

# POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in

Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

Caratterizzazione e modellazione agli elementi finiti di un  
adesivo strutturale per applicazioni automotive



Relatore

Prof. Luca Goglio

Correlatore

Prof. Davide Salvatore Paolino

Tutor Aziendale

Ing. Salvatore Sottile

Candidato

Francesco Pellegrino



## Sommario

1	Caratteristiche e proprietà degli adesivi .....	1
1.1	Generalità adesivi.....	1
1.2	La composizione degli adesivi .....	8
1.3	Adesivi Strutturali.....	10
1.3.1	Tipologia di substrati .....	11
1.3.2	Performances e caratteristiche degli adesivi strutturali .....	12
1.3.3	Volumi di produzione e tempi di cura .....	12
1.3.4	Ambiente di utilizzo.....	13
1.3.5	Temperatura di cura.....	13
1.4	Adesivi epossidici .....	13
2	Meccanica dell'adesione .....	19
2.1	Mechanical interlocking .....	19
2.2	Teoria elettrostatica .....	20
2.3	Strati deboli .....	20
2.4	Teoria della bagnabilità o termodinamica .....	21
2.5	Teoria della diffusione.....	24
2.6	Teoria dei legami chimici.....	27
3	Cohesive Zone Modelling .....	30
3.1	La Modellazione coesiva .....	30
3.2	La legge coesiva .....	32
3.3	Forma della legge coesiva .....	39
3.4	Stima dei parametri coesivi.....	41
3.5	Problematiche di convergenza.....	42
3.6	Vantaggi e svantaggi della modellazione coesiva .....	44

4	Metodi per l'ottenimento dei tassi di rilascio di energia $G_{Ic}$ .....	47
4.1	Double Cantilever Beam (DCB).....	50
4.2	Tapered Double Cantilever Beam (TDCB) .....	56
4.2.1	Prova sperimentale .....	61
4.2.2	Valutazione di $G_{Ic}$ .....	62
4.3	End Notched Flexure (ENF) .....	67
4.3.1	Prova sperimentale .....	72
4.3.2	Valutazione del $G_{IIc}$ .....	74
5	Metodi per l'ottenimento della tensione di picco e del parametro di rigidezza della legge di trazione - separazione.....	78
5.1	Il metodo dell'identificazione dei parametri.....	78
5.2	Il metodo inverso .....	83
5.2.1	Modelli FEM delle prove TDCB e ENF.....	85
5.2.2	Strategia di iterazione .....	93
5.2.3	Effetto dei parametri sul modello TDCB .....	95
5.2.4	Effetto dei parametri sul modello ENF .....	99
5.3	Confronto tra le leggi traction – separation.....	105
5.3.1	Legge trapezoidale .....	107
5.3.2	Legge esponenziale .....	110
5.4	Valutazione delle leggi ricavate su un provino Single Lap Joint.....	119
5.4.1	Single Lap Joint .....	119
5.4.2	Modello FEM del Single lap Joint .....	125
5.4.3	Valutazione delle leggi lineare ed esponenziale sulla riproduzione del comportamento del Single lap Joint.....	127
5.5	Riepilogo generale sull'effetto del tipo di legge e dei parametri.....	132
6	Applicazione: Rinforzo di un montante di sospensione.....	134

6.1	Analisi di rigidezza .....	142
6.2	Analisi del collasso.....	146
7	Conclusioni .....	154
	Riferimenti.....	157
	Ringraziamenti .....	160



# 1 Caratteristiche e proprietà degli adesivi

## 1.1 Generalità adesivi

Un adesivo è un materiale polimerico che applicato sulla superficie di due o più componenti ne permette il collegamento permanente attraverso un processo di incollaggio adesivo. Gli adesivi possono essere impiegati per collegare metalli, plastiche, ceramici, legni, gomme e compositi.

Gli adesivi possono essere classificati secondo la loro natura (naturali o sintetici), la composizione chimica, la forma fisica, la funzione per la quale possono essere impiegati, l'applicazione tecnologica, le modalità di con la quale vengono applicati agli aderenti o le modalità con la quale polimerizzano.

Per poter collegare materiali diversi possiamo utilizzare classi e tipologie di adesivo differenti, purché siano eseguiti gli opportuni trattamenti superficiali, che incrementano l'entità del collegamento adesivo – aderente. L'impiego di questa tecnologia permette il collegamento tra parti realizzate in materiali innovativi o che rendono ostico l'impiego dei classici collegamenti meccanici e si propone come un'ottima soluzione alternativa per la realizzazione di collegamenti. Per fare un esempio immaginiamo di voler collegare un materiale composito a matrice polimerica: questo materiale presenta molti vantaggi come ad esempio la bassa densità e le elevate caratteristiche meccaniche ma non può essere collegato con un'altra parte attraverso un cordone di saldatura, tuttavia può essere collegato senza particolari difficoltà con diverse classi di adesivi anche qualora si volesse impiegarlo in applicazioni strutturali.

Gli adesivi possono essere termoplastici o termoindurenti. Gli adesivi termoplastici sono monocomponente e curano, o meglio solidificano, per raffreddamento dopo essere stato applicato in forma liquida oppure per evaporazione di un solvente o di acqua. Non vengono usati tipicamente per applicazioni strutturali per via della bassa resistenza al peel e mostrano anche bassa resistenza al creep. Non possono essere impiegati per applicazioni ad alte temperature, superiori a 90 °C (non è raccomandato l'uso sopra i 66 °C) e di solito vengono impiegati per incollare materiali non metallici come legno o plastica. Hanno il vantaggio, essendo termoplastici, di poter essere fusi e riutilizzati un certo numero di volte senza subire un sensibile decadimento delle proprietà.

Gli adesivi termoindurenti non possono essere riutilizzati, se riscaldati troppo degradano. Sono forniti in forma solida, liquida o pastosa e possono essere sia monocomponenti che bicomponenti. Le resine

monocomponente possono essere acriliche, poliuretaniche, epossidiche, viniliche e siliconiche. Curano per riscaldamento in forno e hanno una vita utile limitata. In alcuni casi il processo avviene per reazione con umidità. Le resine bicomponente curano a seguito della miscelazione del polimero di base e di un catalizzatore a freddo o a caldo, con velocità variabile in funzione della temperatura (maggiore è la temperatura più velocemente avverrà la cura dell'adesivo). Gli adesivi bicomponenti sono quelli più utilizzati per applicazioni strutturali e hanno una vita utile molto più lunga dei monocomponenti, per contro il loro impiego è più complesso perché necessitano di attenzione per la miscelazione corretta delle due parti in termini di proporzioni e tempi di utilizzo dopo miscelazione. Sono molto resistenti ai solventi e al calore, e offrono ottime proprietà meccaniche in termini di resistenza e di rigidità anche ad elevate temperature (fino a 260 °C). La resistenza al peel è discreta.

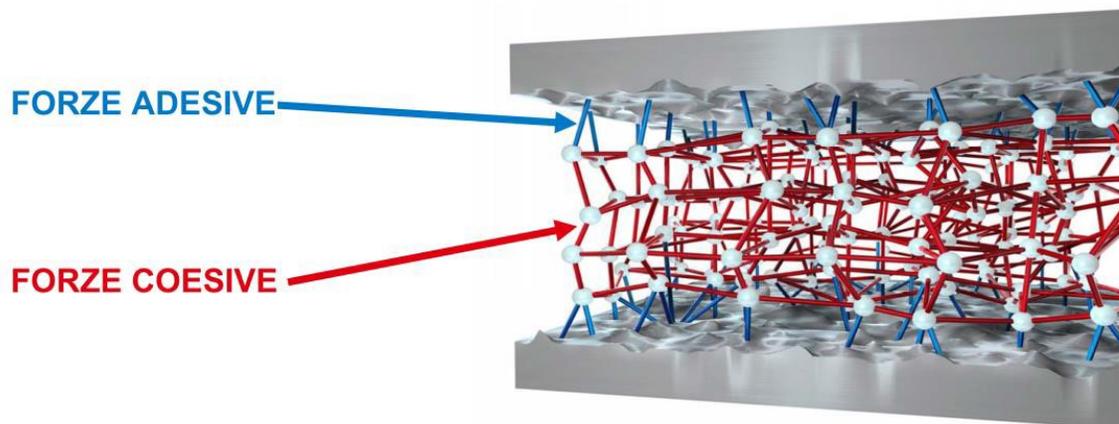
Sul mercato è presente una grande variabilità di adesivi che permettono ai progettisti di individuare la soluzione più opportuna in funzione dell'applicazione, delle necessità del processo produttivo, dell'integrazione con il processo produttivo, delle condizioni in cui la struttura finale andrà ad operare in termini di temperatura ed esposizione all'umidità, dei tempi di apertura e di cura. Tuttavia, è possibile identificare alcune proprietà comuni:

- Buon rapporto resistenza/peso
- Distribuzione uniforme delle tensioni
- Smorzano le vibrazioni riducendo la rumorosità
- Il collegamento non richiede la creazione di intagli, permettendo di evitare la concentrazione delle tensioni che favorirebbe la nucleazione di cricche
- Fornisce un ulteriore contributo di rigidità alla struttura incollata
- Minimizza o evita la corrosione galvanica, poiché isolano gli aderenti dal contatto con l'ambiente circostante
- Bassa conducibilità termica ed elettrica
- L'eventuale calore richiesto nei processi di cura non è tale da determinare l'alterazione delle parti in metallo
- Permettono una semplice, veloce ed economica realizzazione del giunto
- Non sono antiestetici

Gli adesivi più comuni tuttavia non sono utilizzabili per applicazioni ad alte temperature (superiori a 180°), questo perché essendo materiali polimerici (termoplastici o termoindurenti) degradano nel caso vengano raggiunte temperature troppo elevate, inoltre in alcuni casi e per alcune tipologie di adesivi è

richiesto un tempo di cura elevato dopo l'applicazione dell'adesivo per permettere una certa percentuale di reticolazione del polimero, questo in alcuni casi non è compatibile con i tempi del processo produttivo e può configurarsi come una limitazione all'utilizzo di questi materiali. In ogni caso i tempi di cura decrescono in modo importante con l'aumento delle temperature. La vita utile di un giunto adesivo dipende dall'ambiente e dalle condizioni a cui esso è esposto, in generale sono condizioni affaticanti per la resistenza del giunto temperature troppo alte o troppo basse, umidità, acqua dolce o salata, condizioni atmosferiche estreme, contatto con solventi o con agenti chimici aggressivi ed esposizione a radiazioni.

Una delle caratteristiche più importanti di questa classe di materiali è la bassa quantità richiesta comparata al peso dell'oggetto finale. Le proprietà meccaniche della struttura incollata dipendono dalle caratteristiche delle forze di legame coesive che si instaurano all'interno dell'adesivo, dalle proprietà meccaniche dei due substrati e dalle caratteristiche di resistenza dei legami adesivi che si creano all'interfaccia adesivo-aderente. In figura 1.1 è mostrato lo schema di un collegamento adesivo, in cui sono evidenziati i legami coesivi e i legami adesivi che si formano dopo la fase di cura.



*Figura 1.1 Forze coesive all'interno dell'adesivo e forze adesive tra substrati e adesivo*

Un altro vantaggio nell'uso di adesivi si osserva quando si vuole collegare materiali diversi in ambienti in cui si verifica variazione di temperatura con una certa frequenza, questo perché l'incollante è un materiale flessibile che può compensare la differente entità dell'espansione delle parti incollate dovuta ai differenti coefficienti di dilatazione termica.

Il collegamento adesivo permette una riduzione considerevole di peso rispetto ai più classici collegamenti meccanici come saldatura o rivettatura e proprio per questo motivo è un argomento che interessa molti settori tra cui quello automotive. In modo particolare in questo settore si predilige l'utilizzo di adesivi strutturali capaci di sopportare le sollecitazioni a cui i componenti sono sottoposti. Gli adesivi strutturali devono essere capaci di trasmettere le sollecitazioni conservando la loro integrità almeno all'interno del campo di funzionamento del componente. Devono poi essere in grado di garantire una certa durabilità, soprattutto nel collegamento di componenti di cui non è prevista sostituzione durante la vita del veicolo (ad esempio nel caso di giunzione di componenti del sistema sospensivo); in questo caso la vita utile del giunto incollato deve coincidere con la vita utile della vettura. In generale viene definito adesivo strutturale un adesivo con resistenza al taglio maggiore di 7 MPa e con una buona resistenza all'invecchiamento. Un adesivo non strutturale invece non ha nessun compito in termini di resistenza al carico ma è impiegato solo quando sia necessario mantenere in posizione le due parti da collegare.

In generale un collegamento può essere realizzato in modo discontinuo utilizzando avvitatura, rivettatura o saldatura a punti oppure in modo continuo utilizzando saldatura continua o collegamento adesivo. Il ruolo dell'adesivo di incollare due parti è svolto trasmettendo gli stress da un substrato all'altro in modo più uniforme rispetto a quello che può essere fatto da un collegamento meccanico, fornendo strutture meccanicamente equivalenti o superiori con minore costo e peso. In certi casi è possibile raggiungere una resistenza dell'adesivo superiore a quella delle parti incollate agendo opportunamente sulla composizione chimica dell'adesivo. Essendo un tipo di collegamento continuo, forniscono il vantaggio di non avere una resistenza concentrata solo in certi punti di collegamento ma in un'area estesa, il che consente di ridurre l'area di concentrazione delle tensioni e la sua entità.

Gli adesivi sono inoltre in grado di fornire una certa quota di smorzamento meccanico alla struttura e hanno buona resistenza a fatica per la capacità di questi materiali di resistere a stati di deformazione ciclica, inoltre sono resistenti a shock senza la nucleazione di cricche. In un giunto adesivo propriamente realizzato i substrati subiscono rottura per fatica prima del fallimento dell'adesivo. Il processo di applicazione dell'adesivo non causa carichi eccessivi sui substrati come in rivettatura e non causa riscaldamento localizzato come in saldatura evitando la distorsione del pezzo saldato causata dal calore.

La scelta dell'adesivo dipende dalla natura degli aderenti, dall'applicazione, dalle condizioni di utilizzo, dalle performances richieste al giunto, dal processo di incollaggio necessario, dalla compatibilità

chimica con gli aderenti, da esigenze di processo, dai tempi e dalle temperature disponibili per curare l'adesivo e da motivi estetici.

Per ottenere un giunto di buona qualità è necessario che le superfici dei substrati siano pulite altrimenti l'adesivo può aderire allo strato del materiale depositato sulla superficie come sporczia, polvere, olio, umidità o strati ossidati deboli invece che al substrato causando un giunto poco resistente e che non rispetta i requisiti richiesti in termini di resistenza e rigidità. Per eliminare questi strati deboli è necessario eseguire trattamenti superficiali che consistono in processi chimici, fisici o entrambi.

Un altro trattamento eseguito tipicamente è la bagnatura che consiste nello spostare aria o altri gas presenti sulla superficie dei materiali da incollare per concedere un'area maggiore alle forze di adesione.

La polimerizzazione è il processo con la quale si formano le catene polimeriche, tipicamente per poliaddizione o policondensazione mentre per cura si intende il processo con la quale un materiale polimerico termoindurente liquido diventa solido per via della formazione di legami chimici tra le catene polimeriche. La reticolazione tende alla formazione di un'unica struttura reticolare tridimensionale, a questo punto il sistema raggiunge il *punto di gelo*. Nel gergo comune, tuttavia, per cura si intende il processo generico di indurimento dell'adesivo. Il processo di *curing* può avvenire in diversi modi a seconda del tipo di adesivo che si considera:

- 1) Per reazione chimica innescata da calore, pressione oppure agenti chimici
- 2) Raffreddamento di liquido fuso
- 3) Evaporazione di solvente

La cura può durare da minuti o ore fino a qualche giorno e può richiedere il raggiungimento di certe temperature, un certo livello di pressione oppure l'esposizione ai raggi UV. In generale le condizioni specifiche di cura dipendono dalle proprietà dell'adesivo che si utilizza. Tipicamente per adesivi di uso comune il processo di cura avviene in un range di temperature compreso tra la temperatura ambiente e 180 °C e un range di pressione che va dalla pressione di contatto 6,9-34,5 kPa a 3447 kPa.

L'impiego di adesivi nelle produzioni di serie è limitato dai tempi di cura relativamente lunghi che non si sposano con una produzione di grandi volumi, tuttavia il tempo di cura può essere ridotto apportando calore poiché questo favorisce la reticolazione, per questo motivo la reazione avverrà più velocemente

e il collegamento risulterà oltretutto più forte e stabile perché il numero di legami tra le catene sarà superiore.

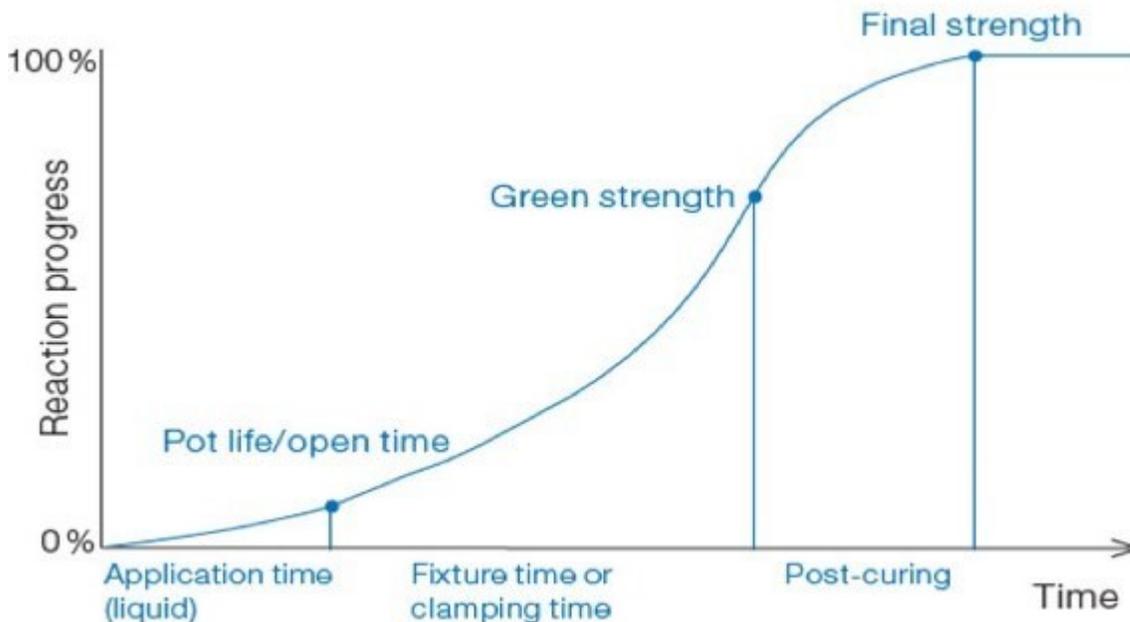


Figura 1.2 Andamento della reazione di cura per un adesivo epossidico bicomponente

Nella figura 1.2 possiamo osservare l'andamento della reazione di cura per un adesivo epossidico bicomponente.

Si vede come la resina può essere lavorata successivamente alla miscelazione (tempo iniziale) solo per un tempo limitato, fino al raggiungimento del tempo di lavorabilità. Successivamente la miscela diventa troppo viscosa e non bagna in modo corretto la superficie dell'aderente. Il tempo di lavorabilità dipende dalla velocità con la quale procede la cura e poiché la velocità di cura dipende dalla temperatura, maggiore sarà la temperatura minore sarà il tempo di lavorabilità. La regola empirica che si segue per fare delle valutazioni iniziali è che ad un aumento di temperature di cura di 10 °C corrisponde un raddoppio della velocità della reazione. Inoltre, questa reazione è esotermica e la miscela ha bassa conducibilità termica, il che significa che maggiore è la quantità di adesivo che si prepara minore sarà la quantità di calore che il sistema riesce a smaltire e quindi la temperatura che la miscela raggiungerà sarà maggiore, il che contribuisce a velocizzare ulteriormente la reazione. Il tempo di lavorabilità o *pot life* può essere incrementato favorendo lo smaltimento di calore ad esempio utilizzando contenitori

quasi – piani. Il tempo di gelificazione indica il tempo in cui lo stato fisico da viscoso diventa solido per cui è il tempo minimo che è necessario attendere prima di movimentare il pezzo. Tendenzialmente per evitare di rompere il collegamento adesivo, ad esempio a causa di una manovra troppo brusca, prima di movimentare il pezzo si attende un tempo sufficientemente lungo da garantire una certa percentuale della resistenza finale del giunto. In questo modo si libera la stazione di lavoro e la cura continua in magazzino o altro luogo fino a raggiungere, dopo qualche ora o qualche giorno la resistenza finale.

È possibile migliorare l'adesione tra i materiali grazie a pulizia, abrasione o trattamenti superficiali anche complessi e costosi come trattamenti con corona o plasma che agiscono sulle caratteristiche delle proprietà delle superfici da collegare. L'abrasione incrementa l'adesione perché la cricca per propagare deve affrontare un percorso più difficoltoso, quindi la velocità di propagazione della cricca sarà inferiore e il giunto avrà vita utile superiore.

La resistenza del giunto dipende dalla natura dell'adesivo, dalla natura dei substrati, dalla velocità di deformazione e dalla sovrapposizione. In generale al fine di progettare un giunto incollato è necessario tener presente che la resistenza del giunto diminuisce all'aumentare dello spessore adesivo, aumenta in modo lineare all'aumentare della larghezza di sovrapposizione e aumenta fino a un valore asintotico con la lunghezza della sovrapposizione. La rottura del giunto incollato può avvenire all'interno del substrato (1), all'interno dell'adesivo in modo coesivo (2), all'interfaccia adesivo – substrato in modo adesivo (3) oppure in modo misto (4). Figura 1.3.

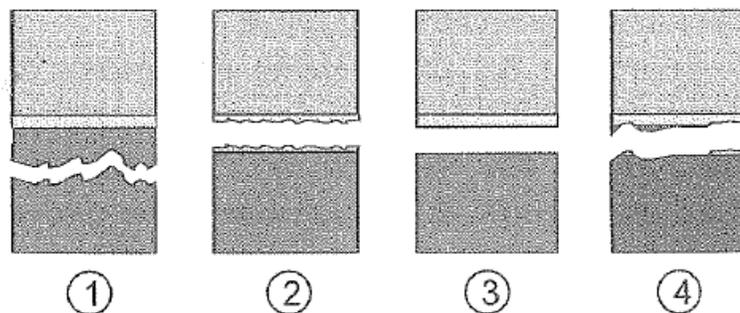


Figura 1.3 Modalità di fallimento del giunto incollato. 1) Coesivo nel substrato 2) Coesivo nell'adesivo 3) Adesivo all'interfaccia adesivo - substrato 4) Misto

È sempre auspicabile che la rottura del giunto avvenga in modo coesivo nell'adesivo o coesivo nel substrato perché in questo modo il giunto offre la massima resistenza a rottura del materiale, spesso però il fallimento del giunto è di tipo misto. Il criterio più importante per valutare la resistenza del giunto è la forza a rottura. È importante sottolineare che se l'adesivo non bagna bene la superficie

dell'aderente, il giunto incollato sicuramente offrirà una resistenza inferiore alla massima possibile. Gli stress all'interno dell'adesivo possono nascere anche senza l'applicazione di una sollecitazione per via della tendenza dell'adesivo di ritrarsi durante la cura oppure per via delle differenti proprietà fisiche di adesivo e aderenti. Proprio per via di questo motivo quando si vuole eseguire cura a temperatura maggiore di quella ambiente è preferibile utilizzare adesivo e aderenti con coefficiente di dilatazione termica simile, altrimenti nel ciclo di riscaldamento e raffreddamento del processo di cura potrei raggiungere stress troppo elevati che potrebbero causare il danneggiamento dell'adesivo. Per modificare il coefficiente di dilatazione termica dell'adesivo è possibile utilizzare dei riempitivi nella formula dell'adesivo.

## 1.2 La composizione degli adesivi

La composizione dell'adesivo può variare allo scopo di ottenere un materiale con le proprietà e le caratteristiche desiderate. Il numero elevato di componenti che vengono utilizzati per formulare un materiale adesivo permette di ottenere potenzialmente una variabilità elevata nel risultato finale, questo permette all'utente finale di scegliere il prodotto più adatto alla propria applicazione in funzione del materiale dei substrati, delle prestazioni richieste al giunto, delle condizioni di esercizio, delle condizioni necessarie per un corretto processo di cura, dei tempi di realizzazione del giunto e della possibilità di integrazione del processo produttivo.

Le componenti principali di un adesivo sono:

- 1) Base dell'adesivo o binder: è la parte del materiale che fa da base ovvero la parte che contiene i polimeri che si andranno a legare nel processo di cura. Ne sono un esempio le resine epossidiche o le resine acriliche
- 2) Hardener: gli indurenti sono quei componenti necessari per l'impiego di adesivi termoindurenti bicomponenti che miscelati con la base permettono l'attivazione del processo di cura e quindi la formazione dei legami covalenti tra le catene polimeriche che danno vita alla struttura reticolare rigida tipica degli adesivi strutturali

- 3) Catalizzatori: vengono impiegati in piccole quantità al fine di controllare la velocità di reazione tra la base e l'indurente. Con questi è possibile controllare il punto di lavorabilità o di manipolazione per rendere l'adesivo compatibile con il processo produttivo e i tempi ciclo e, poiché la velocità di cura e la temperatura sono in relazione, si potrebbe anche utilizzare un catalizzatore per controllare la temperatura di cura piuttosto che la velocità di cura
- 4) Solventi: il ruolo principale di questo componente è aumentare l'adesione adesivo - substrato riducendo la viscosità della miscela al fine di aumentarne la bagnabilità. Possono essere impiegati anche diversi solventi con diversi livelli di volatilità per regolare l'evaporazione del solvente. Possono essere di diverse tipologie (esteri, aromatici, chetoni) e di norma la loro quantità può oscillare tra l'1% e il 3%
- 5) Diluenti: anche i diluenti diminuiscono la viscosità della miscela ma vengono utilizzati anche per alterare le condizioni di processo. A differenza dei solventi non evaporano dopo aver adempiuto al loro scopo ma vengono incorporate nell'adesivo curato reagendo con la base durante la cura, ad esempio nel caso di adesivo epoxy reagisce con la resina epossidica poiché contiene un idrogeno attivo. Non avendo le proprietà della resina in cui si ingloba, determina una riduzione delle proprietà del prodotto curato e ne aumenta la flessibilità. Può reagire anche con gli indurenti
- 6) Riempitivi: vengono utilizzati comunemente nelle miscele degli adesivi perché hanno il doppio scopo di ridurre i costi, diminuendo la quantità di resina all'interno del volume, e di migliorare le performances diminuendo l'espansione termica (diminuisce il coefficiente di dilatazione termica), variando la conduttività termica ed elettrica, riducendo il ritiro dopo eventuale cura ad alte temperature e aumentando la resistenza al calore. Possono essere inseriti sotto forma di polvere, ottenendo un aumento di viscosità e di resistenza all'abrasione, oppure in di fibre per modificare le proprietà reologiche o rinforzare il composto, in questo caso si ottiene un aumento di resistenza all'impatto e a trazione
- 7) Plasticizzanti: aumentano il tempo di lavorabilità e di manipolazione, migliorano la resistenza all'impatto ma causano un degrado della resistenza chimica e al calore.

Altri additivi possono essere inseriti nella miscela in piccole quantità al fine di migliorare l'adesione su certe superfici di substrati non porosi come vetri o plastiche in quantità che variano dal 0,05% al 0,2%. In altri casi vengono introdotti additivi per ridurre l'ossidazione, ridurre l'infiammabilità, incrementare la resistenza chimica, migliorare la conduttività termica ed elettrica oppure favorire l'isolamento elettrico.

### 1.3 Adesivi Strutturali

La tecnologia degli incollaggi adesivi negli ultimi anni sta entrando con vigore nell'industria automotive soprattutto in applicazioni su auto di segmenti superiori, dove di norma cominciano a prendere piede le novità anche dal punto di vista dei materiali impiegati. Proprio per via dell'utilizzo di materiali compositi a matrice polimerica in alcune applicazioni automotive e della necessità di collegare tra loro componenti costituiti da questo materiale (e non solo) nasce la possibilità di impiegare giunti adesivi. Alcune aziende hanno in fase di studio alcune soluzioni di componenti di sospensione in materiale composito, e poiché questi componenti della struttura sospensiva sono strutturali è necessario che anche eventuali giunzioni adesive abbiano la capacità di poter sopportare e trasmettere i carichi a cui il sistema è soggetto senza perdere la loro integrità, se all'interno dei limiti di progetto.

Un adesivo strutturale ha una resistenza al taglio superiore a 7 MPa, questo valore è solo un'indicazione per discriminare adesivi strutturali da adesivi non strutturali e spesso sono necessarie performances in termini di resistenza molto superiori a questo valore perché l'adesivo possa essere impiegato in applicazioni strutturali.

Poiché non è prevista la sostituzione del sistema sospensivo durante la vita utile del veicolo, l'adesivo deve avere una vita utile di diversi anni che coinciderà, in fase di progetto, con quella che viene presa come riferimento per l'intera vettura. Al momento della scelta dell'adesivo quindi un parametro fondamentale sarà la resistenza dell'adesivo all'invecchiamento. Tipicamente adesivi strutturali hanno un'elevata resistenza all'invecchiamento e una bassa degradazione delle proprietà chimico-fisiche nel tempo.

Un esempio di applicazione è il collegamento di una patch in composito per incrementare le caratteristiche di rigidità e il carico di collasso di un componente di sospensione come un braccio, una traversa, un telaio o un montante.

Un adesivo strutturale ha grande resistenza meccanica e buone caratteristiche di rigidità, oltre a tenere unite due parti un collegamento adesivo di questo tipo deve essere in grado di sopportare elevati carichi.

Nella figura 1.4 sono mostrate le principali tipologie di adesivi strutturali.

Adhesive Material	Modifier
Epoxy Modified (or alloyed) epoxy	Toughener, nylon, phenolic, polysulfide, resorcinol and phenol formaldehyde, melamine, and urea-formaldehyde
Modified (or alloyed) phenolic Polyaromatics Polyester Polyurethane Anaerobic Cyanoacrylate Modified acrylic Neoprene (chloroprene) Nitriles (acrylonitrile-butadiene) Polysulfide	Nitrile, vinyl, neoprene

Figura 1.4 Tipologie di adesivi strutturali e materiali che ne possono modificare le proprietà

I criteri utilizzati per la scelta dell'adesivo da impiegare sono differenti e dipendono da molti fattori come l'applicazione finale, i materiali da collegare, tempi e temperature disponibili per l'applicazione dell'adesivo e per il processo di cura, le condizioni di utilizzo, le proprietà meccaniche richieste, l'ambiente di utilizzo, l'integrazione con il processo produttivo, e altri fattori che dipendono dalle specifiche di utilizzo. Proprio per la complessità e l'importanza di questa fase di scelta per ottenere risultati soddisfacenti è consigliabile in questa fase avvalersi del supporto dell'azienda produttrice.

### 1.3.1 Tipologia di substrati

Per ottenere una buona adesione è importante tenere in considerazione la composizione chimica e la tensione superficiale dei substrati. La regola base è che i materiali dei substrati, se a matrice polimerica, aderiscono bene ad adesivi della stessa famiglia. I substrati di interesse sono in lega di Alluminio e CFRP (Composite fiber reinforced plastic), essi condividono una buona adesione con adesivi reattivi epossidici e con adesivi acrilici.

### 1.3.2 Performances e caratteristiche degli adesivi strutturali

Nella tabella 1.1 sono riassunte le proprietà delle principali classi di adesivi strutturali, per ognuna delle tipologie è stato espresso un giudizio da *low a best*. Si vede come gli adesivi epossidici hanno il miglior comportamento a taglio nel caso di incollaggio di substrati in materiale metallico e composito mentre gli adesivi acrilici rispondono meglio in giunti con substrati in materiale plastico. La resistenza al peel è la più alta se si sceglie un adesivo epossidico opportuno. Gli adesivi epoxy, se scelti opportunamente, mostrano anche una buona resistenza all'impatto ed elevata tenacità. Tipicamente per applicazioni strutturali si preferisce avere elevata rigidità e bassa flessibilità, ed in particolare per applicazioni in componenti di sospensione o per collegare parti differenti della carrozzeria auto avere un elevato range di temperature di funzionamento o resistenza ai solventi non è un criterio determinante, tuttavia in alcune applicazioni devono essere tenuti in considerazione.

<b>Property</b>	<b>Epoxies</b>	<b>Acrylics</b>	<b>Urethanes</b>	<b>Cyanoacrylates</b>
Overlap Shear - Metals	best	low to high	moderate	low for long-term bonding
Overlap Shear - Plastics	moderate	best	moderate	high
Overlap Shear - Composites	best	high	high	moderate
Peel Strength	low to best	low to (occasionally) high	good	low
Impact Resistance and Toughness	poor to best	poor to good	good	low
Flexibility	poor to good	poor to good	excellent	low
Temperature Resistance Range	best	moderate	moderate	low
Solvent Resistance	best	moderate	high	low

*Tabella 1.1 Tabella riassuntiva delle caratteristiche dei principali adesivi strutturali*

### 1.3.3 Volumi di produzione e tempi di cura

È importante tener presente che, ad esempio, giunzioni full composite avranno volumi di produzioni diversi rispetto a giunzioni ibride (es. patch di rinforzo) per cui i tempi ciclo delle due categorie saranno differenti. Questo comporta avere tempi di manipolazione disponibili differenti. Al fine di scegliere correttamente l'adesivo bisogna trovare il giusto compromesso tra tempi di manipolazione e tempi ciclo.

#### 1.3.4 Ambiente di utilizzo

Considerando prevalentemente applicazioni automotive, si devono tenere in conto dei fattori ambientali come la temperatura, l'umidità (che rende più complicato l'utilizzo di un adesivo poliuretano) ed in generale tutte le condizioni affaticanti per l'adesivo e quelle che potrebbero causare il degrado del materiale.

#### 1.3.5 Temperatura di cura

È necessario tenere presente la temperatura di cura richiesta dalle diverse tipologie di incollaggio. In generale un aumento della temperatura di cura causa un aumento della velocità della reazione e quindi una riduzione del tempo di cura. È possibile sfruttare il calore dei processi di cataforesi, se prevista nel processo produttivo, per favorire la cura dell'adesivo e ridurre il tempo di manipolazione, riducendo il tempo in cui la struttura collegata con adesivo occupa una stazione di lavoro.

Per i motivi evidenziati nei paragrafi precedenti l'adesivo scelto per questo studio è stato un adesivo epossidico. Questa tipologia risponde meglio all'esigenza di incollare, nel caso studio affrontato, substrati in materiale metallico e composito.

### 1.4 Adesivi epossidici

Gli adesivi strutturali epossidici sono tipicamente adesivi bicomponenti che a seguito della miscelazione di base e indurente vengono applicati entro il tempo di lavorabilità e curano a temperatura ambiente o superiore (se voglio ridurre i tempi del processo).

Le resine epossidiche hanno maggiore resistenza a trazione e tenacità rispetto ad altre famiglie di termoindurenti, per questo garantiscono elevate performances del collegamento adesivo nonostante la densità sia relativamente bassa (la densità delle due parti è nel range  $1 - 1,5 \text{ g/cm}^3$ ). In termini di caratteristiche meccaniche sono il compromesso migliore per applicazioni strutturali e di solito mostrano un tipo di cedimento coesivo sia in giunti metallici che in giunti con substrati in composito. Hanno tempi di lavorabilità abbastanza elevati e hanno elevata tolleranza sul mix ratio, garantendo comunque un buon risultato successivo al processo di cura. Sono stabili e hanno elevata resistenza all'invecchiamento anche se sottoposti a calore, umidità o acqua salata.

La base è una resina epossidica che si forma da molecole reattive con 2 o più gruppi ossirani o ossidi di etilene  $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$  (Figura 1.5). La molecola di partenza si ottiene sostituendo un atomo di idrogeno con un radicale.

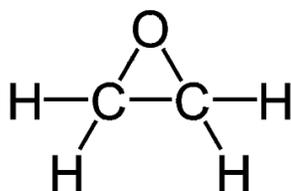


Figura 1.5 Ossido di etilene

Questi adesivi, introdotti nel mercato negli anni '40, reagendo con gli indurenti formano legami covalenti tra le catene che conferiscono un'elevata rigidità e resistenza al prodotto finale, inoltre hanno la capacità di formare legami adesivi forti e stabili con molte tipologie di substrato. Ritirano poco durante la cura per via della piccola presenza di solventi volatili e sono caratterizzati da un'elevata resistenza chimica.

La maggior parte delle resine epossidiche si formano per reazione tra epocloridrina  $\text{C}_3\text{H}_5\text{ClO}$  (figura 1.6) e bisfenolo A (figura 1.7) in eccesso di epocloridrina. Il risultato è un oligomero con due gruppi epossidici alle estremità, mostrato in figura 1.8.

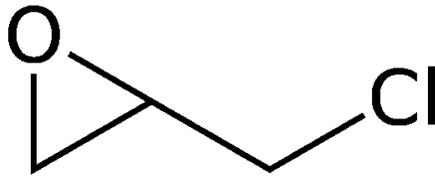


Figura 1.6 Epicloridrina

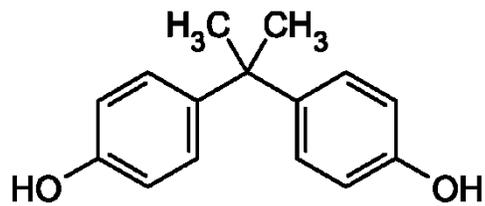


Figura 1.7 Bisfenolo A

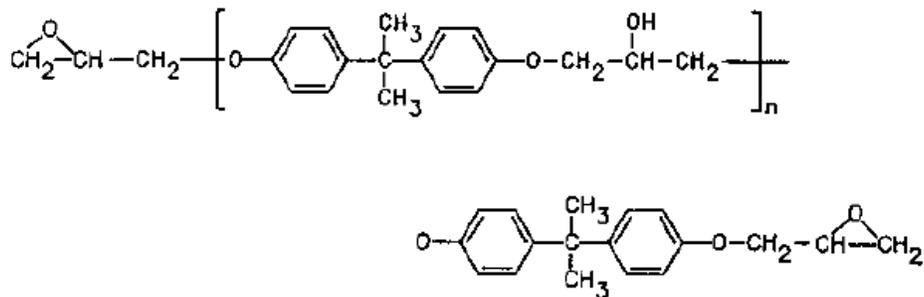


Figura 1.8 Oligomero epossidico

In genere  $n$  (numero di unità ripetitive di cui è costituita la molecola) è compreso tra 0 e 1 per gli adesivi commerciali e, in questa forma, si trova allo stato liquido. Ogni molecola di resina raccoglie due gruppi epossidici. Esistono anche altre tipologie di resine epossidiche come, ad esempio, la tipologia novolacca che viene sintetizzata a partire da epicloridrina e resina fenolica novolacca. Resine ad elevata funzionalità possono essere sintetizzate utilizzando polioli (ovvero composti che contengono più di due

gruppi -OH) ed epicloridrina, in questo caso si ottengono resine con una densità di legami tra le catene elevata, che si riflette in un adesivo con elevata resistenza e fragile. In generale una resina epossidica può essere ottenuta da fenoli, polioli alifatici come il glicerolo e alcoli come il butanolo. In alcuni casi la sintesi è mista per ottenere proprietà intermedie.

La resina ottenuta reagisce con l'indurente e altri additivi per ottenere adesivi epossidici ad alta resistenza. In funzione della composizione della miscela o del tipo di resina epossidica possono raggiungere proprietà differenti e quindi formulazioni diverse sono utilizzate in diverse applicazioni. La quantità di prodotti volatili è modesta quindi tale sarà anche il ritiro in fase di cura e conseguentemente gli stress residui all'interno dell'adesivo dopo cura. Gli indurenti possono essere ammidi, ammine, acidi e basi di Lewis o anidridi. Nella seguente figura è illustrato il meccanismo di cura di una resina epossidica con un indurente ammina primaria (Lo stesso meccanismo avviene con le ammidi o con gli altri indurenti che presentano un idrogeno attivo). In una prima fase l'ammina si lega a una molecola con il primo atomo di idrogeno libero, successivamente il prodotto di questa prima reazione si lega ad una seconda molecola utilizzando il secondo atomo di idrogeno disponibile creando un legame tra le due molecole.



si raggiunge a causa del calore liberato dalla reazione esotermica è troppo alta si corre il rischio di degradare il materiale o della formazione di cricche a seguito del raffreddamento.

I vantaggi nell'utilizzo di una resina epossidica sono:

- 1) Elevate caratteristiche meccaniche e tenacità per via della struttura altamente reticolata e tridimensionale successiva alla cura per poliaddizione
- 2) Stabilità chimica
- 3) Possibilità di lavoro in esercizio tra -150 e +200°C
- 4) Possibilità di gestire la miscela in modo da ottenere le proprietà desiderate
- 5) Basso ritiro durante la cura
- 6) Possibilità di produrla in forma liquida
- 7) Possibilità di incollare superfici differenti e non porose
- 8) Possibilità di collegare compositi a matrice termoplastica e a matrice termoindurente

I principali svantaggi sono legati al costo e al tempo di cura relativamente elevato e al fatto che non è possibile disassemblare il giunto una volta curato, a causa della natura tipicamente termoindurente di questi adesivi.

## 2 Meccanica dell'adesione

In ambito scientifico diverse teorie sono state proposte per descrivere i meccanismi dell'adesione e spesso è difficile associare un solo meccanismo alla creazione di un giunto adesivo [1] [2]. Spesso, al contrario, il collegamento avviene per via di una combinazione di diversi meccanismi ognuno dei quali influenza il collegamento in misura maggiore o minore in funzione del sistema che si considera. Storicamente lo studio di questi meccanismi ha portato ad evidenziare che ognuno di essi ha una scala su cui agisce, ad esempio nella teoria del collegamento meccanico i parametri di interesse riguardano la scala microscopica e per la sua trattazione sono stati usati parametri come la rugosità, la teoria elettrostatica invece pone l'attenzione sulla carica superficiale che è un parametro macroscopico, teorie come quella della diffusione o della bagnabilità fanno riferimento alla scala molecolare ed infine lo studio dei legami chimici pone l'attenzione su scala atomica.

### 2.1 Mechanical interlocking

Secondo la teoria del vincolo meccanico l'adesione avviene a causa della penetrazione dell'adesivo all'interno del substrato, a causa delle irregolarità superficiali, di pori e di cavità presenti sulla superficie dell'aderente. Quando l'adesivo solidifica il collegamento avviene grazie alle creste e valli della superficie che vincolano l'adesivo al legame con il substrato. A conferma di questa teoria ci sono diverse evidenze sperimentali che dimostrano che il collegamento adesivo su una superficie ruvida sia più forte di uno formato su una superficie più liscia, tuttavia non è detto che tra due superfici lisce non si possa instaurare un ottimo incollaggio adesivo ed è per questo motivo che questa teoria non è in grado di spiegare da sola il fenomeno dell'adesione. Il collegamento può essere migliorato assicurando la pulizia della superficie, aumentando la reattività della superficie o aumentando la superficie di contatto adesivo-aderente. È possibile, quindi, migliorare un collegamento adesivo variando le proprietà fisiche e quelle chimiche della superficie dell'incollaggio. La rugosità superficiale causa una maggiore resistenza e una vita utile maggiore del collegamento adesivo purché le condizioni di bagnabilità siano tali da consentire la penetrazione dell'adesivo all'interno di cavità e pori.

Una critica importante a questa teoria riguarda il fatto che, secondo molti studiosi l'aumento di resistenza non sia dovuto all'aumentare del numero dei vincoli e alla loro estensione bensì al fatto che

durante il cedimento del giunto avere una rugosità maggiore della superficie permette di dissipare una maggiore quantità di energia all'apice della cricca e nel materiale perché la cricca deve attraversare un percorso più difficoltoso, inibendo pertanto la propagazione del difetto.

## 2.2 Teoria elettrostatica

La teoria elettrostatica si basa sul fatto che tra due materiali con differente struttura elettronica a bande si ha un trasferimento di elettroni. Tale trasferimento si verifica per raggiungere il livello di Fermi che è l'ultimo livello energetico possibile e causa la formazione di un doppio strato di elettroni che causa la nascita di forze elettrostatiche tra adesivo e aderente. Deryaguin ha notato che il distacco tra adesivo e substrato metallico è assimilabile al distacco tra le armature di un condensatore, per cui si ha un primo aumento della differenza di potenziale (e quindi della forza resistente) fino a raggiungere un massimo per poi avere un decremento fino al momento del distacco delle due armature.

Conferme a questa teoria sono arrivate da prove di peel tra un adesivo e un substrato metallico. Questo meccanismo può spiegare l'adesione polimero-metallo proprio per via della struttura reticolare dei metalli che può essere immaginata come formata da cationi metallici in posizione reticolare immersi in un 'mare' di elettroni delocalizzati liberi di muoversi. Si è dimostrato che in sistemi non-metallici altri tipi di legami chimici influenzano l'adesione in maniera predominante.

## 2.3 Strati deboli

Una delle cause del fallimento degli adesivi può essere, come suggerito da Bikerman, la rottura dei legami coesivi deboli tra la matrice del substrato e alcuni strati di materiale superficiale definiti 'deboli'.

Gli strati deboli si possono generare a causa della natura degli adesivi, di quella degli aderenti, dell'ambiente dove l'incollaggio si forma o per una combinazione di questi tre fattori. La formazione di questi strati si verifica quando una concentrazione di impurità si lega debolmente al substrato. Alcuni materiali contengono intrinsecamente impurità che causano la formazione di questi strati, ne sono un esempio il polietilene che contiene per tutta la sua massa delle componenti deboli e a basso peso molecolare che influenzano il fallimento dell'adesione quando il PE è utilizzato come adesivo o

aderente, e gli ossidi del metallo che si formano sulla superficie della matrice collegandosi ad essa in modo debole. Un'altra causa della formazione di questi strati può essere l'aria, infatti quando la bagnabilità dell'adesivo è troppo bassa non penetra nelle valli della superficie del substrato e l'aria viene intrappolata all'interno diminuendo la resistenza della giunzione.

Questa teoria si basa principalmente su studi statistici condotti da Bikerman che dimostrano come sia più probabile che si verifichi una rottura coesiva degli strati deboli rispetto a fratture nell'interfaccia adesivo-aderente.

Lo spessore degli strati deboli varia a seconda della loro natura e tendenzialmente hanno estensione tra la scala molecolare (nanometri) e quella micrometrica.

Gli strati deboli possono essere in parte eliminati attraverso trattamenti superficiali.

## 2.4 Teoria della bagnabilità o termodinamica

Secondo questa teoria l'adesione avviene a causa del contatto molecolare tra adesivo e aderente, e delle forze di interfaccia che questo contatto causa. Per bagnabilità si intende la proprietà necessaria a stabilire un contatto continuo tra un liquido e un solido, in presenza di un'altra fase gassosa o liquida. La condizione necessaria affinché un adesivo bagni opportunamente un substrato solido è che l'adesivo abbia una tensione superficiale minore rispetto alla tensione superficiale critica del solido, questo spiega il motivo per il quale molti trattamenti superficiali effettuati sui substrati tendono ad aumentarne l'energia superficiale e la polarità. Con il criterio di bagnabilità si spiega perché adesivi organici come gli epossidici hanno ottima adesione a substrati metallici ma pessima a substrati polimerici non trattati.

Il contatto tra i due materiali è importante poiché le forze di Van der Waals che si formano tra le molecole diminuiscono fortemente all'aumentare della distanza tra le molecole stesse.

Nella figura 2.1 sono mostrati i casi di buona e bassa bagnabilità, si ha buona bagnabilità (a) quando l'adesivo fluisce all'interno delle valli del substrato entrando a contatto con la maggior superficie possibile, al contrario si ha bassa bagnabilità (b) quando l'adesivo non entra all'interno delle cavità superficiali riducendo l'area di contatto tra adesivo e substrato.

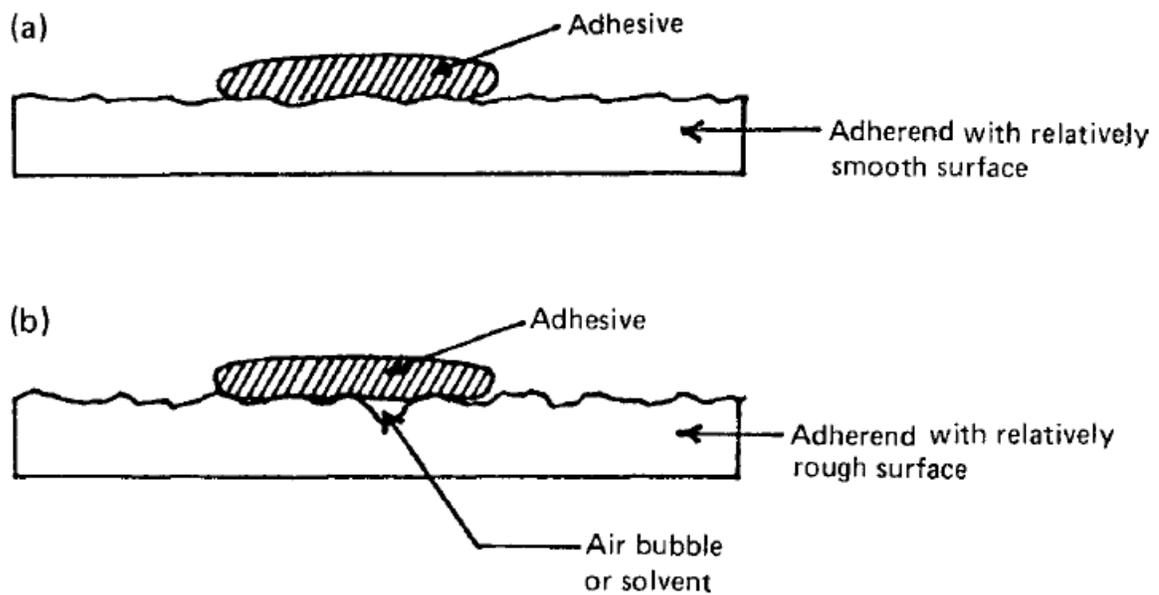


Figura 2.1 Confronto tra buona bagnabilità (a) e scarsa bagnabilità (b)

L'entità delle forze di Van der Waals e di quelle acido-base di Lewis che sono contemplate da questa teoria possono essere messe in relazione a grandezze termodinamiche come la l'energia libera di superficie di adesivo e aderente.

Storicamente questa teoria [2] si è sviluppata cercando di relazionare l'energia libera superficiale ad altre proprietà del materiale, poi cercando di stimare un lavoro di adesione dalle proprietà di superficie e successivamente cercando una relazione tra la resistenza dell'adesione e l'energia di adesione.

L'equazione di Young esprime una relazione tra la tensione superficiale  $\gamma_{SV}$  e l'angolo di contatto  $\vartheta$  (Figura 2.2)

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos\vartheta$$

$\gamma_{SV}$  esprime in modo approssimato l'energia libera superficiale del substrato. Quando  $\vartheta = 0$  il liquido bagna completamente e spontaneamente il substrato, mentre quando  $\vartheta > 0$  il liquido non si distende

completamente sulla superficie del solido. Di conseguenza il criterio di bagnabilità può essere espresso come

$$\gamma_S > \gamma_{SL} + \gamma_{LV}$$

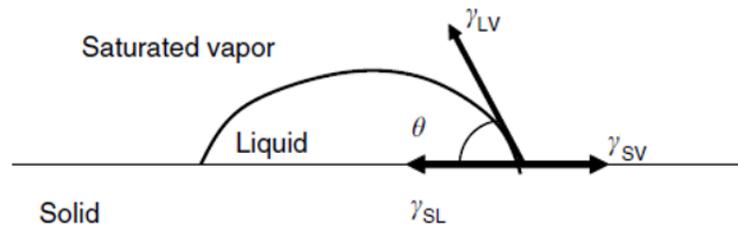


Figura 2.2 Rappresentazione delle tensioni superficiali e dell'angolo di contatto  $\theta$

È tuttavia doveroso evidenziare come rugosità e pressione applicata limitino l'applicabilità del criterio.

Utilizzando la relazione di Dupré si può calcolare l'energia di adesione conoscendo le tensioni superficiali tra i materiali in gioco utilizzando la relazione

$$W_{SL} = \gamma_S + \gamma_{LV} - \gamma_{SL}$$

e utilizzando la relazione di Young

$$W_{SL} = \gamma_{LV}(1 + \cos\theta)$$

In studi successivi Fowkes ha evidenziato come la densità di energia libera superficiale all'interfaccia tra due fasi  $\gamma$  può essere espressa come somma dei contributi delle diverse interazioni, in modo particolare dividendole in dispersive (forze di London) e polari (forze di Debye e Keesom e legame a idrogeno)

$$\gamma = \gamma^D + \gamma^P$$

Fowkers, con il contributo di Owens e Wendt, ha inoltre proposto per il calcolo dell'energia di adesione tra due solidi

$$W_{12} = 2\sqrt{\gamma_1^D \gamma_2^D} + 2\sqrt{\gamma_1^P \gamma_2^P}$$

I due valori di tensione superficiale sono ottenuti dalla misura dell'angolo di contatto di un liquido dalle proprietà superficiali note ed utilizzando l'eq. Di Dupré.

Studi più recenti si sono occupati di valutare i contributi di energia di adesione derivanti dalle diverse tipologie di interazione.

Il modello che mette in relazione l'energia di adesione alla resistenza adesiva prende il nome di modello reologico o modello dei fattori moltiplicativi ed è stato proposto inizialmente da Gent e Shultz e successivamente rivisto utilizzando i concetti della meccanica della frattura da Andrews e Kinloch. Questo modello esprime la resistenza dell'adesione al peel come il prodotto dell'energia di adesione per un fattore di perdita

$$G = W\phi(v, T)$$

$\phi$  corrisponde all'energia persa in modo irreversibile in deformazione viscoelastica o plastica sia nel materiale che dell'apice della cricca, e dipende dalla velocità con cui si esegue la sollecitazione e dalla temperatura.

Risultati sperimentali hanno mostrato che la maggior parte dell'energia necessaria per rompere il giunto adesivo viene utilizzata per deformare il materiale.

## 2.5 Teoria della diffusione

Secondo questa teoria un collegamento adesivo si sviluppa a causa della interdiffusione delle molecole tra adesivo e aderente, essa trova conferma quando sia l'adesivo che l'aderente sono di natura

polimerica, e i polimeri coinvolti sono costituiti da lunghe molecole con un'elevata possibilità di movimento. Sia la natura dei materiali che le condizioni in cui il collegamento si forma sono fattori che influiscono la possibilità che la diffusione si verifichi e la sua entità. L'interfase diffusiva ha spessore 1-100 nm. Questo fenomeno si verifica in diversi processi che coinvolgono materiali termoplastici come la saldatura a caldo. Si ha un'elevata resistenza del legame adesivo quando i due materiali sono solubili l'un l'altro e quando i parametri di solubilità di adesivo e aderente sono confrontabili, il parametro di solubilità è definito come [1]

$$\delta = \sqrt{\frac{E_{coh}}{V}}$$

Dove

$E_{coh}$  è la quantità di energia necessaria per separare le molecole a distanza infinita

$V$  è il volume molare

Poiché la diffusione delle molecole è favorita aumentando la temperatura la resistenza del legame adesivo è funzione della temperatura come evidenziato in figura 2.3

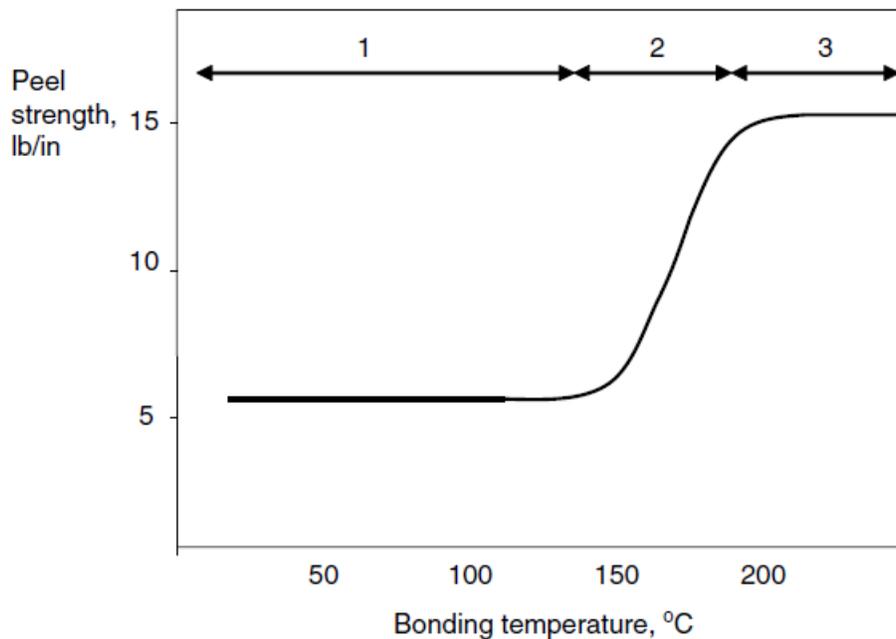


Figura 2.3 Dipendenza della resistenza al peel dell'adesione tra polipropilene e gomma butilica al variare della temperatura di adesione. (1) cedimento adesivo (2) cedimento adesivo/coesivo (3) cedimento coesivo

Vasenin ha sviluppato, partendo dalla legge di Fick, un modello quantitativo della teoria della diffusione [2] che esprime la quantità di materiale  $w$  che diffonde nella direzione  $x$  attraverso un'area unitaria a causa della presenza di un gradiente di concentrazione della specie

$$\partial w = -D_f \partial t \frac{\partial c}{\partial x}$$

Con  $D_f$  coefficiente diffusivo che varia in funzione della mobilità del polimero  $D_d$  e del tempo di contatto  $t_c$  secondo la legge

$$D_f = D_d t_c^{-\beta}$$

$\beta$  costante dell'ordine di 0,5.

È possibile giungere all'espressione della profondità della penetrazione  $l_p$  e al numero di molecole che attraversano l'interfaccia  $N_c$

$$l_p = k \sqrt{\pi D_d t_c^{1/2}}$$

$$N_c = \left( \frac{2N\rho}{M} \right)^{2/3}$$

$k$  è una costante,  $\rho$  è la densità del polimero,  $N$  è il numero di Avogadro e  $M$  è il peso molecolare del polimero.

Vasenin ipotizza che l'energia di peel è proporzionale sia alla profondità dell'interfase diffusiva che al numero di molecole che attraversano l'interfaccia

$$G = K \left( \frac{2N\rho}{M} \right)^{2/3} \sqrt{D_d t_c^{1/2}}$$

$K$  costante che dipende dalle caratteristiche dei polimeri a contatto.

L'energia dissipata viscoelasticamente o plasticamente durante il peel non compare all'interno della precedente equazione perché inclusa all'interno della costante  $K$  e  $D_d$ .

Studi più recenti hanno evidenziato come in un polimero molto denso il moto complessivo di una macromolecola sia vincolato dagli 'entanglements' delle altre catene (figura 2.4). Esse confinano la macromolecola all'interno di una regione tuboidale e ne permettono il moto solo lungo la direzione a zig-zag del tubo in modo molto simile al movimento di un serpente (*reptation motion*). Il moto diffusivo dell'intera molecola diventa quindi più complesso tanto più elevato è il suo peso molecolare e, in particolare, il coefficiente diffusivo della macromolecola dipende dal peso molecolare come  $D \sim M^{-2}$ .



Figura 2.4 Rappresentazione schematica di una catena polimerica vincolata dagli entanglements.

Il fenomeno della diffusione fornisce un elevato contributo alla resistenza adesiva di un collegamento tra due polimeri, tuttavia le due specie devono essere solubili e sufficientemente mobili (la condizione ideale per questo tipo di adesione si verifica quando si vogliono collegare due elementi della stessa specie). Il processo è invece inibito nel caso di bassa solubilità, nel caso di contatto a temperature troppo basse per innescare il fenomeno della diffusione o se il grado di cristallinità delle specie è troppo elevato, poiché troppi ostacoli sono presenti.

## 2.6 Teoria dei legami chimici

Questa teoria attribuisce l'adesione ai legami chimici che si formano tra adesivo e aderente. I legami più forti, ovvero quelli con maggior energia di legame, sono definiti primari. Ne sono un esempio il

legame covalente, il legame ionico, e il legame a idrogeno. Le interazioni secondarie principali sono invece forze di Van der Waals e forze di London.

I tipi di interazione che si formeranno dipenderanno dalla composizione chimica dell'interfaccia e dalla loro reattività e la resistenza dell'adesione dipenderà sia dal numero di legami chimici che si formeranno e dalla loro natura, che dal contributo degli altri meccanismi di adesione.

Il legame covalente e ionico forniscono il maggior contributo all'adesione e si formano prevalentemente in substrati la cui superficie contiene gruppi polari.

Il legame covalente è di solito il più forte e duraturo legame, ma richiede la presenza di composti chimici mutuamente reattivi, infatti la presenza di gruppi polari ne facilita la formazione. Le superfici di rivestimenti termoindurenti, di compositi e di alcune plastiche contengono gruppi funzionali che in genere producono un legame covalente con il materiale adesivo. Queste condizioni possono essere create attraverso trattamenti superficiali come quelli che utilizzano fiamma o plasma per il trattamento di materiali plastici.

I legami dipolo-dipolo sono interazioni secondarie che si verificano a seguito della tendenza delle molecole polari ad allinearsi in modo che il centro di carica positivo di una molecola sia vicino al centro di carica negativo della molecola adiacente.

Il legame a idrogeno è un legame dipolo-dipolo che si forma tra due molecole quando un atomo di idrogeno (collegato di solito ad un atomo piccolo e molto elettronegativo) viene attratto dalla coppia di elettroni di un'altra molecola.

Un altro possibile legame è quello acido-base che nasce dall'attrazione tra una specie acida e una basica, un esempio è il legame a idrogeno tra due molecole d'acqua, essa infatti può comportarsi sia da acido che da base.

Le forze di dispersione di London nascono da dipoli istantanei che si formano a causa della variazione della posizione degli elettroni durante il loro moto attorno ai nuclei atomici. Le forze di London sono più importanti quanto più gli atomi sono grandi e maggiore è il numero di elettroni per atomo, questo perché aumenta la polarità della molecola ovvero la facilità con la quale la nube di elettroni si distorce.

Per promuovere l'adesione tra resine e metalli o plastiche spesso vengono utilizzati dei primers a base di silani organici, per favorire l'adesione con i metalli. Questi primers possono agire ad esempio provocando la formazione di gruppi silanoli che reagiscono con gli ossidi metallici generando legami forti.

In generale i rivestimenti adesivi tendono a formare legami più robusti con i substrati che contengono la stessa tipologia di gruppi funzionali o gruppi funzionali diversi ma caratterizzati da un'alta reattività, ad esempio un legame forte si instaura tra i substrati che contengono gruppi ossidrilici in superficie e adesivi poliuretani, caratterizzati dalla presenza di gruppi isocianati; per lo stesso motivo i gruppi epossidici degli adesivi epossidici formano legami forti con i gruppi ossidrilici presenti sulla superficie della cellulosa.

La varietà dei fenomeni coinvolti sulla meccanica dell'adesione simultaneamente, delle tipologie di substrati e degli adesivi rendono l'adesione un argomento particolarmente vasto e complesso, tuttavia i vantaggi che questa tecnologia garantisce soprattutto in termini di riduzione del peso delle strutture incollate rendono questo campo della ricerca attuale soprattutto in termini di modellazione delle strutture e simulazione del giunto adesivo con la tecnica degli elementi finiti.

## 3 Cohesive Zone Modelling

### 3.1 La Modellazione coesiva

Il collegamento adesivo presenta molteplici vantaggi tra cui l'alleggerimento delle strutture e la possibilità di collegare materiali difficilmente compatibili con le tecnologie più classiche, per questo motivo trova largo impiego in diverse applicazioni ingegneristiche. Proprio per questo motivo si sono sviluppate nel tempo varie metodologie per l'analisi dei giunti incollati al fine di prevedere la distribuzione delle tensioni nell'adesivo e la resistenza offerta dal collegamento. Le analisi su giunti incollati possono essere analitiche o numeriche, le prime si sono sviluppate per trovare soluzioni in forma chiusa a strutture molto semplici con altrettanto semplici condizioni di sollecitazione e di vincolo. Un esempio classico di sistema semplice modellato analiticamente secondo diversi approcci è il *single lap joint*. Con lo sviluppo e la diffusione dei computer l'analisi numerica ha preso sempre più piede perché permetteva di risolvere in modo approssimato strutture e modelli più complessi. Le analisi analitiche permettevano di giungere a soluzioni in forma chiusa con modelli semplici, dove ad esempio lo strato adesivo non presenta curvature, gli aderenti non sono costituiti da materiali con schemi di comportamento troppo complessi come quello dei compositi (oggi software specifici vengono sviluppati al solo scopo di valutare la distribuzione di fibre corte nei processi di iniezione) e se l'adesivo si comporta in modo elastico. Nel caso di sistemi più complessi l'utilizzo di quest'analisi porta alla definizione di sistemi di equazioni molto più complesse, non lineari e non omogenee. Quando si ha a che fare sistemi di questo tipo si predilige, invece, l'uso di analisi numeriche agli elementi finiti. Con gli sviluppi dell'ingegneria nel campo dei collegamenti adesivi si sono sviluppate e impiegate diverse tecniche per la modellazione di sistemi di questo tipo [3]. In particolare, essi fanno riferimento alla meccanica del continuo, alla meccanica della frattura, alla modellazione della zona coesiva e al più recente *extended finite element method*.

Gli schemi di modellazione tradizionale con la quale si modellano molti dei sistemi meccanici usano criteri di rottura basati sulla meccanica del continuo o sulla meccanica della frattura, tuttavia questi metodi hanno delle limitazioni nel loro utilizzo. I criteri basati sulla meccanica del continuo utilizzano tensioni e deformazioni che dipendono dalle dimensioni della mesh nelle zone critiche. L'utilizzo dei criteri della meccanica della frattura, che riguardano il fattore di concentrazione degli stress oppure parametri energetici, era limitato alla meccanica della frattura lineare elastica quindi potevano essere

impiegati in sistemi collegati da adesivi che presentavano una piccola quantità di deformazione plastica all'apice della cricca. Inoltre, quest'approccio richiedeva un sistema già danneggiato all'inizio della simulazione, di cui si doveva conoscere la configurazione e la dimensione iniziale della cricca.

La modellazione della zona coesiva (CZM) [3] è una tecnica molto utile nell'analisi dei giunti incollati ma anche per la modellazione dell'interfaccia tra due materiali differenti, come ad esempio quell'interfaccia adesiva tra un polimero iniettato in uno stampo e un inserto metallico, oppure ancora per l'analisi di delaminazione tra le plies di una lamiera in materiale composito. Questa tecnica è una combinazione della meccanica del continuo e della meccanica della frattura e permette la modellazione del danneggiamento del materiale attraverso l'utilizzo degli elementi coesivi, ovvero elementi implementati in alcuni software di calcolo che permettono la definizione della legge coesiva, una relazione tensione – separazione tra due nodi accoppiati dello stesso elemento. La CZM si basa sul concetto di introdurre nel modello agli elementi finiti tradizionale un'interfaccia in cui può nucleare e propagare una cricca. Questa strategia di modellazione permette di simulare la propagazione della cricca lungo il *failure path* del giunto e ha il vantaggio di prevedere con elevata accuratezza il comportamento del collegamento adesivo. L'importanza di prevedere in modo preciso il comportamento del giunto permette di incrementare la diffusione di questa tecnologia, infatti il fatto di non avere una certa variabilità rispetto al reale comportamento permette di evitare il sovradimensionamento del giunto e, nei componenti strutturali, evitare di accoppiare a questa tecnologia con i classici accoppiamenti meccanici che, seppur incrementando la sicurezza del sistema, riducono notevolmente i vantaggi tecnici ed economici derivabili da questa tecnologia.

Gli elementi coesivi possono essere 2D o 3D e vengono interposti tra gli elementi solidi utilizzati per la modellazione dei substrati. La legge coesiva tiene conto del degrado di rigidità dell'elemento coesivo che riproduce il degrado delle proprietà dell'adesivo quando inizia il suo danneggiamento ovvero quando si raggiunge un certo valore di tensione, e quindi di spostamento relativo tra le facce della cricca. Nella figura 7.1 è evidenziata la differenza tra la curva sforzo - deformazione ottenibile modellando soltanto il comportamento elasto-plastico dei materiali che compongono il sistema, senza prevedere un'evoluzione del danno (abcd') e il caso in cui si completi il modello aggiungendo uno schema di danneggiamento che riproduce la propagazione della cricca, e che si riflette in termini macroscopici in un degrado della rigidità del sistema (tratto cd).

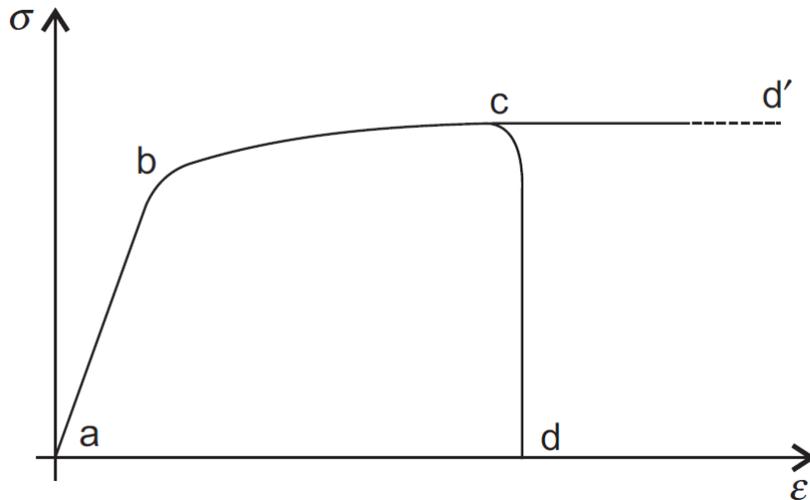


Figure 3.1 Curva sforzo deformazione modello con e senza evoluzione del danno

La modellazione CZM permette due tipi di approccio:

-Approccio locale: i due nodi accoppiati degli elementi coesivi, che appartengono alle due facce della cricca, rappresentano nodi sovrapposti di materiali differenti. In questo caso si vuole simulare un'interfaccia a spessore nullo. In un modello costruito con l'approccio locale la dissipazione plastica è simulata dagli elementi dei substrati e la crescita del danno dagli elementi coesivi, quindi l'energia di deformazione elastica rilasciata durante la propagazione della cricca è suddivisa in una parte di energia di frattura 'intrinseca' associata agli elementi coesivi necessaria per creare nuove superfici e in una di energia necessaria a sostenere la deformazione plastica associata agli elementi dei substrati

-Approccio continuo: uno strato di elementi coesivi rappresentano uno strato di materiale adesivo di spessore finito interposto tra due materiali non a contatto. La rigidezza degli elementi coesivi corrisponde alla rigidezza dello strato adesivo.

### 3.2 La legge coesiva

In ogni punto dell'interfaccia coesiva si avrà una certa tensione corrente di trazione  $t_n$  e di taglio  $t_s$  che corrisponde ad un punto sulla curva della legge coesiva o legge di trazione - separazione. Nel caso di

modellazione 3D avremo anche la componente di tearing  $t_t$ . Nella seguente figura 7.2 è riportata una legge coesiva triangolare.

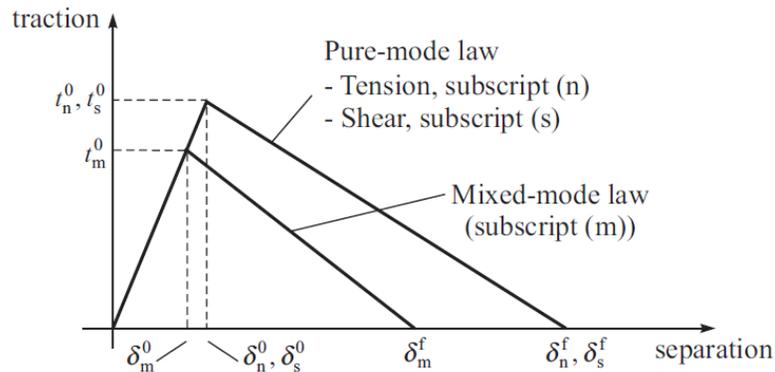


Figure 3.2 Legge di trazione - separazione triangolare

Il primo tratto della curva rappresenta il comportamento elastico lineare dell'adesivo e l'inclinazione corrisponde alla rigidezza dello strato adesivo. Nel caso di modo puro quest'andamento rimane lineare fino al momento in cui si raggiunge la tensione di picco per il modo I  $t_n^0$  o la tensione di picco per il modo II  $t_s^0$ , quando si ha inizio del danneggiamento.  $\delta_n^0$  e  $\delta_s^0$  sono le aperture di modo I e modo II in corrispondenza delle resistenze coesive (picchi di tensione). Nel caso di modo misto, avremo allo stesso modo, una resistenza coesiva di modo misto  $t_m^0$  a cui corrisponde un'apertura di modo misto  $\delta_m^0$ . Il valore di  $t_m^0$  è quello tale per cui le tensioni correnti nei diversi modi si combinano in modo tale da incontrare il criterio di inizio del danno. Raggiunto il valore di picco della legge inizia il processo di evoluzione del danno, ovvero la legge secondo cui la rigidezza dell'elemento coesivo degrada fino al completo cedimento, che si raggiunge in corrispondenza dell'apertura  $\delta_n^f$  nel caso di modo I, di  $\delta_s^f$  nel caso di modo II oppure di  $\delta_m^f$  qualora la sollecitazione fosse mista. La legge di evoluzione del danno viene definita dall'utente specificando la forma della legge di softening e l'entità del tasso di rilascio di energia nei diversi modi  $G_{Ic}$ ,  $G_{IIc}$  o  $G_{IIIc}$  oppure l'apertura di cedimento relativa a quella di inizio del danno  $\delta_m^f - \delta_m^0$ .

Nel caso in cui si modelli il comportamento dell'adesivo con una legge trapezoidale si osserva un tratto a tensione costante dal raggiungimento della tensione di picco all'inizio del danneggiamento, di

conseguenza compare un altro parametro per ogni modo di carico, l'apertura corrispondente all'inizio della fase di softening (Figura 3.3).

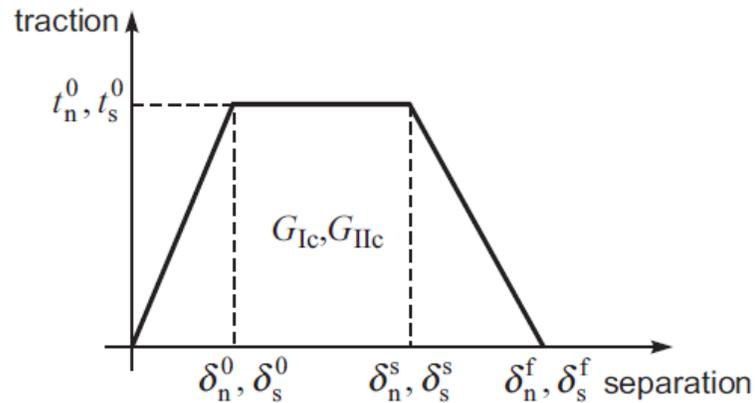


Figure 3.3 Legge di trazione - separazione trapezoidale

A parità di tasso di rilascio  $G$  maggiore è il tratto a tensione costante, maggiore sarà la pendenza del tratto di softening discendente e quindi le problematiche di convergenza.

Quando si ha modo misto di sollecitazione si usano criteri tensionali o energetici per combinare le leggi dei modi puri. Di solito per i criteri di inizio del danneggiamento viene utilizzata la meccanica del continuo, e quindi si usano tipicamente rapporti tra i valori di tensione/deformazione raggiunti e i rispettivi valori limite, mentre per definire l'evoluzione del danno si usano criteri energetici legati alla meccanica della frattura (Power law, Tabulare, Benzeggagh-Kenane).

La parte elastica è regolata dalla relazione matriciale:

$$\{t\} = [K]\{\varepsilon\}$$

$$\begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} & K_{nt} \\ K_{ns} & K_{ss} & K_{st} \\ K_{nt} & K_{st} & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \\ \varepsilon_t \end{Bmatrix}$$

Oppure secondo la formulazione in termini di apertura della cricca [4]:

$$\begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{K_{nn}}{T_0} & \frac{K_{ns}}{T_0} & \frac{K_{nt}}{T_0} \\ \frac{K_{ns}}{T_0} & \frac{K_{ss}}{T_0} & \frac{K_{st}}{T_0} \\ \frac{K_{nt}}{T_0} & \frac{K_{st}}{T_0} & \frac{K_{tt}}{T_0} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{nn} & e_{ns} & e_{nt} \\ e_{ns} & e_{ss} & e_{st} \\ e_{nt} & e_{st} & e_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix} = [E] \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix}$$

La relazione tra deformazione e separazione è

$$\varepsilon_i = \frac{\delta_i}{T_0}$$

con

[*K*] matrice elastica costitutiva che contiene le informazioni di rigidità dello strato adesivo e i parametri che la compongono dipendono dall'approccio di modellazione utilizzato. Se si utilizza la formulazione che utilizza le deformazioni e un approccio continuo una buona approssimazione è ottenuta utilizzando i moduli elastici a trazione e taglio:  $K_{nn} = E$ ,  $K_{ss} = G$ ,  $K_{tt} = G$  e  $K_{ij} = 0$ . Nel caso in cui si impieghi la formulazione che usa le separazioni i termini  $K_{ii}$  assumono a forma  $\frac{E_i T_0}{T_A}$  con  $E_i$  generico modulo elastico. Se il comportamento nei diversi modi è disaccoppiato i termini fuori diagonale sono nulli.

$T_A$  spessore dello strato adesivo

$T_0$  spessore costitutivo, che è la grandezza che definisce il legame tra apertura e deformazione nel modo  $i$ -esimo, sovente il valore scelto è unitario per avere corrispondenza diretta tra apertura e deformazione. Questo valore è tipicamente differente dallo spessore dello strato adesivo, che nella maggior parte dei giunti è di pochi decimi di millimetro.

[*E*] è la matrice che definisce i parametri di rigidità  $e_{ij}$  che esprimono il rapporto tra i moduli elastici e lo spessore dello strato adesivo, ad es.  $e_{nn} = \frac{E}{T_A}$ .

Il significato dei parametri di rigidezza  $e_{ij}$  assume un significato diverso a seconda se si vuole modellare con approccio continuo o locale. Se l'approccio è locale si vuole modellare un'interfaccia a spessore nullo per cui si utilizzeranno elementi coesivi a spessore nullo oppure un contatto coesivo, quindi lo spessore  $t_A = 0$  e il parametro di rigidezza tenderà a infinito, il che porta il parametro a perdere il proprio significato fisico. Nel modello, quindi, deve essere inserito come parametro di rigidezza il valore maggiore possibile compatibilmente con le problematiche di convergenza (studi del prof. Campilho mostrano ottimi risultati con valori di  $10^6 - 10^7 MPa/mm$ ). Se si sceglie di utilizzare un approccio continuo  $t_A$  coincide con lo spessore degli elementi coesivi e otteniamo una buona approssimazione del comportamento dell'adesivo utilizzando come parametri di rigidezza i moduli elastici corrispondenti ai modi di carico.

I criteri che vengono utilizzati al fine di definire l'inizio del danno [3] in caso di sollecitazione mista possono essere differenti e riguardare sia le tensioni che le deformazioni. Per questo modello si è utilizzato il criterio quadratico QUADS, il danneggiamento inizia quando è raggiunta la condizione:

$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_t}{t_t^0} \right\}^2 = 1$$

La legge di evoluzione del danno descrive la modalità con la quale la rigidezza dell'elemento degraderà dopo aver raggiunto il criterio di inizio danno. È possibile definire una variabile di danneggiamento  $d$  che assume valore crescente da 0 a 1, avrà valore 0 al momento dell'inizio del danno e valore 1 in corrispondenza del completo fallimento dell'elemento

$$t = (1 - d)\bar{t}$$

$\bar{t}$  valore di tensione raggiunto senza il danneggiamento del materiale e nella figura seguente la si evidenzia con  $t^{und}$ .

Il danneggiamento è somma di tutti i meccanismi di danneggiamento attivi e quindi del degrado causato dai diversi modi di sollecitazione. Il criterio di evoluzione del danno viene definito specificando

la tipologia di legge di softening e i parametri energetici  $G_{Ic}$  o di separazione relativa a rottura  $\delta_i^f - \delta_i^0$ .  
 Nel caso di legge lineare la variabile danno evolve secondo:

$$d = \frac{\delta_i^f (\delta_i^{max} - \delta_i^0)}{\delta_i^{max} (\delta_i^f - \delta_i^0)}$$

con

$\delta_m^{max}$  massimo valore di separazione raggiunto durante la fase di carico.

Nella figura 3.4 è evidenziato il degrado  $d$  in una legge lineare.

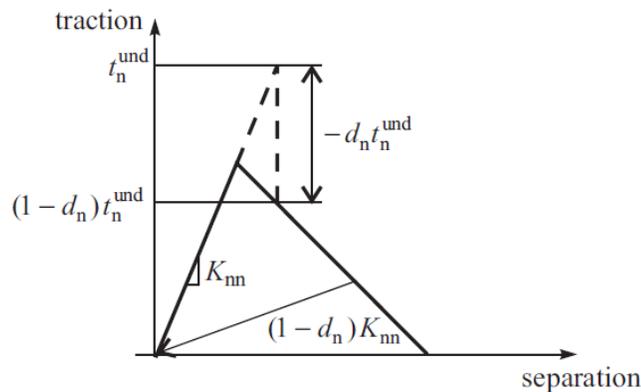


Figure 3.4 Significato della variabile di danneggiamento  $d$

Spesso per la previsione dell'apertura di cedimento nel caso di sollecitazione mista  $\delta_m^f$  si utilizzano criteri energetici al fine di combinare le leggi coesive dei modi puri. Questi criteri utilizzano i tassi di rilascio di energia nei diversi modi  $G_{Ic}$ ,  $G_{IIc}$  o  $G_{IIIc}$ . Ne è un esempio la legge quadratica di potenza, secondo cui si raggiunge il completo cedimento quando:

$$\left\{ \frac{G_I}{G_{Ic}} \right\}^2 + \left\{ \frac{G_{II}}{G_{IIc}} \right\}^2 + \left\{ \frac{G_{III}}{G_{IIIc}} \right\}^2 = 1$$

A questo punto la rigidità dell'elemento è degradata completamente, i nodi corrispondenti all'elemento si separano e la cricca propaga alla coppia di nodi successiva.

La modellazione della zona coesiva è stata introdotta da Dugdale [5] e Barenblatt [6]. Essi hanno associato il processo di frattura allo sviluppo di una zona di processo di frattura FPZ nell'intorno dell'apice della cricca nei metalli. Quando la dimensione di questa zona raggiunge un valore critico, che dipende dall'energia di frattura  $G_c$ , la cricca propaga. Questa teoria è estendibile ai materiali adesivi con la differenza che l'estensione della FPZ è limitata a proseguire solo attraverso lo strato adesivo dalla presenza degli aderenti. Questo spiega la dipendenza di  $G_c$  dal grado di vincolo dello strato adesivo, e quindi dallo spessore dell'adesivo  $t_A$  e, se i substrati sono sottili a tal punto da subire deformazione plastica, dallo spessore degli aderenti  $t_P$  [7].

Il vantaggio di questa strategia di modellazione è che i risultati che si ottengono in termini di distribuzione di tensione e di previsione di resistenza sono più precisi perché posso usare differenti leggi coesive in funzione del tipo di materiale o dell'interfaccia da simulare.

Per utilizzare questa tecnica è necessario definire:

- la forma della legge coesiva, che rappresenta il comportamento dell'adesivo e l'evoluzione del suo comportamento con lo sviluppo e la crescita dell'entità di danneggiamento,
- le resistenze coesive in trazione e taglio  $t_n^0$  e  $t_s^0$ , ovvero le tensioni raggiunte le quali si conclude il comportamento elastico del materiale e inizia il suo danneggiamento,
- i valori di tasso di rilascio di energia di deformazione nel modo I e nel modo II raggiunti durante la simulazione e il loro valore critico  $G_{Ic}$  e  $G_{IIc}$ , che rappresentano l'area sottesa dalla legge trazione - separazione.

Per individuare le resistenze coesive e tutti gli altri parametri che definiscono la legge si possono applicare diverse metodologie: il metodo dell'identificazione dei parametri permette di ricavare una proprietà alla volta da test specifici, con il metodo inverso si ottengono i parametri a seguito di un'attività iterativa e fittando i risultati ottenuti dalle simulazioni FEM con le curve rilevate sperimentalmente. Il metodo diretto permette l'ottenimento della curva CZM corretta di un materiale o di un'interfaccia differenziando il valore di  $G$  con l'apertura cricca, per ognuno dei due modi.

### 3.3 Forma della legge coesiva

Le leggi coesive possono avere forme differenti: triangolari, trapezoidali, esponenziali o polinomiali. Nei paragrafi precedenti è stata descritta la legge coesiva triangolare e i parametri che la caratterizzano.

Il parametro più importante per la scelta della legge coesiva da impiegare è il comportamento del materiale adesivo che si vuole modellare, in generale adesivi molto fragili si modellano con leggi esponenziali, adesivi che mostrano comportamento fragile o poco duttile vengono modellati con leggi lineari, queste in generale riproducono bene il comportamento dello strato adesivo quindi sono le più utilizzate mentre per adesivi duttili sovente si impiegano leggi trapezoidali. Nel caso in cui si debbano modellare adesivi che si comportano in modo fragile se sollecitati in trazione e duttile se sollecitati a taglio si adottano leggi trapezoidali con un modesto tratto a tensione costante. Il materiale dell'adesivo è il parametro più importante per la scelta della legge ma non l'unico, la scelta deve essere ponderata anche in funzione delle problematiche legate al metodo numerico, infatti la legge trapezoidale comporta maggiori problemi di convergenza nella procedura di soluzione iterativa utilizzata dai software di calcolo a causa del fatto che una legge trapezoidale comporta una maggiore pendenza della curva nell'ultima fase di softening, appena dopo il plateau caratteristico. Quindi, a parità di energia di frattura maggiore è l'estensione del plateau della curva trazione – separazione maggiori saranno le problematiche di convergenza che si riscontreranno a calcolo.

Nonostante la legge lineare sia la più impiegata, l'utilizzo di una legge trapezoidale permette di gestire meglio il comportamento degli adesivi duttili che hanno la capacità di non degradare appena si raggiunge la tensione di picco. In questo caso l'utilizzo di una legge lineare comporterebbe il rischio di sottostimare la resistenza dell'adesivo, perché si anticiperebbe il degrado di rigidità del materiale rispetto a quello che succede nella realtà. Al contrario, se si modella un adesivo fragile con una legge trapezoidale si sovrastimerebbero le proprietà dell'incollaggio a causa di un ritardo del degrado del materiale, non coerente con la realtà.

Scegliere la corretta forma della legge è fondamentale soprattutto quando si lavora con substrati rigidi, infatti in questo caso gli stress sono distribuiti in modo uniforme, il che porta a curve forza – spostamento molto simili alla legge coesiva utilizzata; substrati con bassa rigidità invece causano grandi gradienti di tensione quindi pur utilizzando una legge che descrive poco precisamente il comportamento dell'adesivo alcuni elementi subiranno tensioni superiori a quelle reali e altri tensioni inferiori, il che porta ad avere un errore complessivo inferiore. La legge lineare permette di raggiungere

buoni risultati anche con adesivi duttili, per cui può essere preferita per la semplicità di implementazione e per la maggiore semplicità nell'ottenimento dei parametri. L'accuratezza peggiora con il crescere della rigidità dei substrati.

La FPZ ovvero la *failure process zone* è valutata come lunghezza del tratto sotto danneggiamento ed è maggiore se si utilizza una legge esponenziale, coerentemente con la forma della legge, che causa il raggiungimento del completo fallimento per aperture maggiori.

L'utilizzo di leggi trapezoidali ed esponenziali ha maggiori difficoltà di implementazione nei programmi di calcolo.

### 3.4 Stima dei parametri coesivi

Al fine di individuare la legge coesiva si stimano i parametri coesivi che la caratterizzano riproducendo nei test di frattura le stesse condizioni di vincolo e gli stessi spessori adottati nelle strutture su cui determinare la resistenza. I parametri coesivi da determinare per una legge lineare sono  $G_{IC}$ ,  $G_{IIC}$ ,  $t_n^0$  e  $t_s^0$ . Non esistono standard per la definizione dei parametri coesivi ma esistono delle tecniche che si sono affermate nel tempo, le più utilizzate sono la tecnica di identificazione delle proprietà, il metodo diretto e il metodo inverso. Esse differiscono in termini di accuratezza dei risultati, di dati necessari, di difficoltà e di ipotesi iniziali. I test di frattura utilizzati da queste tecniche sono Double Cantilever Beam (DCB) per i parametri relativi al modo I ed End Notched Flexure (ENF) per l'individuazione dei parametri relativi al modo II. Si ha un'evidenza sperimentale del fatto che i parametri ricavati con test a modo puro siano validi anche nel caso di utilizzo degli stessi in condizione di sollecitazione a modo misto, per cui la logica che si vuole seguire è quella di trovare i parametri della legge per i modi puri utilizzando ENF e DCB e successivamente validare i risultati con prove a modo misto come, ad esempio il Single Lap Joint. È importante evidenziare come i valori dei tassi di rilascio di energia sono ottenuti da prove di frattura per tutti e tre i metodi presentati.

La legge coesiva parametrizzata che si ottiene è valida per certi spessori di adesivo, per cui il parametri  $t_A$  deve essere lo stesso tra le prove sperimentali e i modelli di simulazione. Lo spessore dei substrati  $t_P$  non influenza il parametro  $G_C$  e conseguentemente i parametri della legge coesiva se i substrati sono abbastanza resistenti da rimanere nel campo dell'elasticità, in questo caso il provino si comporta come il modello di trave sulla quale si basano le formule utilizzate per il calcolo delle energie critiche.

$G$  è il parametro più importante che influisce in modo determinante sulla correttezza del comportamento del modello.

Il metodo di identificazione dei parametri ricava ogni parametro necessario alla definizione della legge coesiva con un test opportuno. È necessaria una definizione preliminare della legge coesiva caratteristica del materiale e bisogna tenere in considerazione che i test devono contemplare l'utilizzo di giunti con spessore dell'adesivo piccolo, questo perché le proprietà fisico – meccaniche dell'adesivo 'bulk' variano rispetto a quelle di uno strato sottile, a causa del fatto che lo strato di adesivo sottile è vincolato a non deformarsi nella direzione dello spessore per via della presenza dei substrati; inoltre in questo caso la propagazione del danno si verifica lungo il *pattern* dello strato adesivo perché più debole e meno rigido rispetto ai substrati causando una rottura auspicabilmente coesiva. In un volume di

adesivo, invece, con dimensioni considerevoli la propagazione si verifica perpendicolarmente alla direzione della tensione principale massima.

Il metodo inverso consiste in un'analisi di fitting iterativo finalizzata all'individuazione dei parametri coesivi per cui ho un buon riscontro tra le curve ottenute dalle simulazioni agli elementi finiti e quelle delle prove sperimentali, spesso la curva da riprodurre è quella forza – spostamento, ma in altri casi si può riprodurre l'andamento della curva R oppure ancora la configurazione di apertura della cricca. Anche in questo caso è necessario ipotizzare la forma della curva CZM in modo preliminare.

Il metodo inverso e diretto sono i metodi più precisi perché riproducono le condizioni di strato sottile dell'applicazione reale.

Il metodo diretto è quello che consente una più accurata rappresentazione della curva CZM, in questo caso non è necessario ipotizzare la forma della curva poiché il metodo consente di individuarla con precisione senza ipotizzarla, nonostante nel successivo utilizzo della legge per la determinazione della resistenza, per questioni di semplicità di implementazione, si utilizza una forma semplificata della stessa. La legge coesiva si ottiene differenziando le curve  $G_I - \delta_n$  e  $G_{II} - \delta_s$  ottenute identificando le  $G$  mediante test di frattura e utilizzando il metodo della meccanica della frattura lineare elastica se l'adesivo è fragile o moderatamente duttile oppure il metodo dell'integrale J per adesivi duttili. Il metodo dell'integrale J è più complesso e richiede la conoscenza di altri parametri come la rotazione dei substrati e, per l'identificazione di  $G$  richiede la possibilità di monitorare la propagazione della cricca.

### 3.5 Problematiche di convergenza

Altri svantaggi sono legati a problemi di convergenza, è pertanto necessario prestare attenzione a queste problematiche utilizzando alcuni accorgimenti per ridurre le sorgenti o l'entità delle non linearità che si sviluppano in fase di simulazione. La legge coesiva scelta influisce sui problemi di convergenza legati ai processi iterativi per la ricerca della soluzione, la legge trapezoidale porta ad avere problemi di convergenza maggiori legati al fatto che il degrado di rigidità nella fase di softening è maggiore se si utilizza una legge trapezoidale.

Ci sono diverse non linearità che entrano in gioco ad esempio se si sceglie di modellare un Single Lap Joint, la flessione dell'overlap causa una variazione considerevole nella forma del giunto, questo oltre

a causare la nascita di tensioni di peel (e quindi rendere il tipo di sollecitazione mista) fanno cadere l'ipotesi di piccoli spostamenti e quindi è necessario condurre un'analisi che tenga in conto delle non-linearità geometriche. La non-linearità del comportamento post-elastico dei materiali può contribuire, insieme alla formulazione degli elementi coesivi ad avere problemi di convergenza. Anche il contatto adesivo tra adesivo e substrato causa non-linearità dovute alla natura non-lineare del fenomeno del contatto.

In generale i fattori che possono causare instabilità e dare problemi di convergenza numerica sono:

- 1) Formulazione coesiva, aggiunge instabilità a causa della forma della legge soprattutto quando si verifica il passaggio alla fase di softening della legge CZM a causa della brusca variazione dei termini della matrice di rigidità tra un incremento e l'altro. In questo senso è possibile incrementare il valore del tasso di rilascio di energia di deformazione  $G_{Ic}$ ,  $G_{IIc}$  o  $G_{IIIc}$  per addolcire la variazione di rigidità dell'elemento, studi condotti da Campilho hanno dimostrato che l'accuratezza nella previsione della resistenza di un Single lap Joint varia del 10% per un incremento del 100% di  $G_{Ic}$ ,  $G_{IIc}$  o  $G_{IIIc}$ .

Un'altra possibilità è diminuire la rigidità della zona elastica degli elementi coesivi purché non si vari in modo sostanziale la rigidità della struttura, questo permette di ridurre la concentrazione degli stress dovuta alla distorsione tra elementi adiacenti.

- 2) Comportamento plastico degli elementi solidi che modellano i substrati, nel caso in cui con l'esperienza si ha evidenza che i substrati rimangono in campo elastico si consiglia l'utilizzo dell'ipotesi di un comportamento perfettamente plastico
- 3) Comportamento plastico dell'adesivo
- 4) Rigidità dei substrati
- 5) Natura ortotropa dei laminati in composito, si consiglia di utilizzare proprietà isotrope equivalenti ad esempio mediando le proprietà nella direzione della sollecitazione massima ed in quella a essa ortogonale
- 6) Mesh grossolana nelle zone di concentrazione degli stress o di propagazione del danno
- 7) Regioni dove è presente una singolarità (fori, intagli, zone di sovrapposizione dell'adesivo)
- 8) Non-linearità geometrica

Pur migliorando i parametri sopra menzionati, in alcuni casi non si riescono a superare i problemi di convergenza per cui si possono adottare strumenti forniti dai software di calcolo come Abaqus/CAE, ne

è un esempio la '*Viscous regularization*' ovvero uno strumento che permette al software di introdurre nelle equazioni di equilibrio la viscosità. Essa agisce permettendo alle tensioni di uscire dai limiti della legge coesiva, permettendo quindi al calcolo di proseguire nonostante una condizione non sia propriamente rispettata. Se la viscosità è minima l'utilizzo di questo strumento ha effetti modesti sull'accuratezza dei risultati. Il valore di default in software Abaqus è di  $\mu = 2 \times 10^{-4}$ . Se tale valore non dovesse essere sufficiente è possibile incrementarlo e verificare che questo non comporti variazioni significative nella previsione di resistenza, ad esempio verificando che la curva forza spostamento del modello stabilizzato riproduca la curva del modello non stabilizzato fino al momento in cui il calcolo è riuscito ad avanzare senza l'uso della *viscous regularization*. Esistono altre tecniche numeriche ('Automatic stabilization', 'Non default solution controls', ecc.) che aiutano la convergenza ma che non verranno utilizzate in questa tesi.

### 3.6 Vantaggi e svantaggi della modellazione coesiva

La modellazione coesiva permette di ottenere risultati con elevato grado di accuratezza per quanto riguarda le previsioni di resistenza nei giunti incollati, nel caso di rottura coesiva all'interno del materiale, di rottura all'interfaccia tra materiali diversi oppure nel caso di delaminazione interlaminare nei compositi. Utilizzando la *cohesive zone modelling* è possibile simulare la nascita e la propagazione del difetto senza l'intervento del calcolista o senza un difetto iniziale, necessario invece nei calcoli della meccanica della frattura classica.

Tra i vantaggi della modellazione della zona coesiva rispetto alla modellazione classica troviamo inoltre il fatto che questa è mesh indipendente se molti punti di integrazione si trovano nella fase di softening contemporaneamente, questo aspetto dipende dal fatto che quando un elemento inizia a danneggiarsi si ha una riduzione della tensione che è in grado di sopportare quindi si verifica una redistribuzione di tensione agli elementi adiacenti. Se questa redistribuzione avviene con piccoli trasferimenti di tensione la propagazione avviene senza una sostanziale dipendenza dalla dimensione della mesh e questo si verifica quando un grande numero di elementi è nella fase di degrado [8]. Se questa condizione è soddisfatta le caratteristiche rilevanti del processo di fallimento sono catturate accuratamente. L'indipendenza della mesh è dovuta al fatto che la crescita del danno è regolata da criteri energetici, il valore limite per la propagazione è l'energia di frattura mediata sull'area di danneggiamento. La

propagazione quindi non è regolato da un parametro puntuale come lo stress massimo nei criteri di resistenza ma da uno mediato, il che causa la mesh indipendenza del metodo.

Il limite principale di questa strategia di modellazione, che per alcune applicazioni ne può scoraggiare l'utilizzo, è la necessità di conoscere l'interfaccia dove il difetto nuclea e propaga, gli elementi coesivi verranno posizionati in questo strato. La scelta del piano di danneggiamento è un'assunzione di partenza che deve essere confermata sperimentalmente, ad esempio se si vuole modellare uno strato adesivo con un solo strato di elementi coesivi deve essere verificato che si avrà rottura coesiva, altrimenti se l'evidenza sperimentale mostra la possibilità di ottenere una rottura adesiva del giunto lo schema di modellazione deve essere nuovamente valutato. Si potrebbero prevedere, ad esempio, due strati di elementi solidi per modellare l'adesivo, uno strato di elementi coesivi tra ogni interfaccia substrato - adesivo per tenere in conto di una possibile rottura adesiva, ed infine un ulteriore strato di elementi coesivi tra i due strati di adesivo per considerare un'auspicabile rottura coesiva. Per la modellazione di altri sistemi il piano di rottura è più complicato da individuare. Il punto appartenente al piano individuato dove si avrà la nucleazione del difetto dipende solo da quale degli elementi coesivi si troverà prima in una condizione di sollecitazione tale per cui sarà verificato il criterio di inizio del danneggiamento.

Un'altra limitazione importante è legata al fatto che la forma e i parametri della legge coesiva dipendono dalla geometria del collegamento adesivo e, in particolare, dallo spessore dello strato adesivo  $t_A$  e dei substrati  $t_P$  poiché da questi dipende l'estensione della zona plastica e quindi l'entità della plasticità all'apice della cricca. Al crescere dello spessore dello strato adesivo  $t_A$  infatti la legge che descrive meglio il comportamento dell'adesivo varia da triangolare a trapezoidale e per quanto riguarda i parametri la resistenza coesiva diminuisce e il tasso di rilascio di energia aumenta. Se i substrati non rimangono in elasticità, diminuendo  $t_P$  aumenta il tasso di rilascio di energia perché aumenta la deformazione a flessione, gli stress a taglio e quindi anche la plasticità nello strato adesivo. Lo spessore  $t_P$  e la rigidità degli aderenti influenza quanto la legge parametrizzata si differenzia da quella reale.

Un altro svantaggio è legato al fatto che il danneggiamento viene riprodotto in scala macroscopica attraverso l'utilizzo di parametri come le  $G$ , e non si riproduce la plasticizzazione del materiale che nella realtà avviene davanti l'apice della cricca anche negli adesivi fragili.

Nonostante la modellazione coesiva si sia imposta nel campo della modellazione degli adesivi si può ancora fare molto in termini di sviluppo del metodo per ottenere risultati più accurati ad esempio investigando maggiormente l'effetto dei parametri in gioco, allo scopo ridurre lo sforzo sperimentale per l'ottenimento dei parametri e per il miglioramento delle problematiche di convergenza.

## 4 Metodi per l'ottenimento dei tassi di rilascio di energia $G_{Ic}$

$G_{Ic}$  e  $G_{IIc}$  sono i tassi di rilascio di energia di deformazione critici ovvero i valori di  $G$  raggiunti i quali si ha propagazione della cricca. Questo parametro può essere inteso, quindi, come la resistenza che il materiale offre per contrastare la propagazione della cricca.  $G$  è collegato al parametro tenacità a frattura della meccanica della frattura per cui anche  $G$  dipenderà dalla dimensione del difetto, dalla configurazione del difetto e dalle condizioni di sollecitazione. Il valore di  $G_{Ic}$  può essere individuato come il valore di  $G$  al momento il cui la cricca inizia a propagare e quindi come il valore stazionario della curva  $G - a$ . Per alcuni tipi di cedimento il concetto di  $G_{Ic}$  viene esteso a quello di curva  $R$  che tiene conto del fatto che la resistenza offerta dal materiale può non essere costante al variare della lunghezza del difetto, in questo caso la forma della curva  $R$  dipende dal comportamento del materiale. In generale la cricca propaga solo se il valore di  $G$  è maggiore a quello di  $R$ , inoltre le modalità con cui la cricca propaga (propagazione stabile/instabile) dipendono dalla pendenza della curva  $G - a$  e della curva  $R$ . L'integrale  $J$  è l'estensione del concetto di  $G$  in campo non lineare. In questo caso per ogni incremento di lunghezza della cricca  $da$  una parte di energia viene rilasciata, così come accade in campo elastico lineare, mentre un'altra quota di energia serve per sostenere la plasticità localizzata all'apice della cricca.

A causa dell'elevata influenza dei  $G_{Ic}$  sui risultati, per tutti i tre metodi utilizzati per ottenere la legge coesiva descritti precedentemente (metodo dell'ottenimento dei parametri, diretto e inverso [3] ) i tassi di rilascio di energia  $G_{Ic}$  si ottengono conducendo le prove *Double Cantilever Beam (DCB)* per il modo I ed *End Notched Flexure (ENF)* per il modo II. Il metodo inverso e diretto utilizzano anche le curve forza - spostamento ottenuti per le fasi successive dell'analisi. Questi campioni vengono utilizzati ampiamente per la loro semplicità e la possibilità di ottenere  $G_{Ic}$  analiticamente grazie all'impiego di alcune teorie che verranno descritte in seguito.

Le problematiche legate all'impiego tradizionale di questi campioni sono le seguenti:

- Modo I: E' necessario monitorare la cricca, e ciò richiede uno sforzo ulteriore e la disponibilità della strumentazione necessaria. Inoltre, nel seguire la propagazione della cricca possono nascere complicanze causate sia dalla possibile instabilità della propagazione oppure semplicemente dal fatto che non si riesce ad individuare chiaramente l'apice della cricca. Questo risulta essere un problema quando utilizziamo metodi per il calcolo di  $G_{Ic}$  che

richiedono la misura della cricca come quello della calibrazione della cedevolezza, esso infatti necessita della curva cedevolezza - dimensione della cricca.

Un'altra problematica è legata all'utilizzo di metodi basati sulla teoria *beam* per il calcolo di  $G_{IC}$  quando si vuole caratterizzare un adesivo molto duttile al modo I poiché l'energia dissipata nella zona plastica davanti la cricca (Failure process zone) è maggiore di quella prevista a causa della deformazione plastica elevata, caratteristica di questi adesivi.

- Modo II: la prova ENF è la migliore per la caratterizzazione a frattura dell'adesivo nel modo II nonostante vi siano problemi legati al fatto che la propagazione instabile renda complicato seguire la cricca. Il problema principale è che in questo caso il campione non tende a aprirsi quindi rende più complicata la misura della lunghezza della cricca. Il metodo più utilizzato per ovviare a questo problema è utilizzare del colore che si propaga seguendo il *failure path* ed infiltrandosi all'interno della cricca. Raccogliendo immagini con una camera di sufficiente risoluzione ogni 5s si riesce a monitorare in modo abbastanza preciso la propagazione della cricca. Dato un tempo dall'inizio della prova si può ottenere la grandezza della cricca dallo storico delle immagini catturate e lo spostamento della curva P-s partendo dal valore della velocità della cella di carico. Dallo spostamento si ottiene poi la forza corrispondente sulla curva. Per ogni tempo si è quindi in grado di correlare i punti della curva alla lunghezza della cricca. I metodi classici per l'ottenimento di  $G_{IIC}$  come quelli basati sulla teoria beam o sulla calibrazione della cedevolezza richiedono la conoscenza della dimensione istantanea della cricca. Anche in questo caso una grande zona plastica all'apice della cricca può condizionare la precisione nel calcolo di  $G_{IIC}$ . Per superare queste difficoltà e al fine di ottenere i valori di energia di frattura si usano metodi che utilizzano solo il parametro di cedevolezza, che è ricavato a partire dalla curva forza – spostamento.

In questa fase è importante avere la massima conformità possibile dello spessore dell'adesivo  $t_A$  e dell'aderente  $t_P$  tra i campioni sperimentali e quelli simulati con il software di calcolo poiché questi parametri influenzano le condizioni di vincolo dello strato adesivo e quindi i parametri coesivi dello stesso. Diminuendo molto lo spessore  $t_P$  fino a superare il limite elastico si ha una maggiore deformazione del giunto incollato in direzione trasversale, il che porta ad avere una grande deformazione a shear. Questo causa elevata plasticità nell'adesivo che si somma alla plasticità presente davanti l'apice della cricca causando un importante aumento di  $G_{IC}$ .

Anche lo spessore  $t_A$  influisce sulle condizioni di vincolo dello strato adesivo, per questo le proprietà tra materiale bulk e strato sottile sono differenti. Inoltre, cambiano le modalità con la quale la cricca si propaga infatti nel materiale bulk la cricca avanza in modo perpendicolare alla tensione principale massima mentre nello strato sottile la cricca si propaga seguendo il pattern dello strato adesivo, più debole e meno rigido. Al crescere dello spessore di strato adesivo  $G_{ic}$  cresce fino a valori maggiori di quello corrispondente al materiale bulk e poi diminuisce fino al valore massivo. Quando la cricca deve propagare in adesivi duttili la zona plastica FPZ (Failure process zone) diventa molto maggiore di  $t_A$  e delle dimensioni che normalmente raggiunge quando la cricca si propaga nel materiale bulk quindi causa un aumento importante nel valore di  $G_{ic}$ .

In questo capitolo verranno presentati e valutati diversi metodi per l'ottenimento dei tassi di rilascio di energia critici, ponendo particolare attenzione a quelli che non richiedono misurazioni della cricca durante la propagazione.

#### 4.1 Double Cantilever Beam (DCB)

Per la definizione del tasso di rilascio di energia nel modo I è possibile utilizzare un campione Double Cantilever Beam, la prova è standardizzata dalla normativa ISO 25217 [9] e consiste nel realizzare il campione mostrato in figura 4.1. Le condizioni di vincolo possono essere realizzate con diverse tecniche, ad esempio utilizzando due perni, che vengono inseriti in due fori ricavati al centro degli spessori dei due substrati e a 25 mm dall'estremità del campione. Uno dei due perni si comporta da cerniera e blocca il moto traslazionale lungo  $x$  e lungo  $y$  mentre l'altro perno è collegato alla traversa mobile della macchina di carico, che si muove in direzione trasversale con una velocità di 0,5 mm/min.

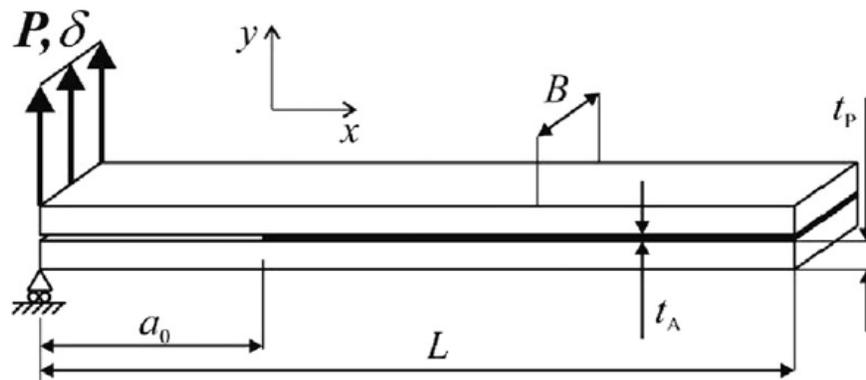


Figura 4.1 Provino Double Cantilever Beam

Per l'ottenimento del parametro  $G_{Ic}$  la normativa [9] prevede l'impiego di diverse tecniche: Simple beam method (SBM), Corrected beam theory (CBT) o Experimental compliance method (ECM) mentre altre tecniche non sono normate ma hanno riscontrato un grande impiego, ne è un esempio quella basata sulla calibrazione della cedevolezza (CCM).

In figura 4.2 si può osservare un campione DCB e i parametri utili alla costruzione della legge coesiva relativa al modo I.

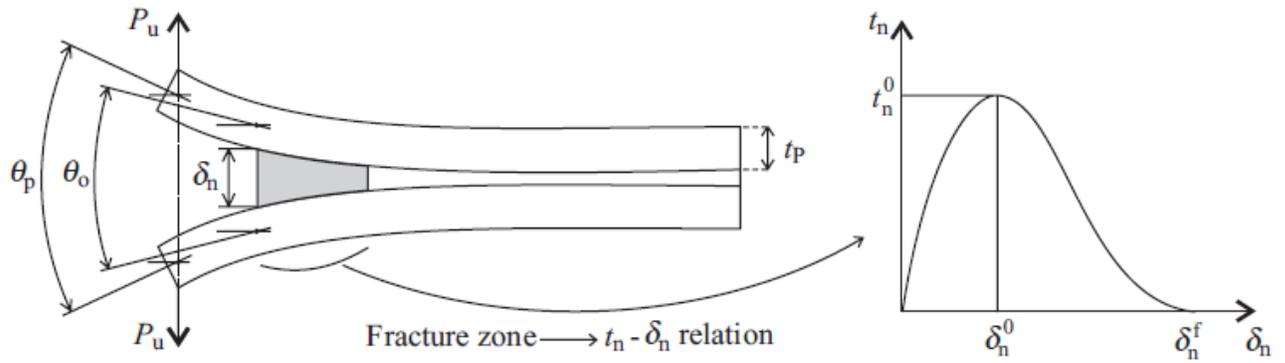


Figura 4.2 Parametri per la costruzione della legge coesiva relativi al modo I

Le tecniche più diffuse per il calcolo dell'energia di frattura [10] si basano sull'equazione di Irwin – Kies

$$G_{Ic} = \frac{P^2}{2b} \frac{dC}{da}$$

Esse utilizzano metodologie diverse per la definizione del tasso di cedevolezza.

Il metodo CCM approssima la curva cedevolezza – dimensione del difetto con una funzione polinomiale che riproduce quello della curva  $C = C(a)$  reale ottenuta sperimentalmente. Utilizzando una funzione cubica

$$C(a) = C_1 a^3 + C_2 a^2 + C_3 a + C_4$$

l'espressione del tasso di rilascio di energia diventa

$$G_{Ic} = \frac{P^2}{2b} (3C_1 a^2 + 2C_2 a + C_3)$$

Il valore  $G_{IC}$  viene individuato come valore stazionario della curva  $G_{IC} - a$ , che corrisponde alla fase di propagazione della cricca.

Il metodo CCM introduce un errore intrinseco legato al fatto che si utilizza una funzione polinomiale per approssimare la curva cedevolezza – dimensione del difetto reale, quindi il risultato ottenuto con questo metodo dipende sia dal grado del polinomio utilizzato che dal numero di punti usati per costruire la curva.

Facendo riferimento al metodo SBT studi condotti da Mostovoy [9] dimostrano che la variazione di cedevolezza può essere valutata come

$$\frac{dC}{da} = \frac{8}{Eb} \left( \frac{3a^2}{h^3} + \frac{1}{h} \right) = \frac{8}{Eb} m$$

con

$m$  parametro geometrico che varia ad ogni incremento di dimensione della cricca

$E$  rigidezza del campione

$h$  altezza del substrato

La cricca presente nella giunzione adesiva può essere considerata come una trave incastrata, per questo motivo la cedevolezza del sistema campione può essere considerata come la cedevolezza di una trave incastrata nell'adesivo. Nonostante la cedevolezza con il metodo SBT sia stata valutata considerando la deformazione a flessione e a taglio, essa non tiene conto della rotazione dell'apice della cricca causato dal fatto che la trave non è perfettamente incastrata (riprodurre un incastro perfetto è impossibile). Utilizzando il metodo SBT quindi si sottostima la cedevolezza del sistema. Questo fenomeno in realtà dà un contributo non trascurabile alla cedevolezza del sistema, il che ha portato a sviluppare una formulazione corretta della precedente, il metodo CBT [9] [10] che considera la cricca più grande del valore reale della quantità  $\Delta$ . Questo porta a una quota aggiuntiva di deformabilità, che migliora la stima della cedevolezza del sistema. Tale formulazione evidenzia che l'energia di frattura può essere valutata come

$$G_{Ic} = \frac{3P\delta}{2B(a + |\Delta|)}$$

Con  $\Delta$  correzione della lunghezza di cricca per tenere in conto della rotazione e della deviazione dell'apice della cricca.

I metodi CCM e CBT portano a risultati molto simili mentre l'utilizzo dell'SBT tendenzialmente causa previsioni del valore di  $G_{Ic}$  inferiori poiché non considera la rotazione dell'apice e quindi porta a valori di cedevolezza minori.

L'ultima tecnica presentata dalla norma [9] è la ECM e si basa sempre su una correzione matematica della cedevolezza. Il valore di tasso di rilascio di energia critico viene espresso come

$$G_{Ic} = \frac{nP\delta}{2Ba}$$

dove  $n$  rappresenta la pendenza della curva  $\log C - \log a$ .

In questo capitolo si vogliono illustrare delle metodologie per ricavare il tasso di rilascio di energia ricorrendo soltanto all'utilizzo della curva forza – spostamento, output delle prove. Per l'energia critica relativa al modo I è doveroso dire che se non si ha la possibilità di seguire la propagazione della cricca è conveniente utilizzare la versione *Tapered* del provino, infatti come si vedrà in seguito il tasso di cedevolezza di questo provino non varia con il propagare della cricca per cui si ottiene una buona approssimazione dei valori di  $G_{Ic}$  senza misurare la dimensione della cricca durante la prova.

Di seguito si presenta un metodo analitico per il calcolo di  $a$  che può essere utilizzato nel caso in cui si abbiano già a disposizione le curve forza – spostamento del double cantilever beam oppure non si possa, per diversi motivi, utilizzare un provino TDCB.

Questa tecnica è proposta da Krenk [4] e si basa sull'assunzione di considerare i substrati del giunto incollato come travi e l'adesivo come costituito da una distribuzione di molle indipendenti. Partendo da questo modello e aggiungendo il contributo di taglio all'apertura secondo la teoria di Timoshenko (ultimo termine in parentesi), l'apertura del giunto incollato assume la forma:

$$\delta = \left( \frac{4P\lambda_\sigma}{k} \right) \left[ 1 + 2\lambda_\sigma a + 2(\lambda_\sigma a)^2 + \frac{2}{3}(\lambda_\sigma a)^3 + \frac{12Pa}{5Ghb} \right]$$

Con  $k$  parametro che rappresenta la rigidezza a flessione di ogni molla del modello

$$k = \frac{2BE'_a}{t}$$

$t$  spessore dell'adesivo

$\lambda_\sigma$  parametro legato alla rigidezza a flessione del sistema

$$\lambda_\sigma^4 = \frac{6E'_a}{h^3 t E}$$

$E$  modulo elastico del substrato

$E'_a$  modulo bulk dell'adesivo ottenibile dal modulo elastico di Young e dal coefficiente di Poisson dell'adesivo:

$$E'_a = \frac{E_a}{(1 - \nu_a^2)}$$

Partendo dall'equazione di Irwin-Kies si giunge al modello per il calcolo di  $G_{Ic}$  proposto da Krenk

$$G_{Ic} = \frac{(Pa)^2}{bEJ} \left( 1 + \frac{1}{\lambda_\sigma a} \right)^2$$

Con  $J$  momento d'inerzia della trave – substrato.

Questo metodo è stato presentato non tanto al fine di fornire un altro schema per il calcolo del tasso di rilascio di energia ma perché fornisce una possibilità per la valutazione analitica della lunghezza della cricca partendo dalla curva forza – spostamento. Infatti, invertendo l'equazione dell'apertura del provino di ottiene:

$$\left(\frac{8P\lambda_{\sigma}^4}{3k}\right)a^3 + \left(\frac{8P\lambda_{\sigma}^3}{k}\right)a^2 + \left(\frac{8P\lambda_{\sigma}^2}{k} + \frac{12Pa}{5Ghb}\right)a + \left(\frac{4P\lambda_{\sigma}}{k} - \delta\right) = 0$$

Questa metodologia è stata validata su un adesivo epossidico (in studi precedenti) confrontando il valore analitico della lunghezza della cricca con il valore osservato sperimentalmente. L'utilizzo di questa lunghezza della cricca porta a una leggera sovrastima del  $G_{Ic}$ .

Un'altra possibilità è quella di utilizzare la tecnica *Compliance Based Beam Method (CBBM)* che utilizza la lunghezza della cricca equivalente ottenibile a partire dalla cedevolezza (quindi dalla curva forza – spostamento). Applicata al provino DCB l'espressione del  $G_{Ic}$  assume la forma

$$G_{Ic} = \frac{6P^2}{B^2h} \left( \frac{2a_{eq}^2}{t_p^2 E_f} + \frac{1}{5G} \right)$$

Con

$E_f$  Modulo a flessione corretto per considerare la concentrazione degli stress all'apice della cricca ed eventualmente una rigidità differente tra i due substrati.

IL CBBM è considerato il metodo più affidabile perché tiene conto dell'effetto della zona plastica davanti l'apice del difetto e non richiede la misura del difetto. Altri dettagli su questo metodo saranno aggiunti per la valutazione del tasso di rilascio nel modo II.

Per tutti i metodi analitici il calcolo di  $G_{Ic}$  deve essere eseguito utilizzando i valori della curva  $P - \delta$  e della curva  $R$  dal carico di picco a quello di rilascio, che è il range che corrisponde alla propagazione della frattura nell'adesivo.

## 4.2 Tapered Double Cantilever Beam (TDCB)

Il campione TDCB, rappresentato in figura 4.3, è la versione con contornatura lineare del DCB ed è progettato in modo tale da conservare costante, per un elevato range di lunghezza della cricca, il rapporto tra la variazione di cedevolezza e la variazione della dimensione della cricca.

Il provino TDCB permette di testare adesivi con elevata tenacità oppure di utilizzare substrati con relativamente basso modulo elastico senza che si verifichi deformazione plastica dei substrati. Oltre a questi aspetti positivi, che ci danno la possibilità di testare diverse classi di adesivo anche utilizzando substrati di materiale meno rigido, il vantaggio principale nell'utilizzo di questo campione è legato alla possibilità di misurare l'energia di frattura  $G_{Ic}$  senza misurare la lunghezza della cricca durante la propagazione. Il campione DCB è tuttavia più economico da produrre quindi se si ha la strumentazione adatta a seguire la cricca e i substrati non plasticizzano la scelta del campione da utilizzare ricade su questi; al contrario se si bisogna testare adesivi duttili e il materiale degli aderenti ha basso modulo elastico si ci allontana dalle condizioni della meccanica della frattura lineare elastica e si predilige l'uso dei TDCB. Per questo campione la curva forza – spostamento ha andamento lineare fino al momento di propagazione della cricca quando rimane circa costante fino al completo cedimento del provino, questo andamento dipende dalla geometria del campione, infatti l'aumento dell'altezza del provino causa una diminuzione della cedevolezza che contrasta l'aumento della cedevolezza dovuto alla crescita della dimensione della cricca. Il risultato è che il rapporto  $\frac{dC}{da}$  rimane costante nonostante l'aumentare della dimensione della cricca.

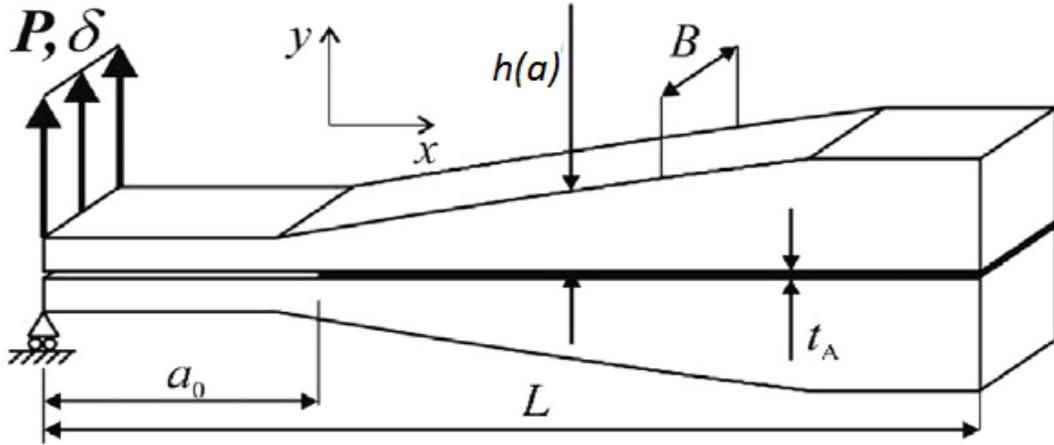


Figura 4.3 Schema del campione TDCB

Per fare in modo che la cedevolezza vari linearmente con la lunghezza della cricca si lavorano i campioni in modo tale che lo spessore vari in modo lineare a partire da una certa ascissa  $x_0$ , in questo modo il fattore geometrico  $m$  e quindi la derivata  $\frac{dC}{da}$  rimangono costanti durante la propagazione della cricca come si osserva in figura 4.4. Questo semplifica molto la procedura per l'ottenimento del parametro  $G_{Ic}$  perché utilizzando il metodo SBT come indicato da [9] non è necessario misurare la propagazione della cricca. Il TDCB ha inoltre una migliore ripetibilità infatti la deviazione nei risultati di  $G_{Ic}$  dei diversi test è inferiore rispetto agli altri metodi.

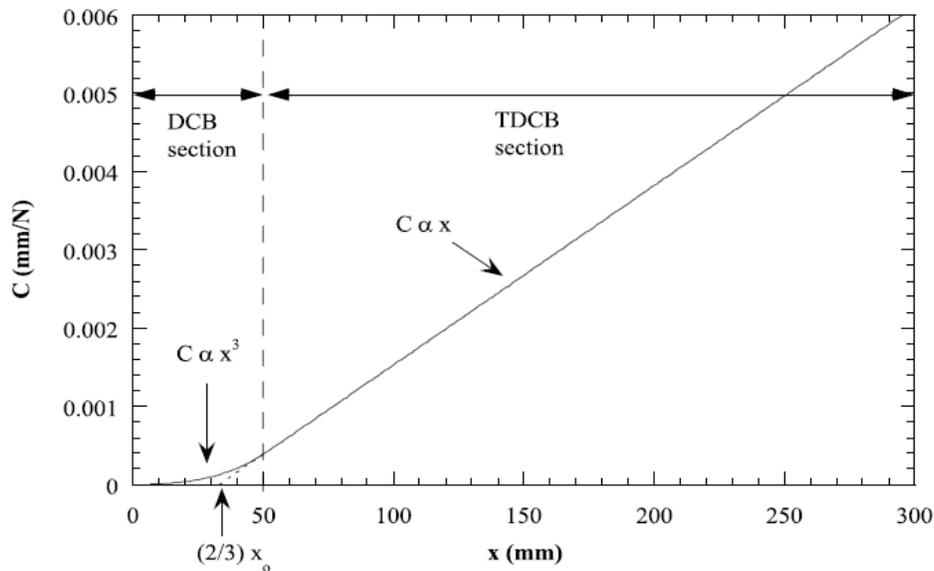


Figura 4.4 Andamento della cedevolezza al variare della coordinata longitudinale

In particolare, il metodo *Simple beam theory (SBT)* valuta la cedevolezza del giunto incollato considerando il contributo del momento flettente e del taglio (ma non della rotazione e della deviazione dell'apice della cricca) con l'espressione:

$$G_{Ic} = 4 \frac{P^2}{Eb^2} m$$

Con  $m$  costante e noto nella zona di propagazione della cricca.

Il metodo SBT ha il vantaggio, non richiedendo la misura della lunghezza della cricca, di non essere soggetto a errori derivanti dalla misura della cricca.

Il metodo CBT [9] permette di considerare il contributo a  $G_{Ic}$  della rotazione o della deviazione dell'apice della cricca correggendo il valore della cedevolezza attraverso l'utilizzo di un valore corretto di lunghezza della cricca.

Il modello più diffuso per la valutazione di  $\Delta$  è quello di che si basa sul modello di Kanninen che considera la cricca come una trave supportata da una fondazione di materiale di rigidezza per unità di lunghezza  $k$ . Risolvendo il sistema di equazioni differenziali che definiscono il modello si ottiene l'espressione

$$\Delta^4 = \frac{Eb h^3}{3k}$$

Da considerazioni sulla rigidezza della fondazione si arriva a

$$\Delta = h \left( \frac{1}{6} \right)^{1/4} = 0,64h$$

Analisi successive che hanno tenuto in considerazione la rotazione dell'apice e le deviazioni dell'apice causate dagli effetti di taglio hanno portato all'espressione

$$\Delta = 0,67h$$

Williams [11] considera come fondazione il sistema costituito dai due substrati con l'adesivo interposto tra di essi e giunge all'espressione

$$\Delta = h \left( \frac{1}{6} \right)^{1/4} \left( 1 + \frac{t_A E}{2h E_A} \right)^{1/4}$$

con

$h$  spessore del substrato

$E$  modulo di Young del substrato

$E_A$  modulo di Young dell'adesivo

$t_A$  spessore dell'adesivo

La correzione  $\Delta$  di quest'ultimo modello può essere espressa in modo più comodo come

$$\Delta = h \left( \frac{1}{6} \right)^{1/4} \left( 1 + \frac{R}{\lambda} \right)^{1/4}$$

con

$$R = \frac{E}{E_A}$$

$$\lambda = \frac{2h}{t_A}$$

Considerando per semplicità il primo dei modelli presentati  $\Delta = 0,64h$  e semplificando l'espressione del parametro geometrico  $m$  (trascurabile variazione nei risultati) come

$$m = \frac{3a^2}{h^3} \rightarrow h = \sqrt[3]{\frac{3}{m}} a^{2/3}$$

Si ottiene

$$\Delta = 0,64 \sqrt[3]{\frac{3}{m}} a^{2/3}$$

Poiché l'espressione di cedevolezza per un campione TDCB è esprimibile come

$$C = \frac{8m}{Eb} \left( a - \frac{2}{3} x_0 \right)$$

con  $x_0$  distanza tra linea di applicazione del carico e inizio del profilo lineare.

Utilizzando il valore corretto di  $a$  si ottiene

$$C = \frac{8m}{Eb} \left( a + 0,64 \sqrt[3]{\frac{3}{m}} a^{2/3} - \frac{2}{3} x_0 \right)$$

A questo punto il valore di  $G_{Ic}$  per un campione TDCB con il metodo CBT è ottenuto differenziando rispetto alla lunghezza della cricca  $a$  l'espressione della cedevolezza, in particolare utilizzando l'espressione di Irwin-Kies:

$$G_{Ic} = 4 \frac{P^2}{Eb^2} m \left( 1 + 0,43 \left( \frac{3}{ma} \right)^{1/3} \right)$$

#### 4.2.1 Prova sperimentale

Le prove sperimentali sono state condotte su un provino *Tapered Double Cantilever Beam* con le dimensioni rappresentate nella figura 4.5 e suggerite dalla normativa ASTM D3433 [12].

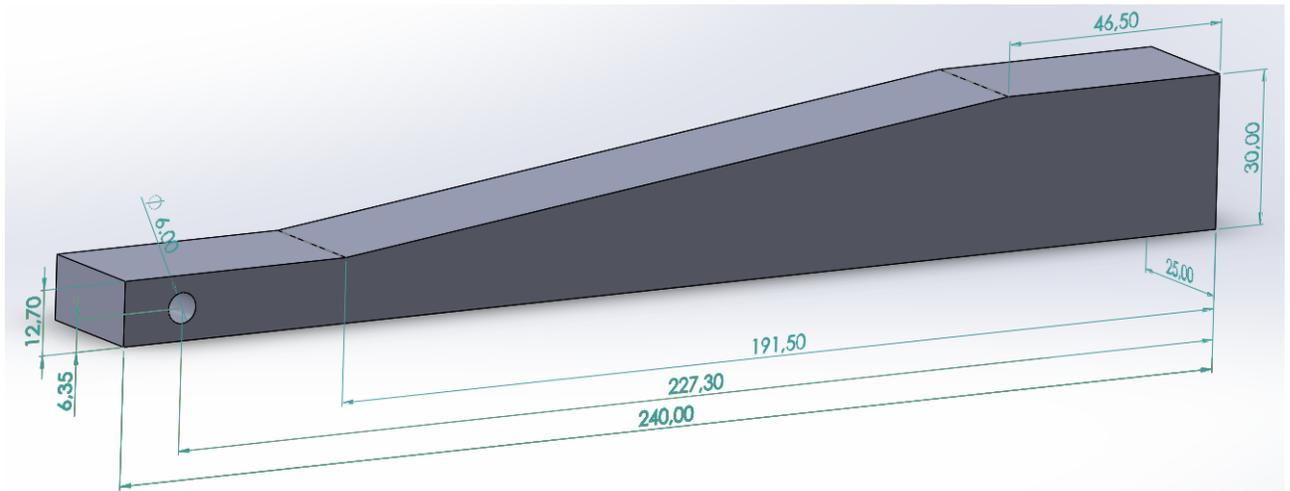


Figure 4.5 Dimensioni provino TDCB

I substrati sono realizzati in lega di alluminio con modulo elastico di 70000 MPa. La prova è condotta a velocità di 0,5 mm/min come suggerito dalla norma ISO 25217 ed è ripetuta 3 volte al fine di cogliere eventuali deviazioni dei risultati. Per migliorare l'adesione si adottano trattamenti superficiali, in questo caso è stato eseguito un trattamento di sabbiatura per aumentare il grado di rugosità e un lavaggio con acetone per pulire la superficie da particelle, grasso, olio o sporcizia. Per ogni test vengono misurati la forza sul campione mediante la cella di carico e l'apertura tra le estremità del campione dallo spostamento della traversa della macchina. Il valore dell'apertura iniziale della cricca di 50 mm è assicurato dall'utilizzo di un nastro di politetrafluoroetilene PTFE applicato sui due campioni, mentre lo spessore massimo è assicurato da alcune microsferi di vetro miscelate all'adesivo epossidico. La curva rilevata dalla macchina di prova per il primo dei tre test è riportata in figura 4.6

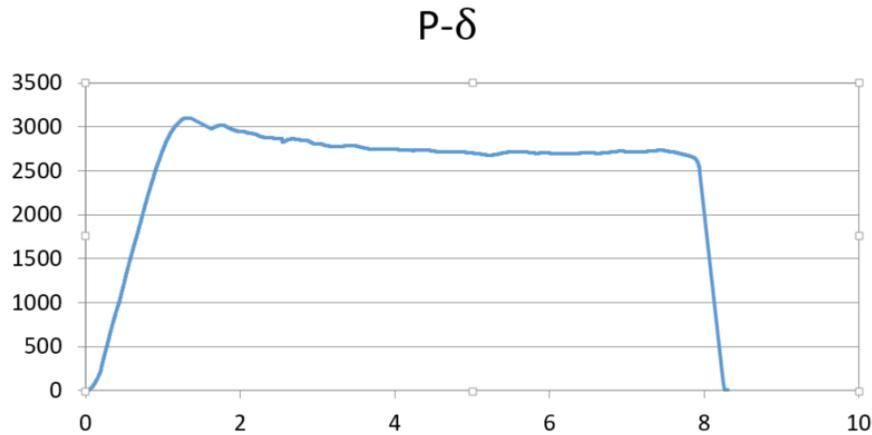


Figure 4.6 Curva forza - spostamento TDCB test 1

Tutti i test hanno mostrato una rottura di tipo coesivo.

Il valore di tasso di rilascio di energia è stato calcolato a partire dal valore di picco della curva forza – spostamento fino al valore di scarico, ovvero il range nella quale si ha propagazione della cricca.

#### 4.2.2 Valutazione di $G_{Ic}$

Se si utilizza il campione TDCB evidenziato in figura 4.5 il fattore geometrico vale  $m = 3,7 \text{ mm}^{-1}$  ed il metodo *Simple beam theory* suggerito dalla normativa ISO 25217 porta per il test 1 ad un risultato di

$$\bar{G}_{Ic} = 4 \frac{p^2}{Eb^2} m = 2,62 \text{ N/mm}$$

In modo particolare il risultato dei tre test è riassunto nella seguente tabella:

$G_{Ic}$ con metodo SBT	
Test 1	2,6001
Test 2	2,6214
Test 3	2,6541
Media	2,6252
Varianza	0,0005

Volendo valutare anche il contributo a  $G_{Ic}$  dovuto alla rotazione e allo spostamento dell'apice della cricca è possibile utilizzare il metodo *beam corretto CBT*, la cui formulazione è

$$G_{Ic} = 4 \frac{P^2}{Eb^2} m \left( 1 + 0,43 \left( \frac{3}{ma} \right)^{1/3} \right).$$

In questo caso è necessario utilizzare il valore di lunghezza della cricca  $a$  che può essere ricavato con una misurazione oppure ricavato analiticamente, utilizzando il metodo di Krenk [4] corretto. Si parla di metodo 'corretto' perché la formulazione originale prevede il calcolo analitico della cricca per substrato DCB, caratterizzato da un'altezza costante. In questo caso si vuole valutare ed utilizzare una trave equivalente al campione TDCB utilizzato. In questo senso si è utilizzata un'altezza del campione pesata sulla lunghezza del tratto in cui si ha una certa altezza rispetto alla lunghezza complessiva del campione, in particolare

$$h_{eq} = \frac{x_1}{x_{tot}} h_1 + \frac{x_2}{x_{tot}} h_m + \frac{x_3}{x_{tot}} h_3 = 21,3 \text{ mm}$$

con

$x_1$  lunghezza del primo tratto di campione ad altezza costante

$x_2$  lunghezza del secondo tratto di campione ad altezza variabile linearmente

$x_3$  lunghezza del terzo tratto di campione ad altezza costante

$h_m$  altezza media tra il primo ed il terzo tratto

In funzione delle caratteristiche dell'adesivo e dei campioni gli altri parametri necessari al calcolo della lunghezza della cricca assumono i valori

$E'_a$ (MPa)	$k$ (MPa)	$\lambda_\sigma$ (mm <sup>-1</sup> )
3012	502000	0,097

Scrivendo la formula dell'apertura evidenziando la lunghezza della cricca si ha

$$\left(\frac{8P\lambda_{\sigma}^4}{3k}\right)a^3 + \left(\frac{8P\lambda_{\sigma}^3}{k}\right)a^2 + \left(\frac{8P\lambda_{\sigma}^2}{k} + \frac{12Pa}{5Ghb}\right)a + \left(\frac{4P\lambda_{\sigma}}{k} - \delta\right) = 0$$

Di forma

$$K_1a^3 + K_2a^2 + K_3a + K_4 = 0$$

La cui soluzione in forma chiusa è

$$a = \frac{\sqrt[3]{\sqrt{C_1^2 + 4C_2^3} + C_1}}{3K_1\sqrt[3]{2}} - \frac{K_2}{3K_1} - \frac{\sqrt[3]{2}C_2(3K_1)^{-1}}{\sqrt[3]{\sqrt{C_1^2 + 4C_2^3} + C_1}}$$

dove

$$C_1 = -27K_1^2K_4 + 9K_1K_2K_3 - 2K_2^3$$

$$C_2 = 3K_1K_2 - K_2^2$$

Secondo questa teoria la lunghezza dipende dall'altezza del substrato come  $a = a\left(h^{\frac{3}{4}}\right)$ .

Ad ogni punto della curva  $P - \delta$  corrisponde un certo valore di lunghezza di cricca  $a$  e di energia critica  $G_{Ic}$  ovvero un punto nella curva  $R$ . La figura 4.7 evidenzia la curva  $R$  ottenuta con il metodo CBT e Krenk modificato per uno dei test.

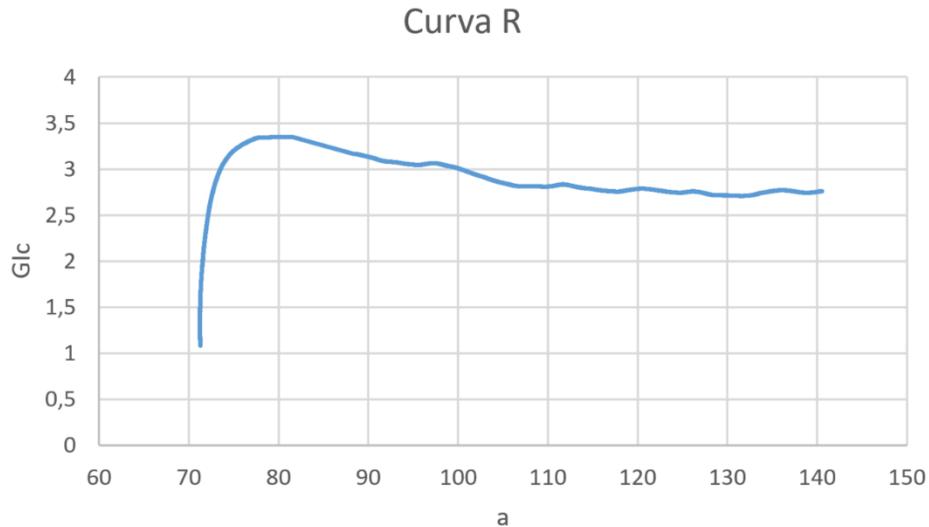


Figure 4.7 Curva R ottenuta dalla lunghezza del difetto analitica e dal metodo CBT

Si evidenzia come la lunghezza di cricca iniziale calcolata con questo metodo vale  $a_0 = 71,2 \text{ mm}$ , questo significa che la propagazione della cricca calcolata e dovuta alla fase di precricatura equivale a 21,2 mm. Questo parametro risulta eccessivamente elevato, infatti di solito viene misurata un allungamento causato dalla precricatura che va dai 10 ai 20 mm. Tale sovrastima può essere dovuta o al fatto che la cricca diventa talmente sottile da non essere percepibile al microscopio oppure ad un sovradimensionamento del metodo.

Nella fase di propagazione del difetto si osserva un valore stabile di  $G_{Ic}$  intorno ai  $3 \text{ N/mm}$ . Questa stabilità è stata rilevata anche in studi precedenti e conferma l'applicabilità del metodo e la sua ripetibilità anche con sistemi di dimensioni e materiali differenti.

Nella seguente tabella sono evidenziati i risultati ottenuti con il metodo CBT su 3 differenti test.

<i><b>G<sub>Ic</sub> con metodo CBT e Krenk modificato</b></i>	
Test 1	2,92
Test 2	2,82
Test 3	3,09
Media	2,94
Varianza	0,01

Quest'ultimo metodo porta a un valore di tasso di rilascio di energia critico molto vicino a quello ricavato con il metodo della cedevolezza. In questo caso per ogni punto della curva  $P - \delta$  si calcola la cedevolezza ed a questa viene associata una dimensione della cricca rilevata dalle immagini catturate

durante la prova con una camera. In questo modo si costruisce punto a punto la curva cedevolezza – dimensione della cricca. Si trova la funzione polinomiale che meglio si adatta a questa curva e la si deriva al fine di ricavare, utilizzando Irwin – Kies, la curva  $G_{Ic}(a)$ . Con questa procedura si giunge al valore di  $G_{Ic} = 3 \text{ N/mm}$  dichiarato dal produttore.

Questo studio conferma che i metodi CCM e CBT portano a risultati molto simili mentre il metodo SBT porta a previsioni del valore di  $G_{Ic}$  inferiori poiché trascurando la rotazione dell'apice considera cedevolezza minori.

### 4.3 End Notched Flexure (ENF)

L'End Notched Flexure è un test di flessione su tre punti del giunto incollato ed è utilizzato al fine di individuare il tasso di rilascio di energia critica per il modo II. In questo caso le condizioni di vincolo e di spostamento imposto sono prodotte utilizzando dei cilindri rigidi posti esternamente al campione (Figura 4.8). Anche per questo modo ci sono diverse strategie per la valutazione dell'energia critica  $G_{IIc}$ .

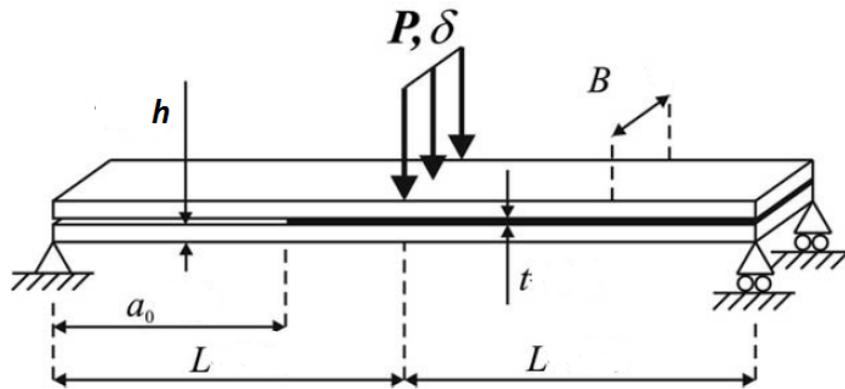


Figura 4.8 Schema del campione End Notched Flexure

In figura 4.9 si può osservare un campione ENF e i parametri utili alla costruzione della legge coesiva relativa al modo II.

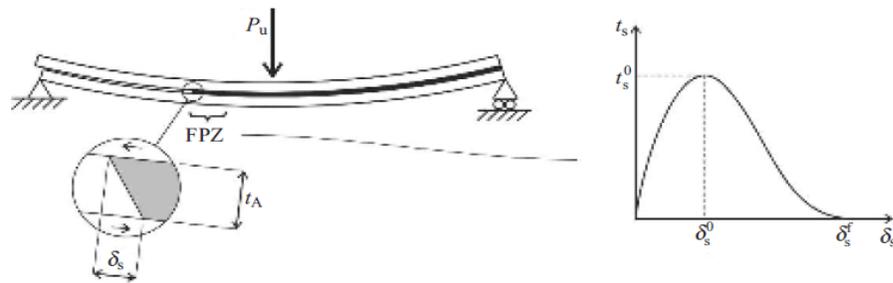


Figura 4.9 Parametri per la costruzione della legge coesiva relativi al modo II

Il metodo basato sulla calibrazione della cedevolezza CCM fornisce una valutazione dell'energia critica a partire dall'equazione di Irwin-Kies

$$G_{IIc} = \frac{P^2}{2b} \frac{dC}{da}$$

Dopo aver costruito la curva cedevolezza – lunghezza del difetto dalla misura della lunghezza del difetto e dal calcolo della cedevolezza a partire dalla curva forza – spostamento della prova  $C = \delta/P$ , si trova l'equazione polinomiale  $C = C(a)$  che segue meglio l'andamento della curva reale. Questa espressione viene derivata e sostituita nell'equazione di Irwin-Kies. Se ad esempio si utilizza una polinomiale cubica:

$$C(a) = C_1 a^3 + C_2 a^2 + C_3 a + C_4$$

l'espressione del tasso di rilascio di energia diventa

$$G_{IIc} = \frac{P^2}{2b} (3C_1 a^2 + 2C_2 a + C_3)$$

Il valore  $G_{IIc}$  viene individuato come valore stazionario della curva  $G_{IIc} - a$ , che corrisponde alla fase di propagazione della cricca.

Il metodo *Corrected beam theory CBT* proposto da Wang e Williams [13] per il campione ENF arriva alla formulazione del  $G_{IIc}$

$$G_{IIc} = \frac{9(a + 0,42\Delta)^2 P^2}{16B^2 h^3 E_1}$$

con

$E_1$  modulo elastico in direzione longitudinale del substrato

$\Delta$  è la correzione della lunghezza del difetto per considerare la rotazione e la deformazione a taglio dell'adesivo di espressione

$$\Delta = h \sqrt{\frac{E_1}{11G_{13}} \left[ 3 - 2 \left( \frac{\Gamma}{1 + \Gamma} \right)^2 \right]}$$

dove

$$\Gamma = 1,18 \frac{\sqrt{E_1 E_3}}{G_{13}}$$

Con  $G_{13}$  modulo elastico a taglio.

Per i metodi descritti precedentemente si rende necessaria la misura della lunghezza della cricca in propagazione, questo richiede una strumentazione importante (sensori o strumenti ottici) oppure metodologie avanzate complesse. La procedura di misurazione è complicata dal fatto che nel modo II non si ha una vera e propria apertura della cricca, inoltre la misura della cricca introduce nel calcolo delle energie critiche un errore di misura intrinseco.

I moderni adesivi permettono lo sviluppo di una zona plastica estesa all'apice della cricca che causa importanti dissipazioni di energia, queste non sono considerate da tutti i metodi per il calcolo dell'energia di frattura, ad esempio non lo sono nel CBT. Il metodo CCM invece ne tiene conto perché si basa sulla misura della cedevolezza che è affetta anche dall'energia dissipata nella zona plastica, questo metodo tuttavia contiene un errore intrinseco associato al riprodurre la curva  $C - a$  reale con una curva polinomiale.

Al fine di evitare la misura della lunghezza della cricca e considerare l'effetto della zona plastica è stato sviluppato il *Compliance based beam method* [4] [13], un metodo per l'ottenimento di  $G_{IIc}$  che si fonda sul concetto di lunghezza della cricca equivalente.

La cedevolezza di un campione ENF valutata con la teoria beam e il teorema di Castigliano è esprimibile come

$$C = \frac{3a^3 + 2L^3}{8EBh^3} + \frac{3L}{10GBh}$$

Il modulo elastico flessionale può essere espresso utilizzando la cedevolezza e la lunghezza del difetto iniziali

$$E_f = \frac{3a_0^3 + 2L^3}{8C_{0corr}Bh^3}$$

Dove

$$C_{0corr} = C_0 - \frac{3L}{10GBh}$$

Questo metodo permette di considerare gli effetti della concentrazione della tensione all'apice del difetto e quelli legati alla rotazione e allo spostamento dell'apice della cricca che entrano in gioco nel calcolo del modulo flessionale. Il modulo a flessione è una proprietà derivata dalla cedevolezza iniziale e dal modulo elastico a taglio.

Se si inverte la formula della cedevolezza utilizzando il modulo elastico flessionale  $E_f$  piuttosto che quello a trazione  $E$  si ottiene la lunghezza equivalente della cricca, che permette di tenere in considerazione l'effetto della plasticità all'apice della cricca, in funzione della cedevolezza del campione. La cedevolezza del campione varia man mano che il difetto propaga.

$$a_{eq} = a + \Delta a_{FPZ} = \left[ \frac{C_{corr}}{C_{0corr}} a_0^3 + \frac{2}{3} \left( \frac{C_{corr}}{C_{0corr}} - 1 \right) L^3 \right]^{1/3}$$

Con

$$C_{corr} = C - \frac{3L}{10GBh}$$

Studi precedenti hanno dimostrato una piccola influenza del valore del modulo elastico a taglio  $G$ .

Utilizzando l'equazione di Irwin–Kies si ottiene il valore di tasso di rilascio di energia per il modo II

$$G_{IIc} = \frac{9P^2 a_{eq}^2}{16B^2 E_f h^3}$$

Questo approccio ha il grande vantaggio di non richiedere la misura della lunghezza della cricca poiché viene utilizzata una lunghezza della cricca equivalente e non quella reale. Con il metodo CBBM è inoltre possibile ottenere il valore di  $G_{IIc}$  al variare di  $a$ , ovvero la curva R.

#### 4.3.1 Prova sperimentale

La prova ENF è sostanzialmente una prova di flessione su 3 punti e il campione ENF utilizzato ha le dimensioni evidenziate nella seguente figura 4.10

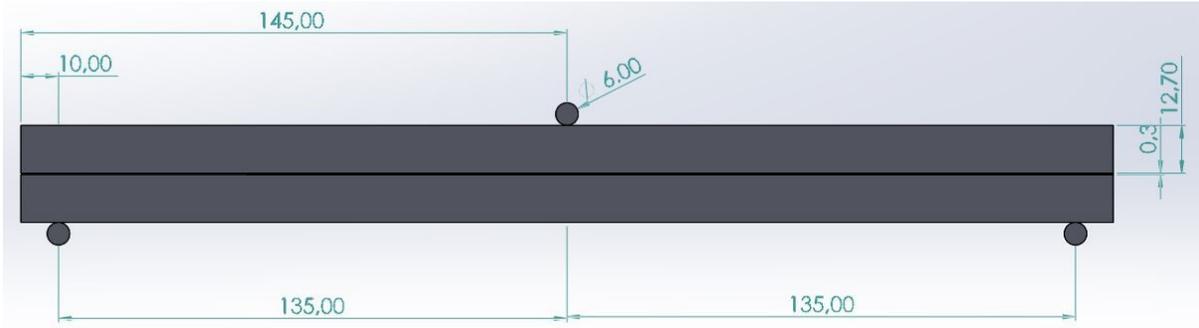


Figure 4.10 Dimensioni del provino End Notched Flexure

I substrati sono realizzati in acciaio con modulo elastico di 210000 Mpa. Il provino è vincolato da due cilindri di diametro 6 mm posti al di sotto del campione e sollecitato da un cilindro delle stesse dimensioni nel punto centrale. La prova è condotta a velocità di 0,5 mm/min come suggerito dalla norma ISO 25217 ed è ripetuta 3 volte al fine di cogliere eventuali deviazioni dei risultati. Per migliorare l'adesione si adottano trattamenti superficiali, in questo caso è stato eseguito un trattamento di sabbiatura per aumentare il grado di rugosità e un lavaggio con acetone per pulire la superficie da particelle, grasso, olio e sporcizia. Per ogni test vengono misurati la forza tramite la cella di carico e lo spostamento della traversa della macchina collegata al cilindro superiore. Il valore dell'apertura iniziale della cricca di 50 mm è assicurato dall'utilizzo di un nastro di politetrafluoroetilene PTFE applicato sui due campioni, mentre lo spessore massimo è assicurato da delle microsferiche di vetro miscelate all'adesivo epossidico. Le curve rilevate dalla macchina di prova per i tre test sono riportate in figura 4.11

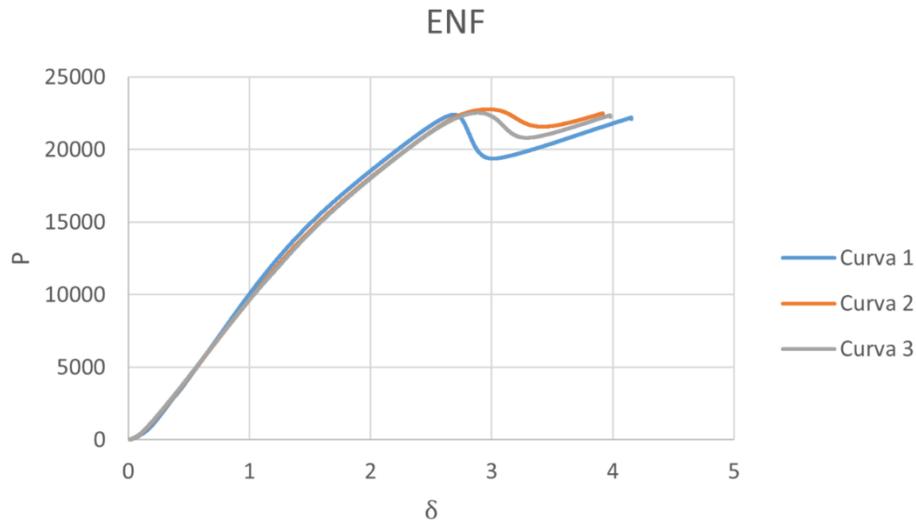


Figura 4.11 Curve P- $\delta$  dei test end notched flexure

I parametri utilizzati per lo sviluppo del calcolo di  $G_{IIc}$  con il metodo CBBM sono riportati nella seguente tabella.

$B$ (mm)	$h$ (mm)	$t_A$ (mm)	$E_A$ (MPa)	$G_A$ (MPa)	$E_{Steel}$ (MPa)	$G_{Steel}$ (MPa)	$a_0$ (mm)	$L$ (mm)
25	12.7	0.3	2530	903	210000	80769	60	135

La normativa ISO 25217, che norma l'ottenimento dell'energia di frattura per il modo I, può essere un riferimento anche per questo test. In modo particolare, da questa si prende spunto per il corretto svolgimento della fase di precraccatura, necessaria a realizzare una cricca con raggio di curvatura dell'apice del difetto che tende a zero. Questa condizione è necessaria al fine di poter applicare i principi della meccanica della frattura e viene realizzata sollecitando a modo I il campione ad una velocità inferiore a quella della prova (0,1 mm/min). La precraccatura porta ad allungare la cricca iniziale di un'ulteriore lunghezza  $a_{pc}$  che varia dai 10 ai 20 mm, e deve essere misurata con un microscopio ottico prima dell'inizio della prova. Per lo studio seguente si considera una precracca di  $a_{pc} = 10 \text{ mm}$  come prescritto da norma, ma si analizzerà l'effetto di una lunghezza differente sul valore di  $G_{IIc}$  calcolato.

Tutti i provini hanno subito una rottura coesiva.

#### 4.3.2 Valutazione del $G_{IIc}$

La cedevolezza iniziale è stata valutata calcolando la rigidità della prima parte della curva forza – spostamento, per tutti i 3 test si giunge a:

$$C_0 = 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ mm/N}$$

$$C_{0corr} = 9,8 \cdot 10^{-5} \text{ mm/N}$$

$$E_f = 14380 \text{ GPa}$$

Con le formule evidenziate per il calcolo della lunghezza del difetto equivalente e del tasso di rilascio di energia critico si ottiene:

**$G_{IIc}$  ottenuti con CBBM**

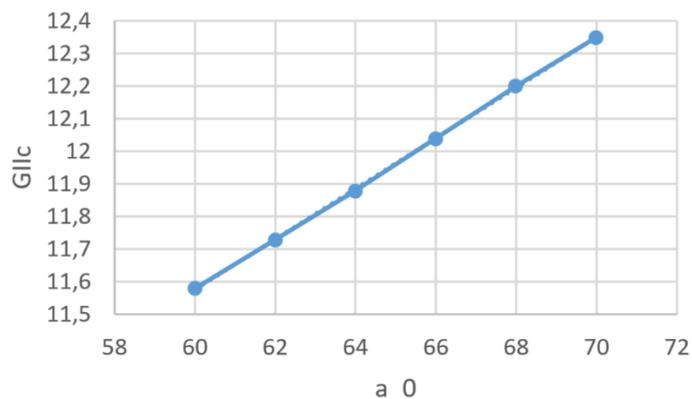
Test 1	11,58
Test 2	14,60
Test 3	13,99
Media	<b>13,39</b>
Varianza	1,70

Il valore medio di  $G_{IIc}$  delle 3 prove è di 13,4 N/mm.

Si può osservare che questo metodo fornisce una maggiore variabilità del risultato rispetto ai metodi analizzati per il modo I infatti la varianza ha valore di 1,7 N/mm.

Nonostante in questo caso si sia raggiunto un valore interno alla forchetta di tolleranza indicata bisogna prestare molta attenzione poiché parametri come la cedevolezza iniziale e la dimensione iniziale del difetto, che in alcuni casi sono difficili da individuare in modo preciso, influenzano il risultato in modo determinante.

$a_0$  deve essere misurata dopo la rottura del campione alla fine della prova attraverso l'osservazione delle superfici di rottura. Di solito l'ulteriore allungamento della cricca a causa della precraccatura va dai 10 ai 20 mm, questo valore deve essere verificato sul campione poiché influenza il calcolo di  $G_{IIc}$ . Un valore maggiore di lunghezza del difetto iniziale, a parità di curva  $P - \delta$  causa un maggiore tasso di rilascio di energia critica. Come si vede nella curva seguente facendo variare  $a_0$  da 60 a 70 mm la dipendenza di  $G_{IIc}$  da  $a_0$  è lineare.



Questo risultato è interpretabile considerando che se il sistema ha un difetto di maggiore entità, esso sarà in grado di offrire le stesse performances di resistenza solo qualora il materiale abbia proprietà più importanti.

Per quanto riguarda la cedevolezza iniziale è doveroso precisare che bisogna considerare un numero sufficientemente grande di punti iniziali per evitare di cogliere eventuali deviazioni dovute a cause esterne e considerare una cedevolezza media del primo tratto, fino a uno spostamento della cella di carico di 1 mm. Viene compreso il piccolo tratto a pendenza inferiore causato dal gioco iniziale della macchina di prova e che può avere una piccola influenza sui risultati.

Il metodo CBBM fornisce prima una decrescita della lunghezza della cricca causato da un difetto del metodo analitico, tuttavia successivamente si osserva una crescita della curva  $R$  causata dalla propagazione stabile e lenta della cricca. Appena si raggiunge il picco nella curva  $P - \delta$  si osserva un decadimento di carico a causa della propagazione instabile della cricca. Successivamente a questo punto si osserva un valore quasi costante della curva  $R$  come è visibile in figura 4.12.

## Curva R

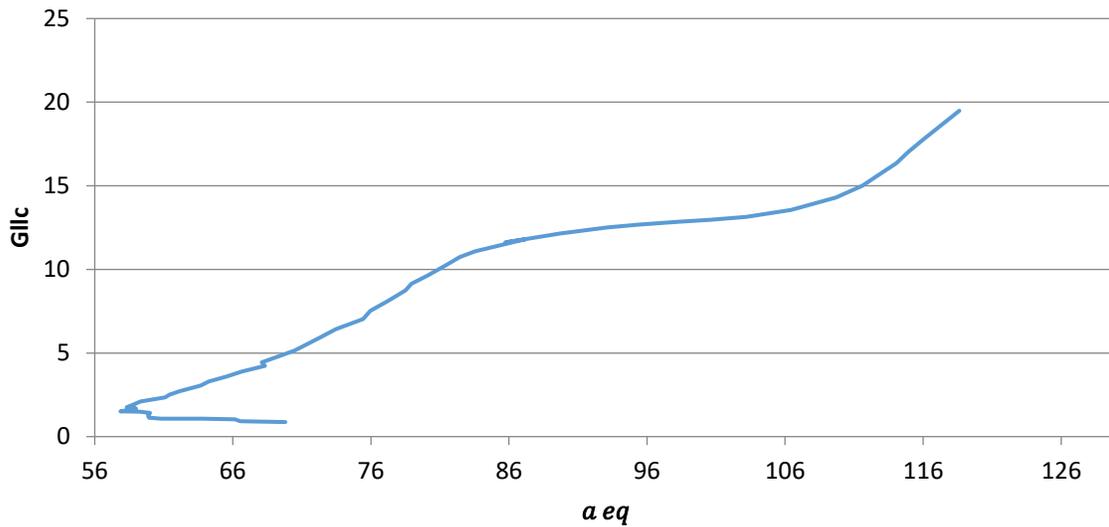


Figura 4.12 Curva R

Successivamente, quando la cricca è prossima a raggiungere la posizione del cilindro di carico la forza riprende ad aumentare e la curva  $R$  continua a crescere con pendenza maggiore perché la velocità della cricca diminuisce ed il campione accumula molta energia durante l'elevata deformazione a flessione del campione. Questa sensibile crescita del  $G_{IIc}$  è spiegata dalla grande estensione della zona plastica in questa fase. Studi precedenti hanno confermato sperimentalmente le stime di lunghezza di cricca iniziale (compresa precricca) e di lunghezza di cricca finale ottenute con questo metodo.

Se si confronta il risultato ottenuto con CBBM rispetto a quello ottenuto con altri metodi si evidenzia come il CBBM porta a valori superiori di  $G_{IIc}$ , questo dipende dal fatto che vengono tenuti in considerazione i fenomeni di dissipazione di energia per sostenere la deformazione plastica all'apice del difetto.

E' importante notare che valori di cedevolezza iniziale minori o maggiori rispetto a quello corretto causano un sensibile aumento del  $G_{IIc}$  calcolato.

Il gioco iniziale dovuto alla macchina di prova porta a valori iniziali di cedevolezza maggiori di quelli reali come si vede nel primissimo tratto della curva. Tale effetto è attenuato dal fatto che per il calcolo della cedevolezza iniziale si considerano tutti i punti della curva fino a uno spostamento di 1 mm, quindi il primissimo tratto ha un effetto trascurabile rispetto al tratto complessivo preso in considerazione.

Nonostante alcune approssimazioni utilizzate, come la reale dimensione iniziale della cricca dopo la fase di precriccatura e il trascurare l'effetto del gioco iniziale della macchina di prova, si raggiunge una buona approssimazione del valore di  $G_{IIc}$ .

## 5 Metodi per l'ottenimento della tensione di picco e del parametro di rigidità della legge di trazione - separazione

L'utilizzo di prove specifiche per l'ottenimento della tenacità a frattura dipende dal fatto che questo parametro influisce in modo significativo sulla legge coesiva ed è il parametro più importante, che determina la qualità con la quale viene riprodotto il comportamento del giunto incollato. Definito questo parametro è possibile ricavare la tensione di picco  $t^0$  e il parametro di rigidità  $e$  nei diversi modi con diverse metodologie che si differenziano per precisione dei risultati e complessità. Nel caso in cui si voglia modellare l'adesivo con legge trapezoidali ai parametri sopracitati si aggiunge il valore di spostamento corrispondente all'inizio della fase di softening  $\delta^S$ .

### 5.1 Il metodo dell'identificazione dei parametri

Il metodo di identificazione dei parametri utilizza l'ipotesi di equivalenza tra i parametri della legge coesiva e le proprietà bulk del materiale. Per la loro definizione quantitativa vengono condotte prove sperimentali i cui risultati vengono utilizzati direttamente nella legge coesiva e inseriti nei programmi di calcolo. Questo metodo quindi non tiene conto del fatto che le proprietà bulk dell'adesivo sono differenti dalle proprietà di uno strato sottile di adesivo: in particolare uno strato sottile di adesivo è vincolato a non deformarsi, o meglio a vincolarsi poco, fuori da piano per via della presenza dei substrati che si oppongono al movimento dell'adesivo nella direzione dello spessore; inoltre mentre nel materiale massivo la cricca propaga in modo perpendicolare alla tensione principale massima nello strato sottile la cricca propaga seguendo il pattern dello strato adesivo, più debole e meno rigido.

I parametri che definiscono l'elasticità dell'adesivo sono il modulo di Young e il coefficiente di Poisson, essi definiscono la resistenza che il materiale oppone alla deformazione elastica e alla contrazione in direzione trasversale e vengono ottenuti da prove di trazione unidirezionale poiché per i materiali adesivi vale l'ipotesi di materiale isotropico. Conducendo la prova (Fig. 5.1) seguendo la normativa di riferimento DIN EN ISO 527 per l'ottenimento delle proprietà di materie plastiche su un provino interamente costruito in materiale adesivo si ottiene

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} = 2530 \text{ MPa}$$

$$\nu = \frac{\Delta n L_0}{n_0 \Delta L} = 0,4$$

1: punto a  $\varepsilon = 0,0005$

2: punto a  $\varepsilon = 0,0025$

$L$ : lunghezza del campione in direzione longitudinale

$n$ : spessore del campione in direzione trasversale

Da cui si ottiene il modulo elastico a taglio, per l'ipotesi di materiale isotropico

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} = 903 \text{ MPa}$$

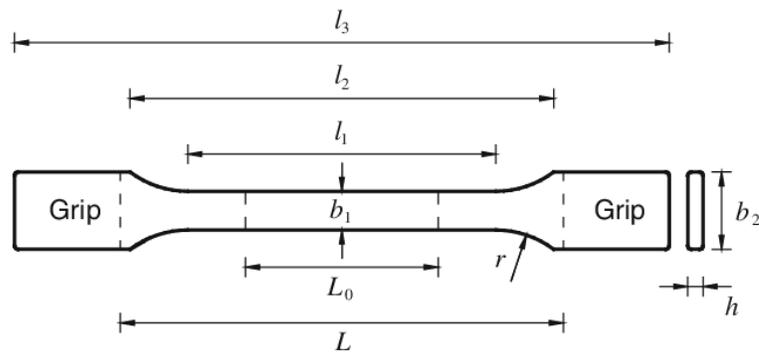


Figura 5.1 Macchina di prova e provino DIN EN ISO 527

Per determinare la tensione di picco per il modo I e per il modo II ovvero le resistenze a trazione e a taglio si utilizzano rispettivamente le prove a giunto di testa e a taglio DIN EN 14869 con aderenti spessi. Nella figura 5.2 è visibile uno schema e un'immagine della prova shear dove sono evidenziati gli estensimetri che misurano la deformazione a taglio (3 punti per lato) e la macchina di prova.

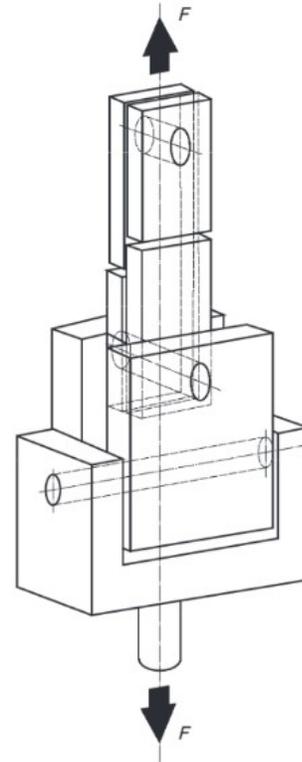
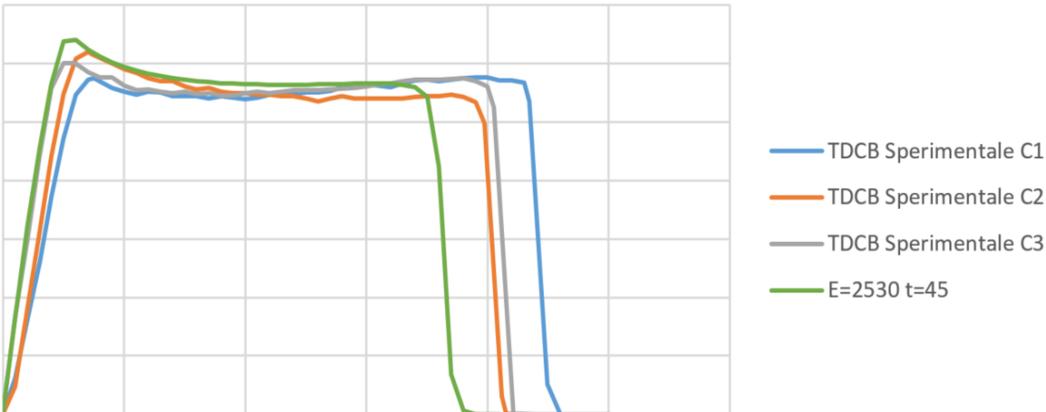


Figura 5.2 Immagine e schema della prova DIN EN 14869-2

Da questa prova si ottiene la curva forza - spostamento e, dividendo la forza di picco delle due prove per la sezione resistente, si trova una resistenza a trazione di  $45 \text{ MPa}$  e una resistenza a taglio di  $30 \text{ MPa}$ .

Con i dati delle energie di frattura, dei moduli elastici e di resistenza nei due modi è possibile implementare una prima legge bilineare nel modello che riproduce il sistema reale. Il confronto tra le curve forza – spostamento delle prove Tapered double cantilever beam e End notched flexure con quelle ottenute dalle simulazioni virtuali porta ai risultati visibili in figura 5.3. Si vede come questo primo modello riproduce in modo molto approssimato il comportamento sperimentale, infatti per la prova TDCB si ha un'elevata differenza tra lo spostamento a rottura valutato a calcolo e quello sperimentale. Per quanto riguarda la prova ENF il modello oltre a non cogliere precisamente la parte elastica della curva reale non coglie il flesso della curva, che identifica la propagazione instabile della cricca.

### TAPERED DOUBLE CANTILEVER BEAM



### END NOTCHED FLEXURE

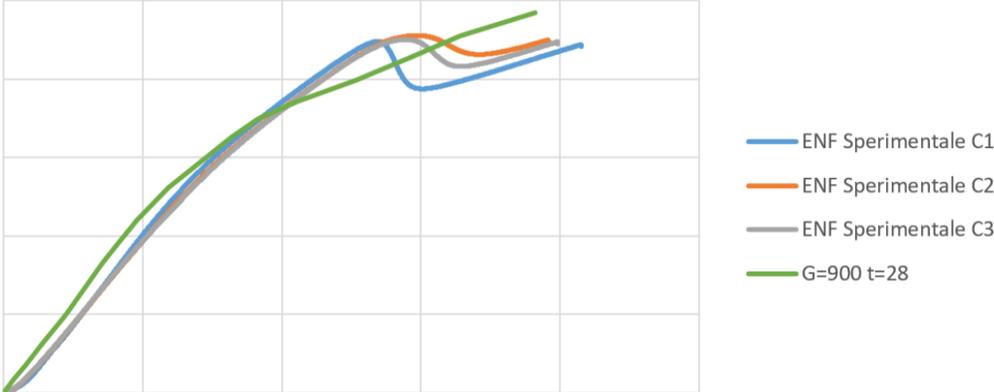


Figura 5.3 Confronto tra le curve forza - spostamento delle simulazioni e delle prove sperimentali

## 5.2 Il metodo inverso

Il metodo inverso consiste nell'ottenimento dei parametri della legge di trazione separazione tramite un processo iterativo finalizzato alla riproduzione delle curve risultanti dalle prove sperimentali con il corrispondente modello agli elementi finiti. Il processo consiste nel ripetere la simulazione variando le variabili in gioco al fine di ridurre l'errore tra le curve reali e quelle simulate. Ipotizzando di voler utilizzare una legge triangolare i parametri da iterare sono due, la tensione di picco della legge (o resistenza coesiva) e il parametro di rigidità; nel caso in cui si utilizzi una legge trapezoidale è necessario iterare un altro parametro ovvero la separazione raggiunta nel momento di inizio della fase di softening. Alcuni studi condotti da Andersson e Stigh [14] hanno dimostrato una trascurabile influenza di questo parametro. Al fine di ottenere un buon risultato è necessario riprodurre in modo fedele la geometria del modello fisico mentre per quanto riguarda la legge coesiva essa viene approssimata dalle forme bi-lineari o tri-lineari per un'implementazione più semplice nei software di calcolo. Le proprietà bulk del materiale possono essere utilizzate come variabili di primo tentativo del processo iterativo.

Spesso si utilizzano come riferimenti la curva R, il profilo di apertura della cricca durante la propagazione oppure più comunemente la curva forza – spostamento. I problemi inversi sono tipicamente mal posti ovvero la soluzione non è stabile, ciò significa che cause molto diverse possono causare effetti simili rendendo complicato cogliere l'influenza di un certo parametro sui risultati.

Una strategia possibile è quella di fittare la curva forza – spostamento di una prova in cui il campione è sollecitato contemporaneamente nei due modi come una prova single lap. In questo caso il numero di variabili da iterare raddoppia rispetto al caso in cui si analizzino in modo indipendente i due modi, con la conseguente necessità di adottare strategie di iterazione complesse, ad esempio in alcuni studi sono stati usati i principi del DoE (design of experiments) e la tecnica kriging. Inoltre, per evitare di condurre una prova in più è necessario ricavare le energie a frattura critiche nei modi puri, ad esempio calcolando l'energia critica dai dati relativi al test in due condizioni di mix mode ed eseguendo un'interpolazione lineare [3].

Un'altra strategia è quella di fittare le curve forza - spostamento relative alle prove di modo puro (Tapered double cantilever beam ed End notched flexure). Dopo aver trovato in modo indipendente i parametri relativi alle due leggi traction – separation è possibile eventualmente validare il modello complessivo in una prova a sollecitazione mista. Questa strategia risulta spesso più conveniente perché

i parametri da valutare esercitano la loro influenza in modo che variabili diverse possono causare le stesse conseguenze. Inoltre, le funzioni di errore, ovvero le funzioni che esprimono quanto bene quella precisa combinazione di parametri fitta i dati sperimentali, sono influenzate in modo più o meno marcato da tutte le variabili in gioco, per questo se i parametri da iterare sono  $n$  la funzione di errore sarà di grado  $n + 1$ , ad esempio se si devono iterare due parametri la funzione di errore sarà una superficie tridimensionale. Il fatto di dover gestire funzioni di grado minore, ovvero di ricercare la soluzione in uno spazio di dimensione inferiore, permette un'implementazione più semplice se si sceglie di adottare eventuali algoritmi di iterazione. Un'ulteriore vantaggio nell'utilizzo di questa strategia consiste nel doppio utilizzo delle prove TDCB e ENF, infatti queste possono essere utilizzate sia utilizzando le curve forza - spostamento come base sulla quale verificare la bontà con la quale la legge individuata riproduce i risultati sperimentali sia per il calcolo o la misura dei tassi di rilascio di energia critici.

### 5.2.1 Modelli FEM delle prove TDCB e ENF

La geometria è costruita seguendo lo schema mostrato in figura 4.5 e suggerito dalla normativa ASTM D3433 [12]. Il componente reale è stato riprodotto con un modello tridimensionale.

La mesh dei substrati (Fig. 5.4) è realizzata con software di pre-processor hypermesh a partire dalle superfici di contorno del campione TDCB ed utilizzando elementi solidi brick a 8 nodi ed elementi solidi penta a 6 nodi per riprodurre in modo continuo il profilo lineare del campione. La dimensione dell'elemento è imposta a 1 mm. Le aree critiche dei fori necessari al passaggio dei perni di afferraggio sono riprodotte con una corona di elementi brick posizionati circolarmente come mostrato in figura 5.5. La dimensione della cricca iniziale è 50 mm e l'adesivo è simulato con uno strato di elementi solidi coesivi COH3D8 di dimensione 0,5 mm, su cui è possibile definire la legge di trazione - separazione. All'interno dei due fori si sono inseriti due elementi RB2 in modo tale da vincolare tutti i nodi della faccia interna del foro a muoversi dello stesso spostamento dei nodi centrali di riferimento, in questo modo si riproduce in modo più realistico il contatto tra un perno rigido e la faccia interna del foro.

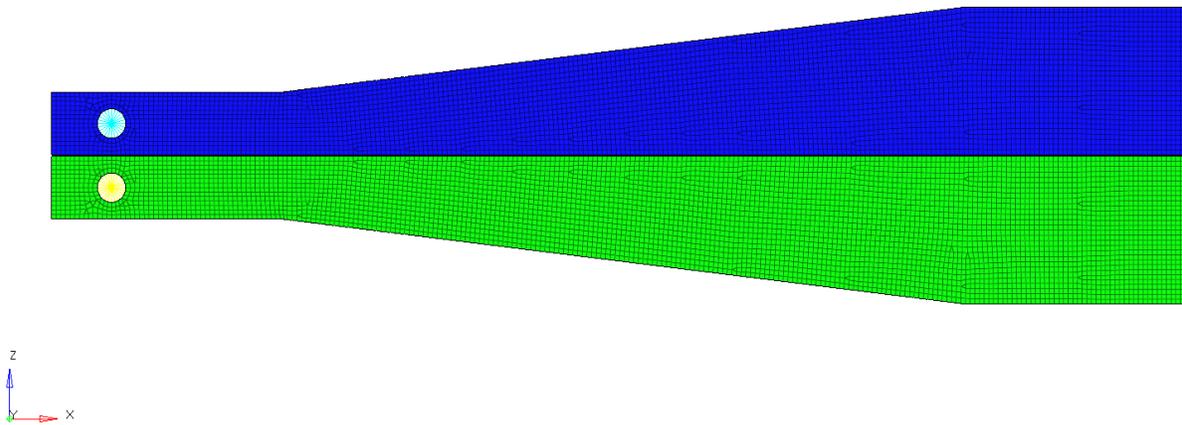


Figura 5.4 Mesh del campione TDCB

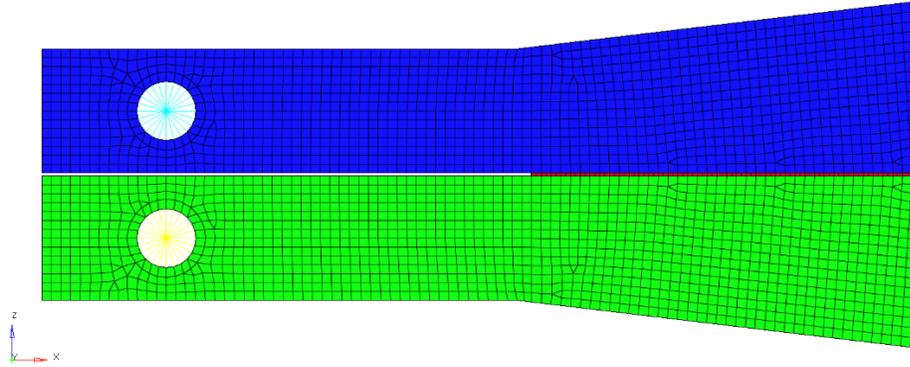


Figura 5.5 Dettaglio foro e strato adesivo

Il materiale adesivo viene definito caratterizzando separatamente le tre fasi: parte elastica, inizio del danneggiamento e evoluzione del danno.

La parte elastica viene definita secondo la formulazione di trazione – separazione disaccoppiata per i diversi modi, definendo i parametri  $K_{nn}$ ,  $K_{ss}$  e  $K_{tt}$  con l'ipotesi  $K_{ss} = K_{tt}$ .

$$\begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & 0 & 0 \\ 0 & K_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \\ \varepsilon_t \end{Bmatrix}$$

L'elemento di adesivo inizia il danneggiamento quando si verifica la condizione

$$\left\{ \frac{t_n}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_t}{t_t^0} \right\}^2 = 1$$

Il modello TDCB qui descritto verrà utilizzato al fine di ricavare i valori di  $K_{nn}$  e di  $t_n$  tramite un processo iterativo finalizzato a riprodurre in modo adeguato la curva forza – spostamento.

La legge traction – separation dipende dal valore del mode mix, ovvero la variabile che indica quanto il sistema sia sollecitato in modo I e in modo II. La legge di evoluzione è definita analiticamente come forma quadratica dell'energia. Il cedimento

sotto sollecitazione mista avviene quando il rapporto tra le energie rilasciate in frattura e le energie di frattura critiche nei modi puri verificano una legge di potenza quadratica. Questa legge quindi definisce il  $G_C = G_n + G_s + G_t$  tale per cui si ha completa rottura dell'adesivo (Fig. 5.6). Nel caso di modo I puro  $G_C = G_{nc} = G_{Ic}$ .

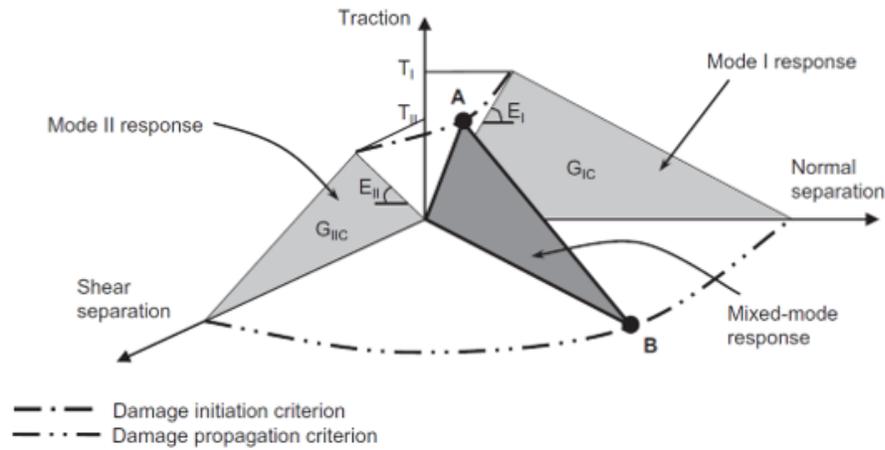


Figura 5.6 Rappresentazione schematica della variazione della legge TS con il variare del mode mix ratio

Il valore di  $G_C$  per una legge di potenza quadratica vale

$$G_C = \frac{1}{\sqrt{\left(\left\{\frac{m_1}{G_{nc}}\right\}^2 + \left\{\frac{m_2}{G_{sc}}\right\}^2 + \left\{\frac{m_3}{G_{tc}}\right\}^2\right)}}$$

con

$$m_1 = \frac{G_n}{G_T}$$

$$m_2 = \frac{G_s}{G_T}$$

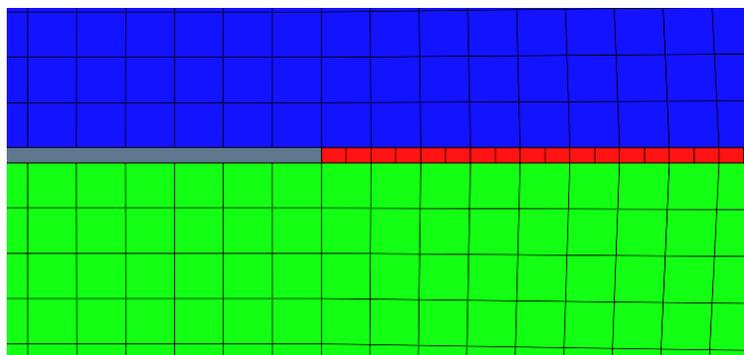
$$m_3 = \frac{G_t}{G_T}$$

$$G_T = G_n + G_s + G_t$$

In prima battuta viene considerata una forma di softening lineare, questa è la forma più utilizzata perché descrive abbastanza correttamente il comportamento sia di adesivi fragili che duttili. In generale, per riprodurre il comportamento di un adesivo molto duttile si predilige l'utilizzo di una legge trapezoidale che riesce a cogliere la grande deformazione plastica grazie ad un livello costante di stress successivo al raggiungimento della tensione di picco, in questo modo la legge trapezoidale riesce a ritardare il decadimento delle proprietà dell'adesivo. Per modellare un adesivo fragile, invece, si utilizza tipicamente una legge esponenziale, che permette di raggiungere risultati migliori.

I substrati impiegati nella prova sono realizzati in lega di alluminio di densità  $2700 \text{ kg/m}^3$ , modulo di Young di  $70000 \text{ MPa}$  e modulo di Poisson di 0,3.

Come si vede in figura 5.7 gli elementi della mesh che riproducono l'adesivo hanno dimensioni inferiori rispetto a quelle dei substrati. Questo per diversi motivi: in prima battuta una mesh più fitta permette di migliorare la convergenza numerica, che è una problematica da tenere in considerazione quando si usano elementi coesivi. Una mesh di dimensioni inferiori permette inoltre di raggiungere una maggiore precisione di calcolo dovuta al fatto che con questa modellazione si ottiene un miglior *aspect ratio* ovvero gli elementi sono caratterizzati da dimensioni simili nelle diverse direzioni. Infine, una maggiore densità di elementi permette di cogliere in modo più preciso eventuali gradienti di stress, di deformazioni o di energia. E' necessario sottolineare che questo tipo di modellazione è mesh indipendente ovvero il risultato della simulazione in termini energetici non dipende, entro certi limiti, dalla dimensione della mesh. Infatti, mentre lo stato tensionale è singolare e quindi il massimo della tensione dipende dalla dimensione della mesh (idealmente è infinita nella soluzione elastica) ed è necessario un affinamento elevato per cogliere bene il fattore di intensità  $K_I$  o  $K_{II}$ , se si considera lo stato energetico del sistema (come si fa per valutare il danneggiamento dell'adesivo) non si ha dipendenza dalla mesh entro certi limiti di dimensione massima perché l'energia non è singolare.



*Figura 5.7 Mesh substrati vs mesh adesivo*

Per via della differente dimensione della mesh dell'adesivo e della mesh dei substrati si ricorre a due contatti di tipo TIE tra le interfacce adesivo – aderente, questo tipo di contatto proietta i nodi degli elementi slave sulla superficie degli elementi master. Il singolo nodo slave proiettato segue rigidamente il movimento del nodo dell'elemento master più vicino. In particolare, tenendo conto del fatto che è buona norma scegliere come superficie master quella del componente più rigido si è scelta come master la superficie di elementi del substrato e come slave la superficie di nodi dell'adesivo.

Successivamente si definiscono le condizioni dell'analisi specificando un numero massimo di 500 incrementi e l'opzione NLGEOM=YES per tenere in considerazione le non – linearità geometriche che, per via degli elevati spostamenti, giocano un ruolo importante nell'analisi. Per riprodurre le condizioni quasi statiche della prova si definisce il tipo di analisi come statica e si specifica il time step iniziale e il time step massimo per assicurare che la soluzione venga calcolata per almeno 50 spostamenti noti su cui, successivamente, si farà un confronto con la curva forza – spostamento reale.

Le condizioni al contorno vengono imposte sui nodi indipendenti degli elementi RB2 come mostrato nella figura 5.8. Per riprodurre il fatto che i substrati hanno la possibilità ruotare attorno ai perni utilizzati per imporre il movimento vengono vincolati solo i gradi di libertà traslazionali, in particolare per il nodo inferiore vengono vincolati tutti i tre gradi di libertà mentre per il nodo superiore vengono vincolati i gradi di libertà lungo x e y e viene imposto uno spostamento di 10 mm lungo z.

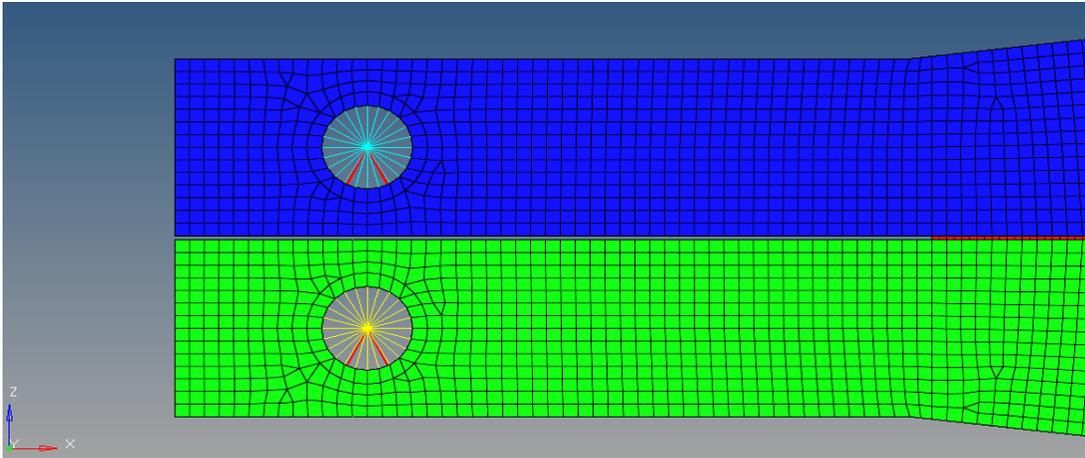


Figura 5.8 Condizioni al contorno del campione TDCB

Per quanto riguarda la modellazione del campione End - notched flexure è stata seguita la stessa strategia di modellazione del campione TDCB per rappresentare i substrati e l'adesivo. Per riprodurre in modo più fedele le condizioni di vincolo sono stati modellati anche i tre perni di vincolo e di carico utilizzando degli elementi rigidi a quattro nodi R3D4 (Fig. 5.9). Ad ognuno dei tre perni è stata associata una proprietà di corpo rigido ed il nodo centrale come nodo di riferimento. L'utilizzo di RB2 per simulare i perni è adatto per il modello TDCB ma rende il modello ENF troppo rigido. [4]

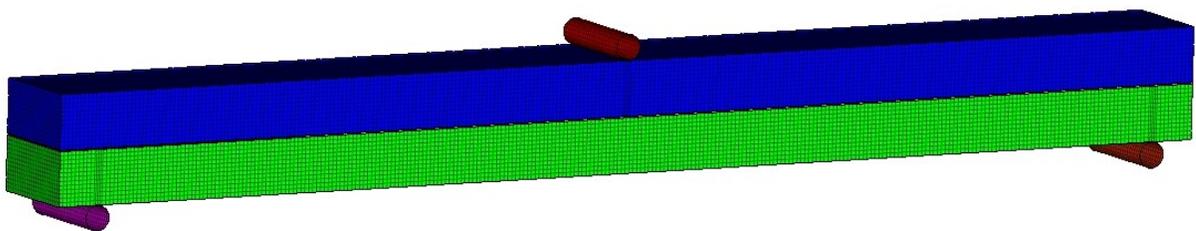


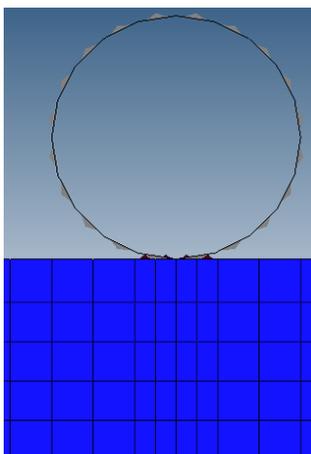
Figura 5.9 Modello End - notched flexure

I substrati impiegati in questa prova sono di acciaio con densità  $7850 \text{ Kg/m}^3$ , modulo di Young di  $210000 \text{ MPa}$  e modulo di Poisson di  $0,3$ . Lo snervamento di questo acciaio è di  $800 \text{ MPa}$  che non viene

raggiunto in nessuna delle simulazioni, coerentemente con il fatto che non si osserva deformazione plastica durante la prova sperimentale.

Il modello end – notched flexure qui descritto verrà utilizzato al fine di ricavare i valori di  $K_{ss} = K_{tt}$  e di  $t_s = t_t$  tramite un processo iterativo finalizzato al riprodurre in modo adeguato la curva forza – spostamento.

In questo caso oltre ai contatti TIE tra adesivo e substrato vengono specificate altre tipologie di contatti. In particolare, il contatto tra perni e substrati [4] viene modellato utilizzando un CONTACT PAIR (figura 5.10) tra la superficie degli elementi rigidi e la superficie degli elementi del substrato con un coefficiente di frizione di 0,2 tipico di un contatto acciaio – acciaio. In questo caso viene raffinata la mesh del substrato nell’intorno del contatto per cogliere meglio la distribuzione di stress. Le superfici di elementi rappresentanti i perni sono definite master, in quanto i perni sono simulati come corpi rigidi, mentre le superfici di elementi dei substrati sono definite come slave.



*Figura 5.10 Contact pair tra perno e substrato*

Nel sistema reale nella zona della cricca iniziale è interposto un nastro di PTFE che assicura alle due parti la possibilità di scivolare tra loro con basso attrito, questo è fondamentale perché l’attrito tra i substrati può fornire un ulteriore termine di resistenza al sistema che porterebbe a sovrastimare le proprietà dell’adesivo. Modellare il nastro tuttavia appesantirebbe il calcolo aggiungendo ulteriori elementi ed ulteriori superfici di contatto, inoltre non sarebbe possibile evitare di modellare la parte plastica che potrebbe peggiorare la convergenza del calcolo. Per questi motivi si evita di modellare lo strato di PTFE ma si definiscono le due superfici di contatto costituite dalle facce interne degli elementi

dei substrati che possono scivolare l'una sull'altra con un coefficiente di attrito pari a 0,01, tipico di un contatto PTFE - PTFE.

Le caratteristiche dell'analisi sono uguali a quelle dell'analisi sul TDCB ma in questo caso non vengono specificate condizioni sul time step poiché si utilizzerà un'altra strategia di confronto tra i dati di simulazione e quelli reali, in questo modo sono necessari un numero inferiore di incrementi con conseguente diminuzione del costo computazionale.

Le condizioni al contorno vengono imposte sui nodi di riferimento dei perni, in particolare sono vincolati tutti i 6 gradi di libertà dei perni di vincolo, mentre per quanto riguarda il perno di sollecitazione sono vincolate le traslazioni lungo x e y e le 3 rotazioni. Il carico è definito con uno spostamento imposto di 5 *mm* in direzione z.

### 5.2.2 Strategia di iterazione

Esistono diversi metodi per l'ottimizzazione del processo iterativo, i principali sono gli algoritmi di ricerca globale e quelli basati sull'ottimizzazione del gradiente, uno degli algoritmi più importanti è quello genetico che fornisce una grande accuratezza a spese di un grande costo computazionale e che fa parte della famiglia degli algoritmi di ricerca globale. Gli algoritmi basati sull'ottimizzazione del gradiente come quello del filtro di Kalman è in grado di portare all'intero processo evolutivo della funzione di errore ma può facilmente cadere in soluzioni locali o causare problemi di convergenza. [15]

Per ridurre al minimo le simulazioni da condurre per ricavare i parametri della legge coesiva nei due modi si è utilizzata una strategia di iterazione che prende spunto dall'algoritmo genetico. L'algoritmo genetico applicato al metodo inverso si fonda sul concetto di considerare il singolo 'individuo' come un set di valori assunto dagli  $n$  parametri da iterare.

In prima battuta si definisce il dominio di iterazione nello spazio  $n$  – dimensionale, nel caso in esame  $n = 2$  per ogni modo, attraverso delle simulazioni esplorative o dettato dall'esperienza. Successivamente si riempie il dominio di individui della prima generazione in modo ordinato o cercando di confinare la maggior parte degli individui nella porzione di dominio dove è maggiore la probabilità di trovare la soluzione. Il passo successivo consiste nell'eseguire le simulazioni con la prima generazione di parametri ed estrarre il parametro o la curva che ci interessa confrontare con il valore sperimentale. Nel nostro caso si estrae la curva forza – spostamento della simulazione TDCB e ENF.

A questo punto si costruisce un parametro che tenga conto della qualità con la quale la combinazione di valori presi in esame riproduce il comportamento del sistema reale, possono essere prese in esame diverse variabili che valutano quanto sia elevata la qualità con la quale si riproduce il comportamento reale, ad esempio nel caso in cui si voglia confrontare due curve si può decidere di valutare lo scarto tra curva reale e curva di simulazione punto a punto, oppure si può decidere di voler valutare quanto bene la curva riesce a riprodurre il carico massimo, oppure ancora l'ascissa corrispondente al verificarsi di un flesso della curva. Si può scegliere, eventualmente, di tenere in conto di tutti questi parametri ed assegnare ad ognuno un certo peso

$$f = \sum_{i=1}^M w_i C_i$$

dove

$w_i$  è il peso che assume ogni criterio di confronto preso in esame

$C_i$  è il parametro che descrive la qualità con la quale il comportamento reale è riprodotto

In questo caso si vuole valutare lo scarto tra la curva sperimentale e la curva della simulazione, questo può essere fatto utilizzando il parametro  $C$

$$C = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (P_j^{sim} - P_j^{exp})^2$$

dove

$N$  è il numero di punti della curva in cui si vuole valutare lo scarto tra curva sperimentale e quella di simulazione

$P_j^{sim}$  è il valore del carico  $P$  del  $j$  – esimo punto della curva forza – spostamento estratta dal modello

$P_j^{exp}$  è il valore del carico  $P$  del  $j$  – esimo punto della curva forza – spostamento sperimentale

Il parametro  $C$  è l'errore quadratico medio, esso è un parametro che descrive quanto la curva del modello si discosta dalla curva esatta, che può essere intesa come la curva sperimentale.

A questo parametro quantitativo verrà associata una valutazione qualitativa del comportamento del modello al fine di giungere ad un giudizio definitivo sulla bontà del comportamento del modello.

Se il modello riproduce in modo soddisfacente il comportamento reale si considerano determinate le leggi traction – separation parametrizzate, esse saranno dunque utilizzabili per la modellazione di giunti incollati con lo stesso materiale adesivo e lo stesso spessore di adesivo. Al contrario, nel caso in cui il modello non riproduca in modo soddisfacente il comportamento dell'incollaggio si attiva un ulteriore schema di iterazione: gli individui della prima generazione che fittano meglio la curva forza –

spostamento saranno i genitori della seconda generazione e definiranno il dominio di iterazione di quest'ultima. Questo stesso schema può essere ripetuto un certo numero di volte fino al raggiungimento del target di precisione imposto a priori, tuttavia nel caso in cui non si converga alla soluzione oppure non si riesca a riprodurre il comportamento fisico del sistema con sufficiente accuratezza è necessario cambiare la strategia di modellazione ad esempio variando la tipologia di legge coesiva.

### 5.2.3 Effetto dei parametri sul modello TDCB

La curva forza – spostamento del campione TDCB assume la forma rappresentata in figura 5.11. Essa cresce linearmente fino al momento di inizio di rottura dell'adesivo; da questo punto in poi il carico rimane costante poiché la propagazione della cricca causa un aumento della cedevolezza del sistema, mentre l'aumento lineare dell'altezza del campione ha l'effetto opposto e la riduce, causando la costanza della forza fino al momento in cui lo strato adesivo residuo non è più in grado di sopportare il carico. A questo punto il carico diminuisce rapidamente fino al valore nullo.

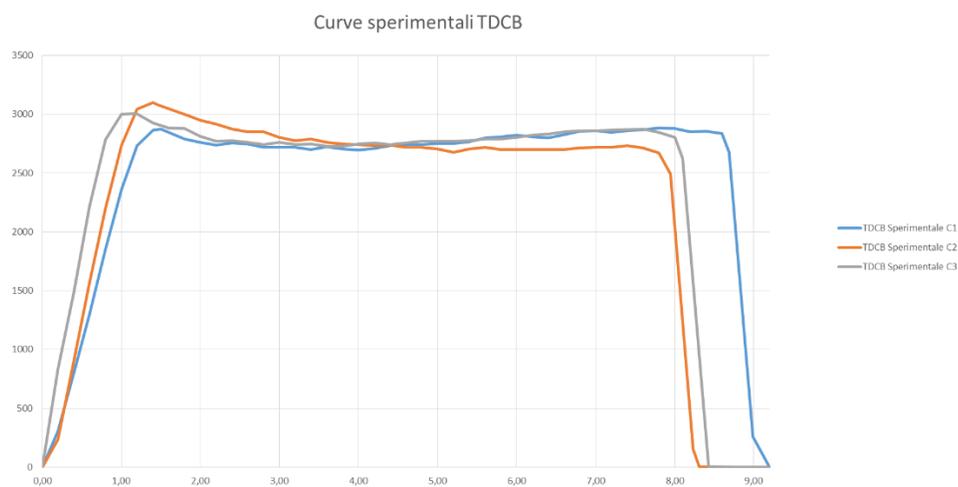


Figura 5.11 Curve  $F - s$  sperimentali del campione TDCB

In questo caso il parametro  $C$  per il confronto tra la curva sperimentale e quella del modello è stato calcolato ogni  $0,2 \text{ mm}$  di spostamento, la soluzione in punti specifici è stata ottenuta imponendo il time

step iniziale e il time step massimo in funzione dell'entità dello spostamento complessivo e del numero di incrementi minimi desiderati.

Come evidenziato nel capitolo precedente il parametro che influenza maggiormente il risultato è l'energia di frattura  $G_{Ic}$  infatti come possiamo osservare dalla seguente figura 5.12 un aumento anche contenuto di questo parametro definisce un incremento sostanziale sia del carico di picco che dello spostamento a rottura, questo è dovuto al fatto che a parità di altri parametri aumentare l'energia di frattura significa diminuire il degrado dell'adesivo. Il valore del plateau della curva è definito esclusivamente da questo parametro. L'area sottesa dalla curva aumenta sensibilmente con l'energia a frattura ed un valore leggermente superiore di quello reale aiuta a superare eventuali problemi di convergenza del calcolo, dovuti ad un rapido degrado delle proprietà dell'adesivo.

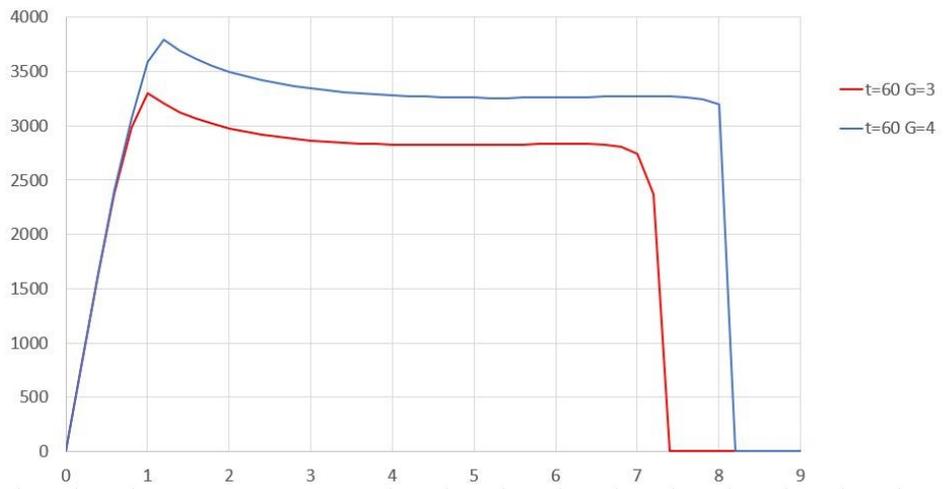


Figura 5.12 Confronto curve  $F-s$  del campione TDCB al variare dell'energia di frattura

Con questa legge e con questi spessori in gioco non si osserva una variazione importante di  $C$  con modulo elastico  $K_{nn}$  per il modo I, pertanto curve con  $K_{nn}$  diversi sono abbastanza simili se non per l'ultimo tratto in cui si osserva una diminuzione del carico più dolce nel caso di rigidzze inferiori [16]. Per bassi valori di  $K_{nn}$ , uguali o inferiori a  $1500\text{ MPa}$  non si osserva rottura dell'adesivo.

Il parametro tensione di picco  $t_n$  influenza in modo marcato il comportamento del modello, in particolare al crescere della tensione di picco aumentano sia il carico di picco che lo spostamento a rottura. Inoltre, per valori elevati di resistenza coesiva si osserva una diminuzione della pendenza del

primo tratto inferiore, che causa un curva complessivamente più spigolosa. Il carico corrispondente al secondo tratto rimane circa costante perché rimane costante il tasso di rilascio critico di energia.

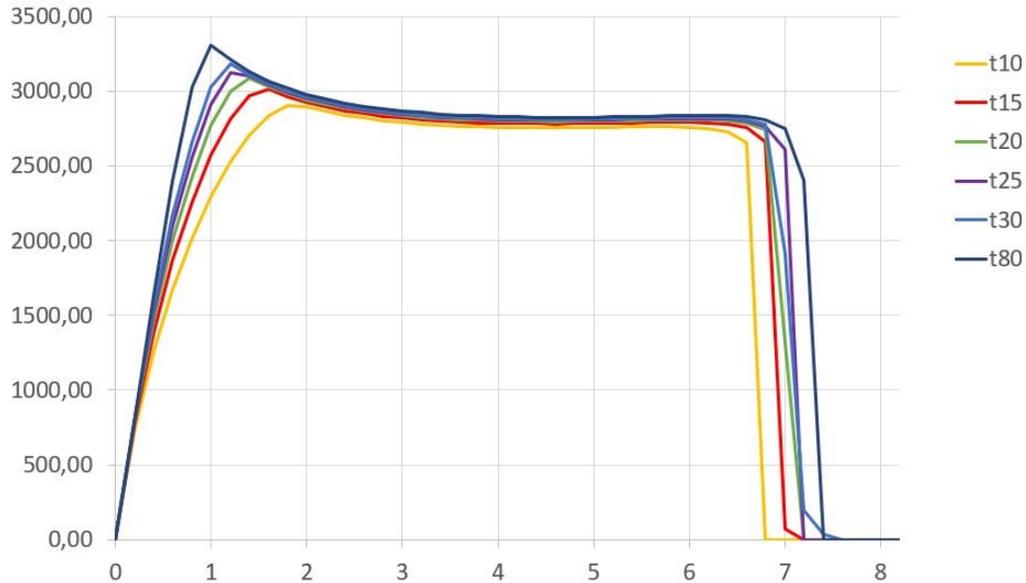


Figura 5.13 Variazione della curva  $F - s$  al variare della tensione di picco della legge coesiva

Nel grafico seguente (Fig. 5.14) è evidenziato come varia l'errore quadratico medio calcolato rispetto alle tre curve sperimentali al variare della tensione di picco. Si osserva che da 10 fino a 30 MPa si ha una diminuzione del parametro  $C$  causato dal fatto che man mano che la tensione cresce diminuisce la tendenza alla diminuzione di pendenza del primo tratto, inoltre si ci avvicina al valore reale di spostamento a rottura. Il valore di minimo (e quindi ottimale del parametro) si osserva per  $t = 40 MPa$  per tutte le tre curve. Per tensioni superiori l'influenza della tensione diminuisce e il parametro  $C$  si attesta a un valore costante.

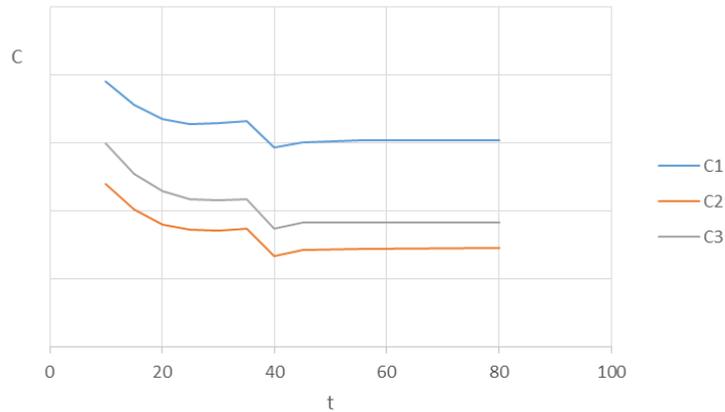


Figura 5.14 Andamento del parametro  $D$  con la variazione della resistenza coesiva

La coppia di valori che permette una migliore riproduzione delle curve forza – spostamento per il modo I è  $K_{nn} = 2530 \text{ MPa}$  e  $t_n^0 = 40 \text{ MPa}$ . Tuttavia, confrontando la curva risultante dal modello con le curve sperimentali si osserva che si ottiene una buona approssimazione del carico massimo (scarto di circa il 6 %) ma si ha una sottostima in termini di spostamento a rottura, che si verifica circa  $1 \text{ mm}$  prima rispetto al sistema reale.

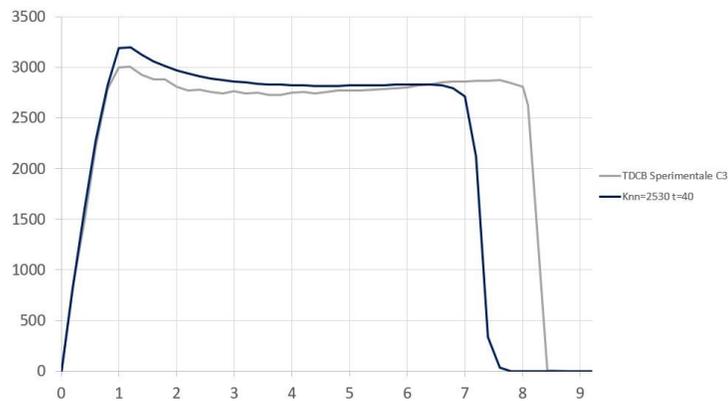


Figura 5.15 Confronto curva  $F - s$ : metodo inverso con legge lineare vs sperimentale

Il modello del TDCB presenta intrinsecamente problemi di convergenza soprattutto dovuti al fatto che nell'ultimo tratto, per alti valori di tensione di picco della legge di trazione – separazione, si ha un rapido abbattimento del carico che porta spesso alla caduta del calcolo. Per migliorare la convergenza del modello è possibile ridurre il  $K_{nn}$ , aumentare  $G_c$  di un valore modesto o eventualmente ridurre la dimensione della mesh.

#### 5.2.4 Effetto dei parametri sul modello ENF

Per quanto riguarda il modello dell'end – notched flexure la forma delle curve forza – spostamento sono più facilmente riproducibili con funzioni polinomiali. Questo permette di evitare di imporre condizioni sul time step per imporre il calcolo in spostamenti noti e ridurre in questo modo il costo computazionale. La strategia in questo caso consiste nel riprodurre la curva ottenuta dal modello con una linea di tendenza polinomiale e valutare con l'equazione che la caratterizza il valore del carico in corrispondenza degli spostamenti desiderati.

Le curve forza – spostamento caratteristiche di questa prova (figura 5.16) sono tali per cui si ha un aumento del carico con pendenza quasi costante fino al valore di massimo. Raggiunto il massimo la curva decresce con pendenza elevata a causa del fatto che la cricca propaga in modo instabile fino a raggiungere un minimo, momento in cui quando la cricca è nei pressi del cilindro di carico si verifica un flesso e il carico riprende la sua salita a causa del fatto che la propagazione continua in modo stabile. La leggera perdita di pendenza nel primo tratto è dovuta al fatto che molti elementi sono in una fase avanzata del processo di degrado di rigidità.

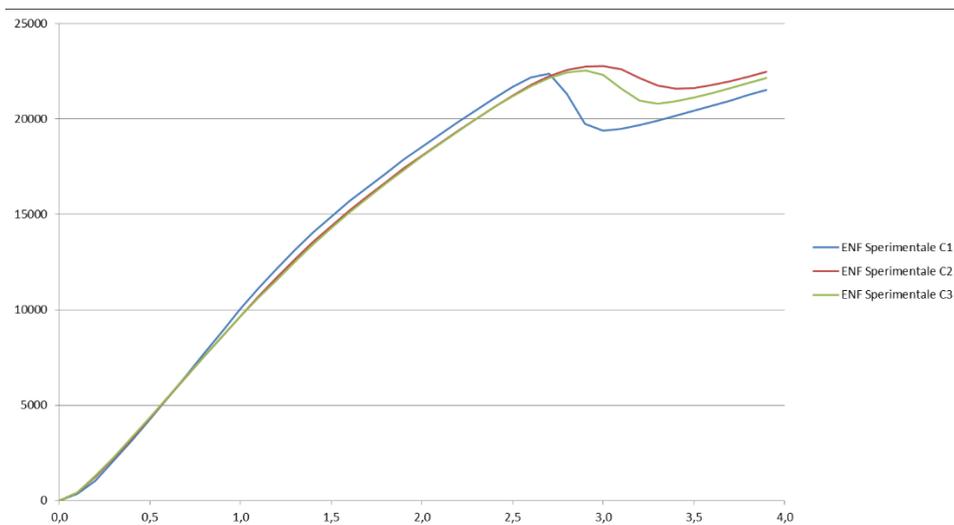


Figura 5.16 Curve sperimentali end - notched flexure

In questo caso lo spostamento del perno di sollecitazione è di 4 mm. Si sceglie di calcolare lo scarto tra curva sperimentale e curva del modello numerico ogni 0,1 mm di spostamento in modo tale da cogliere gli scostamenti tra le due curve in modo abbastanza accurato.

In figura 5.17 è visibile come l'effetto dell'energia di frattura per questo modo è meno importante rispetto al modo I, in particolare nelle condizioni rappresentate in figura 5.12 e in figura 5.18 si evince che mentre per il primo modo variando  $G_{Ic}$  di circa il 30% si ottiene uno scarto massimo tra le curve del 15% che si mantiene circa costante per tutto l'esteso secondo tratto della curva, nel caso del modo II variando  $G_{IIc}$  di circa il 30% si ottiene uno scarto massimo inferiore (circa l'11%). Inoltre l'effetto coinvolge soltanto l'ultimo e più breve tratto della curva forza – spostamento.

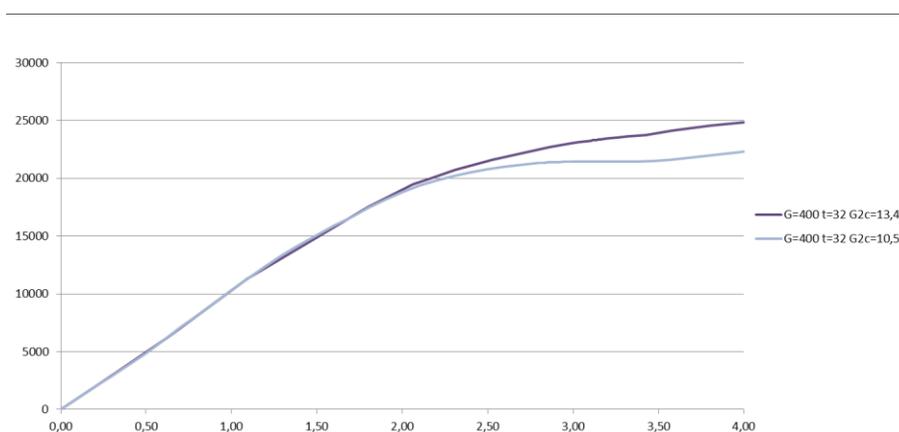
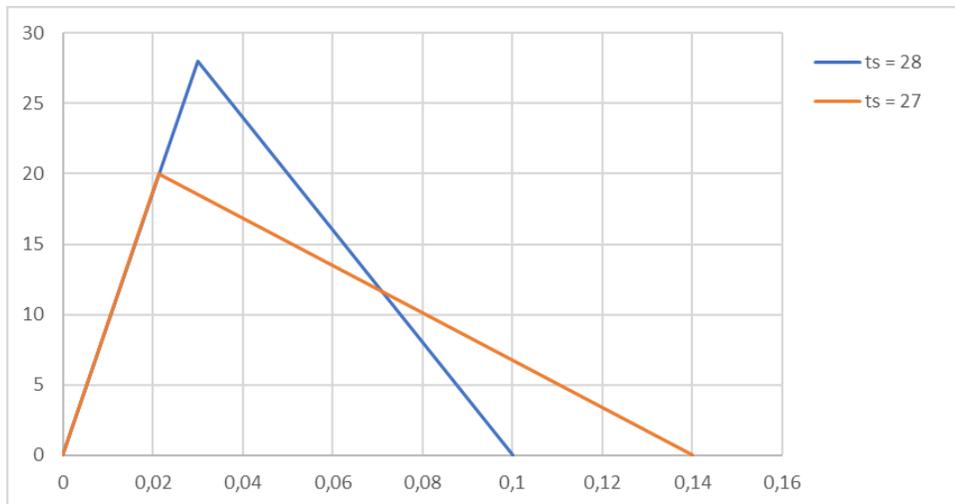


Figura 5.17 Effetto  $G_{IIc}$  sulle curve  $F - s$  della prova ENF

Si osserva una progressiva diminuzione del parametro  $C$  al decrescere del parametro resistenza di picco  $t_s^0$  fino al valore di  $27 \text{ MPa}$ , valore sotto il quale non si osserva rottura dell'adesivo (figura 5.18) perché a parità di energia di frattura il degrado dell'adesivo è inferiore, quindi la curva di softening ha pendenza minore e, a valori maggiori di separazione, l'elemento è in grado di sopportare tensioni maggiori, quindi superata una certa separazione critica un elemento con tensione di picco inferiore trasmette tensioni superiori e non si rompe (si veda il confronto tra la legge lineare con tensione di picco  $20 \text{ MPa}$  e quella con tensione di picco  $28 \text{ MPa}$  nello schema seguente).



Schema 5.1 Confronto legge CZM con tensione di picco di 20 MPa e di 28 MPa

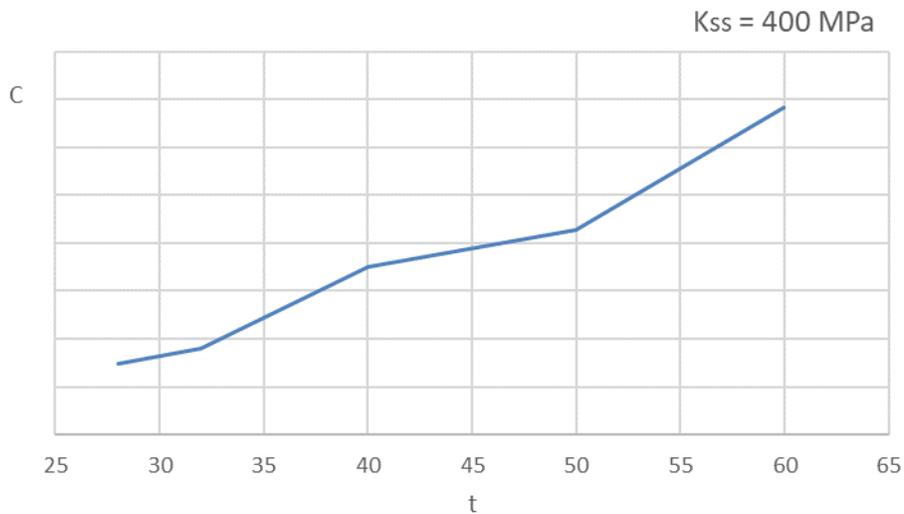


Figura 5.18 Variazione del parametro  $D$  con tensione di picco

Nella figura seguente possiamo notare come le curve del modello riproducono correttamente la rigidità iniziale. Il modello con la coppia di valori  $K_{ss} = 400 \text{ MPa}$  e  $t_s^0 = 32 \text{ MPa}$  riproduce fedelmente la curva reale fino al valore di picco. Per valori maggiori di tensione si ha un aumento nel carico di picco e di rigidità nel primo tratto. In questo caso il parametro  $C$  suggerirebbe un utilizzo del parametro  $t_s^0 = 27 \text{ MPa}$ , questo è dovuto al fatto la curva taglia la zona di propagazione instabile. A

questo punto la scelta della tensione di picco che meglio rappresenta il comportamento dipende dal progettista ed in mancanza di un modello più accurato si dovrà fare una scelta, nel caso in cui il progettista voglia cogliere in modo molto accurato la curva fino al momento della propagazione e interessa meno il comportamento dopo la propagazione sceglierà  $t_s^0 = 32 \text{ MPa}$ , nel caso invece in cui sia di interesse anche la fase di propagazione si sceglierà una tensione di  $t_s^0 = 27 \text{ MPa}$  che permette di ottenere un errore non trascurabile ma contenuto sia nella fase precedente che nella fase successiva all'inizio della propagazione. Come si osserva in figura per tensioni molto elevate ( $t_s^0 = 60 \text{ MPa}$ ) il comportamento qualitativo viene modellato correttamente, poiché viene riprodotta la repentina diminuzione di carico successiva alla propagazione instabile. Per tensioni inferiori a  $t_s^0 = 27 \text{ MPa}$  non si osserva rottura dell'adesivo.

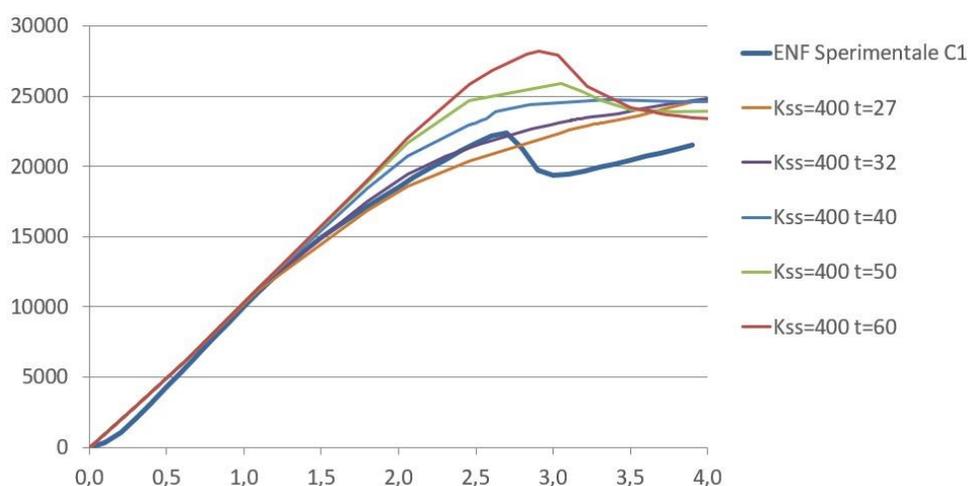


Figura 5.19 Curve  $F - s$  per diverse tensioni di picco nel modo II

Nella figura 5.20 è possibile osservare l'effetto della rigidità con la curva sperimentale 1 inserita per confronto. Aumentando questo parametro aumenta la pendenza iniziale della curva. Il valore che meglio fitta la curva sperimentale corrisponde a  $K_{ss} = 400 \text{ MPa}$ , l'andamento del parametro  $C$  conferma quest'impressione infatti in corrispondenza di questo valore di rigidità si ottiene il minimo di  $C$  ripetto a tutte le 3 curve sperimentali.

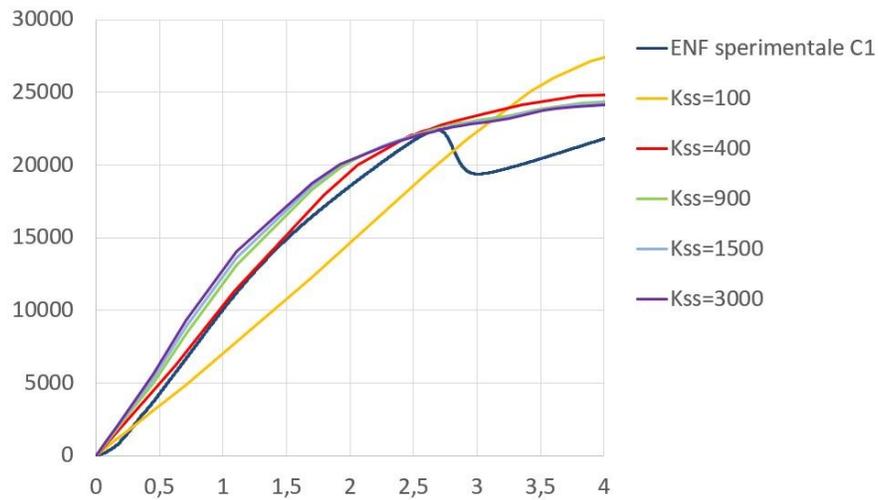


Figura 5.20 Effetto del parametro di rigidità sulle curve  $F - s$  del modo II

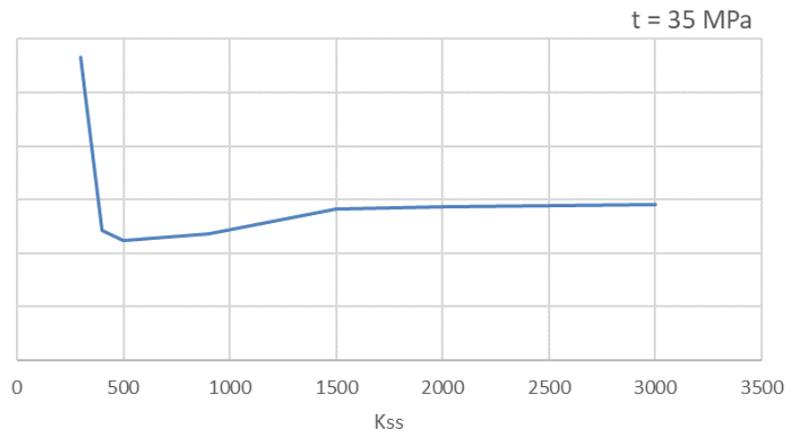


Figura 5.21 Andamento del parametro  $D$  al variare di  $K_{ss}$

Successivamente all'attività di iterazione si ha un miglioramento limitato (figura 5.22), infatti il modello con i parametri iterati raggiunge una migliore convergenza ma non riesce a riprodurre la fisica del sistema reale. Con la legge esponenziale si coglierà in modo più efficace il comportamento del campione end – notched flexure.

## END NOTCHED FLEXURE

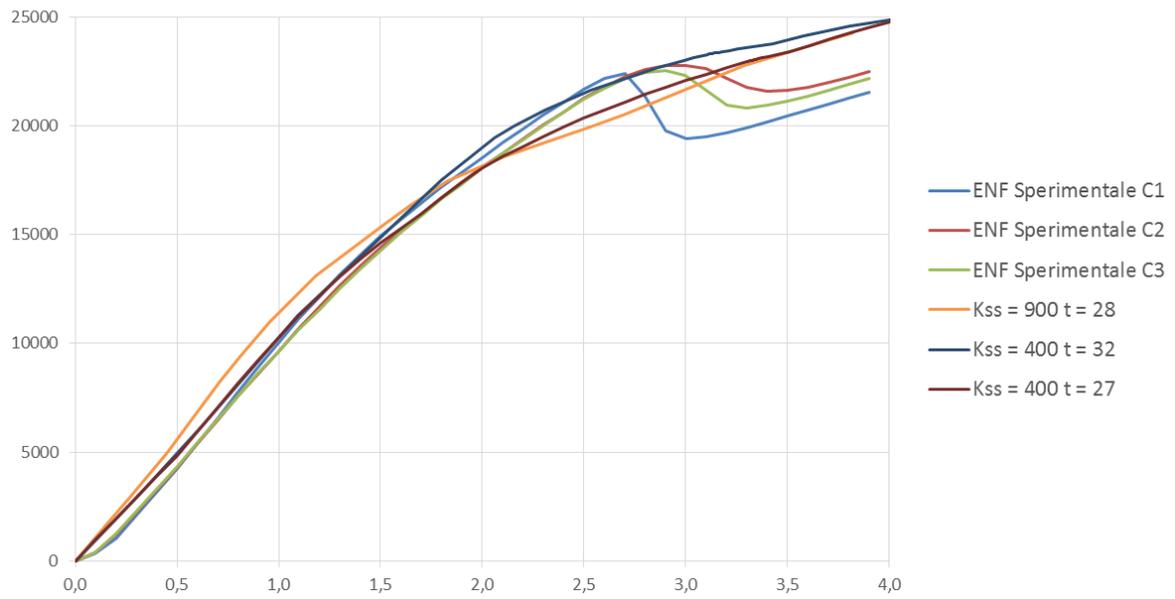


Figura 5.22 Confronto sui risultati  $F - s$  tra un modello con dati bulk e quelli con i dati iterati utilizzando la legge triangolare

### 5.3 Confronto tra le leggi traction – separation

Questo studio è stato condotto utilizzando un modello di Tapered double cantilever beam identico a quello del capitolo precedente ma in una versione 2D in cui per riprodurre i due substrati vengono utilizzati elementi bidimensionali triangolari e quadrangolari in deformazione piana anziché elementi penta e brick. Per rappresentare gli elementi dell'adesivo si utilizzano elementi coesivi bidimensionali a 4 nodi COH2D4.

Si continua invece ad utilizzare un modello 3D per il modello end – notched flexure perché in esso sono presenti un numero maggiore di contatti di tipo tie e contact pair che possono dare maggiori problemi di convergenza in un modello 2D.

Il parametro  $C$  che esprime lo scarto tra la curva risultante dal modello e quella sperimentale viene valutato per valori di spostamento imposti (ogni  $0,2\text{ mm}$  per il TDCB e ogni  $0,1\text{ mm}$  per l'ENF) attraverso la definizione del time step iniziale e del time step massimo, valori caratteristici dell'analisi. In questo caso non viene adottato un approccio che si serve di una funzione di tendenza delle curve perché, come si vedrà, le curve ottenute dal modello saranno più complesse e non precisamente riproducibili con funzioni polinomiali di grado contenuto.

La forma della legge coesiva viene scelta sulla base di diverse considerazioni, in prima battuta è importante valutare la natura del materiale da riprodurre, diversi studi hanno dimostrato come un adesivo duttile è modellato in modo più preciso se si utilizza una forma trapezoidale, mentre per adesivi fragili si utilizzano forme triangolari oppure esponenziali. Tuttavia, studi recenti condotti da Zhang [17] hanno dimostrato come anche il tipo di prova da riprodurre e quindi il tipo di sollecitazione a cui l'adesivo deve resistere influenza la tipologia di legge più adatta. Quanto più l'adesivo è soggetto modo misto tanto meno importante sarà la scelta della legge. Poiché le leggi esponenziali e trapezoidali sono più complesse da implementare nei software di calcolo e sono più soggette a dare problemi di convergenza sovente viene impiegata una legge triangolare, che assicura buoni risultati sia per riprodurre il comportamento di adesivi fragili che per riprodurre quello di adesivi duttili. L'adesivo impiegato in questa tesi appartiene alla famiglia degli epossidici e presenta comportamento relativamente duttile al modo I e fragile al modo II.

Ciò che varia tra una legge ed un'altra è sostanzialmente la modalità con la quale si degrada la rigidità (Fig. 5.23). Una legge esponenziale ha un degrado di rigidità più rapido rispetto ad una legge

triangolare. La legge trapezoidale è quella causa un degrado di rigidezza più lento ma porta a rottura per valori inferiori di separazione. L'aspetto più importante nella scelta della legge è comunque la modalità di degrado della rigidezza che definisce il comportamento del materiale, infatti lo spostamento a rottura può essere eventualmente definito dai parametri della legge. La legge di softening può essere implementata in ABAQUS definendo il parametro di danneggiamento  $d_n$  o  $d_s$ , che esprime il danneggiamento del materiale in funzione dello spostamento relativo rispetto allo spostamento corrispondente all'inizio del danneggiamento [3].

La legge di evoluzione del danneggiamento assume quindi la forma

$$t_n = (1 - d_n)t_n^{und}$$

$$t_s = (1 - d_s)t_s^{und}$$

Dove  $t_n^{und}$  e  $t_s^{und}$  sono le tensioni che si raggiungerebbero senza degrado di rigidezza.

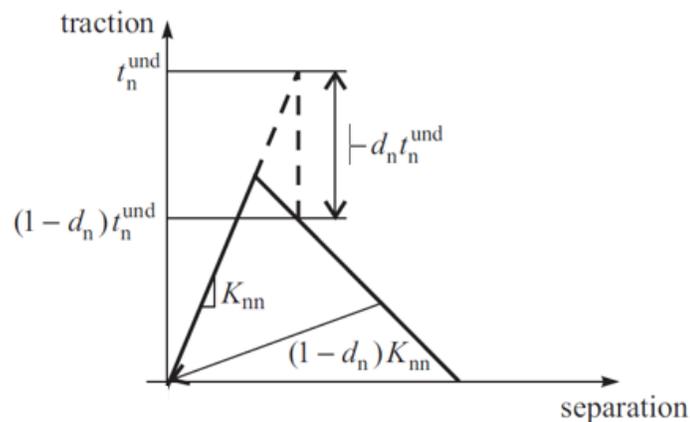


Figura 5.23 Degrado di rigidezza in una legge triangolare

La legge di softening può essere espressa per una legge triangolare come

$$d_{n,s} = \frac{\delta_{n,s}^f (\delta_{n,s} - \delta_{n,s}^0)}{\delta_{n,s} (\delta_{n,s}^f - \delta_{n,s}^0)}$$

Dove

$\delta_{n,s}^f$  è la separazione a rottura

$\delta_{n,s}$  è la separazione al momento in cui si calcola il danneggiamento

$\delta_{n,s}^0$  è la separazione corrispondente al picco della legge coesiva

La legge di evoluzione del danno nel caso di forma triangolare può essere implementata nel software anche in forma energetica, specificando quindi i valori di energia a frattura.

Gli studi precedenti hanno dimostrato come un procedimento iterativo porta ad un miglioramento nella riproduzione dei dati sperimentali per le prove di frattura. Nei prossimi paragrafi si vuole ripetere l'analisi nel caso in cui vengano utilizzate altre forme della legge di trazione – separazione.

### 5.3.1 Legge trapezoidale

La legge trapezoidale è tipicamente impiegata per riprodurre il comportamento di adesivi duttili ed è caratterizzata da un basso tasso di degrado di rigidità per via della possibilità di poter gestire le dimensioni del plateau della legge per controllare la fase di softening. Può causare problemi di convergenza legati alla brusca variazione di rigidità raggiunta la separazione  $\delta_2$ . La legge di evoluzione può essere espressa con il parametro  $D$  (parametro di danno di modo generico) per intervalli

$$D = \begin{cases} 1 - \frac{\sigma^0}{k\delta} & \text{per } \delta_1 \leq \delta \leq \delta_2 \\ 1 - \frac{\sigma^0}{k\delta} \frac{\delta_3 - \delta}{\delta_3 - \delta_2} & \text{per } \delta_2 \leq \delta \leq \delta_3 \end{cases}$$

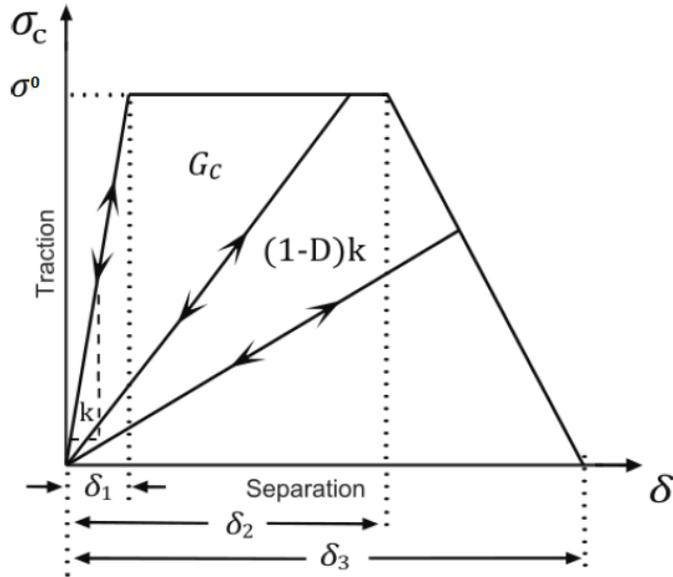


Figura 5.24 Legge trapezoidale e degrado di rigidezza associato

La legge viene implementata nel software ABAQUS in forma tabulare definendo coppie di valori che identificano lo spostamento relativo all'inizio del danneggiamento  $\delta_{n,s} - \delta_{1n,s}$  ed il parametro di danno  $D$  associato. Maggiore è il numero di punti che vengono inseriti migliore sarà la risposta della simulazione per quella legge. L'evoluzione del danno nei due modi è indipendente. Partendo dai parametri della legge e dal tasso di rilascio di energia critico per quel modo  $G_c$  la legge coesiva può essere definita specificando la frazione di spostamento in cui si ha trazione costante rispetto a quello a cui corrisponde la separazione al fallimento  $r$  [18]

$$r = \frac{\delta_2 - \delta_1}{\delta_3}$$

A questo punto si calcolano i punti critici della legge come

$$\delta_1 = \frac{\sigma^0}{k}$$

$$\delta_2 = \delta_1 + r\delta_3$$

$$\delta_3 = \frac{2G_c}{(1+r)\sigma^0}$$

Per far si che valga  $\delta_1 < \delta_2 < \delta_3$  si deve rispettare la condizione

$$0 < r < \frac{1-A}{1+A}$$

Dove

$$A = \frac{\sigma_0^2}{2kG_c}$$

Nella figura 5.25 sono rappresentate alcune leggi trapezoidali al variare del parametro  $r$  usate per le simulazioni della prova TDCB. Alcuni studi condotti da Andersson e Stigh hanno dimostrato che il parametro  $r$  influisce in modo moderato nei risultati ottenuti sia in termini di carico di cedimento sia in termini di modalità di cedimento, questo è stato verificato in questo studio perché in nessuna delle prove si è arrivati alla rottura dell'adesivo. Questa legge infatti è adatta ad adesivi molto duttili e il basso tasso di degrado di rigidità ha portato l'adesivo ad un degrado massimo del 7% durante la simulazione per valori di  $r$  molto piccoli. Il degrado massimo aumenta man mano che diminuiscono  $K$ ,  $t$  e  $G_c$ .

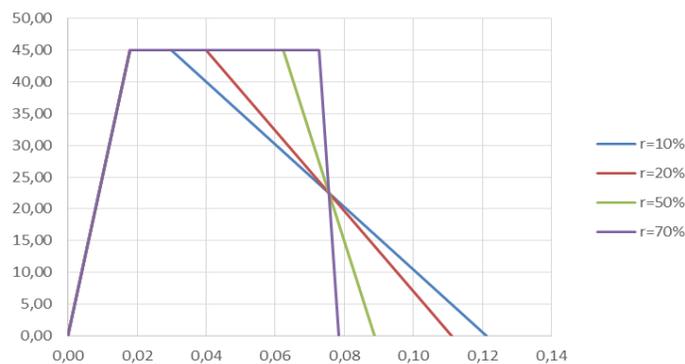


Figura 5.25 Leggi trapezoidali al variare di  $r$  per  $G_c=3\text{N/mm}$

### 5.3.2 Legge esponenziale

La legge esponenziale (Fig. 5.26) è tipicamente impiegata per riprodurre il comportamento di adesivi fragili ed è caratterizzata da un elevato degrado di rigidità a causa della pendenza della legge esponenziale. La diminuzione di rigidità nella fase di softening può essere più o meno accentuata in funzione del parametro della legge esponenziale  $\alpha$ . Anche in questo caso bisogna porre particolare attenzione alle problematiche di convergenza di calcolo, in generale si è osservato un minore manifestazione dei problemi calcolo con il diminuire della tensione di picco della legge. La legge di evoluzione può essere espressa con il parametro  $D$  (parametro di danno di modo generico) utilizzando la formulazione degli spostamenti o quella dell'energia:

$$D = 1 - \frac{\delta_{n,s}^0}{\delta_{n,s}} \left( 1 - \frac{1 - e^{-\alpha \left( \frac{\delta_{n,s} - \delta_{n,s}^0}{\delta_{n,s}^f - \delta_{n,s}^0} \right)}}{1 - e^{-\alpha}} \right)$$

$$D = \frac{\int_{\delta^0}^{\delta^f} t d\delta}{\left( G_c - \frac{t^0 \delta^0}{2} \right)}$$

$\alpha$  è il parametro di evoluzione della legge esponenziale, esso dipende dal tipo di materiale e esprime la velocità con cui il esso degrada. Un valore nullo di  $\alpha$  riconduce ad una legge bilineare triangolare. Al crescere di questo parametro la legge in esame si differenzia sempre di più dalla legge triangolare; valori elevati di  $\alpha$  descrivono il comportamento di materiali fortemente fragili.

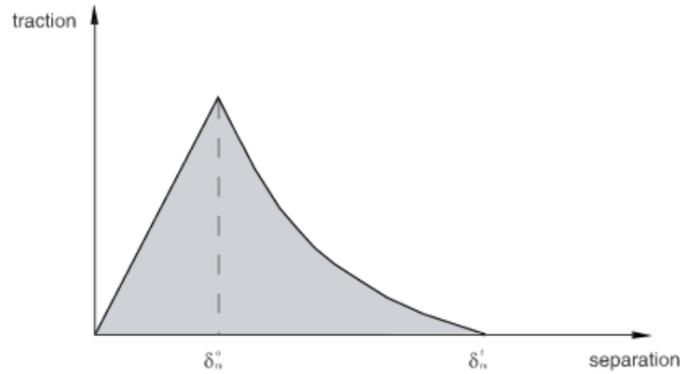


Figura 5.26 Legge esponenziale

Il software ABAQUS fornisce la possibilità di definire la legge sia in termini di energia che di spostamento.

Nel primo caso viene richiesto come parametro di input l'energia di frattura nei due modi. Il parametro di degradazione  $\alpha$  non è definibile e il software sceglie un valore tale per cui il degrado sia molto elevato (adatto per materiali molto fragili) compatibilmente alle esigenze del calcolo. Il vantaggio nell'utilizzo di questo metodo riguarda il fatto che non ci sono passaggi intermedi per la definizione della legge che viene definita automaticamente dal software ed il fatto che è possibile considerare, nel caso di modo misto, una legge combinazione delle leggi dei singoli modi, definita con i criteri di legge di potenza o altri (es. BK).

Nel caso la legge venga implementata in termini di spostamento è necessario definire la separazione a cedimento relativa a quella di inizio del danneggiamento e il coefficiente  $\alpha$  della legge esponenziale, per ricavare il primo parametro è necessario fare qualche valutazione preliminare. Si definiscono la rigidità  $K$ , la tensione di picco della legge coesiva  $t$ , il parametro  $\alpha$  e l'energia di frattura  $G_c$ .

Considerando che l'area sottesa dalla legge è pari all'energia di frattura possiamo scrivere

$$\int_{\delta^0}^{\delta^f} t d\delta = G_c - \frac{t^0 \delta^0}{2}$$

Considerando

$$t = (1 - D)t^{und} = \left( 1 - \left( 1 - \frac{\delta^0}{\delta} \left( 1 - \frac{1 - e^{-\alpha \left( \frac{\delta - \delta^0}{\delta^f - \delta^0} \right)}}{1 - e^{-\alpha}} \right) \right) \right) \cdot K\delta$$

Si ha

$$\int_{\delta^0}^{\delta^f} K\delta^0 \left( 1 - \frac{1 - e^{-\alpha \left( \frac{\delta - \delta^0}{\delta^f - \delta^0} \right)}}{1 - e^{-\alpha}} \right) d\delta = G_c - \frac{t^0 \delta^0}{2}$$

Da cui si ottiene

$$\delta^f = \frac{K\delta^{02} - \frac{K\delta^{02}}{1 - e^{-\alpha}} + \frac{K\delta^{02}}{\alpha} + G_c - \frac{t^0 \delta^0}{2}}{K\delta^0 - \frac{K\delta^0}{1 - e^{-\alpha}} + \frac{K\delta^0}{\alpha}}$$

Implementare la legge tramite la separazione relativa permette di gestire un ulteriore parametro ( $\alpha$ ) che in alcuni casi, ad esempio quando si vuole utilizzare un adesivo poco fragile, permette l'ottimizzazione del processo iterativo finalizzato all'ottenimento dei parametri. In questo modo si parametrizza in modo molto preciso la legge di trazione - separazione. D'altra parte questa formulazione rende più complicata l'implementazione della legge se il sistema è soggetto a modo misto, questo perché se si vuole specificare un certo andamento delle condizioni di frattura in modo misto è necessario specificare i parametri  $G_c$  oppure  $\delta^f - \delta^0$  definendo per ogni valore specificato il mode mix ratio corrispondente in modo tabulare (se non c'è necessità di esprimere questa variazione il danneggiamento può essere eventualmente valutato in modo indipendente nei due modi e sommato).

### 5.3.2.1 Utilizzo della legge esponenziale per riprodurre il comportamento del provino TDCB

In questa sezione si vuole valutare la qualità con la quale la legge esponenziale riproduce il comportamento dell'adesivo preso in esame nella prova per l'ottenimento dell'energia di frattura al modo I. In questo caso si utilizza un modello bi – dimensionale in quanto meno oneroso dal punto di vista computazionale, in particolare si utilizzano per la modellazione dei substrati gli elementi a in deformazione piana a 4 nodi CPE4R, caratterizzati dall'averne un punto d'integrazione per elemento e un campo di deformazione costante nell'elemento, mentre per gli elementi dell'adesivo si utilizzano gli elementi coesivi a 4 nodi COH2D4, su cui è possibile definire la legge coesiva. Si procede poi con la definizione dell'elemento rigido RB2 per riprodurre il contatto tra perno rigido e foro passante ricavato nel provino. Si conduce la simulazione vincolando i gradi di libertà traslazionali e lasciando liberi quelli rotazionali.

L'effetto della tensione di picco della legge coesiva (Figura 5.27) denota che all'aumentare della tensione di picco si ha un incremento del valore di picco della curva forza – spostamento e del successivo valore di plateau. Inoltre, modellando con una legge la cui resistenza coesiva è maggiore si osserverebbe la rottura per valori di spostamento maggiori. Il parametro  $t_n^0$  non influisce sulla rigidità elastica del campione. Si è riscontrato un maggiore effetto di questo parametro per bassi valori di  $K_{nn}$  e alti valori di  $t_n^0$ , infatti come si vede dalla figura seguente riducendo la resistenza coesiva si tende a una curva 'limite', oltre il quale non è più ragionevole ridurre la tensione in quanto non si riscontrerebbero scostamenti rilevanti rispetto alla curva precedente. Nel caso in cui si definisce la legge esponenziale specificando lo spostamento si ha la possibilità di variare il parametro  $\alpha$  per condizionare la modalità con cui l'elemento degrada. Con il diminuire del parametro  $\alpha$  (ovvero se si tende ad una legge triangolare) l'effetto della tensione di picco aumenta. Questo può essere spiegato dal fatto che se si utilizza una legge con  $\alpha$  inferiore la tensione media in un intervallo di separazione centrato in  $\delta_n^0$  è più vicina al valore  $t_n^0$  perché la diminuzione di tensione è lenta, al contrario una legge con  $\alpha$  grande causa una tensione media in un intorno di  $\delta_n^0$  minore rispetto a  $t_n^0$  per via della repentina diminuzione della tensione dopo il valore di picco. Il valore della tensione di picco, pertanto, sarà predominante solo in un intervallo infinitesimo di separazione. Poiché il calcolo prosegue in modo discretizzato maggiore è  $\alpha$  (picco più acuto) minore è la possibilità che ad ogni step di calcolo la separazione tra i nodi dell'elemento sia in un range di separazione tale per cui si riesca a percepire l'influenza della tensione di picco. Un aumento del parametro della legge esponenziale causa un

aumento nella velocità con cui l'elemento degrada per cui si otterrà uno spostamento a rottura inferiore.

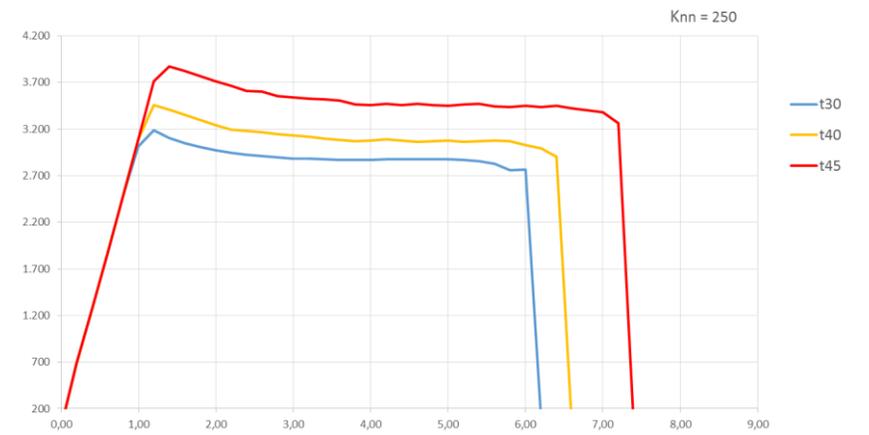


Figura 5.27 Effetto della tensione di picco sulla prova modo I con legge esponenziale

Nella figura 5.28 si vede come il parametro di rigidità abbia un influenza notevole sia sulla pendenza della zona elastica che sul carico di picco che il sistema riesce a raggiungere. Il carico di plateau come visto in precedenza è definito prevalentemente dall'energia di frattura del modo corrispondente. Il parametro  $K_{nn}$  ha un'elevata influenza anche sullo spostamento a rottura. Riprodurre un carico di picco non eccessivamente elevato rispetto a quello reale è auspicabile perché non si vuole sovrastimare la resistenza del giunto incollato, quindi si vorrebbe scegliere un  $K_{nn}$  inferiore per riuscire a riprodurre fedelmente il carico di picco. Tuttavia, un parametro di rigidità troppo basso porterebbe a una sottostima sia della rigidità elastica del campione che dello spostamento a rottura. Si utilizza l'errore minimo quadratico per valutare un compromesso tra le due richieste, la funzione  $C(K_{nn}, t_n^0)$  ha un minimo per la coppia di valori  $K_{nn} = 1000$  e  $t_n^0 = 20$ .

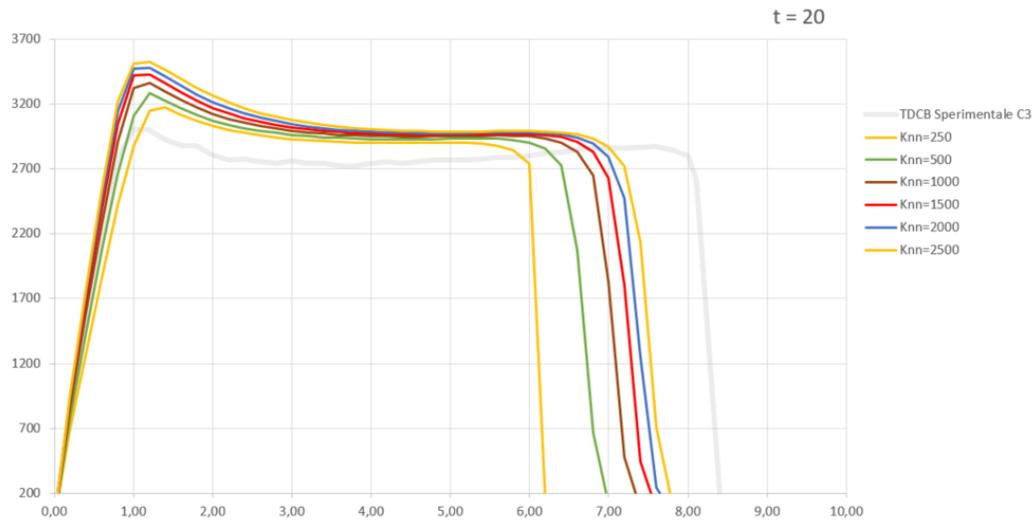


Figura 5.28 Effetto del parametro di rigidezza sulla prova modo I con legge esponenziale

L'utilizzo di una legge lineare con parametri iterati porta a un errore quadratico medio inferiore rispetto a quello ottenuto con una legge esponenziale.

### 5.3.2.2 Utilizzo della legge esponenziale per riprodurre il comportamento del provino ENF

Per valutare l'attitudine della legge esponenziale a riprodurre l'andamento della curva forza spostamento della prova per l'ottenimento dell'energia di frattura nel modo II si utilizza lo stesso modello tridimensionale impiegato per la valutazione della legge lineare, questo perché il modello dell'end – notched flexure necessita della definizione di diverse superfici di contatto di tipo TIE e di tipo CONTACT PAIR. Le superfici di contatto peggiorano le condizioni di convergenza di calcolo pertanto in questo caso viene preferito un modello tridimensionale, più stabile di un modello bidimensionale in termini di calcolo. Un modello tridimensionale richiede un maggior sforzo computazionale ma garantisce un migliore risultato perché viene evitata un'approssimazione della realtà, ovvero l'ipotesi sullo stato di tensione o deformazione piana che richiede la definizione dello spessore.

Vengono stabilite condizioni sul time step iniziale e massimo in modo da poter avere la soluzione in punti specifici.

Nella figura seguente si vede come una legge esponenziale riproduce in modo qualitativamente corretto il comportamento del sistema, questo è dovuto al fatto che la legge esponenziale comprende un intervallo di separazione maggiore della legge bi – lineare e ciò porta ad avere un numero maggiore di elementi in softening, con un degrado di rigidezza più o meno elevato. Allo step  $N$  molti elementi sono in stato di incipiente eliminazione  $\delta \cong \delta^f$  e  $t \cong 0$ . A causa della discretizzazione temporale, allo step successivo  $N + 1$  gli elementi si trovano contemporaneamente nella condizione  $\delta > \delta^f$  per cui un numero elevato di elementi vengono contemporaneamente eliminati, questo riproduce correttamente la condizione di propagazione instabile successiva al massimo della curva.

Nella figura 5.29 è possibile osservare l'effetto della resistenza coesiva, anche in questo caso  $t_s^0$  non influenza la rigidezza del campione nel tratto elastico, tuttavia si osserva come per tensioni inferiori si ha una maggiore perdita di pendenza causata dal fatto che, a parità di separazione e di  $K_{SS}$ , la tensione di picco discrimina se un elemento si trova o meno in condizione di softening. Una tensione di picco minore porta ad avere un numero maggiore di elementi in fase di degrado di rigidezza e ciò porta all'effetto macroscopico di un anticipo della diminuzione di rigidezza del campione. La tensione di picco della legge trazione – separazione influenza il carico di picco della curva forza – spostamento, infatti imporre una maggiore tensione di picco nella legge caratteristica dell'elemento causa un incremento di resistenza del sistema complessivo. Incrementando il valore della tensione di picco si osserva un degrado di carico più accentuato al momento della propagazione instabile, questo perché a parità delle altre condizioni una tensione di picco maggiore causa un tasso di degrado di rigidezza maggiore.

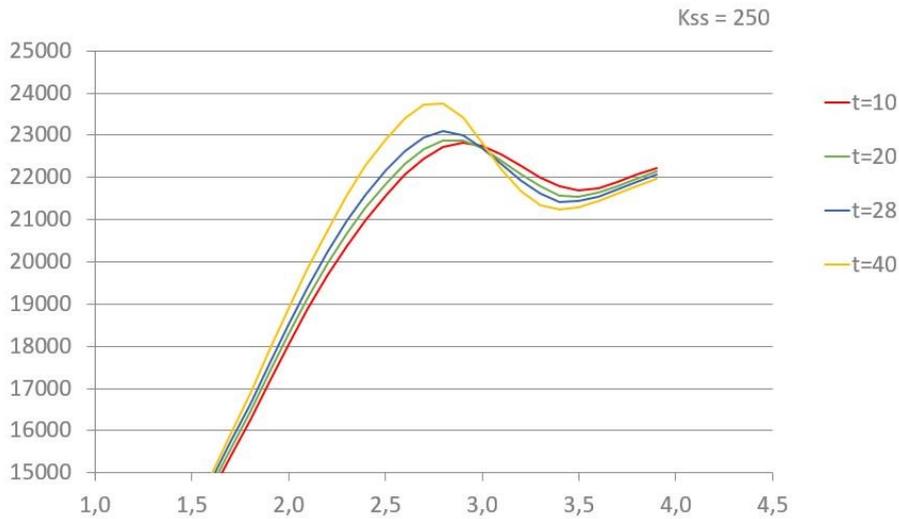


Figure 5.29 Effetto della tensione di picco sulla prova in modo II con legge esponenziale

Il parametro di rigidità è il parametro che descrive il comportamento elastico dell'elemento pertanto esso avrà una notevole incidenza anche sulla rigidità del campione. Inoltre, a parità di tensione di picco e di energia di frattura una rigidità superiore porta a raggiungere il picco per valori di separazione inferiore e questo si riflette a livello del campione in spostamenti corrispondenti al carico di picco inferiori. Contemporaneamente queste condizioni causano un allungamento della legge coesiva perché l'area sottesa dalla curva di trazione – separazione deve essere la stessa. Questo causa il fatto che allo step N un numero elevato di elementi si trova in stato di incipiente eliminazione, il che porta ad una più accentuata perdita di carico seguente al massimo della curva.

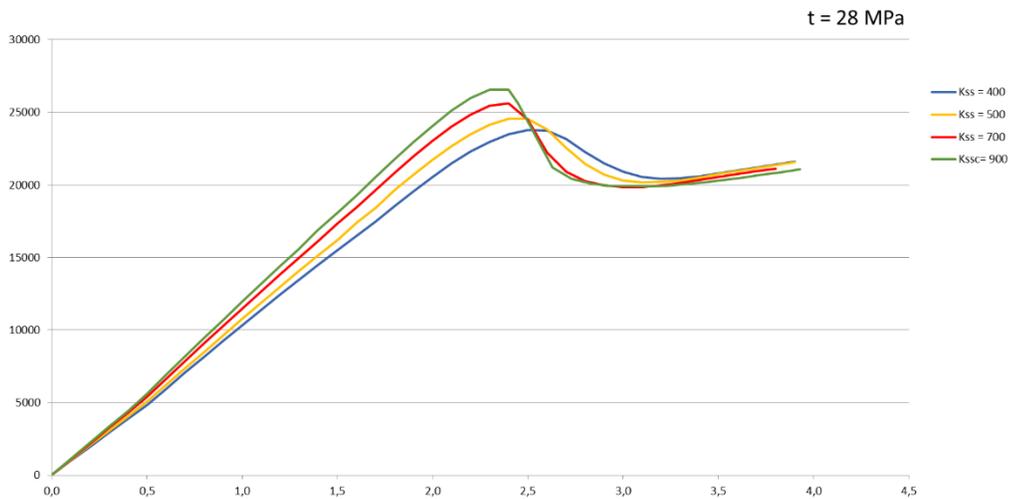


Figure 5.30 Effetto del parametro di rigidità sulla prova modo II con legge esponenziale

Per tutte le tre curve sperimentali la combinazione che minimizza l'errore quadratico medio è  $K_{SS} = 250 \text{ MPa}$  e  $t_s^0 = 20 \text{ MPa}$ . In questo caso si raggiunge un ottimo risultato, migliore rispetto a quello che si raggiunge utilizzando una legge triangolare, infatti come si vede dalla figura 5.31 la curva di simulazione riproduce in modo molto preciso la curva sperimentale.

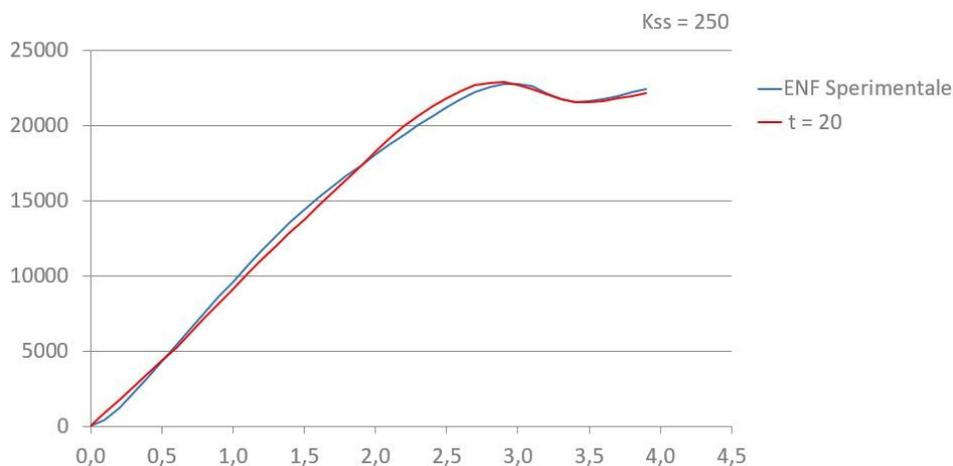


Figura 5.31 Confronto tra curva sperimentale e di simulazione con l'utilizzo di una legge esponenziale

I migliori risultati che si raggiungono nell'utilizzo della legge esponenziale per la modellazione della prova di frattura a modo II rispetto ad altre leggi sono confermate da valutazioni sull'errore quadratico medio, esso infatti viene ridotto di circa il 40% sulla prima curva e di circa l'80% sulla seconda e terza curva.

L'utilizzo di forme differenti della legge trazione – separazione porta, a valle dell'utilizzo del metodo inverso, a parametri ottimizzati diversi per ogni legge.

## 5.4 Valutazione delle leggi ricavate su un provino Single Lap Joint

### 5.4.1 Single Lap Joint

Al fine di valutare se le leggi ricavate con il metodo inverso siano adatte a descrivere il comportamento di un giunto incollato sollecitato a modo misto viene impiegato un provino Single Lap joint (Figura 5.32). Questo giunto incollato è uno dei più studiati fin dal secolo scorso e, nel corso degli anni, molti modelli analitici sono stati proposti per prevederne la resistenza. La normativa di riferimento attualmente in vigore per la valutazione della tensione di picco e della tipologia di rottura è la ISO 4587 del 2003 [19] oppure l'ASTM D1002-10(2019) [20].

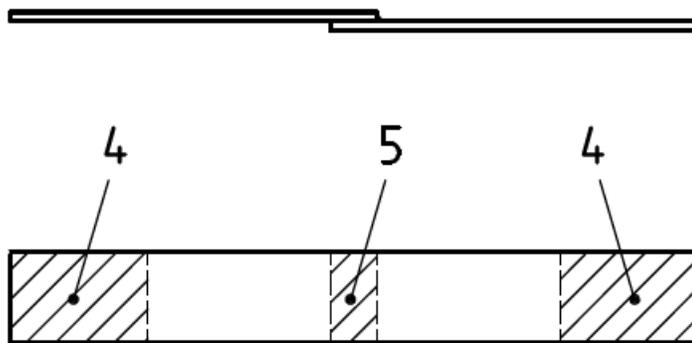


Figura 5.32 Schema di un provino Single Lap Joint

La curva forza – spostamento tipica di un provino single lap joint è rappresentata nella seguente figura e può essere divisa in un primo tratto prevalentemente lineare, in un secondo fortemente non – lineare e nell'ultimo tratto dove si osserva un decremento di carico.

La prima fase è quella prevalentemente lineare, dove le piccole non linearità sono dovute principalmente al fatto che l'adesivo essendo un polimero presenta un comportamento intrinsecamente non lineare. Tuttavia, gli adesivi strutturali, per via dei legami covalenti intercatena, presentano una quota di non linearità molto modesta in questa fase. La non – linearità in questa fase è, inoltre, dovuta al momento flettente che si genera conseguentemente all'offset di carico dovuto al fatto che gli aderenti sono sovrapposti. Il giunto incollato risponde a questo tipo di sollecitazione con

una rotazione della zona della sovrapposizione che tende a ridurre il momento, e quindi il carico. Riguardo la prima fase della curva forza – spostamento di questo sistema bisogna anche sottolineare che in alcuni casi è possibile osservare un cambio di pendenza corrispondente a piccolissimi valori di spostamento, che è causato dalla cedevolezza della macchina di prova.

La seconda fase presenta una quota di non – linearità importante causata dal fenomeno della rotazione del giunto, dal fatto che in questa fase si inizia manifestare il degrado dell’adesivo e/o da un possibile snervamento del substrato.

La terza fase è quella successiva al carico massimo e legata alla grande deformazione plastica oppure al cedimento del giunto.

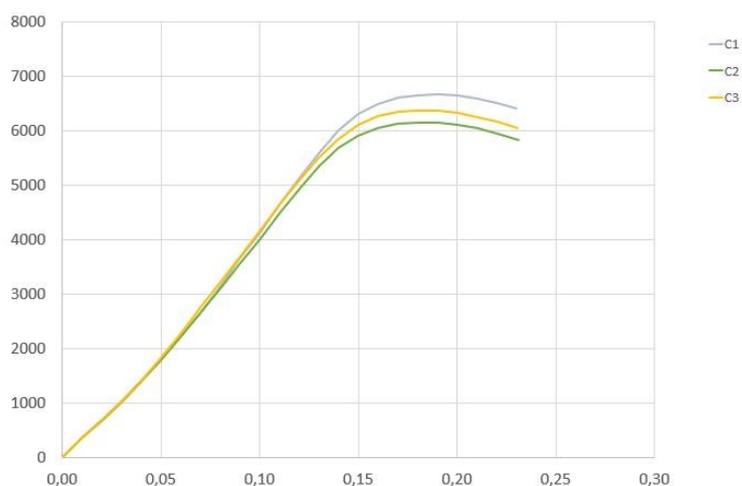


Figura 5.33 Curve sperimentali Single Lap Joint

La distribuzione delle tensioni nell’adesivo è molto complicata e varia sia lungo la sovrapposizione che lungo lo spessore, nella figura seguente è mostrato l’andamento delle tensioni di peel e delle tensioni di taglio, valutato con diversi modelli analitici.

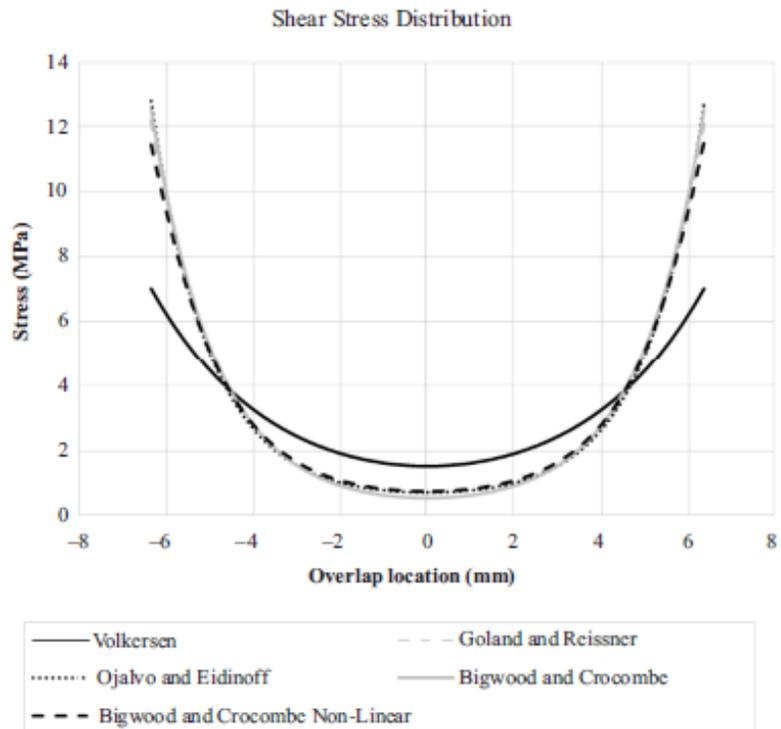


Figura 5.34 Confronto delle teorie analitiche per la valutazione dell'andamento degli stress di peel e di taglio lungo la sovrapposizione

In fase di progettazione la scelta della tensione massima come tensione di riferimento per la progettazione del giunto è ingannevole infatti la singolarità alla fine della sovrapposizione rende il risultato della simulazione mesh dipendente se si utilizza la modellazione tradizionale. Spesso la

strategia che si adotta è quella di prendere come tensione di riferimento la tensione a metà dello spessore adesivo e distante qualche elemento dalla fine della sovrapposizione. La singolarità è legata sia ad un fattore geometrico che ad un fattore legato al materiale di aderente e adesivo (modulo elastico a taglio e coefficiente di Poisson). La presenza di una singolarità che porta a raggiungere tensioni che tendono ad infinito all'estremità dell'adesivo è valutata calcolando le radici del polinomio risultante dal porre il determinante di Bogy nullo, in particolare se una delle radici è compresa tra 0 e 1 si avrà una singolarità [21] [22] [23]. Si ha ad esempio singolarità quando l'adesivo avvolge l'aderente. In alcuni casi per limitare questo fenomeno si riduce l'angolo dell'adesivo da  $90^\circ$  a  $60^\circ$ , in questo modo lo stress calcolato si riduce di 5 volte [3].

Un'altra problematica legata alla modellazione di questo giunto sono le non linearità geometriche, a causa del tipo di sollecitazione che il giunto subisce si ha una rotazione nella zona dell'adesivo, questa rotazione non è trascurabile quindi non è accettabile l'ipotesi dei piccoli spostamenti. Questo porta all'impossibilità di valutare l'equilibrio nella configurazione indeformata perché si avrebbero spostamenti importanti nelle previsioni di resistenza rispetto alla realtà.

Nel momento in cui si inizia ad applicare il carico il braccio è uguale alla somma tra lo spessore dell'adesivo e la metà degli spessori dei substrati. Successivamente alla rotazione il braccio del momento si riduce a causa della curvatura assunta dai substrati, come conseguenza il momento cresce con la forza in modo meno che lineare.

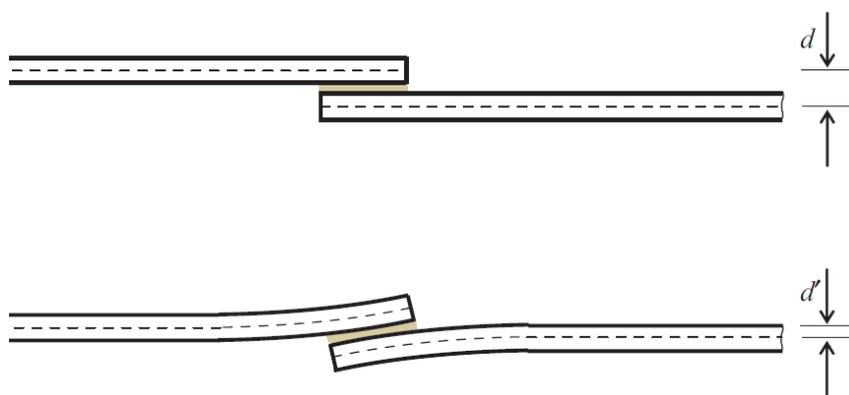


Figura 5.35 Riduzione del braccio a causa della rotazione della sovrapposizione

La prima formulazione analitica per la valutazione del momento in funzione della forza applicata è quella di Goland e Reissner [24] che per semplificare il problema ignorano lo spessore dello strato adesivo e considerano il giunto come una piastra di spessore uguale alla somma degli spessori dei due aderenti, così facendo l'espressione del momento ricavata è:

$$M = kT \frac{t}{2}$$

dove

$T$  è il carico assiale

$t$  è lo spessore di ognuno degli aderenti

$k$  è il fattore del momento

$$k = \frac{\sinh(u_1 l) \cosh(u_2 c)}{\sinh(u_1 l) \cosh(u_2 c) + \frac{u_1}{u_2} \cosh(u_1 l) \sinh(u_2 c)}$$

con  $l$  lunghezza di ogni aderente e  $c$  metà della lunghezza della sovrapposizione.

$u_1$  e  $u_2$  vengono calcolati come

$$u_i = \sqrt{\frac{T}{D_i}}$$

con  $D_1$  rigidezza a flessione del substrato e  $D_2$  rigidezza a flessione dell'overlap.

Negli anni sono stati forniti diversi miglioramenti a questa teoria, che assicurano una migliore previsioni della distribuzione di tensione all'interno dello strato adesivo in condizioni particolari, tuttavia questa teoria fornisce buoni risultati di base sia con modeste che con lunghe sovrapposizioni. Modelli successivi sono stati sviluppati per tenere in conto di altri fattori, ad esempio Guo [25] ha valutato

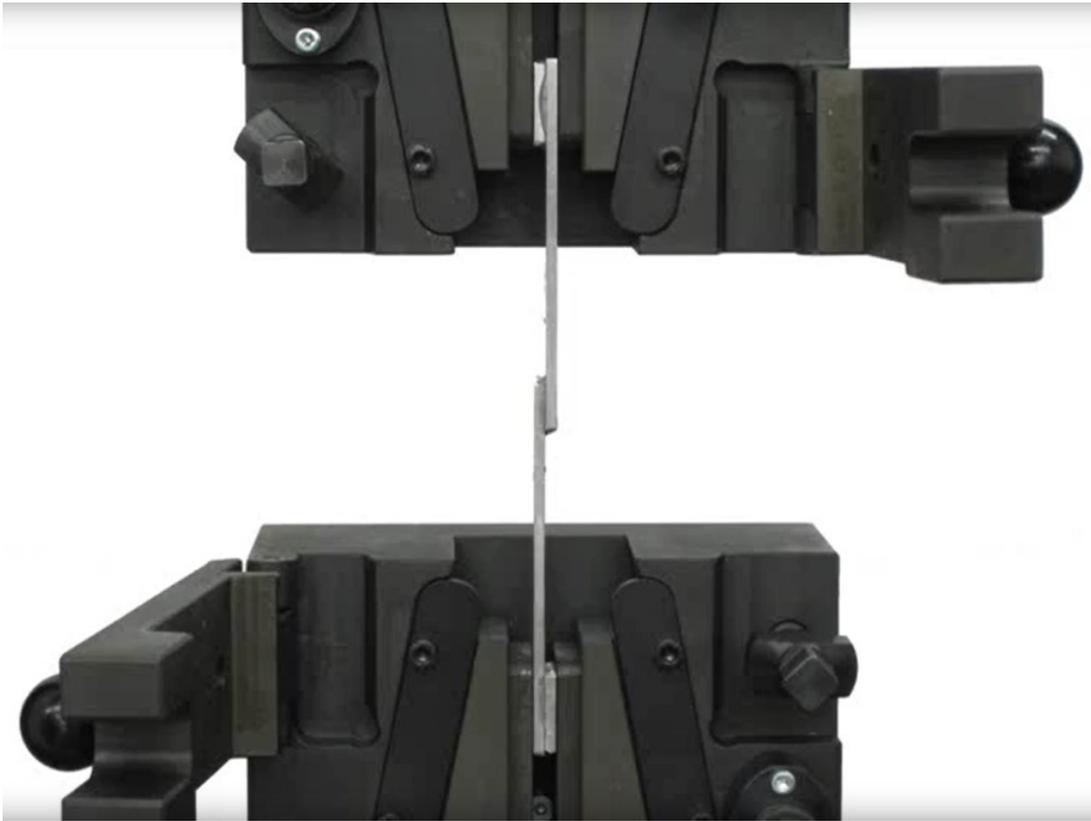
l'effetto dei distanziali per l'allineamento delle ganasce della macchina di prova, quest'effetto diminuisce al crescere della distanza tra le ganasce e la sovrapposizione. Altri studi condotti da Reddy e Roy [26] hanno evidenziato l'importanza sui risultati dei vincoli inseriti nel modello numerico.

Grazie all'analisi agli elementi finiti è possibile svolgere delle analisi che tengano in conto della non – linearità geometrica dovuta ai grandi spostamenti. Un approccio possibile è quello Lagrangiano aggiornato implementato in alcuni software che prende come riferimento non lo stato iniziale del sistema ma quello dello step di calcolo precedente. L'equilibrio viene imposto utilizzando il principio dei lavori virtuali con formulazioni di stress e di deformazione che siano energeticamente coniugate ovvero il loro prodotto deve fornire un'energia per unità di volume. Tipicamente per modellare sistemi che hanno comportamento elastico non lineare si utilizzano la formulazione di 2° tensore di Piola – Kirchhoff per la tensione e il tensore di deformazione di Green – Lagrange per descrivere il campo di deformazione. Per il calcolo della soluzione si utilizza un approccio incrementale quindi a partire dalla soluzione dello step precedente si valuta quella allo step successivo. Le equazioni di equilibrio ricavate dal principio dei lavori virtuali sono linearizzate ed implementate nel software FEM. Il risultato finale è che oltre ad avere una matrice di rigidità legata al materiale si ha una matrice di rigidità geometrica che nasce a causa della parte non lineare di deformazione. Generalmente i software di calcolo impiegano schemi iterativi come quello di Newton – Raphson per il calcolo della soluzione del sistema di equazioni.

La prova è stata condotta su un provino di dimensioni 80 x 25 x 5 con una sovrapposizione di 10 mm e uno spessore di adesivo di 0,3 mm. Le morse della macchina di prova si agganciano ad un tratto di 25mm. I due substrati sono realizzati in lega di alluminio con un modulo di Young di  $E = 73100 \text{ MPa}$  e un coefficiente di Poisson  $\nu = 0,33$ . La tensione di snervamento della lega è di  $R_{p0,2} = 280 \text{ MPa}$ . I provini vengono sottoposti a pulizia con acetone per sgrassare e pulire il provino e ad un trattamento di sabbiatura per aumentarne la rugosità.

L'adesivo è lo stesso impiegato nelle prove di frattura, in particolare le proprietà elastiche sono  $E = 2530 \text{ MPa}$  e  $\nu = 0,4$  mentre la resistenza al peel vale  $t_n = 45 \text{ MPa}$  e quella al taglio  $t_s = 28 \text{ MPa}$ .

Nella figura 5.36 è possibile osservare la macchina di prova e i tipici distanziali che vengono impiegati per permettere l'allineamento dei due provini, necessari poiché non si può produrre un offset tra le due ganasce della macchina di prova.

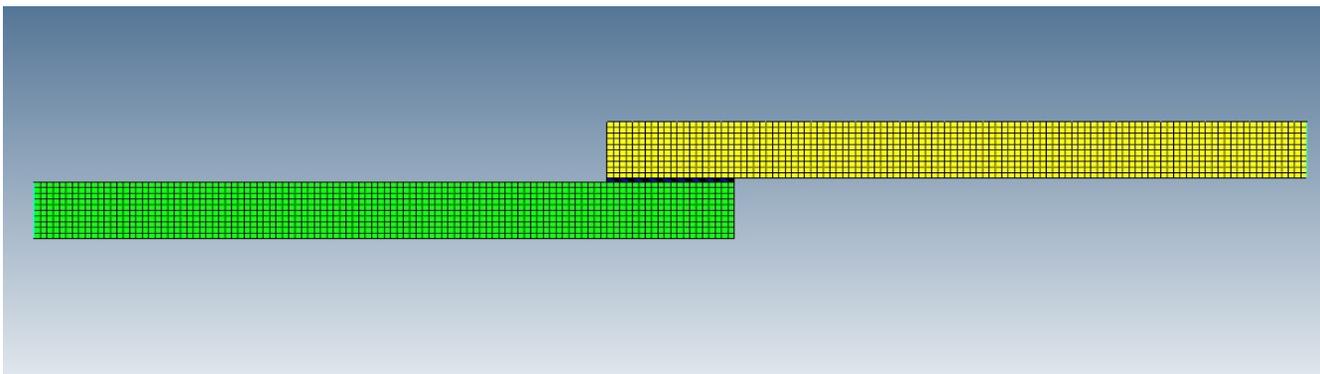


*Figura 5.36 Esempio di prova Single lap shear*

#### 5.4.2 Modello FEM del Single lap Joint

Nel modello agli elementi finiti viene modellata solo la parte di provino di interesse ovvero quella compresa tra le due ganasce (Fig. 5.37). Il campione è rappresentato in modo bidimensionale utilizzando per i due substrati di alluminio degli elementi a 4 nodi in deformazione piana CPE4R mentre gli elementi dell'adesivo sono elementi coesivi a 4 nodi COH2D4. L'adesivo è stato modellato con un solo strato di elementi coesivi. Vengono definiti due elementi rigidi sulle due estremità del campione, in cui il nodo indipendente è quello centrale mentre quelli indipendenti sono i restanti nodi appartenenti a quella sezione. In questo modo si definiranno i vincoli su un solo nodo e saranno

automaticamente estesi a tutta la sezione. La dimensione della mesh degli elementi del substrato è stata imposta pari a 0,5 mm mentre quella dell'adesivo a 0,1 mm.



*Figura 5.37 Modello FEM del campione Single lap Joint*

Per gli elementi dei substrati viene specificata come proprietà \*SOLID SECTION e come materiale la lega di Alluminio di cui si sono precedentemente definite le proprietà. Per gli elementi dell'adesivo si è specificata la proprietà \*COHESIVE SECTION e la risposta TRACTION SEPARATION, in modo da poter caratterizzare il materiale adesivo definendo la legge coesiva, come visto nei paragrafi precedenti. Si è specificato uno spessore costitutivo unitario per avere equivalenza tra deformazione e separazione.

Sono state definite due interfacce di tipo TIE tra gli elementi dei substrati a contatto con l'adesivo e i nodi dell'adesivo a contatto con il substrato, in questo modo è stato possibile modellare due parti a contatto con due mesh di dimensioni diverse.

La sezione estrema di sinistra è stata vincolata bloccando sia le due traslazioni in x ed in y che la rotazione attorno a z del nodo indipendente dell'RB2. Allo stesso modo si è vincolata la sezione estrema di destra bloccando la traslazione lungo y e la rotazione attorno a z. E' stato imposto uno spostamento di 0,9 mm lungo x (sicuramente superiore al valore di spostamento a rottura del giunto) in modo da simulare una prova quasi statica, infatti la norma richiede una velocità di 13 mm/min.

Durante la prova non si osserva deformazione plastica nei due substrati.

### 5.4.3 Valutazione delle leggi lineare ed esponenziale sulla riproduzione del comportamento del Single lap Joint

Nei paragrafi precedenti si è condotta un'analisi iterativa sulle prove di frattura al fine di individuare i parametri ottimizzati della legge trazione – separazione. Per le diverse leggi si sono raggiunti parametri ottimizzati differenti e risultati diversi in termini accuratezza con la quale vengono riprodotte le curve sperimentali. Le leggi ottimizzate raggiunte a valle dell'attività iterativa sono:

#### 1) Lineare

$K_{nn}$	$t_n^0$	$K_{ss}$	$t_s^0$
2530 MPa	40 MPa	400 MPa	27 MPa

#### 2) Esponenziale

$K_{nn}$	$t_n^0$	$K_{ss}$	$t_s^0$
1000 MPa	20 MPa	250 MPa	20 MPa

Si vuole valutare ora quale legge sia migliore per riprodurre il comportamento di un giunto Single Lap caratterizzato da sollecitazione a modo misto.

L'utilizzo della modellazione della zona coesiva permette di caratterizzare il materiale adesivo anche nella fase di degrado delle proprietà meccaniche, questo viene fatto definendo la legge di evoluzione del danneggiamento e non, come nelle analisi tradizionali, modellando la fase plastica. Gli adesivi sono materiali che subiscono una bassa deformazione plastica prima di arrivare a rottura, quindi risulta troppo oneroso, comparato ai vantaggi ottenuti, costruire modelli complessi come Johnson – Cook, Meyer, etc. per la modellazione di questa fase. Spesso per la progettazione di un giunto incollato si fanno valutazioni solo sulla fase elastica quindi la tensione limite viene individuata come la tensione corrispondente alla fine del tratto elastico (1). La modellazione coesiva permette di cogliere il degrado di rigidità del materiale successivo all'inizio del danneggiamento, garantendo una maggiore precisione nella modellazione del comportamento del giunto.

Le curve sperimentali C1, C2 e C3 mostrano come nel primissimo tratto ci sia un incremento di pendenza dovuto al fatto che il giunto passa dalla configurazione iniziale a quella successiva alla rotazione del giunto con i substrati deformati con una certa curvatura.

Dal confronto tra le due leggi (Fig. 5.38) si vede che per la modellazione di un single lap joint è più adatto l'utilizzo di una legge bi – lineare poiché questa riesce a cogliere con una buona precisione sia la rigidità del campione che il carico massimo. La legge esponenziale coglie bene la rigidità del primo tratto ma non segue il comportamento del sistema fisico successivo alla rotazione del giunto. La curva forza – spostamento del modello con legge esponenziale presenta, a livello qualitativo, tutte le 3 fasi tipiche di una curva forza .- spostamento di un giunto single lap mentre quella del modello con legge triangolare presenta un andamento qualitativo molto simile alla legge triangolare stessa.

In particolare, la legge triangolare con i parametri ottimizzati porta ad un errore sul carico massimo mediato sulle tre curve sperimentali del 4,1 %, dovuto soprattutto alle curve 2 e 3, mentre la legge esponenziale si discosta molto dal carico massimo, con un errore percentuale medio del 20,9 %. Ponendo l'attenzione sullo spostamento corrispondente al carico massimo si nota, anche in questo caso, una differenza sensibile tra il comportamento della legge bi – lineare e di quella esponenziale, infatti la prima causa una deviazione media sullo spostamento corrispondente al carico massimo del 1,7 %, che in termini di lunghezza corrisponde a meno di un centesimo di millimetro, mentre la legge esponenziale causa una deviazione media sullo spostamento del 41 %, corrispondente ad uno scostamento superiore al decimo di millimetro.

Se si utilizza una legge triangolare con i parametri bulk dell'adesivo e quindi utilizzando il metodo dell'identificazione dei parametri con delle prove specifiche, si ha una modesta variazione rispetto ai dati sperimentali per quanto riguarda il carico massimo (3,4%) mentre si ottiene una non trascurabile variazione se si considera lo scostamento dallo spostamento corrispondente al massimo della curva forza – spostamento (18,9 %). Questo risultato mostra come la scelta della legge sia, per alcuni materiali, importante tanto quanto l'utilizzo di parametri ottimizzati.

Questi risultati mostrano migliori performance ottenute utilizzando una legge triangolare nel caso di giunto soggetto a sollecitazione di tipo misto. Nelle prove di frattura si è giunti nel modo I a prediligere ancora l'utilizzo di una legge triangolare mentre per il modo II si è ottenuto un comportamento migliore utilizzando una legge esponenziale, che riusciva a cogliere la fase di propagazione instabile. Questa considerazione suggerisce due conclusioni:

- 1) L'adesivo in questione mostra una modesta duttilità se sollecitato al modo I mentre ha comportamento fragile se sollecitato al modo II, questo è confermato anche dai valori di carico che si raggiungono nelle due prove di frattura
- 2) La scelta della legge deve tenere in conto anche alle condizioni di sollecitazione del giunto, in particolare, poiché in un Single lap Joint il contributo del peel è rilevante l'utilizzo della legge triangolare porta ad una maggiore congruenza con i dati sperimentali.

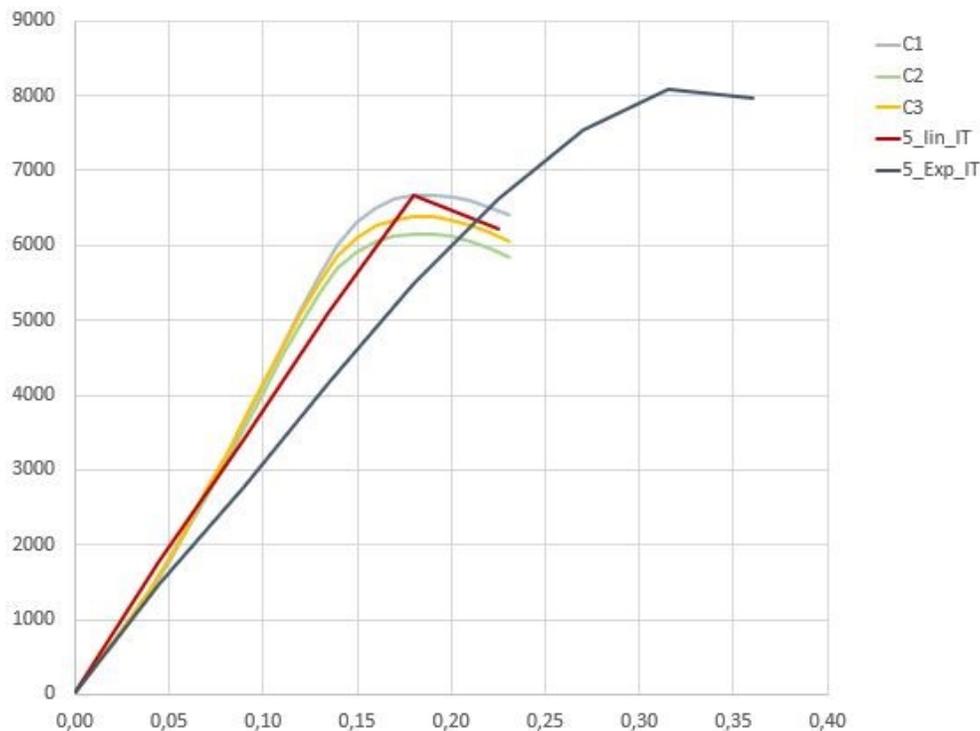


Figura 5.38 Confronto tra le curve sperimentali e le curve ottenute con legge triangolare ed esponenziale

Quanto visto in questo studio conferma i precedenti studi sulla scelta della legge per un giunto single lap [3] infatti per bassi valori di sovrapposizione  $L_0$  come nel caso in esame ( $L_0 = 10 \text{ mm}$ ) la legge esponenziale causa una forte sovrastima del carico massimo a causa del fatto che bassi valori di  $L_0$  causano una distribuzione quasi uniforme di tensione di taglio, mentre si continua ad avere il gradiente tipico del peel che porta al raggiungimento di tensioni elevate agli estremi dell'overlap (figura 5.39). Inoltre, il provino single lap joint è soggetto a un'elevata quota di sollecitazione al modo I per cui il fatto

che la legge lineare sia risultata migliore per descriverne il comportamento è in accordo con il fatto che la stessa legge sia risultata più precisa nel riprodurre la prova di frattura al modo I.

L'effetto di  $L_0$  sul peel è di aumentare l'estensione della zona delle tensioni di picco.

- 1) Un valore minore di  $L_0$  causa una maggiore estensione della zona della sovrapposizione soggetta a tensioni di peel molto elevate e conseguentemente aumenta il carico che il giunto riesce a trasferire provocando una sovrastima del carico massimo del giunto. Minori  $L_0$  causano un maggiore degrado causato dalla sollecitazione di modo I.
  
- 2) La maggiore estensione della zona di softening della legge esponenziale e una distribuzione quasi uniforme della tensione causano una degradazione degli elementi più lenta e uniformemente distribuita nella sovrapposizione. Un numero elevato di elementi poco degradati sono in grado di garantire una maggiore trasmissibilità dei carichi e quindi una sovrastima del carico di picco. Minori  $L_0$  causano un minore degrado causato dalla sollecitazione di modo II.

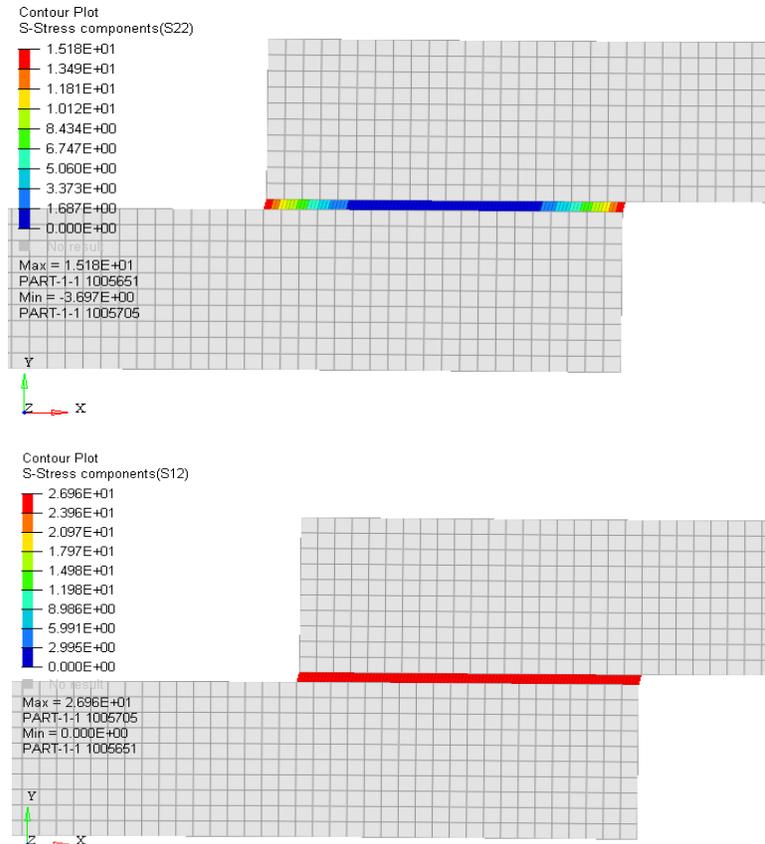


Figura 5.39 Stress di peel e di taglio nell'adesivo al momento del raggiungimento del carico massimo (gradiente di peel in alto, shear uniforme in basso)

Per adesivi molto fragili si ha una minore influenza della legge, questo è dovuto al fatto che si ha un effetto importante della legge se al momento del raggiungimento del carico massimo un buon numero di elementi si trova nella prima parte della fase di softening, zona dove si coglie maggiormente la differenza tra le leggi. Nel caso di adesivi molto fragili il range di separazione nella fase di evoluzione del danno è molto contenuto (un ordine di grandezza inferiore) quindi gli elementi raggiungono molto velocemente la fase finale del degrado, riducendo l'effetto dell'utilizzo di una legge differente.

I gradienti di stress riducono il numero di elementi che si trova nella prima fase dell'evoluzione del danno, quindi avere una distribuzione più uniforme causa una maggiore influenza della scelta della legge.

Raggiunto il carico massimo la 'failure process zone' è maggiore se si utilizza una legge esponenziale rispetto ad una legge lineare o trapezoidale (in figura 5.40 è evidenziato che una legge esponenziale porta a un andamento della variabile del danneggiamento più uniforme e caratterizzata da valori

maggiori rispetto alla legge lineare, caratterizzata da valori inferiori). Questo non significa necessariamente che il carico massimo è maggiore per la legge esponenziale perché la legge triangolare e quella trapezoidale permettono una maggiore trasmissione di carico nelle fasi iniziali del danno. Il parametro fondamentale per discriminare il carico massimo è la lunghezza del range  $\delta_{n,s}^f - \delta_{n,s}^0$ . Adesivi molto fragili con un piccolo  $\delta_{n,s}^f - \delta_{n,s}^0$  portano ad una stima di carico massimo inferiore se si utilizza una legge esponenziale rispetto a quella ottenuta da altre leggi.

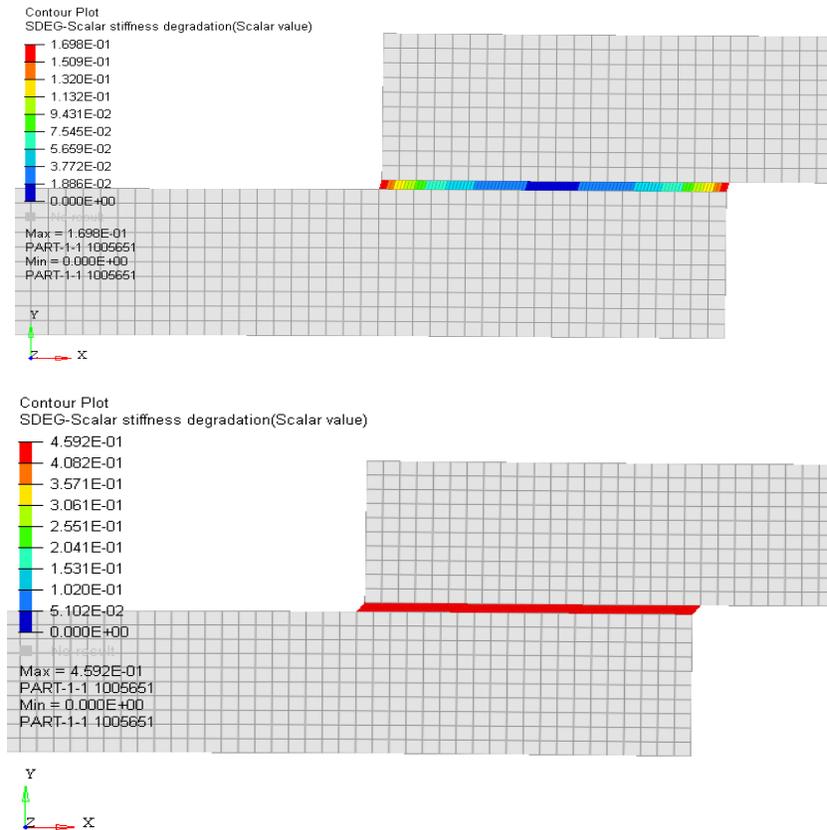


Figura 5.40 FPZ al carico massimo per una legge lineare (in alto) ed una esponenziale (in basso)

## 5.5 Riepilogo generale sull'effetto del tipo di legge e dei parametri

La legge lineare descrive in modo migliore il comportamento del giunto sollecitato al modo I, in questo caso il parametro che influenza maggiormente le curve forze – spostamento risultanti dal modello è l'energia di frattura  $G_{Ic}$ . Un aumento di questo parametro porta ad un aumento del carico di picco, del carico di plateau e dello spostamento a rottura. Il parametro di rigidità  $K_{nn}$  ha, per questo modo, una

bassa influenza. Tuttavia, una riduzione elevata di questo parametro non causa la rottura dell'adesivo per il range di spostamento a cui si sottopone il campione. Un aumento di  $t_n^0$  causa un importante aumento della forza di picco e dello spostamento a rottura.

La legge lineare è meno adatta a rappresentare il campione ENF sottoposto a modo II. In questo caso l'energia a frattura  $G_{IIc}$  ha un effetto meno importante rispetto a quello nel modo I, tuttavia un incremento causa l'aumento del carico nella parte finale della curva. Aumentare  $t_s^0$  causa un aumento del carico di picco e della rigidità del primo tratto. Per valori di  $t_s^0$  molto elevati si coglie la propagazione instabile osservata sperimentalmente. Incrementando  $K_{SS}$  si aumenta la pendenza iniziale ed il carico massimo.

La legge trapezoidale è adatta alla modellazione di adesivi molto duttili, per questo motivo non riproduce correttamente il comportamento dell'adesivo in esame infatti in nessuno dei provini si è osservata la rottura dell'adesivo vista sperimentalmente (con proprietà bulk il massimo degrado di rigidità dell'adesivo è pari al 7%). L'estensione della zona a tensione costante influisce moderatamente sui risultati.

La legge esponenziale riproduce in modo meno preciso della legge lineare la curva forza – spostamento relativa al modo I (TDCB). In questo caso la tensione di picco  $t_n^0$  influenza in modo minore i risultati ottenibili dal modello nonostante per bassi valori del parametro di rigidità e del parametro della legge esponenziale  $\alpha$  un aumento della tensione di picco causa un aumento non trascurabile del carico di picco e dello spostamento a rottura. Utilizzare una legge con degrado maggiore diminuisce le previsioni di spostamento a rottura del provino. Se si utilizza una legge esponenziale e si modella un componente sollecitato al modo I il maggiore effetto è dato dal parametro di rigidità  $K_{nn}$ , infatti utilizzare un valore maggiore di questo parametro causa un aumento elevato della pendenza iniziale, del carico di picco e dello spostamento a rottura.

Questa legge è molto precisa per la modellazione della curva forza - spostamento del campione ENF perché riesce a cogliere la propagazione instabile del difetto. Incrementare la tensione di picco  $t_s^0$  causa un aumento del carico di picco, della rigidità del campione e della velocità di riduzione di carico dopo aver raggiunto il carico massimo. Un incremento di  $K_{SS}$  causa gli stessi effetti di un aumento di  $t_s^0$ .

Poiché il modo I è riprodotto meglio dalla legge lineare e il modo II è riprodotto meglio dalla legge esponenziale si sono confrontate le due leggi per valutare quale riproducesse meglio una condizione di modo misto, giungendo a preferire la legge lineare dovuta al grande contributo delle tensioni di peel nel giunto Single Lap.

## 6 Applicazione: Rinforzo di un montante di sospensione

L'impiego di adesivi strutturali sta trovando sempre più spazio nell'industria automotive perché è in linea con le logiche di alleggerimento sempre più importanti per questioni di material replacement e di sostituzione del sistema di propulsione. In questa sezione si vogliono valutare i vantaggi in termini di rigidità e di carico di collasso ottenibili dal rinforzare un montante di sospensione con una patch in composito a matrice vinilestere e fibra continua unidirezionale. Lo studio verrà condotto tenendo presente che il sistema montante – adesivo – patch deve rispettare i requisiti di ingombro definiti dal black box del progetto di partenza, le interfacce con gli altri componenti, i giochi e le interferenze. In particolare, si utilizza come caso studio una sospensione Multilink installata su un'Alfa Romeo Stelvio (Figura 6.1).



*Figure 6.1 Architettura della sospensione posteriore dell'Alfa Romeo Stelvio*

Una sospensione ha diverse funzioni da assolvere, in particolare deve collegare la ruota alla scocca, permettendo il moto della ruota attorno al proprio asse, assorbire e smorzare le forze provenienti dalle irregolarità stradali e le sollecitazioni provocate dalle manovre al fine di preservare l'integrità della struttura ed aumentare il comfort di marcia. Infine, deve consentire la sterzata delle ruote nel caso di sospensione anteriore. Per immagazzinare e dissipare l'energia la ruota e la scocca devono subire un movimento relativo secondo le traiettorie permesse dai link della sospensione, in modo da garantire la

posizione corretta del pneumatico rispetto al terreno. Dagli angoli tra pneumatico e terreno dipendono i carichi che il pneumatico è in grado di trasmettere.

La scelta dell'architettura del sistema sospensivo (McPherson, Quadrilatero, Multilink, Twist beam) dipende dal segmento dell'auto su cui dovrà essere montata e dal tipo di assale (anteriore o posteriore). Ognuna di esse è in grado di offrire diverse performance in termini di resistenza e di trasferimento di vibrazioni e rumore, e di solito viene individuato un compromesso tra costo e performance.

Una sospensione Multilink permette di ottenere a scapito di complicità costruttive migliori performance in termini di comportamento direzionale e di comfort. Il collegamento ruota – scocca nella configurazione classica è ottenuto tramite 5 aste in modo da vincolare 5 gradi di libertà della ruota e lasciare libero soltanto lo scuotimento. Questa configurazione è impiegata principalmente in berline o auto di segmento D o superiore. La sospensione multilink classica può essere vista come una sospensione a doppio quadrilatero in cui i due bracci sono costituiti ognuno da una coppia di aste. La sospensione multilink individua un asse di sterzo in modo virtuale ovvero le coppie di aste sono di dimensione inferiore a quella necessaria a raggiungere i due punti che definiscono fisicamente l'asse di sterzo. L'asse di sterzo, di configurazione variabile rispetto allo scuotimento ed ai carichi applicati, è l'asse attorno al quale ruotano di moto di rivoluzione la ruota ed il portamozzo a causa di una manovra di sterzata imposta dal guidatore o dalle condizioni dinamiche negli assali sterzanti, oppure a causa del moto verticale della ruota o del moto di rollio negli assali posteriori non sterzanti. Le aste 1, 2, 3 e 4 (figura 6.2) individuano l'asse di sterzo mentre l'asta 5 blocca il moto di rotazione del montante rispetto all'asse di sterzo, condizione che si desidera se si impone in progettazione un angolo di convergenza nullo (angolo tra asse longitudinale auto e piano medio ruota).

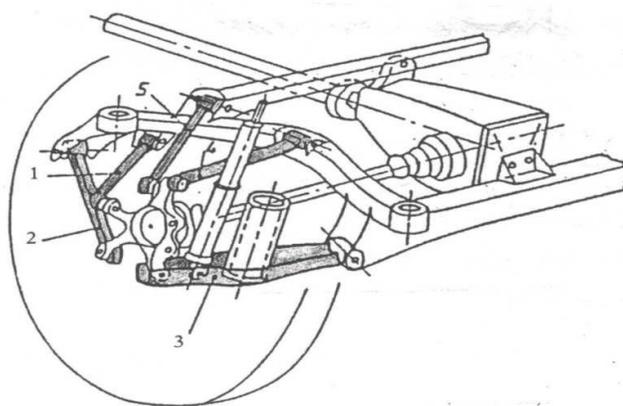
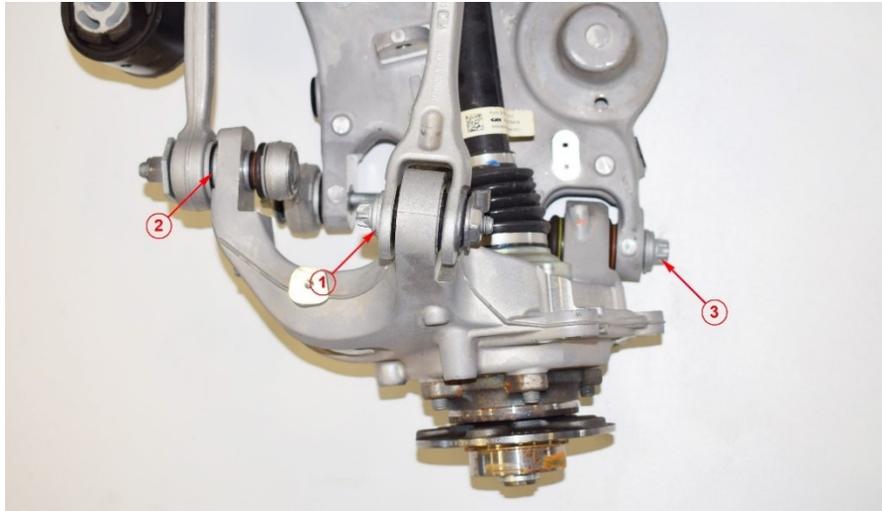


Figure 6.2 Schema sospensione multilink

Tra i vantaggi dell'uso di questa architettura troviamo la possibilità di calibrare la variazione degli angoli di convergenza sotto carico longitudinale o laterale in modo da ottenere un recupero dell'angolo di convergenza. Questo permette di ottenere un comportamento autosterzante che dipende dalle forze trasversali in gioco, particolarmente importante quando si vuole favorire la stabilità del veicolo aumentando il comportamento sottosterzante (ad esempio nelle condizioni di incipiente testacoda). Inoltre, si ottiene buona elasticità longitudinale della sospensione senza variazioni angolari della ruota poiché i link sono meno rigidi dei bracci e il recupero dell'angolo di camber in scuotimento. Quest'ultimo aspetto è particolarmente importante perché in curva la ruota tende ad incrementare l'angolo di campanatura verso l'esterno, in questo modo si riduce la capacità di scambiare forza laterale tra pneumatico e terreno e di conseguenza la possibilità di contrastare gli effetti inerziali (se ho recupero di camber nullo la ruota si inclinerà di un angolo pari all'angolo di rollio) peggiorando la stabilità in curva del veicolo. Questa tipologia di sospensione permette, grazie al numero di elementi di cui è composta, di calibrare i parametri elastocinematici in modo indipendente l'uno dall'altro.

Tra gli svantaggi troviamo l'elevata complessità costruttiva e l'elevato costo, oltre alla necessità di una messa a punto onerosa per gestire al meglio i recuperi di angolo di camber e di convergenza.

La sospensione presa in esame (figura 6.3) è una sospensione posteriore, variante della classica multilink in cui le due aste inferiori sono sostituite da un braccio ad H. Il punto superiore del montante è collegato al telaio (ovvero l'assale trasversale) con un braccio trasversale mentre all'estremità laterale vengono imbullonati un braccio che offre un ulteriore collegamento al telaio ed una biella di collegamento tra questo punto e il braccio inferiore. La sede della molla è ricavata sul braccio ad H ed il corpo ammortizzatore è collegato al perno esterno del braccio. Il telaio è poi collegato alla scocca tramite quattro tasselli elastici.



*Figure 6.3 Dettaglio dei punti di collegamento del montante*

Il montante si interfaccia a tutti i componenti della sospensione, quindi trasferisce tutti i carichi che agiscono sul sistema. Nella sospensione il montante è il componente più caricato, per questo motivo è un componente di forma tozza con sezioni importanti che ha il compito di:

- 1) Bloccare in direzione assiale il cuscinetto porta mozzo
- 2) Sostenere e fissare la pinza freno
- 3) Fissare il braccio oscillante
- 4) Sostenere il gruppo ammortizzatore
- 5) Negli assali anteriori, permettere la manovra tramite la leva sterzo

Tipicamente la realizzazione del montante avviene per fucinatura (acciaio) o fusione (ghisa). Tra le vetture di segmento maggiore non è raro trovare applicazioni in lega leggera.

In questa sezione si vuole vedere quali vantaggi si ottengono in termini di rigidità e carico di collasso rinforzando il montante sopra descritto con una patch di composito, in particolare questa tecnologia ha diversi vantaggi

- Maggiori prestazioni offerte a parità di incremento di sezione rispetto all'utilizzo dei materiali classici
- Minor peso a parità di incremento di sezione rispetto all'utilizzo dello stesso materiale
- I compositi possono essere fusi in forme complesse, riducendo il numero di pezzi rispetto al metallo

- Possibilità di aggiungere la patch anche in un momento successivo alla produzione del montante, ad esempio nel caso di non raggiungimento dei requisiti in fase di qualifica permette di incrementare le performance aggiungendo una stazione alla linea produttiva anziché ritornare alla fase di progettazione con elevata riduzione dei costi di progettazione, oppure permette l'impiego dello stesso componente per applicazioni in cui sono richiesti target superiori, modificando i pezzi esistenti
- Possibilità di integrazione all'interno del processo produttivo, sfruttando ad esempio le eventuali fasi in temperatura per ridurre il tempo di cura dell'adesivo o di polimerizzazione della patch
- Possibilità di automatizzare il processo
- Possibilità di sfruttare la variabilità di materiale della patch offerte dal mercato per raggiungere i target desiderati (materiale matrice, materiale fibre, lunghezza fibre, disposizione fibre, tipo di fibre)

Nel caso in esame si è scelto un composito laminato a matrice termoindurente (vinilestere) rinforzata con fibre di carbonio unidirezionali, le patch sono realizzate con stampaggio a compressione e le caratteristiche sono riassunte nella seguente tabella:

$\rho \left( \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right)$	$R_m$ (Mpa)	$E_1$ (Mpa)	$E_2$ (Mpa)	$\nu_{12}$	$G_{12}$ (Mpa)	$G_{13}$ (Mpa)	$G_{23}$ (Mpa)
1,45	1400	100000	10000	0,09	4000	2000	2000

Le fibre sono costituite da strati di grafite sovrapposti e compattati posti parallelamente all'asse fibra. Per dare vantaggi il composito deve presentare una quantità di fibra non inferiore al 30% altrimenti la rottura avviene per deformazione ammissibile raggiunta dalla matrice. Al contrario, se il contenuto di fibre è superiore al 30% la matrice ha soltanto il compito di dare la forma e trasferire il carico alle fibre, che hanno il compito di sostenerlo. Le fibre lunghe garantiscono maggiore resistenza, rigidità e tenacità perché la rottura del composito avviene per rottura delle fibre e non per decoesione fibra – matrice. Le lamine sono costituite da fibre unidirezionali immerse in una matrice di vinilestere e sono compattate in una pressa secondo lo schema *cross – ply* ovvero con disposizione alternata  $0^\circ - 90^\circ$ . Questo schema è stato scelto perché le lamine offrono il massimo della resistenza nella direzione delle fibre ed il montante è sollecitato dai diversi link sia nella direzione dell'asse del montante sia lungo

l'asse z del sistema di riferimento vettura. Il laminato complessivo è costituito da 8 lamine di spessore 0,25 mm ciascuna, per uno spessore complessivo della patch di 2 mm (figura 6.4). Il laminato risultante avrà comportamento elastico ortotropo laminare, questo comporta il fatto che le lamine saranno in condizione di tensione piana e il comportamento elastico sarà descritto dalla relazione matriciale:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{21}/E_2 & -\cancel{\nu_{31}/E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\cancel{\nu_{32}/E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\cancel{\nu_{13}/E_1} & -\cancel{\nu_{23}/E_2} & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \mathbf{0}$$

Dove la direzione 3 è la direzione in cui vengono staccate le plies.

$\nu_{13}$  e  $\nu_{23}$  sono i coefficienti di Poisson posti a 0 poiché una sollecitazione importante nella direzione di sovrapposizione causa una decoesione tra le lamine e non una contrazione del laminato nella direzione trasversale.

$G_{13}$  e  $G_{23}$  possono essere utilizzati per modellare la deformazione a taglio nella direzione della sovrapposizione.

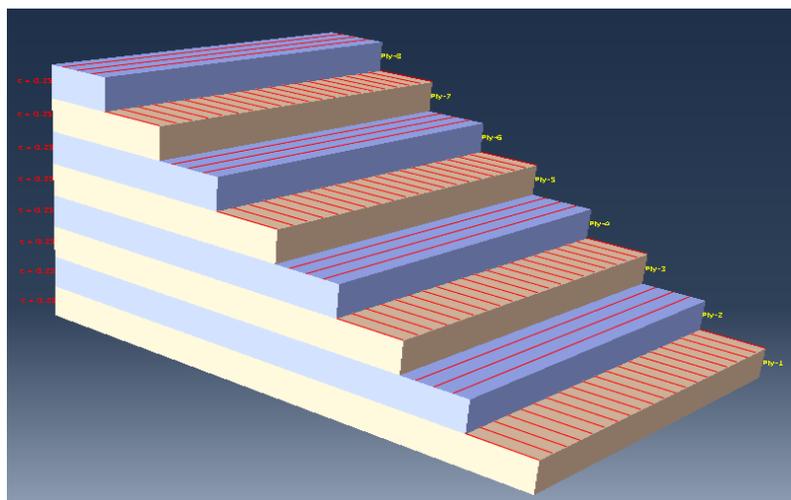


Figure 6.4 Dettaglio laminato fibre UD

I compositi a matrice termoplastica vengono trattati principalmente con il processo di termoformatura (figura 6.5). In essi non avviene alcuna reazione chimica ma i fogli staccati vengono preliminarmente riscaldati e, per via delle alte temperature, la viscosità della matrice diminuisce rendendo deformabili i fogli inizialmente rigidi. Successivamente, queste lastre malleabili vengono inserite negli stampi freddi che aumentano la viscosità del materiale fino ad irrigidirlo nella forma finale dello stampo (consolidamento). Infine si pone la patch realizzata con questa tecnologia sullo strato adesivo per permettere l'adesione ed il processo di cura a temperatura ambiente o ad alte temperature.

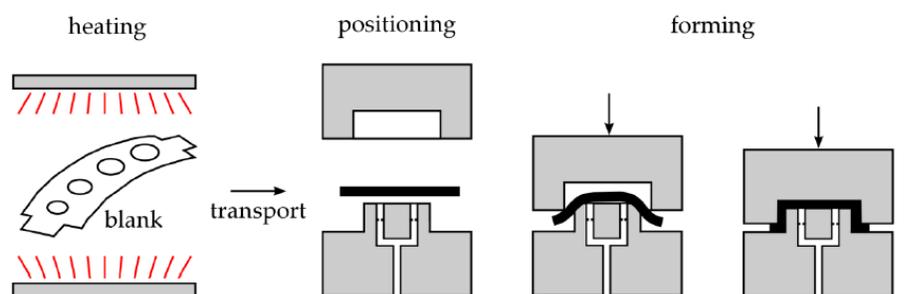


Figure 6.5 Schema del processo di termoformatura per un laminato a matrice termoplastica

I compositi a matrice termoindurente vengono forniti in nastri e sono inizialmente malleabili perché in uno stato iniziale della polimerizzazione. In questo caso i fogli di composito con fibre pre-impregnate vengono inseriti in stampi caldi. Nel caso di termoindurenti non avviene la fase di pre-riscaldamento a causa del fatto che la temperatura ha un ruolo diverso rispetto al caso di termoplastico. Infatti, nello stampaggio a compressione SMC utilizzato per produrre la patch in esame, si dispongono i fogli nello stampo secondo le quantità e l'orientamento definiti in fase di design. Gli agenti che causano la polimerizzazione, ovvero la creazione di legami covalenti tra le catene polimeriche, sono il calore fornito dagli stampi caldi ( $\approx 140^\circ$ ) e la pressione causata dalla chiusura degli stampi (compresa tra 60 – 100 bar). La patch costituita da due gusci viene posta successivamente sullo strato adesivo per permettere il collegamento con il montante.

I compositi in termoindurente permettono l'utilizzo di un'altra tecnologia per la realizzazione del rinforzo: i fogli malleabili vengono disposti in più strati ad avvolgere la zona di montante che si vuole rinforzare, successivamente viene utilizzato un sacco a vuoto per compattare il sistema e dare una

pressione di 1 *bar*. Infine, si pone il sistema montante – adesivo - lamine in autoclave, questo impone una pressione costante di circa 8 – 9 *bar*, che compatta le lamine, ed una temperatura crescente in modo graduale fino ad una temperatura ottimale per permettere la cura dell'adesivo e la polimerizzazione del composito. Questa tecnologia fornisce un ottimo risultato perché permette una cura dell'adesivo ad alte temperature (più efficiente), inoltre il rinforzo ricopre il montante in modo continuo e non c'è il rischio di un'adesione disomogenea dovuta a errori nella fase di termoformatura. Tuttavia, questa richiede l'utilizzo di un'autoclave, il che rende il processo costoso e non facilmente automatizzabile a causa dell'utilizzo del sacco a vuoto. Questa tecnologia non è adatta ai termoplastici che oltre ad essere rigidi quindi non adatti ad avvolgere il componente, se soggetti alle alte temperature dell'autoclave non irrigidiscono, ma al contrario liquefanno.

L'utilizzo di un composito a matrice termoindurente presenta diversi vantaggi rispetto all'utilizzo di una matrice termoplastica, che porta a preferirli per l'applicazione in esame: gli incollaggi aderiscono ai termoindurenti anche senza preparazione, mentre i termoplastici richiedono trattamenti superficiali per aumentare l'energia superficiale. I termoindurenti sono, inoltre, più resistenti a causa dei legami covalenti forti tra le catene e non subiscono il problema dell'idrolisi, a cui sono soggetti molti termoplastici, tra cui il diffuso PA66, per cui l'umidità spezza le catene abbattendo le proprietà meccaniche del composito.

I termoindurenti hanno lo svantaggio di non poter tornare allo stato precedente se riscaldati, come avviene per i compositi termoplastici; inoltre i legami deboli intercatena conferiscono una maggiore tenacità al composito a matrice termoplastica. I tempi necessari a raggiungere la configurazione finale ( $\approx 1 \text{ min}$ ) sono inferiori per i compositi a matrice termoplastica perché essi incrementano la viscosità semplicemente abbassandone la temperatura, al contrario quelli a matrice termoindurente necessitano di un tempo maggiore (5 – 10 min) per raggiungere un certo livello di polimerizzazione che garantisce il raggiungimento delle performance desiderate. I termoindurenti vengono conservati in frigo per evitare che la polimerizzazione raggiunga livelli troppo avanzati a temperatura ambiente.

In prima battuta si vuole valutare se l'utilizzo di una patch causa un aumento della rigidità del sistema nel punto di attacco 15 (Figura 6.6). Questo punto risulta molto sollecitato in tutte le 3 direzioni del sistema di riferimento autovettura poiché i due link collegano il punto 15 sia al telaio che al braccio ad H. La rigidità di questo punto è problematica a causa della configurazione a sbalzo particolarmente snella ed allungata del collegamento ad esso.

## 6.1 Analisi di rigidezza

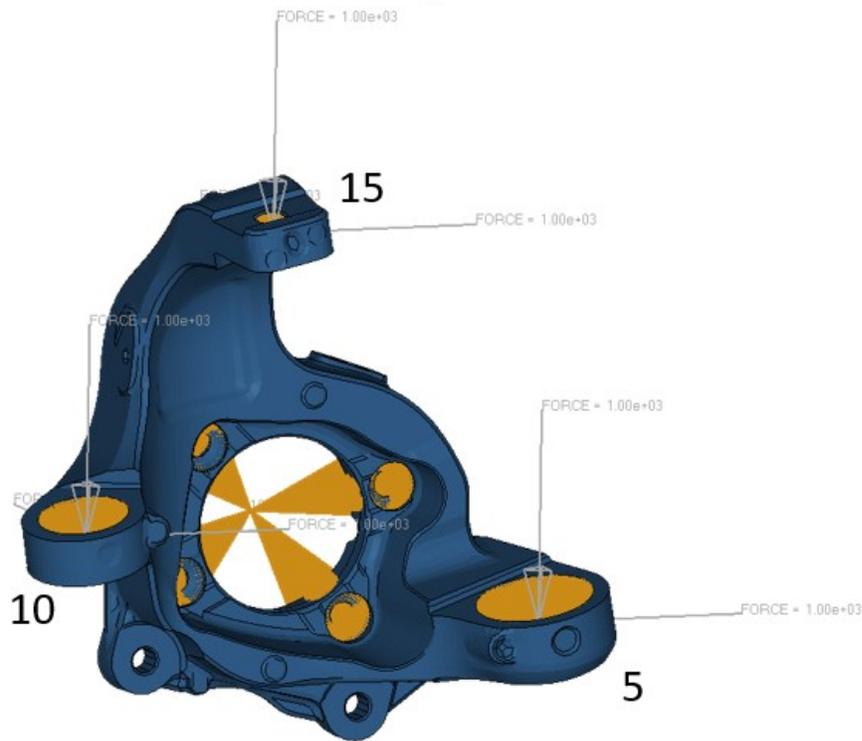


Figure 6.6 Rigidezze HardPoints montante Alfa Romeo Stelvio

Il materiale con cui il montante è realizzato è una lega di alluminio con le caratteristiche riportate di seguito

Material	Rm [MPa]	Rp <sub>0.2</sub> [MPa]	EI [% ]
Aluminium Al Si 7 Mg 0.3	270	220	6

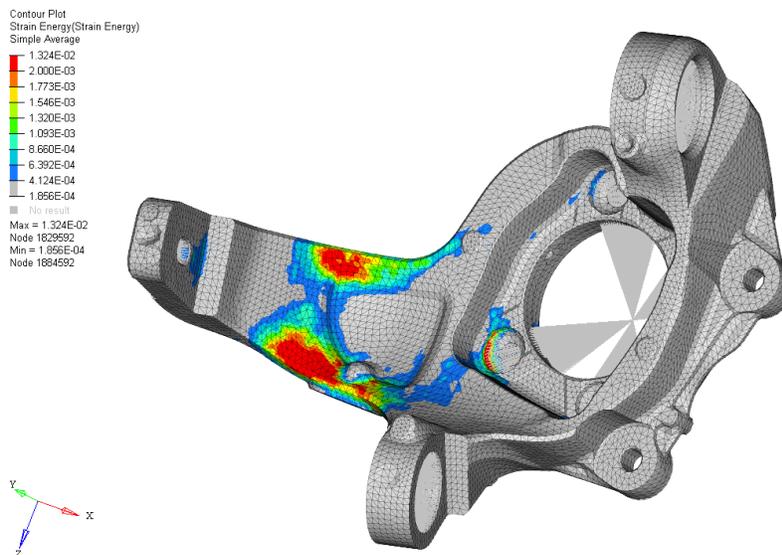
Per valutare la rigidezza dei punti di attacco vengono riprodotte le condizioni di vincolo del montante, che è imbullonato all'anello esterno del cuscinetto portamozzo di 2° generazione. Viene imposto un carico esplorativo di 1000 N nelle 3 direzioni del sistema di riferimento vettura, e valutato lo spostamento nella direzione corrispondente. In particolare, per il montante realizzato in lega si ottengono le rigidzze, espresse come rapporto rigidezza su massa componente:

Soluzione iniziale (senza patch di rinforzo)	
Rigidezza lungo x $\left(\frac{N}{mm \cdot Kg}\right)$	1375
Rigidezza lungo y $\left(\frac{N}{mm \cdot Kg}\right)$	7056
Rigidezza lungo z $\left(\frac{N}{mm \cdot Kg}\right)$	2588

Se si valuta la mappa della densità di energia di deformazione

$$\rho = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y + \sigma_z \varepsilon_z + 2\sigma_{xy} \varepsilon_{xy} + 2\sigma_{xz} \varepsilon_{xz} + 2\sigma_{yz} \varepsilon_{yz})$$

si vede come un'elevata deformazione si ha nel collegamento a sbalzo tra il centro del montante e il punto 15 e nel foro a causa delle elevate tensioni dovute alle condizioni di vincolo (Fig. 6.7).



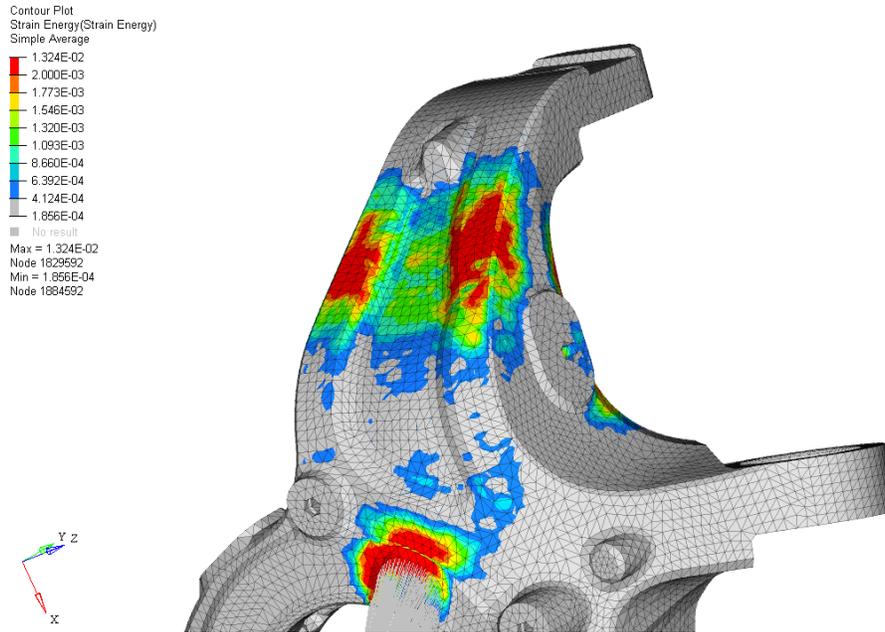


Figure 6.7 Strain energy density montante

Per aumentare la rigidità è necessario ridurre la deformazione che subisce, ad esempio irrigidendo il sistema utilizzando un rinforzo al collegamento del punto 15. Il sistema risultante, utilizzando una patch costituita da due semi – gusci che si avvolgono attorno al montante è rappresentato nella seguente figura 6.8.

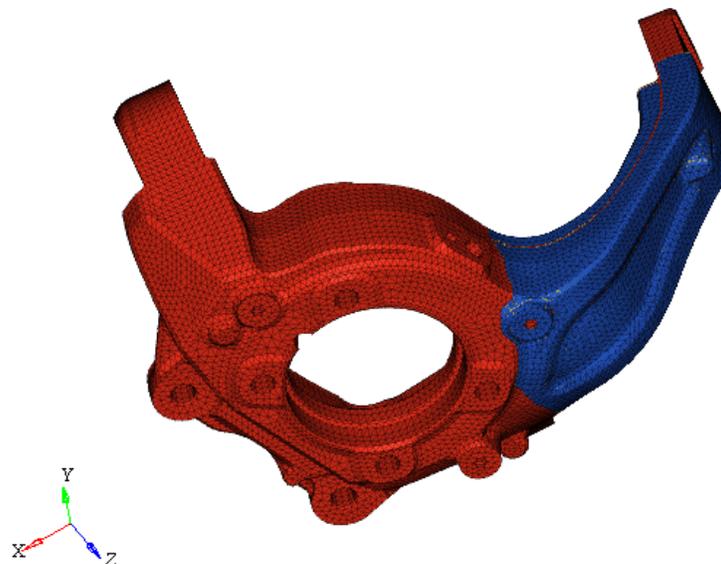


Figure 6.8 Configurazione patch di rinforzo a 2 semi - gusci

La densità di energia di deformazione diminuisce di due ordini di grandezza passando da  $\sim 10^{-2} MPa$  a  $\sim 10^{-4} MPa$ , infatti si ottiene una tensione massima dell'ordine di  $10^1 MPa$  e una deformazione massima dell'ordine di  $10^{-5}$ . Anche intorno al foro la densità di energia di deformazione diminuisce di un ordine di grandezza ( $\sim 10^{-3} MPa$ ), nonostante quella zona non sia direttamente collegata alla patch di rinforzo. Lo stato tensionale diminuisce nel montante poiché gli sforzi sono trasferiti alla patch, le cui fibre assolvono alla funzione di sostegno del carico.

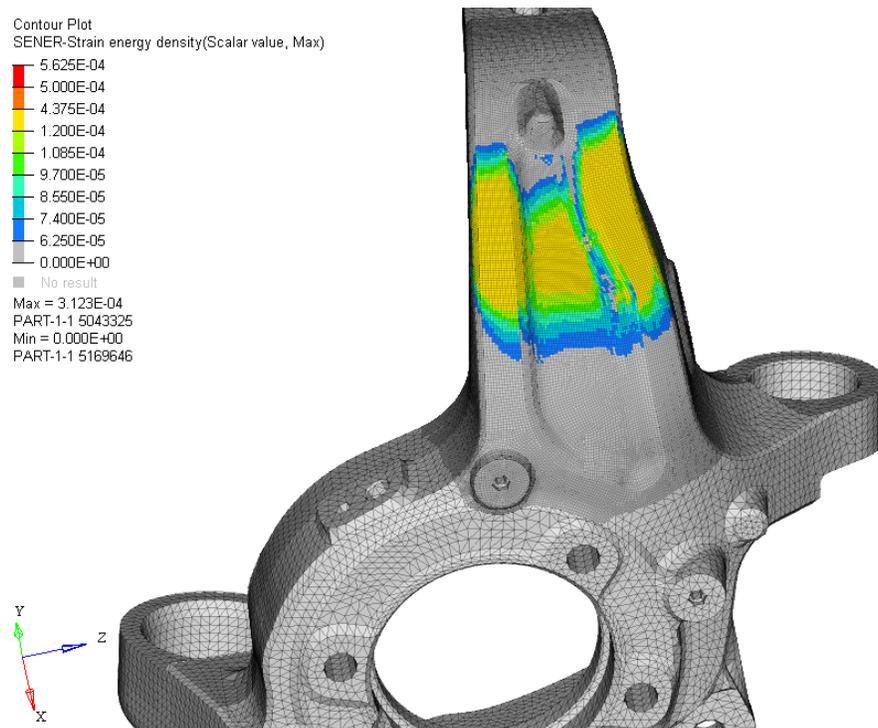


Figure 6.9 Strain energy density nella patch di rinforzo

Si sottolinea che con questo carico esplorativo di  $1000 N$  non si osserva il danneggiamento dell'adesivo.

La patch permette di incrementare le caratteristiche di rigidità del montante in tutte le 3 direzioni con un aumento di peso, causato dall'inserimento dell'adesivo e, soprattutto, della patch all'interno del sistema del 3%.

Soluzione finale con patch di rinforzo in laminato	
Rigidezza lungo x $\left(\frac{N}{mm \cdot Kg}\right)$	1769
Rigidezza lungo y $\left(\frac{N}{mm \cdot Kg}\right)$	8010
Rigidezza lungo z $\left(\frac{N}{mm \cdot Kg}\right)$	2865

In particolare, considerando le rigidezze normalizzate rispetto al peso si ottengono incrementi di rigidezza nelle 3 direzioni del 29% lungo x, del 14% lungo y e dell'11% lungo z.

## 6.2 Analisi del collasso

Per carico di collasso si intende il carico massimo che si raggiunge prima che in una regione estesa del componente si arrivi ad una deformazione equivalente pari alla deformazione a rottura del materiale. Spesso questa condizione coincide con il carico massimo della curva forza – spostamento, tuttavia questo non è sempre vero ed in generale dipende dalla geometria del componente, dalla direzione e dal punto in cui si sollecita il componente. Le valutazioni sul carico di collasso vengono fatte quando si vuole valutare il carico massimo prima di raggiungere un'eccessiva deformazione plastica del componente, che porta ad una variazione irreversibile della geometria del componente. In questo paragrafo si vuole valutare il carico di collasso del montante e del montante rinforzato per valutare se un eventuale inserimento di una patch di rinforzo ne incrementi il valore. In particolare, si vuole studiare il carico di collasso nel punto più critico (punto 15) nelle direzioni dei due link a cui il punto è collegato. Nel caso di montante rinforzato possiamo estendere il concetto di carico di collasso, infatti potrebbe succedere che la condizione di deformazione uguale alla deformazione di rottura nel montante possa non verificarsi prima della rottura della patch o del distacco della stessa per cedimento dell'adesivo. In questo caso si prende come carico di collasso quello in cui si verifica la condizione di distacco o di rottura della patch poiché, in seguito alla rottura e dopo una certa fase di transitorio, si continua a seguire la curva forza – spostamento caratteristica del montante non rinforzato, caratterizzata da valori di carico inferiori.

Lo schema della sospensione e i sistemi di riferimento locali associati ai due link sono riportati nella figura 6.10.

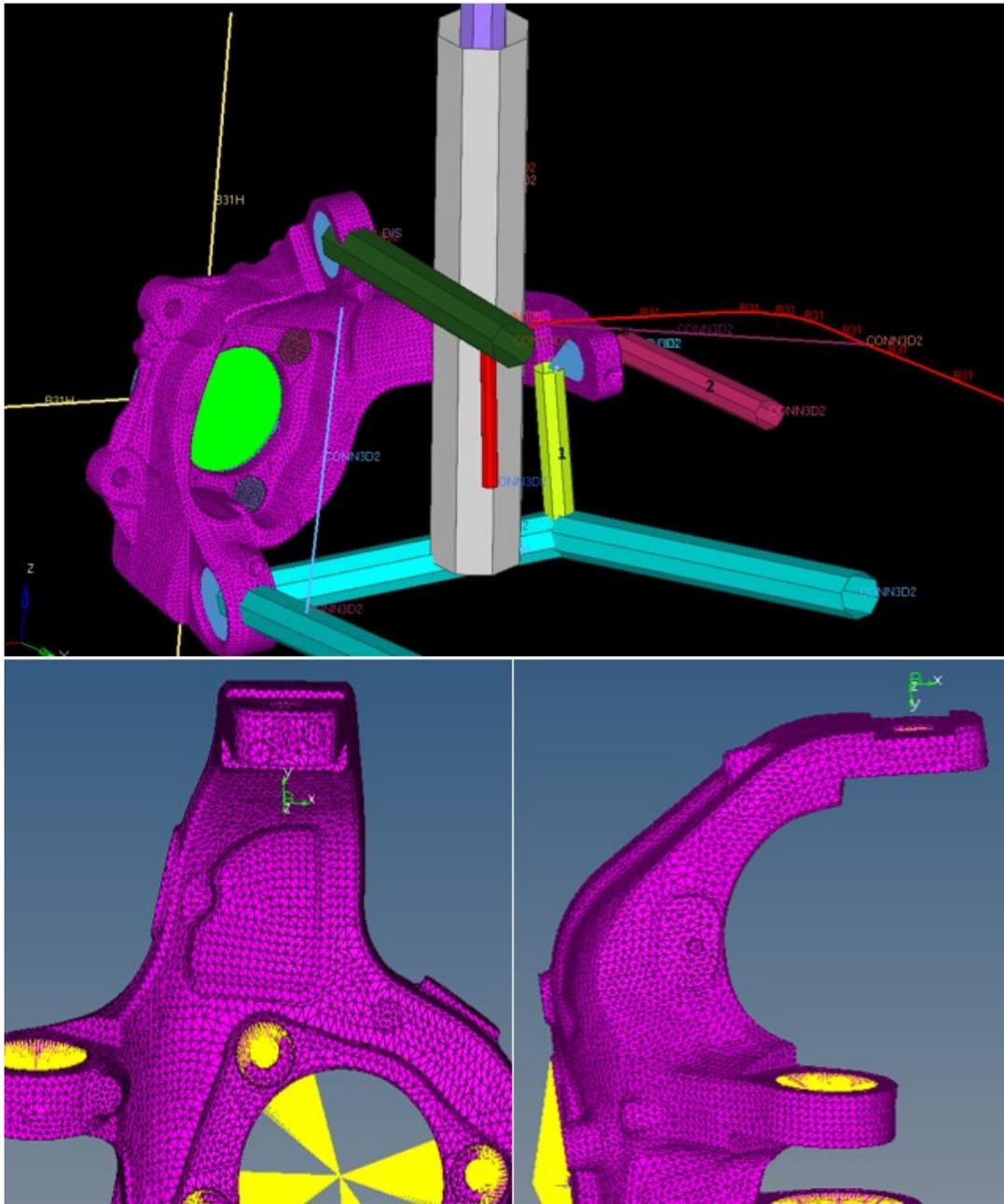


Figure 6.10 Architettura della sospensione e sistemi di riferimento locali

Sollecitando il sistema montante con uno spostamento imposto lungo la direzione del link 1 si ottiene un carico di collasso di  $55,2 \text{ kN}$ . Nella figura seguente si mostra la mappa della deformazione plastica equivalente al time step in cui si raggiunge questo carico, in rosso è evidenziata la zona estesa per la quale si ha una deformazione plastica pari alla deformazione plastica a rottura del materiale  $\varepsilon_m^{pl} = \varepsilon_m - \varepsilon_m^{el} = 5,8\%$ . Si vede come, in queste condizioni, una grande zona del montante si trova in

plasticità poiché la tensione equivalente di Von Mises è superiore alla tensione di snervamento del materiale ( $R_{p0,2} = 220MPa$ ). Per spostamenti superiori a quello corrispondente al carico di collasso si potrebbe verificare un leggero aumento di carico prima della diminuzione dello stesso, per via del fatto che in questa condizione solo una certa frazione di sezione resistente ha raggiunto la deformazione a rottura.

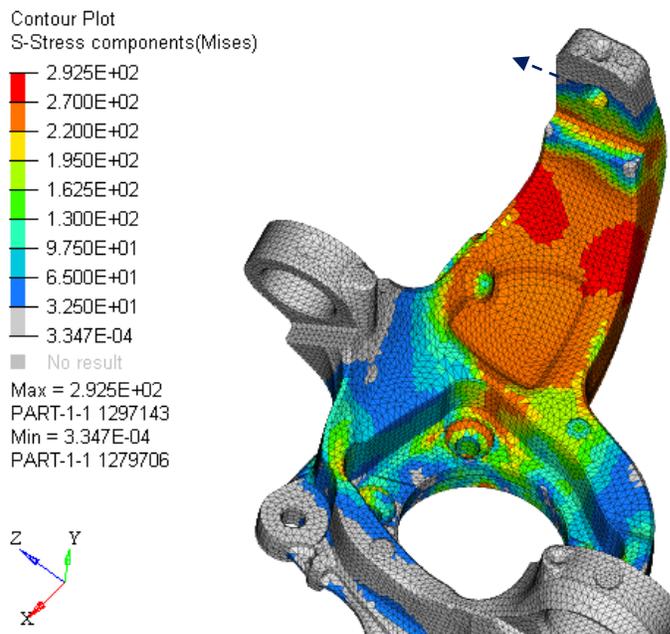
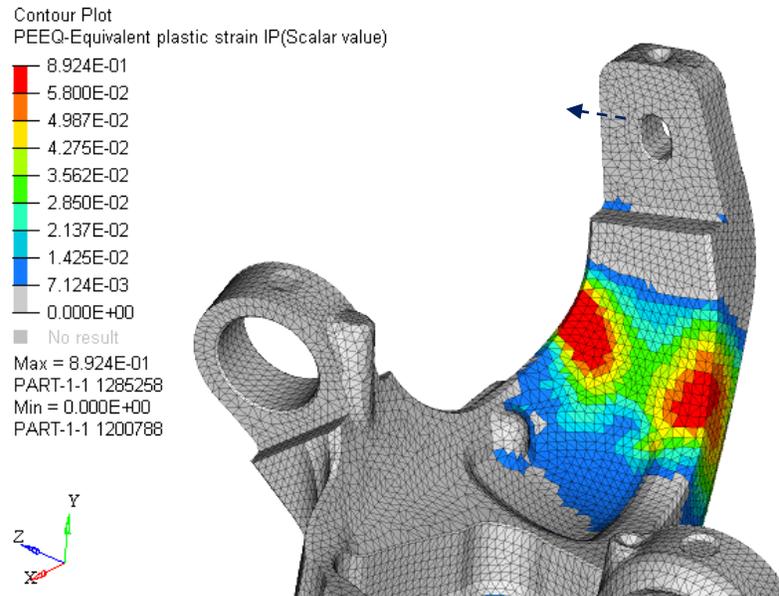


Figure 6.11 PEEQ e stress sul montante non rinforzato

Nel caso in cui si rinforzi il montante con una patch di rinforzo di ottiene un carico di collasso di 78,6 kN. Raggiunto questo carico, la deformazione plastica dell'alluminio non ha ancora raggiunto il valore di deformazione plastica a rottura ma arriva ad un valore massimo del 4% (figura 6.12).

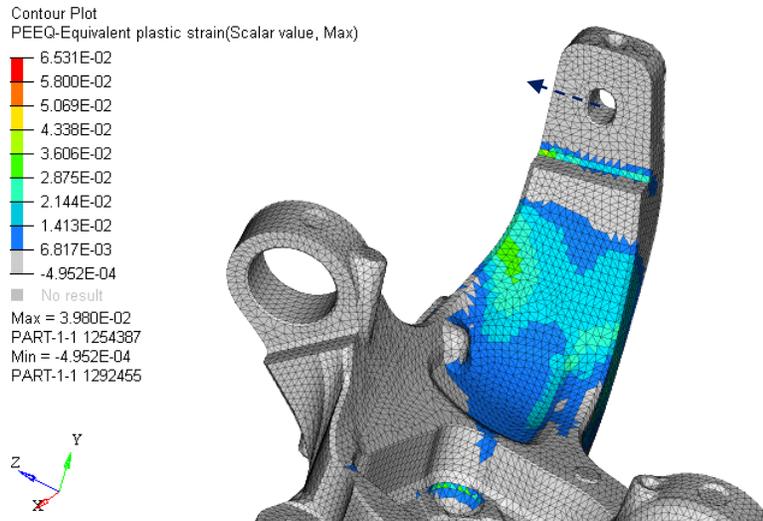


Figure 6.12 PEEQ montante rinforzato con patch

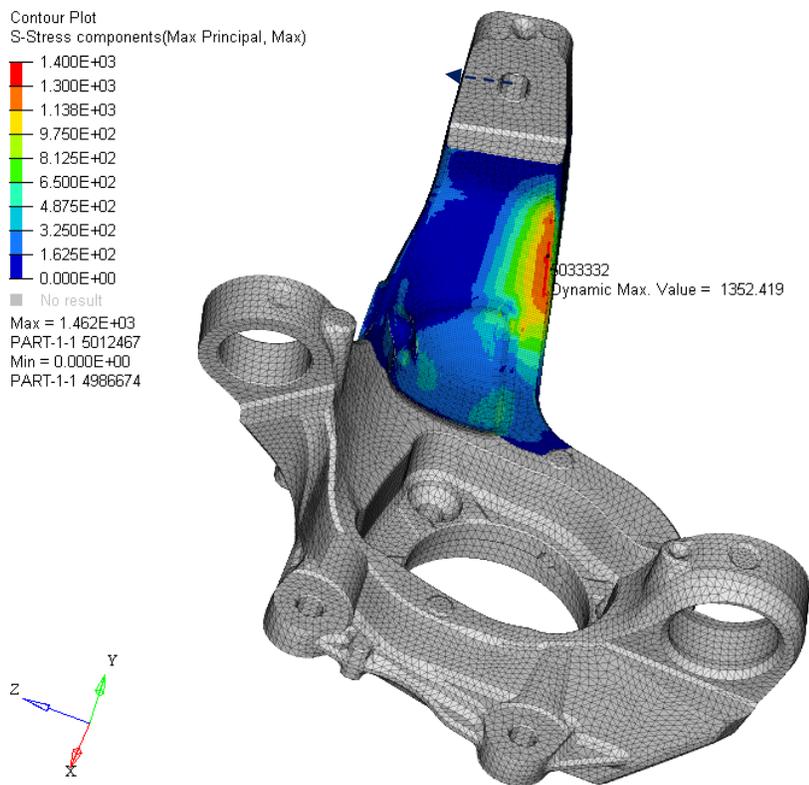


Figure 6.13 Stato tensionale sulla patch in composito

Gli stress sulla ply più sollecitata della patch (con orientamento delle fibre parallelo alla direzione di applicazione del carico) sono tali da non raggiungere la tensione di rottura del laminato di  $R_m = 1400 \text{ MPa}$  (figura 6.13) pertanto possiamo concludere che utilizzando un montante rinforzato con patch in composito si ottiene un miglioramento in termini di carico di collasso nella direzione del link 1 del 42,4 %. Questo aumento, seppur considerevole, è limitato dal fatto che il collasso non è determinato dalla rottura della patch ma dal degrado dell'adesivo, che causa il distacco della patch in composito al raggiungimento di un carico di 78,6 kN. Come mostrato nella figura 6.14, al momento in cui si raggiunge il carico di collasso, una grande porzione di adesivo è in stato di incipiente eliminazione. Raggiunto il carico di collasso si può ipotizzare che il comportamento del montante in termini di forza spostamento sia, dopo una fase di transitorio, assimilabile a quella del montante senza rinforzo.

Si evidenzia che questi risultati sono raggiungibili idealmente nel caso in cui il processo di formatura delle patch, di deposizione e cura dell'adesivo e di posizionamento delle patch siano eseguiti senza alcun errore di processo, con uno spessore uniforme dell'adesivo lungo la sovrapposizione. Inoltre, le proprietà del composito evidenziate sono raggiungibili nella direzione delle fibre, quindi se le plies sono orientate con un certo angolo rispetto alla direzione di applicazione del carico le proprietà sono inferiori al crescere di tale angolo, raggiungendo il minimo delle proprietà per le plies orientate a 90°. Questo è dovuto al fatto che quando la direzione del carico è parallela alla direzione delle fibre la matrice si deforma trasferendo il carico alle fibre, pertanto soltanto le fibre hanno il compito di sostenere il carico. Quando le fibre sono poste a 90° rispetto alla direzione di applicazione del carico la matrice interposta tra una fibra e l'altra assume anche ruolo strutturale dovendo sostenere il carico, questo causa la diminuzione delle proprietà della lamina. Inoltre, le fibre di carbonio sono caratterizzate da tanti fogli di grafite sovrapposti, più questi piani sono allineati alla direzione longitudinale della fibra e più sono compatti maggiori saranno le proprietà delle fibre. Sui piani grafitici si hanno principalmente legami covalenti, mentre tra i piani si formano legami più deboli. Per questi motivi, generalmente, la nucleazione della cricca avviene nelle lamine orientate con angolo maggiore rispetto alla direzione di applicazione del carico. Esula dallo scopo di questo studio analizzare le dinamiche di rottura del laminato pertanto si utilizza come criterio di resistenza quello della massima tensione principale, prevedendo rottura della patch quando nella ply più sollecitata la massima tensione principale eguaglia la tensione di rottura.

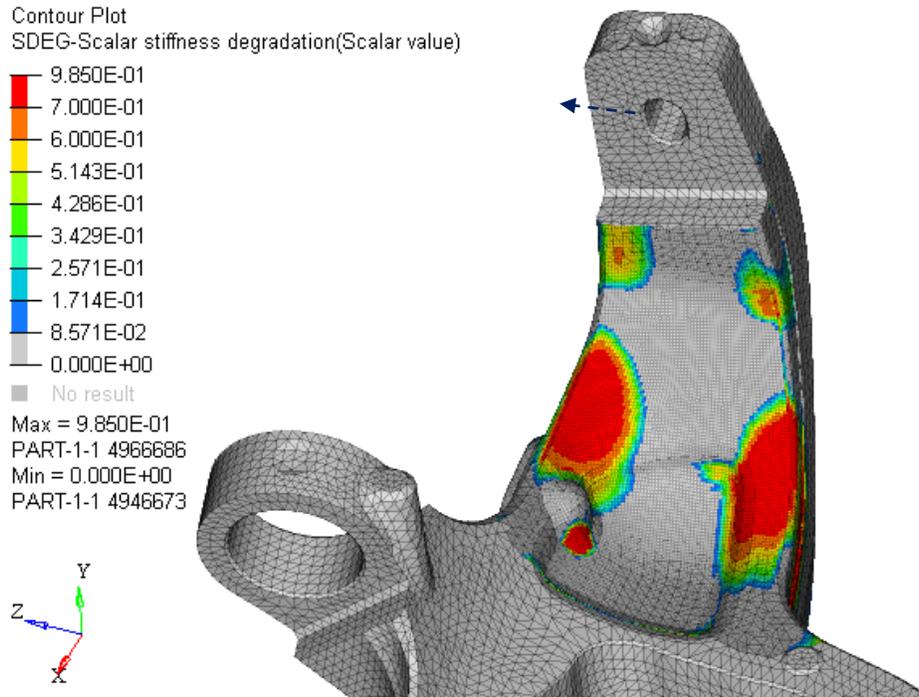


Figure 6.14 Degrado adesivo al momento del raggiungimento del carico di collasso

Nel caso di sollecitazione lungo il link 2 la soluzione senza patch di rinforzo collassa ad un carico di 41,8 kN.

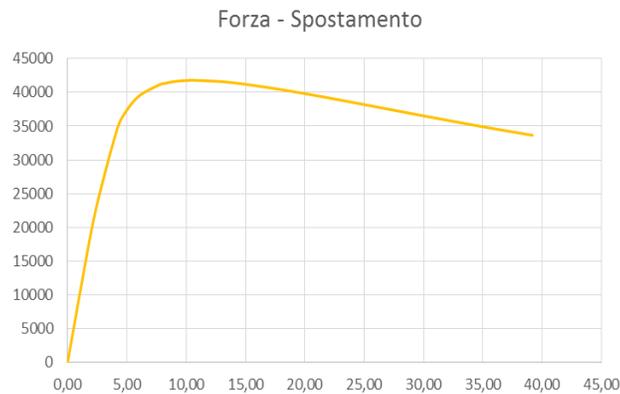


Figure 6.15 Curva Forza - Spostamento direzione link 2

In questa condizione una grande zona è in snervamento e vicina alla tensione di rottura (figura 6.16).

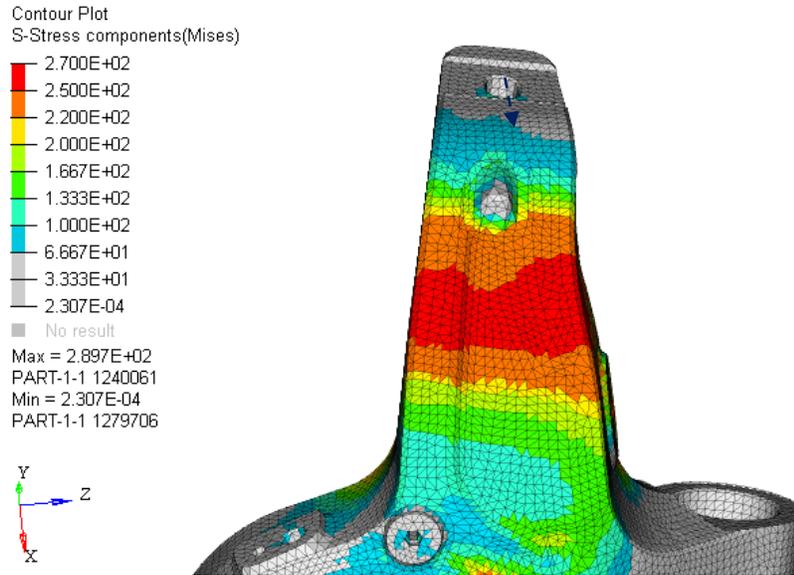


Figure 6.16 Stato tensionale in condizione di carico massimo

Utilizzando la patch in composito per rinforzare il materiale si ottiene un carico di collasso di 75,2  $kN$  che corrisponde ad un incremento dell'80% rispetto al valore iniziale. Anche in questo caso il carico massimo è limitato dal distacco della patch per degrado dell'adesivo e non dalla rottura della patch, infatti il rinforzo non raggiunge la tensione di rottura ma un valore massimo, nella ply più sollecitata, di circa 1300  $MPa$  (Fig. 6.17). La deformazione plastica massima raggiunta dall'alluminio è inferiore all'1,5% al momento del distacco.

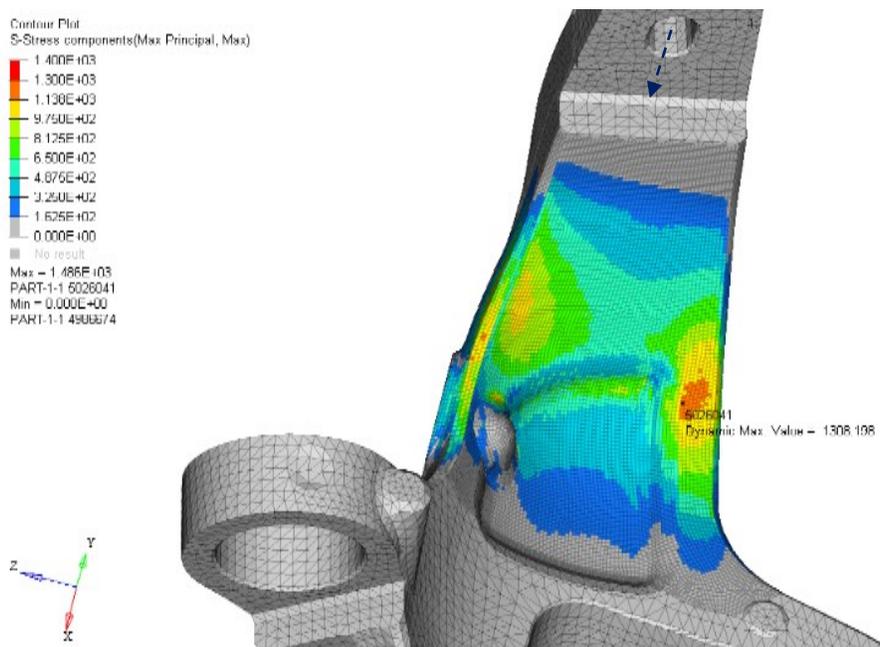


Figure 6.17 Stato tensionale nella patch al momento del distacco

Il grafico forza – spostamento (a) mostra il passaggio ideale dalla curva del sistema montante rinforzato alla curva del sistema costituito dal solo montante al momento del distacco. In realtà, il distacco graduale e differenziato delle due patch causa un transitorio che garantisce un passaggio più graduale da una curva all'altra, ipotizzato come (b), ma che non siamo in grado di vedere in simulazione perché la rottura dell'adesivo al momento del distacco (figura 6.18) causa problematiche di convergenza del calcolo.

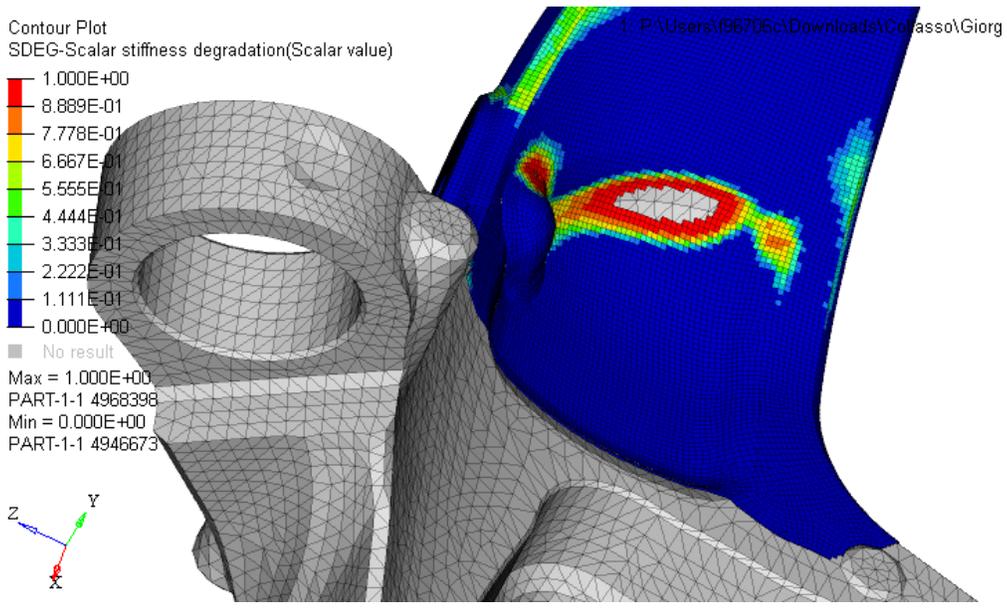
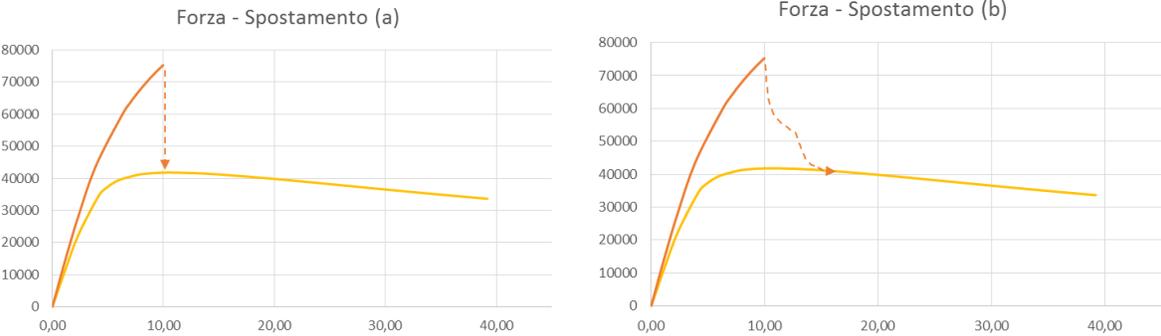


Figure 6.18 Cedimento dell'adesivo che causa il distacco della patch

## 7 Conclusioni

Lo scopo di questa tesi è stato quello di individuare delle metodologie per l'ottenimento analitico delle energie di frattura e di investigare gli effetti della forma e dei parametri della legge coesiva, fornendo infine un esempio di applicazione per evidenziare i vantaggi ottenibili dall'applicazione di questa tecnologia.

A causa dell'elevata influenza delle energie di frattura sui risultati, per tutti i tre possibili metodi utilizzati per ottenere la legge coesiva, esse si ottengono conducendo le prove Double Cantilever Beam (DCB) per il modo I ed End Notched Flexure (ENF) per il modo II. Si vogliono evitare le metodologie classiche di ottenimento delle energia di frattura perché queste richiedono elevati tempi e costi (a causa della strumentazione ottica che deve permettere di seguire una cricca in propagazione) e per via degli errori di misura associati alla complessità del processo.

Per il modo I si vogliono confrontare due metodi per l'ottenimento dell'energia di frattura senza la misura della dimensione del difetto, il metodo della teoria della trave semplice (SBT) e quello della teoria della trave corretta modificata (CBT).

Il campione Tapered Double Cantilever Beam permette di misurare l'energia di frattura senza misurare la lunghezza della cricca durante la propagazione. L'aumento dell'altezza del provino causa una diminuzione della cedevolezza che contrasta l'aumento della cedevolezza dovuto alla crescita della dimensione della cricca. Il risultato è che il rapporto  $\frac{dC}{da}$  rimane costante nonostante l'aumentare della dimensione della cricca. L'uso del metodo SBT ha il vantaggio di non dover misurare la lunghezza della cricca, e quindi di non essere soggetto agli errori che derivano da questo processo.

Se si vuole tenere in considerazione della rotazione dell'apice del difetto con il metodo CBT è inevitabile passare attraverso la misura della cricca, infatti in questo caso la derivata della cedevolezza rispetto alla dimensione del difetto non è costante. Quindi la semplificazione secondo cui l'energia di frattura è costante con  $a$  vale solo se si considera la teoria della trave semplice SBT (anche in questo caso il contributo di  $a$  è piccolo dovendo moltiplicare il termine dipendente da  $a$  per  $\frac{1}{E}$ ). Se si utilizza il metodo SBT la semplificazione operativa del non seguire la cricca si riflette in una sottostima dell'energia di frattura. Tuttavia, un approccio CBT in cui la dimensione della cricca è stimata analiticamente secondo il metodo di Krenk (testato in studi precedenti solo sul campione DCB) porta al vantaggio di poter considerare la deformabilità dell'apice della cricca nel calcolo, senza richiedere la misura della cricca

stessa. Nella fase di propagazione del difetto si osserva un valore di  $G_{Ic}$  molto vicino a quello dichiarato dal produttore. L'utilizzo del metodo CBT ha portato ad una leggera sovrastima della lunghezza di cricca iniziale che può essere dovuta o al fatto che la cricca diventa talmente sottile da non essere percepibile al microscopio oppure ad un sovradimensionamento del metodo. La stabilità di questo metodo evidenziata in questa tesi è stata rilevata anche in studi precedenti e conferma l'applicabilità del metodo e la sua ripetibilità anche con sistemi di dimensioni e materiali differenti. Si evidenzia che la varianza di questo metodo è maggiore rispetto all'utilizzo del metodo Simple Beam.

Per quanto riguarda il modo II si è valutata la bontà del metodo analitico Compliance based beam method che si basa sul calcolo di una lunghezza di cricca equivalente a parte dalla cedevolezza del campione ENF. Il valore dell'energia critica per il modo II è superiore a quello dichiarato dal fornitore, seppure all'interno della forchetta di tolleranza. Questo può essere spiegato principalmente dal fatto che lo spessore reale di adesivo per questa prova era superiore a quello nominale per via delle tolleranze di processo, e questo si riflette in valori di energia frattura superiori, in accordo con quanto evidenziato in letteratura [27]. Questo metodo fornisce una maggiore variabilità del risultato rispetto ai metodi analizzati per il modo I. Il calcolo è stato ripetuto con diverse misure della lunghezza iniziale di cricca e si è notato come un aumento della lunghezza di pre-cricca causa un incremento lineare dell'energia di frattura, questo è interpretabile considerando che se il sistema ha un difetto di maggiore entità, esso sarà in grado di offrire le stesse performances di resistenza solo qualora il materiale abbia proprietà più importanti. Il calcolo mostra, inoltre, una sensibilità elevata alla cedevolezza iniziale del campione. Se si confronta il risultato ottenuto con CBBM rispetto a quello ottenuto con altri metodi si evidenzia come il CBBM porta a valori superiori di  $G_{IIc}$ , questo dipende dal fatto che vengono tenuti in considerazione i fenomeni di dissipazione di energia per sostenere la deformazione plastica all'apice del difetto.

Gli effetti dei parametri sono diversi in funzione del tipo di prova e della legge utilizzata.

La legge lineare descrive in modo migliore il comportamento del giunto sollecitato al modo I, in questo caso il parametro che influenza maggiormente le curve forze – spostamento risultanti dal modello è l'energia di frattura  $G_{Ic}$ . Un aumento di questo parametro porta ad un aumento del carico di picco, del carico di plateau e dello spostamento a rottura. Un aumento di  $t_n^0$  causa un importante aumento della forza di picco e dello spostamento a rottura. La legge lineare è meno adatta a rappresentare il campione ENF sottoposto a modo II. In questo caso l'energia a frattura  $G_{IIc}$  ha un effetto meno importante rispetto a quello nel modo I e ristretto alla parte finale della curva. Aumentare  $t_s^0$  causa un aumento

del carico di picco e della rigidità del primo tratto. Per valori di  $t_s^0$  molto elevati si coglie la propagazione instabile osservata sperimentalmente. Incrementando  $K_{SS}$  si aumenta la pendenza iniziale ed il carico massimo.

La legge trapezoidale è adatta alla modellazione di adesivi molto duttili, per questo motivo non riproduce correttamente il comportamento dell'adesivo in esame infatti in nessuno dei provini si è osservata la rottura dell'adesivo vista sperimentalmente. L'estensione della zona a tensione costante influisce moderatamente sui risultati.

La legge esponenziale riproduce in modo meno preciso della legge lineare la curva forza – spostamento relativa al modo I (TDCB). In questo caso la tensione di picco  $t_n^0$  influenza in modo minore i risultati ottenibili dal modello. Utilizzare una legge con degrado maggiore diminuisce le previsioni di spostamento a rottura del provino. Se si utilizza una legge esponenziale e si modella un componente sollecitato al modo I il maggiore effetto è dato dal parametro di rigidità  $K_{nn}$ , infatti utilizzare un valore maggiore di questo parametro causa un aumento elevato della pendenza iniziale, del carico di picco e dello spostamento a rottura. Questa legge è molto precisa per la modellazione della curva forza - spostamento del campione ENF perché riesce a cogliere la propagazione instabile del difetto. Incrementare la tensione di picco  $t_s^0$  causa un aumento del carico di picco, della rigidità del campione e della velocità di riduzione di carico dopo aver raggiunto il carico massimo. Un incremento di  $K_{SS}$  causa gli stessi effetti di un aumento di  $t_s^0$ .

Poiché il modo I è riprodotto meglio dalla legge lineare e il modo II è riprodotto meglio dalla legge esponenziale si sono confrontate le due leggi per valutare quale riproducesse meglio una condizione di modo misto, giungendo a preferire la legge lineare per una prova Single Lap.

Infine, si è utilizzata la tecnologia degli adesivi strutturali per migliorare le proprietà di un montante di sospensione grazie al collegamento adesivo di una patch di rinforzo. I risultati hanno mostrato nel punto più sollecitato un aumento di rigidità del 29% lungo x, del 14% lungo y e dell'11% lungo z. Inoltre, si sono ottenuti miglioramenti anche in termini di carico di collasso nelle direzioni dei link della sospensione. In particolare, nella direzione del link di attacco braccio si è avuto un miglioramento a calcolo del 42% rispetto al valore iniziale, mentre nella direzione del link di collegamento all'assale si è avuto un miglioramento dell'80% rispetto al valore iniziale. In entrambi i casi la rottura è avvenuta per distacco della patch. Per eventuali studi futuri si suggerisce di investigare l'effetto che si otterrebbe in termini di fatica.

## Riferimenti

- [1] S. Ebnesajjad e A. H. Landrock, *Adhesives Technology Handbook*, William Andrew, 2008.
- [2] A. Pizzi e K. Mittal, *Handbook of Adhesive Technology. Second Edition, Revised and Expanded*, Marcel Dekker, Inc., 2003.
- [3] L. Goglio e R. D. S. G. Campilho, *Strength prediction of adhesively-bonded joints*, Taylor & Francis Group, CRC Press, 2016.
- [4] S. Cardamone, A. Bernasconi e M. Giglio, «Characterization of the 3M Scotch-Weld™ 7260 B/A epoxy adhesive by cohesive damage models and application to a full-scale bonded sub-structure» *The Journal of Adhesion*, pp. 1-32, 2019.
- [5] D. S. Dugdale, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 8, n. 2, pp. 100-104, 1960.
- [6] G. I. Barenblatt, *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, vol. 23, pp. 622-636, 1959.
- [7] R. Fernandes e R. Campilho, «Testing different cohesive law shapes to predict damage growth in bonded joints loaded in pure tension» *The Journal of Adhesion*, vol. 93, pp. 57-76, 2017.
- [8] K. M. S. e T. M. D., «The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints» *International Journal of Solids and Structures*, vol. 39, pp. 4367-4383, 2002.
- [9] ISO 25217:2009(E), *Adhesives. Determination of the Mode I Adhesive Fracture Energy of Structural Adhesive Joints Using Double Cantilever Beam and Tapered Double Cantilever Beam Specimens*.
- [10] R. Lopes, R. Campilho, F. D. Silva e a. T. Faneco, «Comparative Evaluation of the Double-Cantilever Beam and Tapered Double-Cantilever Beam Tests for Estimation of the Tensile Fracture Toughness of Adhesive Joints» *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 67, pp. 103-111, 2016.
- [11] B. Blackman, H. Hadavinia, A. Kinloch, M. Paraschi e J. Williams, «The Calculation of Adhesive Fracture Energies in Mode I: Revisiting the Tapered Double Cantilever Beam (TDCB) Test» *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 70, pp. 233-248, 2003.

- [12] ASTM D3433 – 99 (Reapproved 2012), *Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Metal Joints*.
- [13] M. de Moura, R. Campilho e J. Gonçalves, «Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints» *International Journal of Solids and Structures*, vol. 46(6), pp. 1589-1595, 2009.
- [14] T. Andersson e U. Stigh, «The stress–elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces» *International Journal of Solids and Structures*, n. 41, pp. 413-434, 2004.
- [15] X. Yangjian, L. Xiangyu, W. Xiaogui e L. Lihua, «Inverse parameter identification of cohesive zone model for simulating mixed-mode crack propagation» *International Journal of Solids and Structures*, n. 51, pp. 2400 - 2410, 2014.
- [16] R. Campilho, M. de Moura e J. Domingues, «Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single - strap repairs» *International Journal of Solids and Structures*, vol. 45(5), pp. 1497-1512, 2008.
- [17] J. Zhang, J. Wang, Z. Yuan e H. Jia, «Effect of the cohesive law shape on the modelling of adhesive joints bonded with brittle and ductile adhesives» *International Journal of Adhesion and Adhesives*, n. 85, pp. 37-43, 2018.
- [18] M. S. Islam, *Fracture and delamination in packaging materials. A study of experimental methods and simulation techniques*, Karlskrona: Blekinge Institute of Technology, 2019.
- [19] BS ISO 4587:2003, *Adhesives. Determination of tensile lap shear strength of rigid-to-rigid bonded assemblies*.
- [20] ASTM 1002-10(2019), «Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal)».
- [21] D. B. Bogy, «Edge-bonded dissimilar orthogonal elastic wedges under normal and shear loading» *Journal of Applied Mechanics*, n. 35, pp. 460-466, 1968.
- [22] D. Bogy, «Two edge-bonded elastic wedges of different materials and wedge angles under surface tractions» *Journal of Applied Mechanics*, n. 38, pp. 377-386, 1971.

- [23] D. Bogy e K. Wang, «Stress singularities at interface corners in bonded dissimilar isotropic elastic materials» *International Journal of Solids and Structures*, n. 7, pp. 993-1005, 1971.
- [24] M. Goland e E. Reissner, «The stresses in cemented joints» *Journal of Applied Mechanics*, n. 11, pp. A17-27, 1944.
- [25] S. Guo, D. Dillard e R. Plaut, «Effect of boundary conditions and spacers on single-lap joints loaded in tension and compression» *International journal of Adhesion and Adhesives*, n. 26, pp. 629-638, 2006.
- [26] J. Reddy e S. Roy, «Non - linear analysis of adhesively bonded joints» *International Journal of Non - linear Mechanics*, n. 23, pp. 97-112, 1988.
- [27] J. Figueiredo, R. Campilho, E. Marques, J. Machado e L. da Silva, «Adhesive thickness influence on the shear fracture toughness measurements of adhesive joints» *International Journal of Adhesion and Adhesives*, n. 83, pp. 15-23, 2018.
- [28] J. Zhang, J. Wang, Z. Yuan e H. Jia, «Effect of the cohesive law shape on the modelling of adhesive joints bonded with brittle and ductile adhesives» *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 85, pp. 37-43, 2018.

## Ringraziamenti

La prima volta che sono entrato in questo ateneo avevo 19 anni e tanti sogni nascosti nello zaino. Qualche anno dopo è tempo di abbandonare questo nido e coronare quei sogni che ancora devono realizzarsi. Oggi inizia un nuovo capitolo della mia vita e voglio iniziarlo con la consapevolezza di essere arricchito di tante esperienze e di anni intensi, complicati ma allo stesso tempo meravigliosi. Oggi coronano uno di questi sogni che erano nello zaino di quel ragazzo e sono sicuro che non ci sarei mai riuscito senza l'aiuto delle persone che mi sono vicine.

Vorrei ringraziare i miei relatori, il prof. Goglio e il prof. Paolino, perché mi hanno fornito tutto il loro supporto ogni volta che ne avevo bisogno per un chiarimento, una spiegazione o un confronto. Si sono dimostrati sempre entusiasti delle mie idee per questo progetto di tesi, favorendone in ogni modo lo sviluppo. Un grazie va al mio tutor aziendale Salvatore che mi ha aiutato a superare le difficoltà che si sono presentate in questo progetto e che ha messo tutto l'impegno possibile per formarmi al meglio.

Poi volevo ringraziare Mamma e Papà, non solo per il supporto economico senza il quale tutto questo non sarebbe stato possibile, ma soprattutto perché mi avete dato il vostro sostegno sempre, nei momenti buoni ed in quelli meno buoni, siete la mia forza. Un grazie a mia sorella Anna ed a mio fratello Peppe, che riescono a mettermi un'allegria che non riesco a spiegare. Un enorme grazie ad Arianna, perché è al mio fianco ogni giorno da prima che questo percorso iniziasse e perché non ha mai smesso di credere in me neanche per un secondo. Resterai al mio fianco ancora per molto. Poi volevo ringraziare i miei cugini Mario e Giuseppe, che sono la mia famiglia a Torino e so di poter sempre contare su di loro, così come loro possono farlo su di me.

E poi ci sono gli amici del nono piano (esteso), che hanno colorato le giornate e hanno condiviso con me momenti di felicità, di tristezza, di entusiasmo, di gioco e di allegria. Grazie a Dejan, Giovanni, Umberto, Klodiana, Caterina, Maga, Giorgia, Giulia, Roberta, Santa, Claudia e Katia. Con ognuno di voi ho passato dei momenti speciali.

Sono davvero tante le persone che hanno contribuito a questo percorso, vi ringrazio tutti.

Ad Maiora!