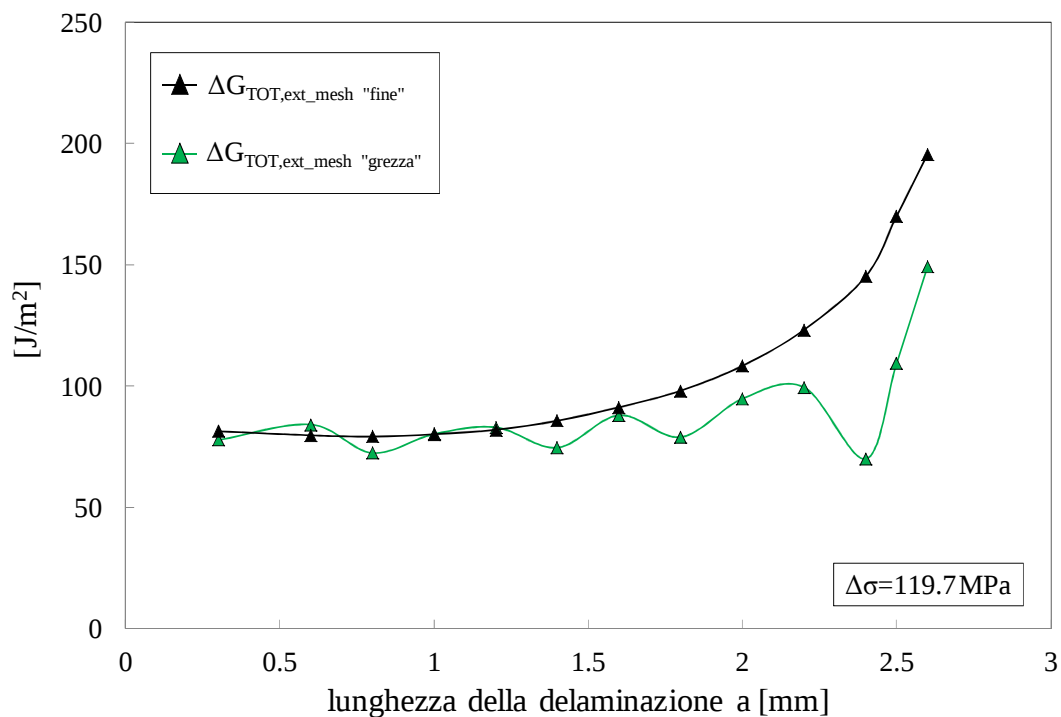
0.8	39.15	36.41	75.56	79.17	4.56
1	40.65	35.83	76.49	80.1	4.51
1.2	42.77	36.41	79.19	81.96	3.38
1.4	45.41	37.65	83.06	85.68	3.06
1.6	48.97	39.41	88.39	91.27	3.16
1.8	53.4	42.57	95.97	98.10	2.18
2	59.02	47.58	106.6	108.35	1.61
2.2	66.03	55.89	121.91	123.25	1.08
2.4	75.15	71.40	146.55	145.29	0.87
2.5	80.72	84.11	164.82	170.13	3.12
2.6	87.54	103.13	190.67	195.58	2.51

Tabella 5.1: valori di ΔG per mesh raffinata

Si registra una variazione massima percentuale in valore assoluto di circa il 5% tra il ΔG_{TOT} ottenuto dalla somma di ΔG_I e ΔG_{II} e il $\Delta G_{TOT,ext}$ calcolato tramite la (5.1).

5.3.1 mesh grossolane primo tentativo:

come primo tentativo si è deciso di partire da “lontano” meshando l’intero giunto con un element size medio di 0.5 mm, pari a 50 volte la minima dimensione utilizzata all’apice della cricca per la mesh “fine” mantenendo comunque le stesse divisioni di quest’ultima all’estremo di applicazione del carico.

Figura 5.15: confronto tra i ΔG_{TOT} ottenuti tramite mesh raffinata e mesh grossolana

delaminazione a [mm]	$\Delta G_{TOT,ext_mesh}$ raffinata [J/m²]	$\Delta G_{TOT,ext_mesh}$ grossolana [J/m²]	Variazione %
0.2			
0.3	81.34	77.67	4.48
0.6	79.68	84.09	5.57
0.8	79.17	72.38	8.53
1	80.1	80.15	0.11
1.2	81.96	82.95	1.25
1.4	85.68	74.56	12.95
1.6	91.27	87.92	3.64
1.8	98.10	78.91	19.53
2	108.35	94.75	12.51
2.2	123.25	99.41	19.31
2.4	145.29	69.9	51.87
2.5	170.13	109.35	35.70
2.6	195.58	149.12	23.73

Tabella 5.2: confronto tra i ΔG_{TOT} ottenuti tramite mesh raffinata e mesh grossolana

I risultati evidenziano come si è partiti da troppo “lontano” essendo la massima variazione percentuale anche superiore al 50%.

5.3.2 mesh grossolane secondo tentativo:

si decide di dimezzare l'element size medio portandolo a 0.25 mm e di diminuire a 4 le divisioni all'estremo di applicazione del carico e quindi di attribuire uno spacing ratio in modo che le zone esterne, che portano agli estremi del giunto, siano caratterizzate da un diradamento continuo mentre la zona di giunzione sia totalmente meshata con la dimensione di elemento fissata e pari appunto a 0.25 mm.

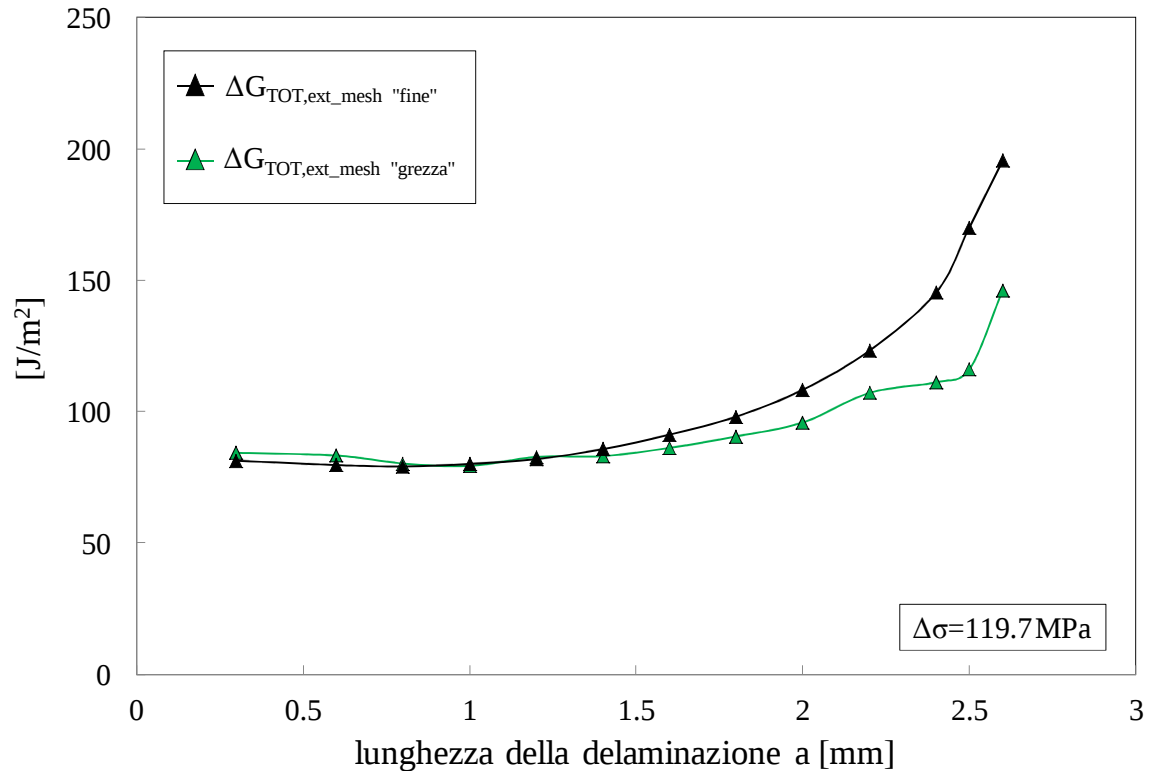


Figura 5.16: confronto tra i ΔG_{TOT} ottenuti tramite mesh raffinata e mesh grossolana

delaminazione a [mm]	$\Delta G_{TOT,ext_mesh}$ raffinata [J/m ²]	$\Delta G_{TOT,ext_mesh}$ grossolana [J/m ²]	Variazione %
0.2			
0.3	81.34	84.30	3.69
0.6	79.68	83.26	4.53
0.8	79.17	80.24	1.40
1	80.1	79.31	0.95
1.2	81.96	82.74	1.00
1.4	85.68	83.05	3.03
1.6	91.27	86.18	5.55

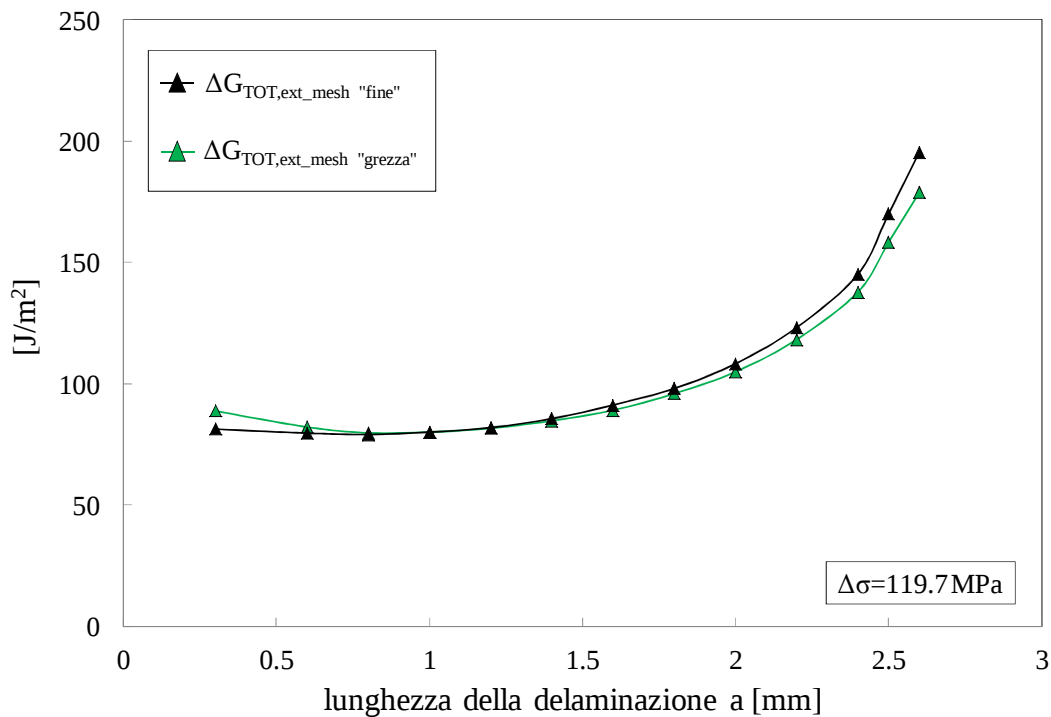
1.8	98.10	90.55	7.66
2	108.35	95.85	11.49
2.2	123.25	107.09	13.07
2.4	145.29	111.15	23.46
2.5	170.13	116.15	31.70
2.6	195.58	146.12	25.26

Tabella 5.3: confronto tra i ΔG_{TOT} ottenuti tramite mesh raffinata e mesh grossolana

In questo caso la massima variazione registrata nei riguardi del ΔG_{TOT} si aggira attorno al 30%, ma è più interessante notare come fino ad una lunghezza della delaminazione pari a 2.2 mm la variazione % sia inferiore al 15%.

5.3.3 mesh grossolane terzo tentativo:

Si passa ora all'utilizzo di un element size medio di 0.1 mm per quanto riguarda la zona di giunzione (10 volte la minima dimensione utilizzata all'apice della cricca per la mesh "fine"), mentre alle zone esterne è stato attribuito anche in questo caso uno spacing ratio in modo da mantenere le 4 divisioni all'estremo di applicazione del carico.

Figura 5.17: confronto tra i ΔG_{TOT} ottenuti tramite mesh raffinata e mesh grossolana

delaminazione a [mm]	$\Delta G_{TOT,ext_mesh}$ raffinata [J/m^2]	$\Delta G_{TOT,ext_mesh}$ grossolana [J/m^2]	Variazione %
0.2			
0.3	81.34	88.79	9.21
0.6	79.68	82.17	3.16
0.8	79.17	79.79	0.83
1	80.1	80.10	0.05
1.2	81.96	81.65	0.33
1.4	85.68	84.76	1.04
1.6	91.27	89.10	2.34
1.8	98.10	95.93	2.17
2	108.35	104.94	3.11
2.2	123.25	118.29	3.99
2.4	145.29	137.85	5.08
2.5	170.13	158.34	6.89
2.6	195.58	178.83	8.53

Tabella 5.4: confronto tra i ΔG_{TOT} ottenuti tramite mesh raffinata e mesh grossolana

La massima variazione percentuale è ora inferiore al 10% e le variazioni più elevate si registrano per lunghezze di cricca molto piccole o prossime al passaggio di interfaccia. Uno scostamento molto simile era già stato riscontrato tra il ΔG_{TOT} ottenuto dalla somma delle componenti ΔG_I e ΔG_{II} ed il $\Delta G_{TOT,ext}$ calcolato tramite la (5.1) ricavati dalle analisi geometricamente non lineari caratterizzate dalla mesh raffinata, come riportato nei grafici precedenti (Figura 5.6 – Figura 5.14).

Sono state a questo punto condotte delle ulteriori analisi sostanzialmente identiche a queste appena effettuate, varianti solamente nel numero delle divisioni all'estremo di applicazione del carico: 8 anziché 4. I risultati ottenuti evidenziano un leggero miglioramento per lunghezze di cricca piccole avvicinandosi circa di un 2% al valore del $\Delta G_{TOT,ext}$ calcolato tramite la (5.1) in presenza della mesh raffinata. Tuttavia tale beneficio si esaurisce molto in fretta in quanto per lunghezze della delaminazione superiori a 0.6 mm lo scostamento rimane sostanzialmente invariato.

Questo evidenzia come non sia necessario infittire la mesh nelle zone esterne del giunto ed in particolare all'estremo di applicazione del carico per avvicinarsi ai risultati ottenuti con

la mesh “fine” e come invece sia la mesh nella zona di giunzione il fattore più influente a tal riguardo. In altre parole, poco incide la dimensione degli elementi nelle strette vicinanze degli estremi del provino, mentre una buona approssimazione dei risultati è in realtà fortemente legata alla fittezza della mesh nella zona di giunzione, nonostante le misurazioni degli spostamenti siano effettuate lontano da questa e quindi lontano da dove sta propagando la cricca, evidenziando quindi come il comportamento globale del giunto sia pesantemente influenzato da quello che sta accadendo nella zona di giunzione.

A tal riguardo sono state condotte delle analisi con un element size medio di 0.05 mm per quanto riguarda la zona di giunzione (5 volte la minima dimensione utilizzata all’apice della cricca per la mesh raffinata) e 4 divisioni all’estremo di applicazione del carico per verificare ulteriori variazioni apprezzabili. Tale confronto ha evidenziato come lo scostamento rispetto ai risultati ottenuti per la mesh con un element size di 0.1 mm e quindi l’avvicinamento verso i valori ottenuti tramite la mesh raffinata vari globalmente tra uno 0.4% ed un 2.4% con una variazione massima pari al 4% circa.

Variazioni così contenute sono accettabilmente trascurabili se rapportate all’aumento di tempo richiesto per la risoluzione di tali analisi (minuti anziché ore), dato che in questa sezione si sta appunto ricercando una modalità di risoluzione e di caratterizzazione dei giunti *stepped-lap*, almeno per quanto concerne il ΔG_{TOT} , decisamente meno onerosa da questo punto di vista. Tramite i soli spostamenti nodali all’estremo di applicazione del carico non è stato possibile infatti separare da questo ΔG_{TOT} le componenti ΔG_I e ΔG_{II} in quanto anche se si ipotizza per il momento di utilizzare le rotazioni degli elementi calcolate all’apice della cricca per la mesh raffinata rispetto al sistema di riferimento globale (capitolo 2), i valori di queste rotazioni si aggirano attorno a qualche grado portando ad una predominanza pressoché assoluta del Modo II. Inoltre i valori degli spostamenti lungo l’asse y per i nodi all’estremo di applicazione del carico sono nell’ordine di 0.01 mm, con variazioni alla sesta/settima cifra decimale, troppo bassi quindi per conferire qualsiasi tipo di contributo.

È doveroso precisare tuttavia che, anche nel caso in cui si potesse scomporre con successo il ΔG_{TOT} nelle componenti ΔG_I e ΔG_{II} , per giungere a variazioni percentuali accettabili (10% circa) dell’angolo di rotazione calcolato tramite mesh grossolane rispetto a quello calcolato tramite mesh raffinata bisogna adottare un element size minore a 0.015625 mm all’apice della cricca, che è comunque prossimo allo 0.01 mm adottato appunto per

quest'ultime mesh annullando di fatto qualsiasi tipo di vantaggio derivante dall'utilizzo di una mesh più rada in termini di semplicità realizzativa e tempistiche di analisi richieste.

Capitolo 6: CONCLUSIONI

In questo lavoro è stato analizzato il comportamento a fatica delle giunzioni stampate in materiale composito (stepped-lap) con lo scopo di definire un modello previsionale per la vita di questi giunti.

I risultati più interessanti possono essere riassunti come segue:

1. Il modello agli elementi finiti richiede la presenza della cricca trasversale per ottenere trend sostanzialmente crescenti e quindi realistici delle componenti dello Strain Energy Release Rates;
2. sono necessarie analisi geometricamente non lineari per descrivere in maniera più realistica il comportamento delle giunzioni stepped-lap;
3. dalle analisi FEM si evince come la propagazione sia a Modo misto (Modo I + Modo II);
4. è stata ottenuta una curva di Paris che correla da/dN con un ΔG_{eqv} ;
5. si è visto come la curva di Paris ottenuta tramite l'utilizzo del ΔG_{eqv} proposto da M. Quaresimin e M. Ricotta sia in ottimo accordo con le altre formulazioni del ΔG_{eqv} proposte in letteratura;
6. con analisi dedicate si è verificato che l'assunzione del materiale omogeneo non è aderente alle reali propagazioni del materiale;
7. solo per questa tipologia di giunti è possibile utilizzare il ΔG_{TOT} per sintetizzare i dati; si è dimostrato che il ΔG_{TOT} può essere calcolato senza la VCCT ma tramite gli spostamenti rilevati all'estremo di applicazione del carico con un errore massimo del 10 %;
8. è stato quindi proposto un approccio semplificato in ΔG_{TOT} valida soltanto per questa tipologia di giunti.

RINGRAZIAMENTI

Ringrazio tutte le persone che mi sono state affianco in questi anni, in particolare la famiglia che mi ha permesso di proseguire gli studi e mio fratello per i suoi tanto preziosi e sofferiti aiuti.

Ringrazio l'Ing. Mauro Ricotta per avermi dato l'opportunità di fare questa tesi e per avermi offerto sempre la sua assistenza dandomi le "dritte" giuste, per la sua simpatia e pazienza.

Ringrazio i membri dell' "ufficio disperati" per aver reso piacevoli e divertenti questi mesi di tesi, in particolare il compagno di studi degli ultimi due anni Alessandro.

Ringrazio tutte le persone che ho conosciuto in questi anni universitari con cui ho trascorso serate molto animate.

Ringrazio gli insostituibili compagni d'avventura Enrico e Paolo per tutti i momenti trascorsi insieme in questi anni universitari.

Ringrazio Giulia per aver corretto tutte le mie castronerie ortografiche, per la pazienza, il sostegno e l'incoraggiamento.

Spero di non aver dimenticato nessuno.

Bibliografia

- [1] 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.
- [2] Blanco, V. (2004). *variable mixed-mode delamination in composite laminates under fatigue conditions: testing & analysis*. Universitat de Girona: Tesi di laurea.
- [3] Indrio M. (2001-2002). *Tenacità a frattura interlaminare di materiali compositi avanzati a matrice polimerica*. Università degli studi di Padova: Tesi di laurea.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Polloni Simone. (2003-2004). *Analisi del danneggiamento per fatica in giunzioni stampate in materiale composito*. Università degli studi di Padova: Tesi di laurea.
- [7] 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.
- [8] Quaresimin Ricotta. (2006). *Stress intensity factor and strain energy release rates in single lap bonded joints in composite materials*. Composites Science and Technology 66, 647-656.
- [9] N. Blanco, E. G. (2004). *Mixed-mode delamination growth in carbon-fibre composite laminates under cyclic loading*. International Journal of Solids and Structures 41, 4219-4235.

- [10] J.A. Pascoe, R. A. (2013). Methods for the prediction of fatigue delamination growth in composites and adhesive bonds - A critical review. *Engineerin Fracture Mechanics* 112-113, 72-96.
- [11] Lunardon Giulia. (2004-2005). *Resistenza a delaminazione di compositi laminati*. Università degli studi di Padova: Tesi di laurea.
- [12] Olivier Loic. (2005). *Delamination resistance of woven carbon/epoxy composites under Mode I and Mode II fatigue loading*. Università di Padova: Rapport of Master/PFE.
- [13] Broutman, A. (1990). *Analysis and performance of fiber composites*. Wiley-Interscience publication.
- [14] Duo Paolo. (2008-2009). *Analisi del comportamento a fatica di laminati compositi tessuti basata sulla densità di energia di deformazione*. Università degli studi di Padova: Tesi di laurea.
- [15] S. Cristanini M. Quaresimin M. Ricotta. (2001). *Analisi del comportamento statico e a fatica di giunzioni stampate in materiale composito*. Dipartimento di tecnica e Gestione dei sistemi industriali Università di Padova.
- [16] 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 investigation and phenomenological modelling*. Università di Padova: Journal of Adhesion Science and Technology.
- [17] Griffith A.A., J. W. (1924). *The Theory of Ropture*. in Proc. 1st Cong. Applied Mechanics 55-63.
- [18] Pagano N. J., S. G. (s.d.). *Delamination of polymer matrix composites: Problems and assessment*, *Comprehensive Composite Materials*. Vol. 2, cap. 13, Elsevier Science Ltd. pp: 433-528.

Appendice A: APDL per la costruzione dei giunti stepped-lap

PREMESSA:

APDL è l'acronimo di Ansys Parametric Design Language ovvero il linguaggio di programmazione del codice di calcolo agli elementi finiti Ansys. Ogni qual volta si esegue un comando Ansys per mezzo dell'interfaccia grafica in realtà si stanno eseguendo uno o più comandi del linguaggio. L'APDL offre diverse possibilità come la creazione di macro per l'esecuzione di serie di comandi, l'esecuzione di cicli if-then-else, cicli do, operazioni tra scalari, vettori e matrici. Propriamente l'APDL è il fondamento per la costruzione di modelli parametrici su cui condurre l'attività di ottimizzazione ma può offrire spunti per la velocizzazione e risoluzione di problemi che si possono incontrare nell'attività sperimentale.

```
/PREP7
/TITLE, APDL - stepped-lap
/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]
```

```
w=3
t=0.25          !spessore singola lamina
h=2             !spessore giunto
Lt=260          !lunghezza totale
L=220           !lunghezza tra le tab
b=(1-7*w)/2     !distanza del primo step dal bordo
z=20            !lunghezza tab di afferraggio
Ex=58050        !modulo elastico lungo la direzione
Ey=6000         !modulo elastico lungo lo spessore
Ez=58650        !modulo lungo la larghezza
Gxy=500         !modulo elastico tangenziale
v1=0.3          !coeff. Poisson del carbonio
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

!1-laminato in composito (ortotropo)

MP,EX,1,Ex
MP,EY,1,Ey
MP,EZ,1,Ez
MP,NUXY,1,v1
MP,NUYZ,1,0.3
MP,NUXZ,1,0.06
MP,GXY,1,500
MP,GYZ,1,500
MP,GXZ,1,3300

!=====

!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

!-----

*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,147,7*w-a1-t,h,0

k,148,7*w-a1+5*d,h,0
k,155,0,h-t-5*d,0
k,156,0,h-2*t,0
k,165,7*w,h-7*t-5*d,0
k,172,0,h-t+5*d,0
k,181,7*w,h-6*t,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,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,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,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,159,2*w,h-3*t-5*d,0
k,160,2*w,h-4*t,0
k,161,4*w,h-6*t,0
k,162,5*w,h-5*t-5*d,0
k,175,2*w,h-3*t+5*d,0
k,176,3*w,h-2*t,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 SINISTRO

!-----

l,1,2

!-----

*IF,a1,GT,0,AND,a1,LT,w,THEN

l,2,44
l,155,46
l,44,39
l,39,40
l,40,53
l,2,155,
l,155,156
l,156,33
l,156,52
l,44,46
l,46,47
l,39,47
l,47,48

!linee del vcct alto (giunto sx)

```

1,40,48
1,46,52
1,48,49
1,52,49
1,53,49
1,52,129
1,49,130
1,33,129
1,129,130
1,130,149
1,53,3
1,49,4

1,14,98
1,85,98
1,154,94
1,98,94
1,85,84
1,84,89
1,85,86
1,86,87
1,84,87
1,87,88
1,89,88
1,86,94
1,94,97
1,88,97
1,15,89
1,165,88
1,97,16
1,15,165
1,165,16
*ELSE
1,2,3
1,2,33
1,33,149

1,14,15
1,154,16
1,15,16
*ENDIF

!-----

1,3,4
1,14,154

!-----

*IF,a2,GT,0,AND,a2,LT,w,THEN
1,4,157
1,157,158
1,158,149
1,4,59
1,157,61
1,158,67
1,149,131
1,59,54
1,54,55
1,59,61

```

!linee del vcct basso (giunto sx)

!linee parte alta senza vcct (giunto sx)

!linee parte bassa senza vcct (giunto sx)

!linee del vcct alto (giunto sx)

```

1,61,62
1,54,62
1,55,63
1,62,63
1,55,68
1,61,67
1,63,64
1,67,64
1,68,64
1,67,131
1,64,132
1,131,132
1,68,5
1,64,6
1,132,150

1,12,113                !linee del vcct basso (giunto sx)
1,100,113
1,100,99
1,99,104
1,113,109
1,12,163
1,163,153
1,163,109
1,153,137
1,100,101
1,101,102
1,99,102
1,102,103
1,104,103
1,101,109
1,103,112
1,109,112
1,109,137
1,112,138
1,137,138
1,13,104
1,164,103
1,112,14
1,138,154
1,13,164
1,164,14
*ELSE
1,4,5                    !linee parte alta senza vcct (giunto sx)
1,4,149
1,149,150

1,12,13                  !linee parte bassa senza vcct (giunto sx)
1,12,153
1,153,154
1,13,14
*ENDIF

!-----

1,5,6

!-----

*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,160,150	
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,82,133	
l,79,134	
l,133,134	
l,83,7	
l,79,8	
l,134,151	
l,10,128	!linee del vcct basso (giunto sx)
l,10,161	
l,161,152	
l,161,124	
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	!linee parte alta senza vcct (giunto sx)
l,6,150	
l,150,151	
l,10,11	!linee parte bassa senza vcct (giunto sx)
l,11,12	
l,10,152	

1,152,153
*ENDIF

!-----

!linee di completamento

1,7,8
1,8,9
1,8,151
1,151,152
1,9,10
1,37,1
1,37,38
1,38,33

!.....

!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+2,,0	!si cancellano le seguenti linee
LDELE,num_linee+3,,0	

*GET,num_linee,LINE,,COUNT	!si effettua il conteggio delle linee rimaste
----------------------------	---

ALLSEL,ALL,ALL	!si seleziona tutto
----------------	---------------------

!.....

!GIUNTO DESTRO

*IF,a1,GT,0,AND,a1,LT,w,THEN	
1,172,17	!linee del vcct alto (giunto dx)
1,172,18	
1,18,45	
1,172,43	
1,45,39	
1,17,51	
1,43,45	
1,43,42	
1,42,39	
1,42,41	
1,41,40	
1,43,51	
1,41,50	
1,51,50	
1,50,53	
1,50,166	
1,53,19	

```

1,171,147
1,29,95
1,30,98
1,147,95
1,95,98
1,147,148
1,95,96
1,148,96
1,93,95
1,93,85
1,93,92
1,92,84
1,92,91
1,91,96
1,91,90
1,84,90
1,148,34
1,96,181
1,182,91
1,31,90
1,34,181
1,182,181
1,182,31
1,31,32
*ELSE
1,17,18
1,18,19
1,17,166

1,171,34
1,30,31
1,34,31
1,31,32
*ENDIF

!-----

1,166,19

!-----

*IF,a2,GT,0,AND,a2,LT,w,THEN
1,19,173
1,173,20
1,166,139
1,19,66
1,173,58
1,20,60
1,60,54
1,58,60
1,58,57
1,57,54
1,57,56
1,56,55
1,58,66
1,56,65
1,66,65
1,65,68
1,139,66
!linee del vcct basso (giunto dx)

!linee parte alta senza vcct (giunto dx)

!linee parte bassa senza vcct (giunto dx)

!linee del vcct alto (giunto dx)

```

```

1,139,140
1,140,65
1,140,167
1,65,174
1,68,21
1,167,174
1,174,21

1,170,27      !linee del vcct basso (giunto dx)
1,27,28
1,170,145
1,27,110
1,28,113
1,145,110
1,110,113
1,145,146
1,146,111
1,110,111
1,108,110
1,108,100
1,108,107
1,107,99
1,107,106
1,106,111
1,106,105
1,99,105
1,146,171
1,111,179
1,180,106
1,29,105
1,171,179
1,179,180
1,180,29
1,29,30
*ELSE
1,19,20      !linee parte alta senza vcct (giunto dx)
1,20,21
1,166,167
1,167,21

1,27,28      !linee parte bassa senza vcct (giunto dx)
1,28,29
1,170,171
1,171,29
1,29,30
*ENDIF

!-----

*IF,a3,GT,0,AND,a3,LT,w,THEN
1,21,175      !linee del vcct alto (giunto dx)
1,175,22
1,167,141
1,21,81
1,175,73
1,22,75
1,75,69
1,73,75
1,73,72
1,72,69

```

```

1,72,71
1,71,70
1,73,81
1,71,80
1,81,80
1,80,83
1,141,81
1,141,142
1,142,80
1,142,168
1,80,176
1,83,23
1,168,176
1,176,23

1,169,143      !linee del vcct basso (giunto dx)
1,25,125
1,26,128
1,143,144
1,143,125
1,144,126
1,125,126
1,125,128
1,123,125
1,123,115
1,123,122
1,122,114
1,122,121
1,121,120
1,114,120
1,121,126
1,144,170
1,126,177
1,178,121
1,27,120
1,170,177
1,177,178
1,178,27
1,27,28
*ELSE
1,21,22      !linee parte alta senza vcct (giunto dx)
1,22,23
1,167,168
1,168,23

1,169,170      !linee parte bassa senza vcct (giunto dx)
1,26,27
1,170,27
1,27,28
*ENDIF

!-----

!linee di completamento

1,23,24
1,24,25
1,168,169
1,169,25
1,25,26

```

1,34,35
1,32,36
1,35,36

!.....

```
*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_ree,AREA,,COUNT                !si effettua il conteggio delle aree fatte finora

ADELE,num_ree+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
LSEL,U,LOC,X,i*w            !si deselezionano dal precedente set le linee comprese in quest'intervallo
*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,,,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,,,35

KSEL,A,,,36

LSLK,S,1

LESIZE,ALL,,4

ALLSEL,ALL,ALL

KSEL,S,,,37
KSEL,A,,,38

LSLK,S,1

LESIZE,ALL,,,4

ALLSEL,ALL,ALL

!-----

!parte a dx della zona di giunzione

KSEL,S,,,34
KSEL,A,,,35
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 VINCOLI

!estremo sinistro

KSEL,S,,,37
KSEL,A,,,38

LSLK,S,1

DL,ALL,,UX,,1
DL,ALL,,UY,,1

ALLSEL,ALL,ALL

!-----

!estremo destro

KSEL,S,,,35
KSEL,A,,,36

LSLK,S,1

DL,ALL,,UY,,1

ALLSEL,ALL,ALL

!=====

!DEFINIZIONE DEL CARICO

KSEL,S,,,35

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,NDIV

!si identifica 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,NDIV

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,NDIV

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,NDIV

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,NDIV

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,NDIV

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,NDIV

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,NDIV

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,NDIV

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,NDIV
!
!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,NDIV

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,NDIV
!
!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,NDIV
```

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,NDIV
```

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,NDIV

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,NDIV

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,NDIV
!
!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,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,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

```

!*****

!una volta che il programma ha ultimato la soluzione e si può procedere lanciando il file APDL contenente il
!POSTPROCESSING opportuno relativamente all'interfaccia di propagazione della cricca.

!i seguenti comandi funzionano correttamente solo quando letti in input da ANSYS

!*****

! 1. propagazione della cricca lungo la prima e settima interfaccia

!=====

!POSTPROCESSING
/POST1

!-----

!SPOSTAMENTI PER IL CALCOLO DELLE COMPONENTI DEL SERR TRAMITE VCCT

```
*CFOPEN,'(nome del file)',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

!si seleziona la linea costruita tra questi kp

NSLL,S,1

!si selezionano i nodi appartenenti a tale linea

NSEL,R,LOC,X,a1-0.0125,a1-0.0075

!si seleziona il nodo all'interno dell'intervallo (lungo x)

```
*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX
*GET,u_m1,NODE,num_nodo,U,X
*GET,v_m1,NODE,num_nodo,U,Y
```

!si identifica lo spostamento in direzione x

!si identifica lo spostamento in direzione 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

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX
*GET,u_m2,NODE,num_nodo,U,X
*GET,v_m2,NODE,num_nodo,U,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

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX
*GET,u_l1,NODE,num_nodo,U,X
*GET,v_l1,NODE,num_nodo,U,Y

*VWRITE,'l',u_l1,'l',v_l1
(' ',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,a1-0.0075,a1-0.0025

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX
*GET,u_l2,NODE,num_nodo,U,X
*GET,v_l2,NODE,num_nodo,U,Y

*VWRITE,'l*',u_l2,'l*',v_l2
(' ',A2,' F10.6' ',A2,' F10.6' ')

ALLSEL,ALL,ALL

!-----

!SPOSTAMENTI PER IL CALCOLO DELLA ROTAZIONE

*VWRITE,'SPOSTAMENTI PER ROTAZIONI:'
%/%c

```

```
*VWRITE,'U','V'
('      'A2,'      'A2)
```

```
KSEL,S,,,39
KSEL,A,,,40
```

```
LSLK,S,1
```

```
NSLL,S,1
```

```
NSEL,R,LOC,X,a1+0.001,a1-0.001
```

```
*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX
*GET,u_a,NODE,num_nodo,U,X
*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
```

```
NSEL,R,LOC,X,a1+0.0025,a1+0.0075
```

```
*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX
*GET,u_b,NODE,num_nodo,U,X
*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 PER IL CALCOLO DELLE COMPONENTI DEL SERR TRAMITE VCCT Xi,Xj,Yi,Yj

```
*VWRITE,'FORZE VCCT:'
%/%c
*VWRITE,'X','Y'
('      'A2,'      'A2)
```

```
NSEL,S,LOC,X,a1-0.001,a1+0.001
NSEL,R,LOC,Y,h-t-0.001,h-t+0.001
```

!si seleziona il nodo all'apice della cricca

```
ESLN,S,0,ALL
```

!si selezionano gli elementi attaccati a quel nodo

```
ESEL,R,CENT,Y,h-t,h-t+0.01
```

! si selezionano gli elementi superiori

```
NSLE,S,ALL
```

! si selezionano i nodi di questi elementi

```
NSEL,R,LOC,X,a1-0.001,a1+0.001
NSEL,R,LOC,Y,h-t-0.001,h-t+0.001
```

!si seleziona il nodo dell'apice

```

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX          !forze sul nodo (i) all'apice dell'elemento di destra
*GET,num_elem,ELEM,0,NUM,MIN
*GET,X_idx,ELEM,num_elem,EFOR,num_nodo,FX
*GET,Y_idx,ELEM,num_elem,EFOR,num_nodo,FY

*GET,num_elem,ELEM,0,NUM,MAX          !forze sul nodo (i) all'apice dell'elemento di sinistra
*GET,X_isx,ELEM,num_elem,EFOR,num_nodo,FX
*GET,Y_isx,ELEM,num_elem,EFOR,num_nodo,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        !si seleziona il nodo all'apice della cricca
NSEL,R,LOC,Y,h-t-0.001,h-t+0.001

ESLN,S,0,ALL                          !si selezionano gli elementi attaccati a quel nodo

ESEL,R,CENT,Y,h-t,h-t+0.01            !si selezionano gli elementi superiori

NSLE,S,ALL                            !si selezionano i nodi di questi elementi

NSEL,R,LOC,X,a1+0.0025,a1+0.0075      !si seleziona 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      !forza in direzione x sul nodo (j)
*GET,Y_j,ELEM,num_elem,EFOR,num_nodo,FY      !forze in direzione y sul nodo (j)

*VWRITE,'j',X_j,'j',Y_j
(' ',A1,' F10.6' ',A1,' F10.6' ')

!-----

!SPOSTAMENTI AGLI ESTREMI DI APPLICAZIONE DEL CARICO

*VWRITE,'SPOSTAMENTI AGLI ESTREMI:'
%/%c%/

!-----ux,alto-----

KSEL,S,,,35
KSEL,A,,,36

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,,,35

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,,,36

LSLK,S,1

NSLL,S,1

NSEL,R,LOC,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

!=====

!per cominciare una nuova analisi si deve rientrare nel PREPROCESSOR e ripulire tutto

/PREP7

CPDELE,ALL,,,ALL

ACLEAR,ALL

ADELE,ALL

LCLEAR,ALL

LDELE,ALL

KDELE,ALL

/CLEAR,NOSTART

FINISH

!=====

! 2. propagazione della cricca lungo la seconda e sesta interfaccia

!=====

!POSTPROCESSING
/POST1

!-----

!SPOSTAMENTI PER IL CALCOLO DELLE COMPONENTI DEL SERR TRAMITE VCCT

```
*CFOPEN,'(nome del file)',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,,,60
KSEL,A,,,54

LSLK,S,1

NSLL,S,1

NSEL,R,LOC,X,w+a2-0.0125,w+a2-0.0075

```
*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX
*GET,u_m1,NODE,num_nodo,U,X
*GET,v_m1,NODE,num_nodo,U,Y
```

```
*VWRITE,'m',u_m1,'m',v_m1
(' 'A1,' 'F10.6' 'A1,' 'F10.6' ')
```

ALLSEL,ALL,ALL

KSEL,S,,,59
KSEL,A,,,54

LSLK,S,1

NSLL,S,1

NSEL,R,LOC,X,w+a2-0.0125,w+a2-0.0075

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX

*GET,u_m2,NODE,num_nodo,U,X

*GET,v_m2,NODE,num_nodo,U,Y

VWRITE,'m',u_m2,'m*',v_m2

(' 'A2,' F10.6' 'A2,' F10.6')

ALLSEL,ALL,ALL

!-----,l]*-----

KSEL,S,,,60

KSEL,A,,,54

LSLK,S,1

NSLL,S,1

NSEL,R,LOC,X,w+a2-0.0075,w+a2-0.0025

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX

*GET,u_l1,NODE,num_nodo,U,X

*GET,v_l1,NODE,num_nodo,U,Y

*VWRITE,'l',u_l1,'l',v_l1

(' 'A1,' F10.6' 'A1,' F10.6')

ALLSEL,ALL,ALL

KSEL,S,,,59

KSEL,A,,,54

LSLK,S,1

NSLL,S,1

NSEL,R,LOC,X,w+a2-0.0075,w+a2-0.0025

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX

*GET,u_l2,NODE,num_nodo,U,X

*GET,v_l2,NODE,num_nodo,U,Y

VWRITE,'l',u_l2,'l*',v_l2

(' 'A2,' F10.6' 'A2,' F10.6')

ALLSEL,ALL,ALL

!-----

!SPOSTAMENTI PER IL CALCOLO DELLA ROTAZIONE

*VWRITE,'SPOSTAMENTI PER ROTAZIONI:'

%/%c

*VWRITE,'U','V'

(' 'A2,' 'A2)

KSEL,S,,,54

```

KSEL,A,,,55

LSLK,S,1

NSLL,S,1

NSEL,R,LOC,X,w+a2+0.001,w+a2-0.001

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX
*GET,u_a,NODE,num_nodo,U,X
*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,,,54
KSEL,A,,,55

LSLK,S,1

NSLL,S,1

NSEL,R,LOC,X,w+a2+0.0025,w+a2+0.0075

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX
*GET,u_b,NODE,num_nodo,U,X
*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 PER IL CALCOLO DELLE COMPONENTI DEL SERR TRAMITE VCCT Xi,Xj,Yi,Yj

*VWRITE,'FORZE VCCT:'
%/%c
*VWRITE,'X','Y'
(' ',A2,' ',A2)

NSEL,S,LOC,X,w+a2-0.001,w+a2+0.001
NSEL,R,LOC,Y,h-2*t-0.001,h-2*t+0.001

ESLN,S,0,ALL

ESEL,R,CENT,Y,h-2*t,h-2*t+0.01

NSLE,S,ALL

NSEL,R,LOC,X,w+a2-0.001,w+a2+0.001
NSEL,R,LOC,Y,h-2*t-0.001,h-2*t+0.001

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX
*GET,num_elem,ELEM,0,NUM,MIN
*GET,X_idx,ELEM,num_elem,EFOR,num_nodo,FX

```

```

*GET,Y_idx,ELEM,num_elem,EFOR,num_nodo,FY

*GET,num_elem,ELEM,0,NUM,MAX
*GET,X_isx,ELEM,num_elem,EFOR,num_nodo,FX
*GET,Y_isx,ELEM,num_elem,EFOR,num_nodo,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

NSSEL,S,LOC,X,w+a2-0.001,w+a2+0.001
NSSEL,R,LOC,Y,h-2*t-0.001,h-2*t+0.001

ESLN,S,0,ALL

ESEL,R,CENT,Y,h-2*t,h-2*t+0.01

NSLE,S,ALL

NSSEL,R,LOC,X,w+a2+0.0025,w+a2+0.0075
NSSEL,R,LOC,Y,h-2*t-0.001,h-2*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' ')

!-----

!SPOSTAMENTI AGLI ESTREMI DI APPLICAZIONE DEL CARICO

*VWRITE,'SPOSTAMENTI AGLI ESTREMI:'
%/%c%/

!-----ux,alto-----

KSEL,S,,,35
KSEL,A,,,36

LSLK,S,1

NSLL,S,1

NSSEL,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,,,35
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,,,36

LSLK,S,1

NSLL,S,1

NSEL,R,LOC,Y,h-2*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

!=====

!per cominciare una nuova analisi si deve rientrare nel PREPROCESSOR e ripulire tutto

/PREP7

CPDELE,ALL,,,ALL
ACLEAR,ALL
ADELE,ALL
LCLEAR,ALL
LDELE,ALL
KDELE,ALL

/CLEAR,NOSTART

FINISH

```

=====

! 3. propagazione della cricca lungo la terza e quinta interfaccia

=====

!POSTPROCESSING
/POST1

!-----

!SPOSTAMENTI PER IL CALCOLO DELLE COMPONENTI DEL SERR TRAMITE VCCT

*CFOPEN,'(nome del file)',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,,,75
KSEL,A,,,69

LSLK,S,1

NSLL,S,1

NSEL,R,LOC,X,2*w+a3-0.0125,2*w+a3-0.0075

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX
*GET,u_m1,NODE,num_nodo,U,X
*GET,v_m1,NODE,num_nodo,U,Y

*VWRITE,'m',u_m1,'m',v_m1
(' 'A1,' 'F10.6' 'A1,' 'F10.6' ')

ALLSEL,ALL,ALL

KSEL,S,,,74
KSEL,A,,,69

LSLK,S,1

NSLL,S,1

NSEL,R,LOC,X,2*w+a3-0.0125,2*w+a3-0.0075

```

```
*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX
*GET,u_m2,NODE,num_nodo,U,X
*GET,v_m2,NODE,num_nodo,U,Y
```

```
*VWRITE,'m*',u_m2,'m*',v_m2
(' ',A2,' F10.6' ',A2,' F10.6' ')
```

```
ALLSEL,ALL,ALL
```

```
!-----],l*-----
```

```
KSEL,S,,,75
KSEL,A,,,69
```

```
LSLK,S,1
```

```
NSLL,S,1
```

```
NSEL,R,LOC,X,2*w+a3-0.0075,2*w+a3-0.0025
```

```
*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX
*GET,u_l1,NODE,num_nodo,U,X
*GET,v_l1,NODE,num_nodo,U,Y
```

```
*VWRITE,'l',u_l1,'l',v_l1
(' ',A1,' F10.6' ',A1,' F10.6' ')
```

```
ALLSEL,ALL,ALL
```

```
KSEL,S,,,74
KSEL,A,,,69
```

```
LSLK,S,1
```

```
NSLL,S,1
```

```
NSEL,R,LOC,X,2*w+a3-0.0075,2*w+a3-0.0025
```

```
*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX
*GET,u_l2,NODE,num_nodo,U,X
*GET,v_l2,NODE,num_nodo,U,Y
```

```
*VWRITE,'l*',u_l2,'l*',v_l2
(' ',A2,' F10.6' ',A2,' F10.6' ')
```

```
ALLSEL,ALL,ALL
```

```
!-----
```

```
!SPOSTAMENTI PER IL CALCOLO DELLA ROTAZIONE
```

```
*VWRITE,'SPOSTAMENTI PER ROTAZIONI:'
%/%c
*VWRITE,'U','V'
(' ',A2,' ',A2)
```

```
KSEL,S,,,69
KSEL,A,,,70
```

LSLK,S,1

NSLL,S,1

NSEL,R,LOC,X,2*w+a3+0.001,2*w+a3-0.001

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX

*GET,u_a,NODE,num_nodo,U,X

*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,,,69

KSEL,A,,,70

LSLK,S,1

NSLL,S,1

NSEL,R,LOC,X,2*w+a3+0.0025,2*w+a3+0.0075

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX

*GET,u_b,NODE,num_nodo,U,X

*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 PER IL CALCOLO DELLE COMPONENTI DEL SERR TRAMITE VCCT Xi,Xj,Yi,Yj

*VWRITE,'FORZE VCCT:'

%%/%c

*VWRITE,'X','Y'

(' 'A2,' 'A2)

NSEL,S,LOC,X,2*w+a3-0.001,2*w+a3+0.001

NSEL,R,LOC,Y,h-3*t-0.001,h-3*t+0.001

ESLN,S,0,ALL

ESEL,R,CENT,Y,h-3*t,h-3*t+0.01

NSLE,S,ALL

NSEL,R,LOC,X,2*w+a3-0.001,2*w+a3+0.001

NSEL,R,LOC,Y,h-3*t-0.001,h-3*t+0.001

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX

*GET,num_elem,ELEM,0,NUM,MIN

*GET,X_idx,ELEM,num_elem,EFOR,num_nodo,FX

*GET,Y_idx,ELEM,num_elem,EFOR,num_nodo,FY

*GET,num_elem,ELEM,0,NUM,MAX

```

*GET,X_isx,ELEM,num_elem,EFOR,num_nodo,FX
*GET,Y_isx,ELEM,num_elem,EFOR,num_nodo,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,2*w+a3-0.001,2*w+a3+0.001
NSEL,R,LOC,Y,h-3*t-0.001,h-3*t+0.001

ESLN,S,0,ALL

ESEL,R,CENT,Y,h-3*t,h-3*t+0.01

NSLE,S,ALL

NSEL,R,LOC,X,2*w+a3+0.0025,2*w+a3+0.0075
NSEL,R,LOC,Y,h-3*t-0.001,h-3*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' ')

!-----

!SPOSTAMENTI AGLI ESTREMI DI APPLICAZIONE DEL CARICO

*VWRITE,'SPOSTAMENTI AGLI ESTREMI:'
%/%c%/

!-----ux,alto-----

KSEL,S,,,35
KSEL,A,,,36

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,,,35
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,,,36

LSLK,S,1

NSLL,S,1

NSEL,R,LOC,Y,h-3*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

!=====

!per cominciare una nuova analisi si deve rientrare nel PREPROCESSOR e ripulire tutto

/PREP7

CPDELE,ALL,,,ALL
ACLEAR,ALL
ADELE,ALL
LCLEAR,ALL
LDELE,ALL
KDELE,ALL

/CLEAR,NOSTART

FINISH

```
!=====
```

```
! 4. propagazione della cricca lungo tutte le interfacce per la realizzazione delle cricche da 0,2 mm
```

```
!=====
```

```
!POSTPROCESSING
```

```
/POST1
```

```
!-----
```

```
!SPOSTAMENTI PER IL CALCOLO DELLE COMPONENTI DEL SERR TRAMITE VCCT
```

```
*CFOPEN,'(nome del file)',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
```

```
*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX
```

```
*GET,u_m1,NODE,num_nodo,U,X
```

```
*GET,v_m1,NODE,num_nodo,U,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
```

```

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX
*GET,u_m2,NODE,num_nodo,U,X
*GET,v_m2,NODE,num_nodo,U,Y

*VWRITE,'m*',u_m2,'m*',v_m2
(' ',A2,' F10.6' ',A2,' F10.6' ')

ALLSEL,ALL,ALL

!-----],l*-----

KSEL,S,,,45
KSEL,A,,,39

LSLK,S,1

NSLL,S,1

NSEL,R,LOC,X,a1-0.0075,a1-0.0025

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX
*GET,u_l1,NODE,num_nodo,U,X
*GET,v_l1,NODE,num_nodo,U,Y

*VWRITE,'l',u_l1,'l',v_l1
(' ',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,a1-0.0075,a1-0.0025

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX
*GET,u_l2,NODE,num_nodo,U,X
*GET,v_l2,NODE,num_nodo,U,Y

*VWRITE,'l*',u_l2,'l*',v_l2
(' ',A2,' F10.6' ',A2,' F10.6' ')

ALLSEL,ALL,ALL

!-----

!SPOSTAMENTI PER IL CALCOLO DELLA ROTAZIONE

*VWRITE,'SPOSTAMENTI PER ROTAZIONI:'
%/%c
*VWRITE,'U','V'
(' ',A2,' ',A2)

KSEL,S,,,39
KSEL,A,,,40

LSLK,S,1

```

NSLL,S,1

NSEL,R,LOC,X,a1+0.001,a1-0.001

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX

*GET,u_a,NODE,num_nodo,U,X

*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

NSEL,R,LOC,X,a1+0.0025,a1+0.0075

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX

*GET,u_b,NODE,num_nodo,U,X

*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 PER IL CALCOLO DELLE COMPONENTI DEL SERR TRAMITE VCCT

*VWRITE,'FORZE VCCT:'

%/%%c

*VWRITE,'X','Y'

(' ',A2,' ',A2)

NSEL,S,LOC,X,a1-0.001,a1+0.001

NSEL,R,LOC,Y,h-t-0.001,h-t+0.001

ESLN,S,0,ALL

ESEL,R,CENT,Y,h-t,h-t+0.01

NSLE,S,ALL

NSEL,R,LOC,X,a1-0.001,a1+0.001

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_idx,ELEM,num_elem,EFOR,num_nodo,FX

*GET,Y_idx,ELEM,num_elem,EFOR,num_nodo,FY

*GET,num_elem,ELEM,0,NUM,MAX

```
*GET,X_isx,ELEM,num_elem,EFOR,num_nodo,FX
*GET,Y_isx,ELEM,num_elem,EFOR,num_nodo,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
NSEL,R,LOC,Y,h-t-0.001,h-t+0.001

ESLN,S,0,ALL

ESEL,R,CENT,Y,h-t,h-t+0.01

NSLE,S,ALL

NSEL,R,LOC,X,a1+0.0025,a1+0.0075
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' )

!-----

!SPOSTAMENTI AGLI ESTREMI DI APPLICAZIONE DEL CARICO

*VWRITE,'SPOSTAMENTI AGLI ESTREMI:'
%/%c%/

!-----ux,alto-----

KSEL,S,,,35
KSEL,A,,,36

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,,,35
```

```

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,,,36

LSLK,S,1

NSLL,S,1

NSEL,R,LOC,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

!-----

!SPOSTAMENTI PER IL CALCOLO DELLE COMPONENTI DEL SERR TRAMITE VCCT PER LA
!SECONDA INTERFACCIA

*VWRITE,'SPOST. VCCT 2nd INTERFACCIA:'
%/%c
*VWRITE,'UX','UY'
(' ',A2,' ',A2)

!-----m,m*-----

KSEL,S,,,60
KSEL,A,,,54

LSLK,S,1

NSLL,S,1

NSEL,R,LOC,X,w+a2-0.0125,w+a2-0.0075

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX
*GET,u_m1,NODE,num_nodo,U,X
*GET,v_m1,NODE,num_nodo,U,Y

```

```
*VWRITE,'m',u_m1,'m',v_m1  
( ' ,A1,' F10.6' ' ,A1,' F10.6' )
```

```
ALLSEL,ALL,ALL
```

```
KSEL,S,,,59  
KSEL,A,,,54
```

```
LSLK,S,1
```

```
NSLL,S,1
```

```
NSEL,R,LOC,X,w+a2-0.0125,w+a2-0.0075
```

```
*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX  
*GET,u_m2,NODE,num_nodo,U,X  
*GET,v_m2,NODE,num_nodo,U,Y
```

```
*VWRITE,'m*',u_m2,'m*',v_m2  
( ' ,A2,' F10.6' ' ,A2,' F10.6' )
```

```
ALLSEL,ALL,ALL
```

```
!-----],l*-----
```

```
KSEL,S,,,60  
KSEL,A,,,54
```

```
LSLK,S,1
```

```
NSLL,S,1
```

```
NSEL,R,LOC,X,w+a2-0.0075,w+a2-0.0025
```

```
*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX  
*GET,u_l1,NODE,num_nodo,U,X  
*GET,v_l1,NODE,num_nodo,U,Y
```

```
*VWRITE,'l',u_l1,'l',v_l1  
( ' ,A1,' F10.6' ' ,A1,' F10.6' )
```

```
ALLSEL,ALL,ALL
```

```
KSEL,S,,,59  
KSEL,A,,,54
```

```
LSLK,S,1
```

```
NSLL,S,1
```

```
NSEL,R,LOC,X,w+a2-0.0075,w+a2-0.0025
```

```
*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX  
*GET,u_l2,NODE,num_nodo,U,X  
*GET,v_l2,NODE,num_nodo,U,Y
```

```
*VWRITE,'l*',u_l2,'l*',v_l2  
( ' ,A2,' F10.6' ' ,A2,' F10.6' )
```

```
ALLSEL,ALL,ALL
```

!-----

!SPOSTAMENTI PER IL CALCOLO DELLA ROTAZIONE SULLA SECONDA INTERFACCIA

*VWRITE,'SPOST. ROTAZIONI 2nd INTERFACCIA:'

%,/%c

*VWRITE,'U','V'

(' 'A2,' 'A2)

KSEL,S,,,54

KSEL,A,,,55

LSLK,S,1

NSLL,S,1

NSEL,R,LOC,X,w+a2+0.001,w+a2-0.001

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX

*GET,u_a,NODE,num_nodo,U,X

*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,,,54

KSEL,A,,,55

LSLK,S,1

NSLL,S,1

NSEL,R,LOC,X,w+a2+0.0025,w+a2+0.0075

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX

*GET,u_b,NODE,num_nodo,U,X

*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 PER IL CALCOLO DELLE COMPONENTI DEL SERR TRAMITE VCCT PER LA
!SECONDA INTERFACCIA

*VWRITE,'FORZE VCCT 2nd INTERFACCIA:'

%,/%c

*VWRITE,'X','Y'

(' 'A2,' 'A2)

NSEL,S,LOC,X,w+a2-0.001,w+a2+0.001

NSEL,R,LOC,Y,h-2*t-0.001,h-2*t+0.001

ESLN,S,0,ALL

ESEL,R,CENT,Y,h-2*t,h-2*t+0.01

NSLE,S,ALL

NSEL,R,LOC,X,w+a2-0.001,w+a2+0.001

NSEL,R,LOC,Y,h-2*t-0.001,h-2*t+0.001

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX

*GET,num_elem,ELEM,0,NUM,MIN

*GET,X_idx,ELEM,num_elem,EFOR,num_nodo,FX

*GET,Y_idx,ELEM,num_elem,EFOR,num_nodo,FY

*GET,num_elem,ELEM,0,NUM,MAX

*GET,X_isx,ELEM,num_elem,EFOR,num_nodo,FX

*GET,Y_isx,ELEM,num_elem,EFOR,num_nodo,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,w+a2-0.001,w+a2+0.001

NSEL,R,LOC,Y,h-2*t-0.001,h-2*t+0.001

ESLN,S,0,ALL

ESEL,R,CENT,Y,h-2*t,h-2*t+0.01

NSLE,S,ALL

NSEL,R,LOC,X,w+a2+0.0025,w+a2+0.0075

NSEL,R,LOC,Y,h-2*t-0.001,h-2*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')

!-----

!SPOSTAMENTI PER IL CALCOLO DELLE COMPONENTI DEL SERR TRAMITE VCCT PER LA
!TERZA INTERFACCIA

*VWRITE,'SPOST. VCCT 3rd INTERFACCIA:'

%%/%%c

*VWRITE,'UX','UY'

(' 'A2,' 'A2)

!-----m,m*-----

KSEL,S,,,75

KSEL,A,,,69

```

LSLK,S,1

NSLL,S,1

NSEL,R,LOC,X,2*w+a3-0.0125,2*w+a3-0.0075

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX
*GET,u_m1,NODE,num_nodo,U,X
*GET,v_m1,NODE,num_nodo,U,Y

*VWRITE,'m',u_m1,'m',v_m1
(' ',A1,' F10.6' ',A1,' F10.6' ')

ALLSEL,ALL,ALL

KSEL,S,,,74
KSEL,A,,,69

LSLK,S,1

NSLL,S,1

NSEL,R,LOC,X,2*w+a3-0.0125,2*w+a3-0.0075

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX
*GET,u_m2,NODE,num_nodo,U,X
*GET,v_m2,NODE,num_nodo,U,Y

*VWRITE,'m*',u_m2,'m*',v_m2
(' ',A2,' F10.6' ',A2,' F10.6' ')

ALLSEL,ALL,ALL

!-----l,l*-----

KSEL,S,,,75
KSEL,A,,,69

LSLK,S,1

NSLL,S,1

NSEL,R,LOC,X,2*w+a3-0.0075,2*w+a3-0.0025

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX
*GET,u_l1,NODE,num_nodo,U,X
*GET,v_l1,NODE,num_nodo,U,Y

*VWRITE,'l',u_l1,'l',v_l1
(' ',A1,' F10.6' ',A1,' F10.6' ')

ALLSEL,ALL,ALL

KSEL,S,,,74
KSEL,A,,,69

LSLK,S,1

NSLL,S,1

```

NSSEL,R,LOC,X,2*w+a3-0.0075,2*w+a3-0.0025

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX

*GET,u_l2,NODE,num_nodo,U,X

*GET,v_l2,NODE,num_nodo,U,Y

VWRITE,'l',u_l2,'l*',v_l2

(' 'A2,' F10.6' 'A2,' F10.6')

ALLSEL,ALL,ALL

!-----

!SPOSTAMENTI PER IL CALCOLO DELLA ROTAZIONE SULLA TERZA INTERFACCIA

*VWRITE,'SPOST. ROTAZIONI 3rd INTERFACCIA:'

%%/%c

*VWRITE,'U','V'

(' 'A2,' 'A2)

KSEL,S,,,69

KSEL,A,,,70

LSLK,S,1

NSLL,S,1

NSSEL,R,LOC,X,2*w+a3+0.001,2*w+a3-0.001

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX

*GET,u_a,NODE,num_nodo,U,X

*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,,,69

KSEL,A,,,70

LSLK,S,1

NSLL,S,1

NSSEL,R,LOC,X,2*w+a3+0.0025,2*w+a3+0.0075

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX

*GET,u_b,NODE,num_nodo,U,X

*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 PER IL CALCOLO DELLE COMPONENTI DEL SERR TRAMITE VCCT PER LA
!TERZA INTERFACCIA

```

*VWRITE,'FORZE VCCT 3rd INTERFACCIA:'
%/%c
*VWRITE,'X','Y'
('      'A2,'      'A2)

NSEL,S,LOC,X,2*w+a3-0.001,2*w+a3+0.001
NSEL,R,LOC,Y,h-3*t-0.001,h-3*t+0.001

ESLN,S,0,ALL

ESEL,R,CENT,Y,h-3*t,h-3*t+0.01

NSLE,S,ALL

NSEL,R,LOC,X,2*w+a3-0.001,2*w+a3+0.001
NSEL,R,LOC,Y,h-3*t-0.001,h-3*t+0.001

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX
*GET,num_elem,ELEM,0,NUM,MIN
*GET,X_idx,ELEM,num_elem,EFOR,num_nodo,FX
*GET,Y_idx,ELEM,num_elem,EFOR,num_nodo,FY

*GET,num_elem,ELEM,0,NUM,MAX
*GET,X_isx,ELEM,num_elem,EFOR,num_nodo,FX
*GET,Y_isx,ELEM,num_elem,EFOR,num_nodo,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,2*w+a3-0.001,2*w+a3+0.001
NSEL,R,LOC,Y,h-3*t-0.001,h-3*t+0.001

ESLN,S,0,ALL

ESEL,R,CENT,Y,h-3*t,h-3*t+0.01

NSLE,S,ALL

NSEL,R,LOC,X,2*w+a3+0.0025,2*w+a3+0.0075
NSEL,R,LOC,Y,h-3*t-0.001,h-3*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' ')

*CFCLOS

ALLSEL,ALL,ALL

```

!=====

!per cominciare una nuova analisi si deve rientrare nel PREPROCESSOR e ripulire tutto

/PREP7

CPDELE,ALL,,ALL

ACLEAR,ALL

ADELE,ALL

LCLEAR,ALL

LDELE,ALL

KDELE,ALL

/CLEAR,NOSTART

FINISH

Appendice B: APDL per la realizzazione della tessitura del materiale composito per il provino S05_17

```

/PREP7
/TITLE, APDL - stepped-lap
/PNUM,KP,1
/PNUM,LINE,1
/PNUM,ELEM,0

*ASK,a1,inserisci la lunghezza di propagazione della cricca all'interfaccia primo strato,
*ASK,a2,inserisci la lunghezza di propagazione della cricca all'interfaccia primo strato,

!parametri geometrici [mm]

w=5
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
Ex=160000       !modulo elastico lungo la direzione 0 (x)
Ey=12000        !modulo elastico lungo lo spessore
Ez=13000        !modulo lungo la larghezza
d=0.010         !dimensioni elemento in mm
sigma=200
a3=0

!=====

!displacement scaling off.\1
/DSCALE,1,1

!=====

!DEFINIZIONE DEL TIPO DI ELEMENTO

ET,1,PLANE183
KEYOPT,1,1,0
KEYOPT,1,3,2
KEYOPT,1,6,0

!=====

!DEFINIZIONE DELLE PROPRIETA' DEL MATERIALE

!1-laminato in composito 0°

MP,EX,1,Ex
MP,EY,1,Ey
MP,EZ,1,Ez
MP,NUXY,1,0.17
MP,NUYZ,1,0.2
MP,NUXZ,1,0.17
MP,GXY,1,500

```

MP,GYZ,1,500
MP,GXZ,1,7170

!2-laminato in composito 90°

MP,EX,2,Ez
MP,EY,2,Ey
MP,EZ,2,Ex
MP,NUXY,2,0.17
MP,NUYZ,2,0.018
MP,NUXZ,2,0.018
MP,GXY,2,500
MP,GYZ,2,500
MP,GXZ,2,7170

!3-laminato in composito ortotropo

MP,EX,3,58050
MP,EY,3,6000
MP,EZ,3,58650
MP,NUXY,3,0.3
MP,NUYZ,3,0.3
MP,NUXZ,3,0.06
MP,GXY,3,500
MP,GYZ,3,500
MP,GXZ,3,3300

!=====

!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

!-----

*IF,a1,GT,0,AND,a1,LT,w,THEN

!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

k,129,a1-5*d,h-8*t,0
k,130,a1+t,h-8*t,0
k,147,7*w-a1-t,h,0
k,148,7*w-a1+5*d,h,0
k,155,0,h-t-5*d,0
k,156,0,h-2*t,0
k,165,7*w,h-7*t-5*d,0
k,172,0,h-t+5*d,0
k,181,7*w,h-6*t,0
k,182,7*w,h-7*t+5*d,0

*ENDIF

!-----

*IF,a2,GT,0,AND,a2,LT,w,THEN

!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

k,131,w+a2-5*d,h-8*t,0
k,132,w+a2+t,h-8*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,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

!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

k,133,2*w+a3-5*d,h-8*t,0
k,134,2*w+a3+t,h-8*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,159,2*w,h-3*t-5*d,0
k,160,2*w,h-4*t,0
k,161,4*w,h-6*t,0
k,162,5*w,h-5*t-5*d,0
k,175,2*w,h-3*t+5*d,0
k,176,3*w,h-2*t,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
l,155,46
l,44,39
l,39,40
l,40,53
l,2,155,
l,155,156
l,156,33
l,156,52
l,44,46

```

1,46,47
1,39,47
1,47,48
1,40,48
1,46,52
1,48,49
1,52,49
1,53,49
1,52,129
1,49,130
1,33,129
1,129,130
1,130,149
1,53,3
1,49,4

1,14,98
1,85,98
1,154,94
1,98,94
1,85,84
1,84,89
1,85,86
1,86,87
1,84,87
1,87,88
1,89,88
1,86,94
1,94,97
1,88,97
1,15,89
1,165,88
1,97,16
1,15,165
1,165,16
*ELSE
1,2,3
1,2,33
1,33,149

1,14,15
1,154,16
1,15,16
*ENDIF
!-----

1,3,4
1,14,154

!-----

*IF,a2,GT,0,AND,a2,LT,w,THEN
1,4,157
1,157,158
1,158,149
1,4,59
1,157,61 !l_56
1,158,67
1,149,131
1,59,54

```

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,67,131
l,64,132
l,131,132
l,68,5
l,64,6
l,132,150

l,12,113
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,4,149
l,149,150

l,12,13
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
l,74,69
l,69,70
l,6,159
l,159,160
l,160,150
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,82,133
l,79,134
l,133,134
l,83,7
l,79,8
l,134,151

l,10,128
l,10,161
l,161,152
l,161,124
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,6,150
l,150,151

l,10,11

l,11,12
l,10,152
l,152,153
*ENDIF

!-----

l,7,8
l,8,9
l,8,151
l,151,152
l,9,10

l,37,1
l,37,38
l,38,33

!=====

!COSTRUZIONE DEL RETICOLO PER IL GIUNTO SX

k,183,w/2,0,0
k,184,w/2,h-t,0
k,185,1.25*w,0,0
k,186,1.25*w,h-2*t,0
k,187,1.5*w,0,0
k,188,1.5*w,h-2*t,0
k,189,1.75*w,0,0
k,190,1.75*w,h-2*t,0
k,191,2.25*w,0,0
k,192,2.25*w,h-3*t,0
k,193,2.5*w,0,0
k,194,2.5*w,h-3*t,0
k,195,3.5*w,0,0
k,196,3.5*w,h-4*t,0
k,197,4.5*w,0,0
k,198,4.5*w,h-5*t,0
k,199,4.75*w,0,0
k,200,4.75*w,h-5*t,0
k,201,5.25*w,0,0
k,202,5.25*w,h-6*t,0
k,203,5.5*w,0,0
k,204,5.5*w,h-6*t,0
k,205,5.75*w,0,0
k,206,5.75*w,h-6*t,0
k,207,6.5*w,0,0
k,208,6.5*w,h-7*t,0

l,183,184
l,185,186
l,187,188
l,189,190
l,191,192
l,193,194
l,195,196
l,197,198
l,199,200
l,201,202
l,203,204
l,205,206

l,207,208

k,209,0,h-1.5*t,0

k,210,w,h-1.5*t,0

*IF,a1,GT,0,AND,a1,LT,w,THEN

*ELSE

k,211,0,h-2*t,0

*ENDIF

k,212,0,h-2.5*t,0

k,213,2*w,h-2.5*t,0

k,214,0,h-3*t

k,215,0,h-3.5*t,0

k,216,3*w,h-3.5*t,0

k,217,0,h-4*t,0

k,218,0,h-4.5*t,0

k,219,4*w,h-4.5*t,0

k,220,0,h-5*t

k,221,0,h-5.5*t,0

k,222,5*w,h-5.5*t,0

k,223,0,h-6*t,0

k,224,0,h-6.5*t,0

k,225,6*w,h-6.5*t,0

k,226,0,h-7*t

k,227,0,h-7.5*t,0

k,228,7*w,h-7.5*t,0

l,209,210

*IF,a1,GT,0,AND,a1,LT,w,THEN

*ELSE

l,211,4

*ENDIF

l,212,213

*IF,a2,GT,0,AND,a2,LT,w,THEN

l,214,158

*ELSE

l,214,6

*ENDIF

l,215,216

l,217,8

l,218,219

l,220,10

l,221,222

l,223,12

l,224,225

*IF,a2,GT,0,AND,a2,LT,w,THEN

l,226,163

*ELSE

l,226,14

*ENDIF

l,227,228

!=====

!AREA TROUGH KPS

A,37,38,16,34
ASBL,ALL,ALL

ASEL,S,AREA,,ALL
*GET,num_aree_sx,AREA,,COUNT

ADELE,num_aree_sx+1,,1

*GET,num_ultima_area_sx,AREA,,NUM,MAX

k,34,7*w,h,0 !si ricrea questo kp

NUMCMP,LINE !rinumero tutte le linee

LSEL,S,LINE,,ALL !si selezionano tutte le linee fatte finora
*GET,num_linee_sx,LINE,,COUNT !conto delle linee fatte finora per il giunto di sx
*GET,num_ultima_linea_sx,LINE,,NUM,MAX !numero dell'ultima linea creata dalla divisione

ALLSEL,ALL,ALL

!=====

*IF,a1,GT,0,AND,a1,LT,w,THEN

l,172,17
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
l,29,95
l,30,98
l,147,95
l,95,98
l,147,148
l,95,96
l,148,96
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,34,181
    l,182,181
    l,182,31
    l,31,32
*ELSE
    l,17,18
    l,18,19
    l,17,166

    l,171,34
    l,30,31
    l,34,31
    l,31,32
*ENDIF

!-----

l,166,19

!-----

*IF,a2,GT,0,AND,a2,LT,w,THEN
    l,19,173
    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
    l,27,28
    l,170,145
    l,27,110
    l,28,113
    l,145,110
    l,110,113
    l,145,146

```

```

    l,146,111
    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,171,179
    l,179,180
    l,180,29
    l,29,30
*ELSE
    l,19,20
    l,20,21
    l,166,167
    l,167,21

    l,27,28
    l,28,29
    l,170,171
    l,171,29
    l,29,30
*ENDIF

!-----

*IF,a3,GT,0,AND,a3,LT,w,THEN
    l,21,175
    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,80,176
    l,83,23
    l,168,176
    l,176,23

    l,169,143
```

```

l,25,125
l,26,128
l,143,144
l,143,125
l,144,126
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,126,177
l,178,121
l,27,120
l,170,177
l,177,178
l,178,27
l,27,28
*ELSE
l,21,22
l,22,23
l,167,168
l,168,23

l,169,170
l,26,27
l,170,27
l,27,28
*ENDIF

l,23,24
l,24,25
l,168,169
l,169,25
l,25,26

l,34,35
l,32,36
l,35,36

!=====

!COSTRUZIONE DEL RETICOLO PER IL GIUNTO DX

k,400,w/2,h,0
k,484,w/2,h-t,0
k,401,1.25*w,h,0
k,486,1.25*w,h-2*t,0
k,402,1.5*w,h,0
k,488,1.5*w,h-2*t,0
k,403,1.75*w,h,0
k,490,1.75*w,h-2*t,0
k,404,2.25*w,h,0
k,492,2.25*w,h-3*t,0
k,405,2.5*w,h,0

```

k,494,2.5*w,h-3*t,0
k,406,3.5*w,h,0
k,496,3.5*w,h-4*t,0
k,407,4.5*w,h,0
k,498,4.5*w,h-5*t,0
k,408,4.75*w,h,0
k,500,4.75*w,h-5*t,0
k,409,5.25*w,h,0
k,502,5.25*w,h-6*t,0
k,410,5.5*w,h,0
k,504,5.5*w,h-6*t,0
k,411,5.75*w,h,0
k,506,5.75*w,h-6*t,0
k,412,6.5*w,h,0
k,508,6.5*w,h-7*t,0

l,400,484
l,401,486
l,402,488
l,403,490
l,404,492
l,405,494
l,406,496
l,407,498
l,408,500
l,409,502
l,410,504
l,411,506
l,412,508

k,413,0,h-0.5*t,0
k,414,7*w,h-0.5*t,0
k,415,7*w,h-t,0
k,416,7*w,h-1.5*t,0
k,417,7*w,h-2*t,0
k,418,7*w,h-2.5*t,0
k,419,7*w,h-3*t,0
k,420,7*w,h-3.5*t,0
k,421,7*w,h-4*t,0
k,422,7*w,h-4.5*t,0
k,423,7*w,h-5*t,0
k,424,7*w,h-5.5*t,0

*IF,a1,GT,0,AND,a1,LT,w,THEN
*ELSE
k,425,7*w,h-6*t,0
*ENDIF

k,426,7*w,h-6.5*t,0

l,413,414

*IF,a2,GT,0,AND,a2,LT,w,THEN
l,174,415
*ELSE
l,19,415
*ENDIF

k,709,0,h-1.5*t,0
k,710,w,h-1.5*t,0

```
*IF,a1,GT,0,AND,a1,LT,w,THEN
*ELSE
k,711,0,h-2*t,0
*ENDIF
```

```
k,712,0,h-2.5*t,0
k,713,2*w,h-2.5*t,0
k,714,0,h-3*t
k,715,0,h-3.5*t,0
k,716,3*w,h-3.5*t,0
k,717,0,h-4*t,0
k,718,0,h-4.5*t,0
k,719,4*w,h-4.5*t,0
k,720,0,h-5*t
k,721,0,h-5.5*t,0
k,722,5*w,h-5.5*t,0
k,723,0,h-6*t,0
k,724,0,h-6.5*t,0
k,725,6*w,h-6.5*t,0
```

```
l,710,416
l,21,417
l,713,418
l,23,419
l,716,420
l,25,421
l,719,422
```

```
*IF,a2,GT,0,AND,a2,LT,w,THEN
l,179,423
*ELSE
l,27,423
*ENDIF
```

```
l,722,424
```

```
*IF,a1,GT,0,AND,a1,LT,w,THEN
*ELSE
l,29,425
*ENDIF
```

```
l,725,426
```

```
!=====
```

```
*GET,num_totale_linee,LINE,,COUNT !conto delle linee totali
```

```
LSEL,S,LINE,,num_linee_sx+1,num_totale_linee,1 !si selezionano tutte le linee fatte finora
```

```
*IF,a1,GT,0,AND,a1,LT,w,THEN
KSEL,S,,,39,40,1
KSEL,A,,,53
LSLK,A,1
*ENDIF
```

```
*IF,a2,GT,0,AND,a2,LT,w,THEN
KSEL,S,,,54,55,1
KSEL,A,,,68
LSLK,A,1
```

*ENDIF

*IF,a3,GT,0,AND,a3,LT,w,THEN
KSEL,S,,,69,70,1
KSEL,A,,,83
KSEL,A,,,114,115,1
KSEL,A,,,128
LSLK,A,1
*ENDIF

*IF,a2,GT,0,AND,a2,LT,w,THEN
KSEL,S,,,99,100,1
KSEL,A,,,113
LSLK,A,1
*ENDIF

*IF,a1,GT,0,AND,a1,LT,w,THEN
KSEL,S,,,84,85,1
KSEL,A,,,98
LSLK,A,1
*ENDIF

KSEL,ALL

A,17,33,36,35
ASBL,1,ALL

ASEL,S,AREA,,ALL

*GET,num_ree,AREA,,COUNT

*GET,num_ultima_area,AREA,,NUM,MAX

ADELE,num_ultima_area,,1

ALLSEL,ALL,ALL

*GET,num_linea_finale,LINE,,NUM,MAX

!=====

!pregiunzione sx

k,600,-w,h,0
k,601,-w,h-t/2,0
k,602,-w,h-t,0
k,603,-w,h-1.5*t,0
k,604,-w,h-2*t,0
k,605,-w,h-2.5*t,0
k,606,-w,h-3*t,0
k,607,-w,h-3.5*t,0
k,608,-w,h-4*t,0
k,609,-w,h-4.5*t,0
k,610,-w,h-5*t,0
k,611,-w,h-5.5*t,0
k,612,-w,h-6*t,0
k,613,-w,h-6.5*t,0
k,614,-w,h-7*t,0
k,615,-w,h-7.5*t,0
k,616,-w,h-8*t,0

k,617,0,h-t/2,0
k,618,-w/2,h,0
k,619,-w/2,h-8*t,0

l,600,616
l,601,617
l,602,2
l,603,209

*IF,a1,GT,0,AND,a1,LT,w,THEN
l,604,156
*ELSE
l,604,211
*ENDIF

l,605,212
l,606,214
l,607,215
l,608,217
l,609,218
l,610,220
l,611,221
l,612,223
l,613,224
l,614,226
l,615,227

l,618,619

ASEL,S,AREA,,num_ultima_area_sx

KSEL,S,,,600,619,1
LSLK,S,0

ASBL,num_ultima_area_sx,ALL

ALLSEL,ALL,ALL

!=====

!pregiunzione dx

k,650,8*w,h,0
k,651,8*w,h-t/2,0
k,652,8*w,h-t,0
k,653,8*w,h-1.5*t,0
k,654,8*w,h-2*t,0
k,655,8*w,h-2.5*t,0
k,656,8*w,h-3*t,0
k,657,8*w,h-3.5*t,0
k,658,8*w,h-4*t,0
k,659,8*w,h-4.5*t,0
k,660,8*w,h-5*t,0
k,661,8*w,h-5.5*t,0
k,662,8*w,h-6*t,0
k,663,8*w,h-6.5*t,0
k,664,8*w,h-7*t,0
k,665,8*w,h-7.5*t,0
k,666,8*w,h-8*t,0

k,667,7*w,h-7.5*t,0
k,668,7.5*w,h,0
k,669,7.5*w,h-8*t,0

l,650,666
l,414,651
l,415,652
l,416,653
l,417,654
l,418,655
l,419,656
l,420,657
l,421,658
l,422,659
l,423,660
l,424,661

*IF,a1,GT,0,AND,a1,LT,w,THEN
l,181,662
*ELSE
l,425,662
*ENDIF

l,426,663
l,31,664
l,667,665
l,668,669

!=====

ASEL,S,AREA,,num_ultima_area-1

KSEL,S,,,650,669,1
LSLK,S,0

ASBL,num_ultima_area-1,ALL

ALLSEL,ALL,ALL

!=====

!DEFINIZIONE VINCOLI

!parte sx del giunto

KSEL,S,,,37
KSEL,A,,,38

LSLK,S,1

DL,ALL,,UX,,1
DL,ALL,,UY,,1

ALLSEL,ALL,ALL

!-----

!parte dx del giunto

KSEL,S,,,35
KSEL,A,,,36

LSLK,S,1

DL,ALL,,UY,,1

ALLSEL,ALL,ALL

!=====

!DEFINIZIONE CARICO

KSEL,S,,,35
KSEL,A,,,36

LSLK,S,1

SFL,ALL,PRES,-sigma,-sigma,,

ALLSEL,ALL,ALL

!*****

! A questo punto è necessario effettuare manualmente l'operazione di meshatura ed attribuzione delle
! proprietà del materiale alle varie aree

!*****

/PREP7

!CICLO PER ASSEGNARE LE COUPLING EQUATION

!-----SX ORIZZONTALE-----

*IF,a1,GT,0,AND,a1,LT,w/2-0.25,THEN

KSEL,S,,,53
KSEL,A,,,184
KSEL,A,,,484

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=a1+t+incr/2
x2=w/2-incr

*DO,j,x1,x2,incr
NSEL,R,LOC,X,j,j+incr
*GET,nmodisel,NODE,,COUNT

```
*IF,nnodisel,EQ,2,THEN
CP,,ALL,ALL
*ELSE
*ENDIF
NSLL,S,1
*ENDDO

ALLSEL,ALL,ALL

KSEL,S,,184
KSEL,A,,484
KSEL,A,,3
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,NDIV

incr=lunghezza/numdiv/2

x1=w/2-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

!-----DX ORIZZONTALE-----

KSEL,S,,14
KSEL,A,,30
KSEL,A,,208
KSEL,A,,508

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=6*w-incr/2
x2=13/2*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

KSEL,S,,,208
KSEL,A,,,508
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,NDIV

incr=lunghezza/numdiv/2

x1=13/2*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

*ENDIF

!-----

*IF,a1,GE,w/2-0.25,AND,a1,LT,w,THEN

!-----SX ORIZZONTALE-----

KSEL,S,,,53
KSEL,A,,,19
KSEL,A,,,3

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=a1+t+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

!-----DX ORIZZONTALE-----

KSEL,S,,,98

KSEL,A,,,14

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,NDIV

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

*ENDIF

!-----

*IF,a2,GT,0,AND,a2,LT,w/4-0.25,THEN

!-----SX ORIZZONTALE-----

```

KSEL,S,,,68
KSEL,A,,,186
KSEL,A,,,486

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=w+a2+t+incr/2
x2=5/4*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

KSEL,S,,,186
KSEL,A,,,486
KSEL,A,,,188
KSEL,A,,,488

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=5/4*w-incr/2
x2=3/2*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

```

```
KSEL,S,,,188
KSEL,A,,,488
KSEL,A,,,190
KSEL,A,,,490
```

```
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=3/2*w-incr/2
x2=7/4*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
```

```
KSEL,S,,,190
KSEL,A,,,490
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,NDIV
```

```
incr=lunghezza/numdiv/2
```

```
x1=7/4*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

!-----DX ORIZZONTALE-----

KSEL,S,,,12
KSEL,A,,,28
KSEL,A,,,202
KSEL,A,,,502

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=5*w-incr/2
x2=21/4*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

KSEL,S,,,202
KSEL,A,,,502
KSEL,A,,,204
KSEL,A,,,504

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=21/4*w-incr/2
x2=11/2*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

KSEL,S,,,204

KSEL,A,,,504

KSEL,A,,,206

KSEL,A,,,506

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=11/2*w-incr/2

x2=23/4*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

KSEL,S,,,206

KSEL,A,,,506

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,NDIV

incr=lunghezza/numdiv/2

x1=23/4*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

*ELSEIF,a2,EQ,w,THEN

*ENDIF

!-----

*IF,a2,GE,w/4-0.25,AND,a2,LT,w/2-0.25,THEN

!-----SX ORIZZONTALE-----

KSEL,S,,,68
KSEL,A,,,188
KSEL,A,,,488

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=w+a2+t+incr/2
x2=3/2*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

KSEL,S,,,188
KSEL,A,,,488
KSEL,A,,,190
KSEL,A,,,490

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=3/2*w-incr/2
x2=7/4*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

KSEL,S,,,190
KSEL,A,,,490
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,NDIV

incr=lunghezza/numdiv/2

x1=7/4*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

!-----DX ORIZZONTALE-----

KSEL,S,,,12
KSEL,A,,,28
KSEL,A,,,202
KSEL,A,,,502

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=5*w-incr/2
x2=21/4*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

KSEL,S,,,202
KSEL,A,,,502
KSEL,A,,,204
KSEL,A,,,504

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=21/4*w-incr/2
x2=11/2*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

KSEL,S,,,204
KSEL,A,,,504
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,NDIV

incr=lunghezza/numdiv/2

x1=11/2*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

*ELSEIF,a2,EQ,w,THEN

*ENDIF

!-----

*IF,a2,GE,w/2-0.25,AND,a2,LT,3/4*w-0.25,THEN

!-----SX ORIZZONTALE-----

KSEL,S,,,68
KSEL,A,,,190
KSEL,A,,,490

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=w+a2+t+incr/2
x2=7/4*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

KSEL,S,,,190
KSEL,A,,,490
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,NDIV

incr=lunghezza/numdiv/2

x1=7/4*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

!-----DX ORIZZONTALE-----

KSEL,S,,,12
KSEL,A,,,28
KSEL,A,,,202
KSEL,A,,,502

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=5*w-incr/2
x2=23/4*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

KSEL,S,,,202
KSEL,A,,,502
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,NDIV
```

incr=lunghezza/numdiv/2

x1=23/4*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

*ELSEIF,a2,EQ,w,THEN

*ENDIF

!-----

*IF,a2,GE,3/4*w-0.25,AND,a2,LT,2*w,THEN

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,NDIV
```

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,NDIV

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

*ELSEIF,a2,EQ,w,THEN

*ENDIF

!-----

*IF,a2,EQ,0,THEN

!-----SX ORIZZONTALE-----

KSEL,S,,,4
KSEL,A,,,20
KSEL,A,,,186
KSEL,A,,,486

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=w-incr/2
x2=5/4*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

```
KSEL,S,,,186
KSEL,A,,,486
KSEL,A,,,188
KSEL,A,,,488
```

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
```

$incr = \text{lunghezza} / \text{numdiv} / 2$

```
x1=5/4*w-incr/2
x2=3/2*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

```
KSEL,S,,,188
KSEL,A,,,488
KSEL,A,,,190
KSEL,A,,,490
```

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
```

$incr = \text{lunghezza} / \text{numdiv} / 2$

```
x1=3/2*w-incr/2
x2=7/4*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

KSEL,S,,,190
KSEL,A,,,490
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,NDIV

incr=lunghezza/numdiv/2

x1=7/4*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

!-----DX ORIZZONTALE-----

KSEL,S,,,12
KSEL,A,,,28
KSEL,A,,,202
KSEL,A,,,502

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=5*w-incr/2
x2=21/4*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
```

```
KSEL,S,,,202
KSEL,A,,,502
KSEL,A,,,204
KSEL,A,,,504
```

```
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=21/4*w-incr/2
x2=11/2*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
```

```
KSEL,S,,,204
KSEL,A,,,504
KSEL,A,,,206
KSEL,A,,,506
```

```
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=11/2*w-incr/2
x2=23/4*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

KSEL,S,,,206
KSEL,A,,,506
KSEL,A,,,13
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,NDIV
```

incr=lunghezza/numdiv/2

x1=23/4*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

*ENDIF

!*****

!non è prevista propagazione di cricca lungo la terza interfaccia

!*****

!-----SX ORIZZONTALE-----

KSEL,S,,,6
KSEL,A,,,22
KSEL,A,,,192
KSEL,A,,,492

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=2*w-incr/2
x2=9/4*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

KSEL,S,,,192
KSEL,A,,,492
KSEL,A,,,194
KSEL,A,,,494

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=9/4*w-incr/2
x2=5/2*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

KSEL,S,,,194
KSEL,A,,,494
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,NDIV
```

incr=lunghezza/numdiv/2

x1=5/2*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

!-----DX ORIZZONTALE-----

KSEL,S,,,10
KSEL,A,,,26
KSEL,A,,,198
KSEL,A,,,498

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=4*w-incr/2
x2=9/2*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

KSEL,S,,,198
KSEL,A,,,498
KSEL,A,,,200

KSEL,A,,,500

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=9/2*w-incr/2

x2=19/4*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

KSEL,S,,,200

KSEL,A,,,500

KSEL,A,,,11

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,NDIV

incr=lunghezza/numdiv/2

x1=19/4*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

!-----

!-----INTERFACCIA CENTRALE-----

```

KSEL,S,,,8
KSEL,A,,,24
KSEL,A,,,196
KSEL,A,,,496

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-incr/2
x2=7/2*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

KSEL,S,,,196
KSEL,A,,,496
KSEL,A,,,9
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=7/2*w-incr/2    !0.03125/2
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

```

!=====

!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
```

!*****

!una volta che il programma ha ultimato la soluzione e si può procedere lanciando il file APDL contenente il
!POSTPROCESSING opportuno relativamente all'interfaccia di propagazione della cricca.

!i seguenti comandi funzionano correttamente solo quando letti in input da ANSYS

!*****

! propagazione della cricca lungo la prima e settima interfaccia

!=====

```
!POSTPROCESSING
/POST1
```

!-----

!SPOSTAMENTI PER IL CALCOLO DELLE COMPONENTI DEL SERR TRAMITE VCCT

```
*CFOPEN,'(nome del file)',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                                !si seleziona la linea costruita tra questi kp
NSLL,S,1                                !si selezionano i nodi appartenenti a tale linea
NSEL,R,LOC,X,a1-0.0125,a1-0.0075        !si seleziona il nodo all'interno dell'intervallo (lungo x)

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX
*GET,u_m1,NODE,num_nodo,U,X             !si identifica lo spostamento in direzione x
*GET,v_m1,NODE,num_nodo,U,Y             !si identifica lo spostamento in direzione 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

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX
*GET,u_m2,NODE,num_nodo,U,X
*GET,v_m2,NODE,num_nodo,U,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

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX
*GET,u_l1,NODE,num_nodo,U,X
*GET,v_l1,NODE,num_nodo,U,Y

*VWRITE,'l',u_l1,'l',v_l1
(' ',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,a1-0.0075,a1-0.0025

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX

*GET,u_l2,NODE,num_nodo,U,X

*GET,v_l2,NODE,num_nodo,U,Y

VWRITE,'l',u_l2,'l*',v_l2
('A2,'F10.6' 'A2,'F10.6')

ALLSEL,ALL,ALL

!-----

!SPOSTAMENTI PER IL CALCOLO DELLA ROTAZIONE

*VWRITE,'SPOSTAMENTI PER ROTAZIONI:'

%%/%c

*VWRITE,'U','V'

('A2,'A2'

KSEL,S,,,39

KSEL,A,,,40

LSLK,S,1

NSLL,S,1

NSEL,R,LOC,X,a1+0.001,a1-0.001

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX

*GET,u_a,NODE,num_nodo,U,X

*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

NSEL,R,LOC,X,a1+0.0025,a1+0.0075

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX

*GET,u_b,NODE,num_nodo,U,X

*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 PER IL CALCOLO DELLE COMPONENTI DEL SERR TRAMITE VCCT Xi,Xj,Yi,Yj

*VWRITE,'FORZE VCCT:'

%/%c

*VWRITE,'X','Y'

(' 'A2,' 'A2)

NSEL,S,LOC,X,a1-0.001,a1+0.001
NSEL,R,LOC,Y,h-t-0.001,h-t+0.001

!si seleziona il nodo all'apice della cricca

ESLN,S,0,ALL

!si selezionano gli elementi attaccati a quel nodo

ESEL,R,CENT,Y,h-t,h-t+0.01

! si selezionano gli elementi superiori

NSLE,S,ALL

! si selezionano i nodi di questi elementi

NSEL,R,LOC,X,a1-0.001,a1+0.001
NSEL,R,LOC,Y,h-t-0.001,h-t+0.001

!si seleziona il nodo dell'apice

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX

!forze sul nodo (i) all'apice dell'elemento di destra

*GET,num_elem,ELEM,0,NUM,MIN

*GET,X_idx,ELEM,num_elem,EFOR,num_nodo,FX

*GET,Y_idx,ELEM,num_elem,EFOR,num_nodo,FY

*GET,num_elem,ELEM,0,NUM,MAX

!forze sul nodo (i) all'apice dell'elemento di sinistra

*GET,X_isx,ELEM,num_elem,EFOR,num_nodo,FX

*GET,Y_isx,ELEM,num_elem,EFOR,num_nodo,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
NSEL,R,LOC,Y,h-t-0.001,h-t+0.001

!si seleziona il nodo all'apice della cricca

ESLN,S,0,ALL

!si selezionano gli elementi attaccati a quel nodo

ESEL,R,CENT,Y,h-t,h-t+0.01

!si selezionano gli elementi superiori

NSLE,S,ALL

!si selezionano i nodi di questi elementi

NSEL,R,LOC,X,a1+0.0025,a1+0.0075
NSEL,R,LOC,Y,h-t-0.001,h-t+0.001

!si seleziona il nodo successivo all'apice

*GET,num_nodo,NODE,0,NUM,MAX

*GET,num_elem,ELEM,0,NUM,MIN

*GET,X_j,ELEM,num_elem,EFOR,num_nodo,FX

!forza in direzione x sul nodo (j)

*GET,Y_j,ELEM,num_elem,EFOR,num_nodo,FY

!forze in direzione y sul nodo (j)

*VWRITE,'j',X_j,'j',Y_j

(' 'A1,' F10.6' 'A1,' F10.6')

!-----

ISPOSTAMENTI AGLI ESTREMI DI APPLICAZIONE DEL CARICO

*VWRITE,'SPOSTAMENTI AGLI ESTREMI:'

%%/%c%/

!-----ux,alto-----

KSEL,S,,,35

KSEL,A,,,36

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,,,35

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,,,36

LSLK,S,1

NSLL,S,1

NSEL,R,LOC,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

!=====

!per cominciare una nuova analisi si deve rientrare nel PREPROCESSOR e ripulire tutto

/PREP7

CPDELE,ALL,,,ALL

ACLEAR,ALL

ADELE,ALL

LCLEAR,ALL

LDELE,ALL

KDELE,ALL

/CLEAR,NOSTART

FINISH

