

POLITECNICO DI TORINO

**Corso di Laurea Magistrale in
Ingegneria Meccanica**

Tesi di Laurea Magistrale

**Caratterizzazione sperimentale di giunti adesivi
per applicazioni *automotive***



Relatore

Prof. Giovanni Belingardi

Corelatore

Prof. Luca Goglio

Candidata

Lucrezia Greco

Ottobre 2018

Indice

Introduzione	7
1 Giunti incollati	11
1.1 Classificazione delle tecniche di giunzione	11
1.2 Configurazioni giunti incollati	12
1.3 Modelli teorici di adesione	15
1.4 Adesivi: definizioni	16
1.5 Bagnabilità: condizione preliminare per l'incollaggio	17
1.6 Applicazione dell'adesivo	18
1.7 Tecniche per migliorare l'incollaggio dei substrati: trattamento superficiale	19
1.8 Classificazione degli adesivi	21
1.8.1. Tipologia di polimero	21
1.8.2. Modo di polimerizzazione	22
1.8.3. Applicazioni	22
1.9 Resine epossidiche	23
1.10 Vantaggi e svantaggi degli adesivi	24
1.11 Applicazione in ambito <i>automotive</i>	25
2 Test adesivi	27
2.1 Single-lap joint	27
2.2 Influenza dello spessore adesivo	28
2.3 Sollecitazioni sui giunti incollati	29
2.4 Perché fare test di resistenza a rottura su giunti incollati	31
2.5 Prove di taglio a trazione	32
2.6 Prove di peeling	33
2.7 Arcan test	35

2.8	Cedimento di un giunto adesivo	36
3	Stato tensionale in un giunto adesivo	39
3.1.	Tensioni e deformazioni in un giunto adesivo	39
3.2.	Fonti di tensioni	40
3.3.	Analisi delle tensioni.	45
4	Prove preliminari	51
4.1	Descrizione prove preliminari	51
4.2	Adesivi	54
4.3	Provini preparati	55
4.5	Prove su provini con spessore di 0.74 mm	57
4.5.1.	Betamate 4600G: SLJ vs OC	58
4.5.2.	Betamate 1640: SLJ vs OC	60
4.6	Prove su provini con spessore di 3 mm	62
4.6.1	Betamate 4600G: SLJ vs OC	63
4.6.2	Betamate 1640: SLJ vs OC	65
4.6.3	OC: Betamate 1640 vs Betamate 4600G	67
4.6.4	SLJ: Betamate 1640 vs Betamate 4600G	69
5	Valutazione della deformabilità degli aderendi	71
5.1	Provino utilizzato	71
5.2	Preparazione provino	73
5.3	Estensimetro	75
5.4	Afferraggio utilizzato	80
5.5	Prove effettuate	82
5.5.1.	Test di trazione	82
5.5.2.	Test di taglio	86
6	Caratterizzazione giunti adesivi mediante Arcan Test	91
6.1.	Scopo delle prove	91
6.2.	Attrezzatura Arcan	92
6.3.	Prove effettuate	95
6.3.1.	Provini in Al 5182	95

6.3.2. Provini in DP600	103
6.4. Confronto tensioni Al 5182 vs DP600	113
Conclusioni	115

Introduzione

La storia degli adesivi e dei collanti è intrinsecamente collegata a quella del genere umano; difatti l'uso degli adesivi ha le sue origini nell'antichità. “Insetti, pesci e uccelli conoscono l'arte di produrre fluidi corporei mucosi adatti per l'incollaggio” (1). Nella letteratura, però, c'è poco accordo riguardo le date in cui gli adesivi si sono iniziati a sviluppare o sono stati utilizzati in applicazioni scientifiche. Ciò è dovuto ad un contemporaneo sviluppo in molte parti del mondo e poiché i riferimenti in letteratura sono appartenenti ai paesi più sviluppati (2). Sicuramente, però, si può affermare che lo sviluppo dell'industria adesiva è strettamente legato a quello dell'industria automobilistica e aerospaziale grazie alla possibilità di alleggerire il peso totale delle strutture (2). Tuttavia, gli adesivi sono stati introdotti anche in settori come l'odontoiatria e la chirurgia.

L'incollaggio mediante adesivi è una valida alternativa alle più classiche tecniche meccaniche di assemblaggio come bullonatura e saldatura. Infatti, l'utilizzo degli adesivi comporta numerosi vantaggi. Primo tra tutti, la versatilità, poiché permette di incollare materiali diversi, andando a realizzare giunzioni ibride. La facilità di attrezzamento, poiché richiede l'utilizzo di una sola attrezzatura per componenti di forma diversa. Garantisce la continuità della giunzione, senza necessità di forature e quindi eventuale innesco di cricche come con la bullonatura o modifiche delle proprietà meccaniche dei materiali, con la saldatura. Infine, garantisce la possibilità di avere una distribuzione uniforme delle tensioni sull'intera superficie di incollaggio, avendo un effetto molto positivo sulla resistenza statica e dinamica (3).

Ci sono vari parametri per la scelta di un adesivo, tra cui: la finalità dell'incollaggio, la tipologia dei materiali da incollare, la tipologia della superficie, la forma della giunzione, il processo di applicazione e la temperatura di esercizio (3).

“Ogni anno in Europa vengono prodotti ed impiegati oltre 3.000.000 di tonnellate di collanti e questa cifra è in continua crescita. I produttori di adesivi offrono oltre 250.000 prodotti differenti per svariate applicazioni” (4). Difatti, a seconda dell'applicazione, “un adesivo deve essere in grado di resistere a temperature bassissime, a temperature di diverse centinaia di gradi, essere molto elastico o estremamente rigido (4)”.

Per quanto riguarda il settore automobilistico, l'uso di adesivi è progressivamente aumentato negli ultimi decenni ed è in continua crescita; questo perché il mercato richiede un'auto sempre più leggera affinché si possa ridurre il consumo di carburante e conseguentemente l'inquinamento ambientale e, al contempo, aumentare le prestazioni. Nell'Unione Europea il limite di CO₂ è stato ridotto dalla Commissione Europea a 95 g/km entro il 2021, e recenti studi dimostrano che, riducendo di 100 kg il peso della vettura, si ha una riduzione di CO₂ del 3-5% (5). Pertanto, in un contesto in cui la domanda di autoveicoli è in continua crescita, l'utilizzo di adesivi risulta essere sempre più incalzante.

Gli adesivi si dividono in due grandi categorie: quelli ad indurimento fisico, ovvero *adesivi termoindurenti*, e quelli ad indurimento chimico, ovvero *adesivi termoplastici*. I primi sono adesivi in grado di sopportare elevati carichi meccanici, quelli termoplastici, invece, sopportano carichi nettamente inferiori.

Questo lavoro di tesi, svolto in collaborazione con il Centro Ricerche Fiat, ha riguardato la caratterizzazione di giunti realizzati con adesivi termoindurenti, largamente utilizzati in ambito *automotive*. Una prima fase del lavoro si è basata sull'applicazione di due adesivi a un comune acciaio, con il fine di poter valutare le caratteristiche degli adesivi e la loro risposta quando sono sottoposti a prove di taglio a trazione. Inoltre, queste prove, hanno permesso di valutare se, un eventuale confinamento della zona di incollaggio, mediante poliestere o teflon, potesse alterare i risultati finali.

Successivamente, stabilita la possibilità di poter confinare l'area di incollaggio, sono state fatte delle prove preliminari sul provino proposto da FCA, con lo scopo di poterne valutare l'eventuale deformabilità quando sottoposto a test. Durante queste prove, infatti, grazie all'ausilio di un estensimetro collocato sull'aderendo del giunto adesivo, si è potuto osservare che, quando il giunto è sottoposto a trazione o taglio, gli aderendi non si deformano.

L'ultima parte del lavoro, invece, si è basata sulla caratterizzazione dei giunti adesivi mediante Arcan Test presso i laboratori di Magneti Marelli. Tale test, pur essendo attualmente utilizzato in azienda per testare elementi saldati, è stato applicato per la prima volta su giunti adesivi per valutarne la resistenza, quando sottoposti, non solo a puro taglio o trazione, ma anche a una loro combinazione. Sono stati sottoposti al test giunti con differenti temperature di cura e si è valutata la loro risposta in configurazioni e condizioni analoghe. La scelta, da parte di FCA, di rivolgere l'attenzione a differenti temperature di cura, mantenendo lo spessore costante, riguarda la possibilità di poter ottimizzare i processi e svolgere la cura dell'adesivo durante il processo di verniciatura per cataforesi. Il seguente studio, quindi, si è incentrato sulla caratterizzazione di giunti adesivi mediante Arcan Test, con il fine di valutare la risposta del giunto in determinate condizioni di carico e cura.

1 Giunti incollati

1.1 Classificazione delle tecniche di giunzione

Con il termine giunto si intende l'unione, mediante diverse modalità, di due o più parti per formare un'unica struttura. Esso, quindi, nasce dalla necessità di poter trasferire un carico in una struttura. "Le giunzioni, tuttavia, sono tra le parti più delicate ed importanti; delicate, poiché richiedono una certa accuratezza realizzativa per evitare rotture precoci o malfunzionamenti, e importanti, poiché la corretta scelta della tecnica di giunzione può influenzare le caratteristiche del manufatto" (6).

I sistemi di collegamento vengono suddivisi e denominati nel seguente modo (7):

- *Unioni fisse o permanenti*: quando le parti vengono unite in modo stabile e il loro smontaggio può avvenire solamente mediante una modifica del pezzo di partenza. Come nel caso di saldatura, chiodatura o incollaggio (7);
- *Unioni temporanee*: quando è possibile effettuare lo smontaggio e il rimontaggio delle parti senza andare a modificare i pezzi di partenza. Come nel caso di collegamenti filettati, chiavette, linguette (7);
- *Accoppiamenti*: quando l'unione di due pezzi avviene senza l'ausilio di altri elementi di giunzione. Come nel caso di accoppiamento albero-mozzo (7);
- *Organi di trasmissione*: quando si realizza una catena cinematica destinata alla trasmissione del moto (7).

Tra le tecnologie di giunzione più utilizzate abbiamo la saldatura, la bullonatura e l'incollaggio (6).

La *saldatura* è un processo nel quale vengono collegati componenti dello stesso materiale in modo permanente. Tale tecnica prevede il riscaldamento del materiale fino al raggiungimento del punto di fusione; dove tale materiale fuso può essere o il materiale componente le parti da unire o un materiale d'apporto (6). “Tra i principali vantaggi, si può identificare la possibilità di unire parti di grandi dimensioni e un peso inferiore del 15-20% rispetto a chiodatura e bullonatura (6)”. Al contempo, bisogna tener conto degli effetti derivanti dall'uso di questa tecnica: come la presenza di tensioni residue dopo il raffreddamento non uniforme del collegamento, la presenza di maggiori difettosità introdotte e una probabile trasformazione della microstruttura e delle proprietà meccaniche del metallo (8).

La *bullonatura* è una tecnica che prevede di collegare due o più componenti mediante l'utilizzo di bulloni. “Questa tipologia di giunzione prevede una forza assiale che tende ad unire le parti ma, allo stesso tempo, si genera un collegamento forzato dato dall'interferenza fra bullone e pezzo (8)”. La bullonatura è una giunzione che permette il collegamento di diversi tipi di materiali. Tuttavia, questa tecnica comporta un indebolimento della struttura a causa della foratura e un aumento del peso derivante dai bulloni stessi (8).

L'*incollaggio* è una tecnica di giunzione che permette l'unione di materiali, uguali o diversi tra loro, grazie all'interposizione di uno strato adesivo. Tali adesivi vengono applicati in forma liquida o pastosa alle superfici da incollare e, a presa avvenuta, formano strati solidi sottili (6). Questo tipo di giunzione garantisce: una distribuzione “relativamente” uniforme delle forze di collegamento, la possibilità di accoppiare materiali differenti tra loro, la non alterazione della microstruttura o l'indebolimento della struttura come abbiamo visto con le tecniche precedenti. Tuttavia, sono necessariamente presenti anche degli svantaggi, come il tempo necessario per la realizzazione della giunzione o la necessità di preparare le superfici prima dell'incollaggio (6).

1.2 Configurazioni giunti incollati

Di seguito sono illustrate alcune delle configurazioni di più comune utilizzo per i giunti incollati (9):

- *Single-lap joint* (giunto a sovrapposizione singola): adoperato nel caso di sezioni sottili;

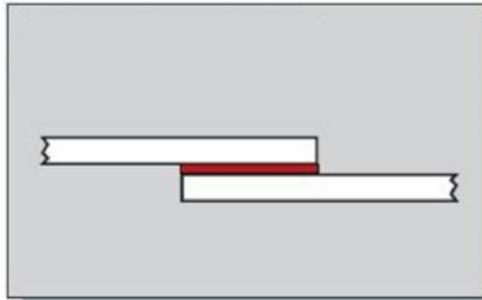


FIGURA 1 - SINGLE-LAP JOINT (9)

- *Double-lap joint* (giunto a sovrapposizione doppia): consente di raggiungere una resistenza maggiore rispetto al caso precedente;

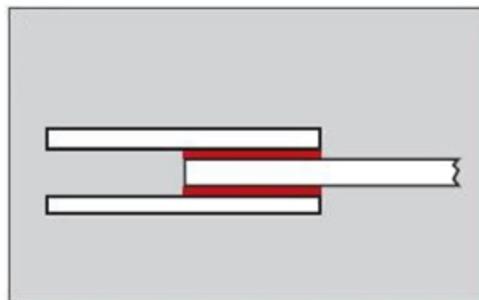


FIGURA 2 - DOUBLE-LAP JOINT (9)

- *Single-strap joint* (giunto a taglio con coprigiunto): utilizzato per l'ottenimento di superfici lisce;

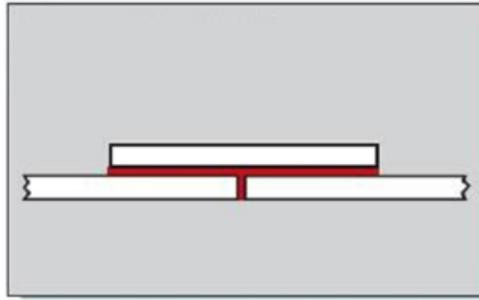


FIGURA 3 - SINGLE-STRAP JOINT (9)

- *Double-strap joint* (giunto a sovrapposizione con doppio coprigiunto): consente di avere una maggiore resistenza rispetto alla singola ma più complicata da realizzare;

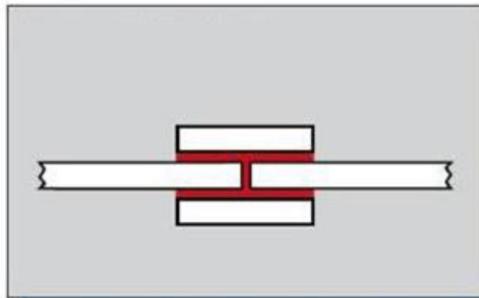


FIGURA 4 - DOUBLE-STRAP JOINT (9)

- *Scarf joint* (giunto testa a testa inclinato): presenta una buona resistenza ma al contempo è di difficile realizzazione. Indicato per substrati spessi;

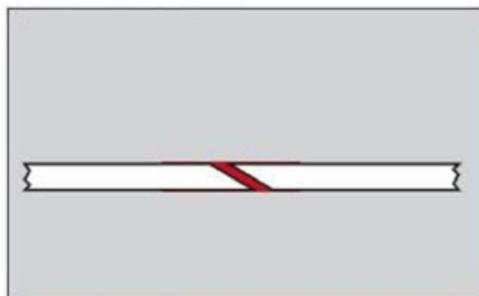


FIGURA 5 - SCARF JOINT (9)

Tra queste configurazioni quella più utilizzata, poiché di facile realizzazione ed al contempo efficiente, è quella a *single-lap joint*.

1.3 Modelli teorici di adesione

Una delle principali difficoltà nello studio dei meccanismi di adesione sta nel fatto che ci si trova al confine di diversi campi scientifici, tra cui: scienza macromolecolare, chimica fisica delle interfacce, scienza dei materiali, meccanica e micromeccanica della frattura (2). Pertanto, lo studio dell'adesione, utilizza vari concetti che dipendono dal campo di applicazione. Nel corso degli anni sono stati proposti molti modelli teorici di adesione, complementari e contraddittori al tempo stesso. Essi sono:

- 1 *Teoria dell'interconnessione meccanica*: concepisce l'interconnessione dell'adesivo con le irregolarità superficiali dei substrati il fattore principale nella determinazione della forza adesiva.
Infatti, stabilire una buona adesione tra superfici lisce con questa teoria non era possibile (2). Pertanto, si potrebbe raggiungere un alto livello di adesione andando ad aumentare la rugosità superficiale, per consentire la penetrazione dell'adesivo nei pori e nelle cavità.
- 2 *Teoria elettronica*: nel caso in cui l'adesivo e i substrati possiedono diverse strutture elettroniche a bande, si verifica un trasferimento di elettroni per bilanciare i cosiddetti livelli di Fermi (10). Questo fenomeno porta alla formazione di un doppio strato di carica elettrica all'interfaccia e le forze elettrostatiche risultanti possono contribuire in modo significativo alla forza adesiva (2).
- 3 *Teoria degli strati limite deboli*: dove la forza coesiva di uno strato limite debole può sempre essere considerata come il fattore principale nella determinazione del livello di adesione. Secondo questa ipotesi, l'energia di adesione G è sempre uguale a quella di coesione G_c dello strato limite più debole (2).
- 4 *Teoria dell'assorbimento*: Si basa sul concetto che l'adesivo aderirà al substrato a causa delle forze intermolecolari (forze di Van der Waals) e interatomiche stabilite tra le molecole e gli atomi dell'adesivo e del substrato, a condizione che sia raggiunto un contatto sufficientemente intimo (2).

- 5 *Teoria della diffusione*: si basa sul presupposto che la forza di adesione tra polimeri e substrati polimerici è dovuta alla mutua diffusione di macromolecole attraverso l'interfaccia (2).
- 6 *Teoria del legame chimico*: la quale afferma che i legami chimici che si sono formati tra substrato e adesivo possono partecipare al livello di adesione che si instaura tra i materiali (2).

Ognuna di queste teorie è valida in una certa misura, pertanto la loro rispettiva importanza dipende in gran parte dal sistema scelto. Dato il numero di fenomeni coinvolti nell'adesione e la varietà di materiali da incollare, la ricerca di una teoria unica e universale capace di spiegare tutto è forse inutile e dispersiva. Tuttavia, si presuppone che la teoria dell'assorbimento presenta più applicabilità (2).

1.4 Adesivi: definizioni

Secondo la normativa DIN EN 923 con adesivo si intende “un materiale non metallico che permette di collegare particolari da assemblare mediante incollatura superficiale e rigidità interna” (11). Dove per “incollatura superficiale” si intende l'adesione, mentre per “rigidità interna” si intende la coesione.

L'*adesione*, infatti, è l'attrazione molecolare che si instaura tra due materiali di natura differente posti a contatto. La *coesione*, invece, “è una forza di natura elettrostatica che si crea tra le particelle elementari di una stessa sostanza, tenendole unite ad eventuali forze esterne che tenderebbero a separarle (12)”. Essa, quindi, è proprio la forza intrinseca dell'adesivo.

Di seguito è riportata la sezione di un giunto adesivo in cui è possibile individuare:

- *Substrato*: materiale che deve essere collegato. Una volta che è avvenuto l'incollaggio esso viene chiamato *aderendo*;
- *Zona di adesione*: qui l'adesivo presenta una struttura e composizione modificata a causa dell'adesione al substrato;
- *Zona di transizione*: zona caratterizzata da spessore variabile (da alcuni nanometri fino a estensioni millimetriche (4)), nella quale sono presenti le interazioni tra l'adesivo e il substrato;
- *Zona di coesione*: qui l'adesivo possiede le proprietà nominali riportati nella sua scheda tecnica;
- *Overlap*: è la zona di sovrapposizione degli aderendi dove è presente l'adesivo;
- *Interfaccia*: è la zona di contatto tra aderendo e adesivo.

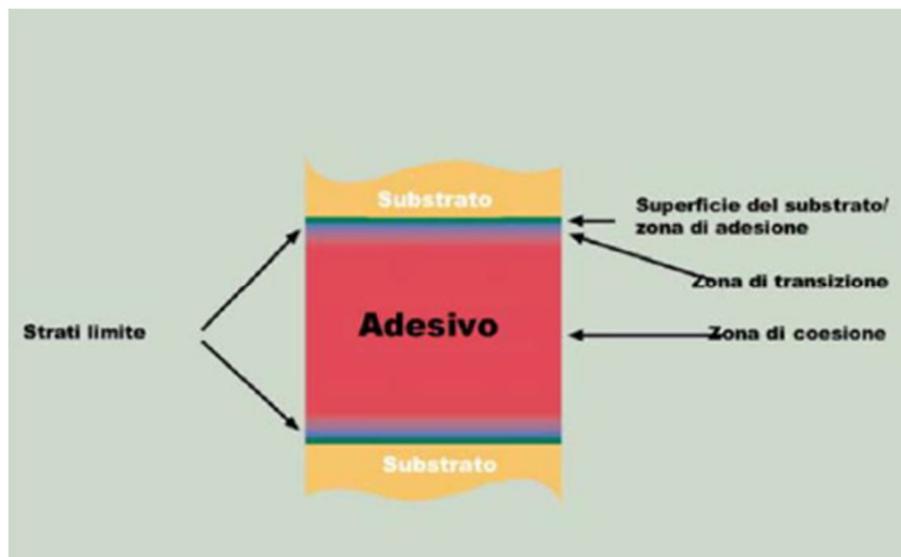


FIGURA 6 - SEZIONE DI UN GIUNTO (4)

1.5 Bagnabilità: condizione preliminare per l'incollaggio

“Un requisito indispensabile per la formazione di uno strato adesivo è dato dalla capacità dell’adesivo liquido di bagnare la superficie del substrato in modo *efficace*” (4). Questa capacità dipende dalle sue proprietà reologiche, ovvero: viscosità e tixotropia. La viscosità è una grandezza fisica che misura la resistenza che possiede un fluido allo scorrimento. Se elevata, permette di evitare la fuoriuscita dell’adesivo dai bordi dei giunti incollati. Questo parametro, però, deve variare in base al metodo di applicazione dell’adesivo. Infatti, è “richiesta una viscosità bassa in applicazioni a spruzzo ed una consistenza pastosa per applicazioni serigrafiche (4)”. La tixotropia, invece, è la “proprietà di un fluido di passare temporaneamente ad uno stato di viscosità più bassa in seguito all’azione di forze meccaniche, come agitazione, scosse, ecc. (4) “. Tuttavia, la bagnabilità della superficie del substrato, è una condizione necessaria ma non sufficiente affinché ci sia un’adesione; una buona bagnabilità non garantisce un legame forte e di alta qualità. Nel caso in cui si voglia applicare un adesivo su un substrato incompatibile con l’adesivo stesso, si può pensare di rivestirlo con un adeguato promotore di adesione. Inoltre, è importante sottolineare come, una buona adesione, contribuisce notevolmente alla resistenza del giunto incollato, ma non è possibile creare una correlazione immediata e univoca (4).

1.6 Applicazione dell’adesivo

L’applicazione dell’adesivo dipende dalla sua forma. Per adesivi liquidi non è necessaria una cura speciale, poiché l’adesivo scorre facilmente lungo l’area da incollare. Nel caso di adesivi pastosi, invece, è necessario effettuare una cura prima dell’applicazione affinché l’adesivo raggiunga una viscosità tale da riuscire a bagnare adeguatamente il substrato (13)

L'adesivo deve essere sempre messo nella zona intermedia ed in quantità sufficientemente abbondante affinché, una volta uniti i substrati, tutta la zona di sovrapposizione sia ricoperta da adesivo e non ci siano vuoti o zone in cui l'adesivo non sia presente (14). Questo, infatti, non garantirebbe una perfetta adesione e il giunto adesivo raggiungerebbe la rottura prima di quanto previsto. Inoltre, “qualora ci trovassimo di fronte ad adesivi bicomponenti, ed essi sono miscelati manualmente, i substrati devono essere premuti l'uno contro l'altro quando vengono in contatto affinché vengano eliminati vuoti intermedi (4)”. Nel caso in cui essi vengano miscelati dal produttore, invece, gran parte di questo vuoto è già eliminato durante la miscelazione (15). Una corretta applicazione, per evitare l'intrappolamento dell'aria, è quella rappresentata nella figura sottostante.

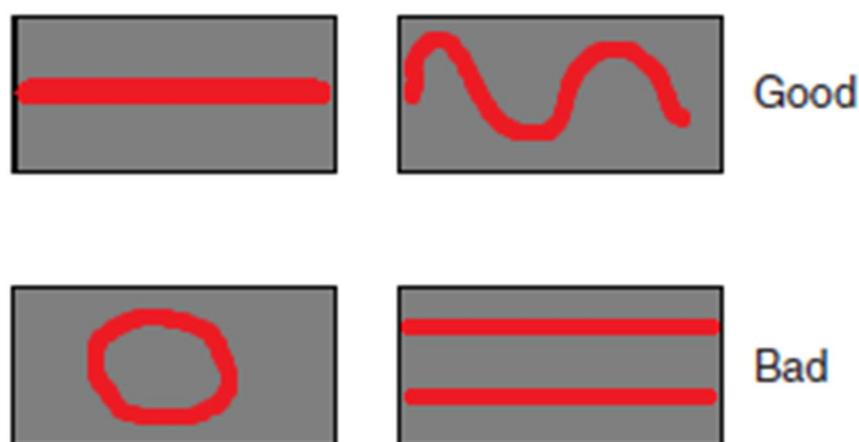


FIGURA 7 - COME APPLICARE L'ADESIVO (13)

1.7 Tecniche per migliorare l'incollaggio dei substrati: trattamento superficiale

Affinché si possa avere un'adesione forte e duratura la struttura del substrato deve soddisfare certi requisiti, ovvero (4):

- La superficie del substrato deve essere facilmente bagnabile;
- Devono formarsi interazioni intermolecolari e chimiche tra substrato ed adesivo;
- Dopo l'incollaggio la superficie deve rimanere tale nel tempo, non deve modificarsi.

“Questi aspetti evidenziano la necessità di sottoporre il substrato ad un trattamento superficiale affinché si crei una superficie adeguata.” Generalmente si distinguono tre tipologie di trattamenti superficiali: preparazione della superficie, pretrattamento superficiale e post-trattamento superficiale (4).



FIGURA 8 - TECNICHE DI TRATTAMENTO SUPERFICIALE (4)

La preparazione superficiale si basa sulla pulizia del substrato (ad esempio carteggiatura, sgrassatura, piattatura). Il trattamento superficiale consiste, invece, in tutte le operazioni meccaniche (ad esempio rettifica, lavaggio a getto), nei processi chimici (ad esempio la passivazione sui metalli) e nei processi fisici che modificano la struttura e/o la composizione chimica del substrato. Infine, il post-trattamento superficiale riguarda le

“tecniche che tendono a migliorare ulteriormente le proprietà ricettive della superficie trattata (4).”

1.8 Classificazione degli adesivi

Le classificazioni degli adesivi sono molteplici. Esse possono essere suddivise in base a:

- 1 Tipologia di polimero;
- 2 Modo di polimerizzazione;
- 3 Applicazioni.

1.8.1 Tipologia di polimero

Il principale componente alla base di un adesivo è la resina primaria, la quale conferisce molte caratteristiche come: bagnabilità, resistenza adesiva, proprietà termiche, resistenza chimica e ambientale. Per resina primaria si identifica un polimero che rappresenta la catena principale nella struttura molecolare adesiva (15).

La classificazione in base al tipo di polimero consiste in:

- *Adesivi naturali*: sono adesivi ottenuti da risorse naturali come amido, proteine o colle animali. Essi presentano una bassa resistenza meccanica ma elevata resistenza alla temperatura (15);
- *Adesivi termoindurenti*: presentano un “polimero in uno stato solido o viscoso che cambia irreversibilmente mediante polimerizzazione, grazie all’apporto di calore, radiazioni o umidità (15)”. Questi adesivi sono generalmente i più forti grazie alla formazione di legami 3-D (15). Quindi, più adatti ad applicazioni che prevedono elevata resistenza meccanica ed elevata temperatura;
- *Adesivi termoplastici*: formati da polimeri che possono trasformarsi in liquido quando vengono surriscaldati e ritornare allo stato solido quando raffreddati. Questi adesivi presentano una struttura molecolare lineare o ramificata. Infatti, rispetto a quelli termoindurenti, presentano una minore resistenza meccanica ed una temperatura di esercizio più bassa (15);

- *Adesivi elastomerici*: sono formati da resine di origine naturale o sintetica e comprendono materiale di tipo gommoso (15).

1.8.2. Modo di polimerizzazione

Si possono individuare tre metodologie differenti per la polimerizzazione:

- *Solvent adhesive*: sono adesivi che contengono il polimero preformato prima dell'adesione e che polimerizzano per evaporazione del solvente. “La presenza di solvente, tuttavia, può presentare rischi di incendio e per la salute. In questa categoria sono compresi adesivi naturali, una parte dei termoplastici ed elastomerici (16)”.
- *Hot-melt*: questi adesivi contengono un polimero che fonde per riscaldamento e solidifica per successivo raffreddamento. Essi presentano proprietà termoplastiche con conseguente resistenza limitata alla temperatura. Al contempo, la bassa viscosità che possiedono allo stato fuso rappresenta una considerazione importante con questa tipologia di adesivi (15);
- *Reactive adhesives*: questi adesivi polimerizzano sia a caldo che a freddo. Inoltre, presentano una elevata forza di adesione e di durata nel tempo, seppur in condizioni ambientali severe.

1.8.3. Applicazioni

L'ultima classificazione si basa sulla funzione dell'adesivo, è infatti possibile distinguere:

- *Adesivi strutturali*: caratterizzati dalla possibilità di trasferire elevati carichi meccanici tra gli aderenti. Questi adesivi possono sopportare stress significativi e prestarsi ad applicazioni strutturali. Consentono di avere una distribuzione continua delle sollecitazioni e una maggiore resistenza alle vibrazioni (17);
- *Adesivi non strutturali*: al contrario di quelli strutturali, riescono a trasferire carichi inferiori. Tipicamente usati qualora si volesse realizzare un'adesione di breve durata.

1.9 Resine epossidiche

“Le resine epossidiche sono l’adesivo strutturale più utilizzato grazie alla loro capacità di aderire ad un’ampia gamma di materiali, alla loro elevata resistenza e alla loro capacità di resistere ad un carico di scorrimento elevato (18)”. Difatti, trovano importanti sbocchi nell’industria automobilistica, nell’edilizia e anche in applicazioni elettroniche, poiché presentano buone proprietà elettriche.

Queste resine possono essere (4):

- Monocomponenti: dove i due reagenti sono miscelati e la polimerizzazione avviene a caldo (tra 250 e 350° C);
- Bicomponenti: dove nella miscela sono inglobati i catalizzatori e la polimerizzazione avviene a temperatura ambiente in seguito alla miscelazione. Questi sistemi bicomponenti sono, però, sensibili a errori di miscelazione.

Nella maggior parte delle formulazioni adesive sono inclusi indurenti che aumentano la loro versatilità. “Essi, difatti, risultano essere adesivi molto rigidi, poiché presentano un elevato modulo elastico e un basso allungamento a rottura. Inoltre, alcune formulazioni sono in grado di tollerare residui di olio di lavorazione e ottenere comunque una forza di adesione sufficientemente elevata (18)”.

I vantaggi degli adesivi a base di resina epossidica sono di seguito elencati (2):

- Capacità di legare un’ampia gamma di substrati;
- Restringimento trascurabile durante la cura che riduce al minimo gli stress;
- Eliminazione della corrosione galvanica durante l’incollaggio di materiali dissimili;
- Elevata resistenza, buona durata e resistenza a un’ampia gamma di ambienti;
- Formulazione flessibile.

Al contempo presentano degli svantaggi, tra cui (2):

- I sistemi a due componenti richiedono una miscelazione in rapporti corretti;
- Molti componenti sono tossici o irritanti;
- Resistenza al calore relativamente scarsa;
- Fragilità intrinseca, che richiede un'attenta progettazione del giunto;
- Preparazione accurata della superficie prima dell'applicazione dell'adesivo;
- Costo relativamente elevato.

1.10 Vantaggi e svantaggi degli adesivi

Andando a considerare sia le prestazioni strutturali che funzionali, i principali vantaggi offerti da una giunzione adesiva possono così riassumersi (10):

- Possibilità di trasferire elevati carichi grazie all'estesa superficie di incollaggio;
- Minimizzazione della concentrazione degli sforzi grazie all'assenza di discontinuità e, quindi, una conseguente distribuzione più uniforme delle tensioni sulla superficie degli aderenti;
- Migliore aspetto estetico;
- Possibilità di realizzare forme complesse;
- Possibilità di collegare aderenti di vari spessori;
- Possibilità di collegare materiali anche completamente dissimili;
- L'incollaggio può fungere anche da sigillante contro l'umidità ed agenti chimici;
- L'incollaggio non modifica la composizione chimica degli aderenti;
- L'incollaggio non apporta modifiche alla struttura degli aderenti;
- L'incollaggio può minimizzare o prevenire fenomeni di corrosione galvanica tra materiali dissimili;
- L'incollaggio smorza le vibrazioni;
- Una miglioria del comportamento alla fatica;
- Nessuna produzione di protuberanze;
- Possibilità di collegare materiali sensibili al calore che verrebbero distrutti se sottoposti a saldatura.

Le giunzioni adesive, al contempo, presentano alcuni svantaggi che ne restringono il campo di applicabilità, tra cui si possono ricordare (10):

- Sensibilità strutturale ai carichi di peeling rispetto a carichi di taglio e trazione;
- Necessità di un'accurata preparazione superficiale degli aderendi;
- Necessità di un rigido controllo di processo;
- Tempo di polimerizzazione molto lungo in alcuni casi;
- Necessità di attrezzature specifiche;
- Necessità di effettuare controlli non distruttivi poiché non è applicabile una ispezione diretta;
- Impossibilità di riparare giunzioni difettose;
- La temperatura massima di funzionamento di un incollaggio può essere limitata;
- La durabilità di una giunzione incollata dipende dalle condizioni ambientali di esercizio;
- Alcuni adesivi organici sono sensibili all'attacco di funghi e batteri;
- Infiammabilità e tossicità dell'adesivo.

Nonostante gli svantaggi appena elencati, l'applicazione degli adesivi è sempre crescente poiché è considerata una pratica alternativamente valida ai noti metodi di giunzione meccanica.

1.11 Applicazione in ambito *automotive*

In campo *automotive* si sta riscontrando sempre più un crescente utilizzo degli adesivi grazie alla possibilità di unire una vasta gamma di materiali e ridurre il peso complessivo della struttura. Nella seguente immagine, infatti, vengono rappresentati i campi di applicabilità degli adesivi nell'automobile.

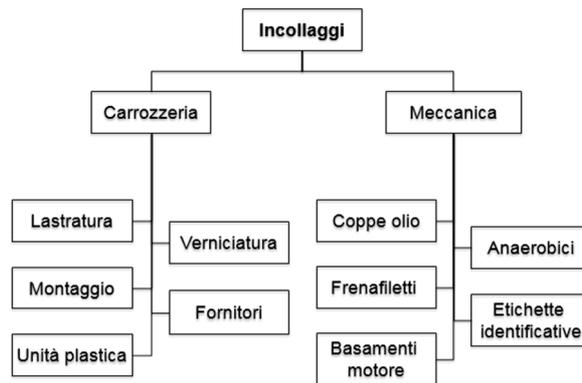


FIGURA 9 - APPLICAZIONI IN CAMPO AUTOMOTIVE (3)

Gli adesivi, infatti, contribuiscono alla realizzazione di una struttura più leggera e al contempo con prestazioni più elevate (15). In commercio sono disponibili diversi tipi di adesivi con proprietà specifiche in modo tale da poter soddisfare una vasta gamma di requisiti. Ad esempio, gli adesivi per la carrozzeria devono poter essere utilizzati senza rischi per la verniciatura e devono resistere alle temperature elevate dei forni per la cottura della vernice (2). “Inoltre, gli adesivi non devono soddisfare solo ai requisiti funzionali, ma devono anche conservarli in diverse condizioni di utilizzo, quando sono sottoposti a: vibrazioni, urti, condizioni climatiche avverse, cambiamenti estremi di temperatura e così via (2)”.

2 Test adesivi

2.1 Single-lap joint

La configurazione di giunto adesivo più comunemente utilizzata per la valutazione delle proprietà meccaniche degli adesivi è quella a Single-Lap Joint (SLJ). Questo perché essi tendono a riprodurre le giunzioni incontrate nelle strutture aeronautiche e automobilistiche (13)

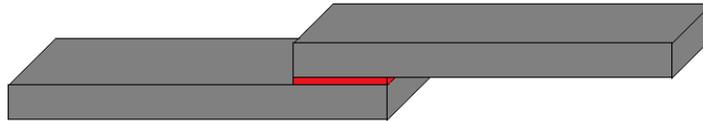


FIGURA 10 - SLJ

Il SLJ ha il vantaggio di essere semplice ed economico. Tuttavia, la costruzione ed i test fatti con questa geometria possono presentare alcuni problemi, tra cui: il corretto allineamento dei provini e il controllo dello spessore dell'adesivo (13). Infatti, i "SLJ vengono preparati serrando insieme le due parti metalliche dopo l'applicazione dell'adesivo e mantenendo questa configurazione durante la polimerizzazione (13)".

Il serraggio può essere eseguito in diversi modi, ad esempio mediante l'utilizzo di morsetti a C o fermacarte (13).

Ci sono, però, diversi problemi riscontrabili con l'utilizzo di questi strumenti (13):

- La possibilità che questi rimangono legati ai SLJ;
- La difficoltà nel riuscire a mantenere l'allineamento quando i SLJ devono essere spostati in un forno per effettuare la cura;
- La difficoltà nel riuscire a controllare lo spessore adesivo, a meno che non siano inserite delle sfere di vetro o dei fili metallici che garantiscano un determinato spessore;
- Un elevato dispendio di tempo nel caso in cui debbano essere preparati un gran numero di provini.

A fronte di queste problematiche bisogna, quindi, prestare molta attenzione nella fase di preparazione del giunto adesivo affinché non si spostino gli aderenti e si mantenga uno strato adesivo costante lungo tutta la zona di sovrapposizione. Questo permette di fare dei test con dei risultati confrontabili tra loro.

2.2 Influenza dello spessore adesivo

Un fattore molto importante che deve essere preso in considerazione durante le varie prove è lo spessore adesivo. “Numerosi studi affermano che è stato dimostrato sperimentalmente che la forza di un giunto adesivo diminuisce all'aumentare dello spessore adesivo (15)”.

Per valori relativamente sottili, 0.1-0.4 mm, la variazione della forza del SLJ non è sostanziale, ma è sempre meglio indicare lo spessore adesivo utilizzato. Affinché possa essere mantenuto uno spessore adesivo costante e contenuto nei limiti previsti, si possono adottare degli accorgimenti, quali: il posizionamento di fili di acciaio o rame dal diametro noto, tra i substrati, a condizione che essi abbiano un'elevata rigidità alla flessione;

adesivi che prevedono già delle microsferi di vetro disperse uniformemente al loro interno con un diametro noto, come rappresentato nella seguente immagine.

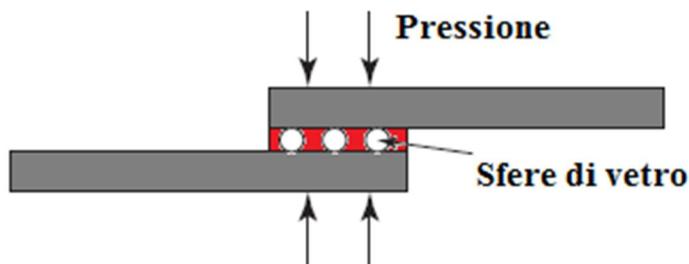


FIGURA 11 - ADESIVO CONTENENTE SFERE DI VETRO (15)

2.3 Sollecitazioni sui giunti incollati

Il requisito principale per un giunto incollato è quello di trasmettere le forze ed essere in grado di resistere alle sollecitazioni, causate dalle stesse forze, per un lungo periodo di tempo (4). I giunti incollati possono essere sottoposti prevalentemente alle seguenti sollecitazioni (4):

- a. *Pelatura*: la quale esercita un'elevata sollecitazione, quasi uniforme, sul giunto incollato (4);
- b. *Scorrimento (taglio a trazione)*: qui i substrati vengono allontanati parallelamente rispetto alla superficie di incollaggio e l'intera superficie di incollaggio risulta essere sottoposta a sollecitazione (4). Nel caso ideale la distribuzione delle sollecitazioni sarebbe uniforme, nella realtà si ha un andamento in cui gli sforzi maggiori sono localizzati all'estremità dell'area di sovrapposizione. "Solitamente si pensa di aumentare la superficie di incollaggio dei giunti in modo da poter distribuire le sollecitazioni su una superficie più grande ed avere un carico di rottura superiore (4)";

- c. *Scorrimento (taglio a compressione)*: analogo a quanto espresso nella trazione, ma nel verso opposto, andando a favorire l'adesione dei substrati. Pertanto, un adesivo sottoposto a compressione cede più raramente (4);
- d. *Trazione*: “questa sollecitazione agisce verticalmente rispetto alla superficie di incollaggio. Da un punto di vista progettuale viene presa in considerazione raramente poiché non è sufficiente aumentare la superficie di incollaggio per aumentare il carico meccanico sopportato, come nel caso del taglio a trazione (4)”;
- e. *Compressione*: sollecitazione alla quale non sono sensibili i giunti incollati;
- f. *Torsione*: presentano un comportamento analogo a quello riscontrato nel taglio a trazione.

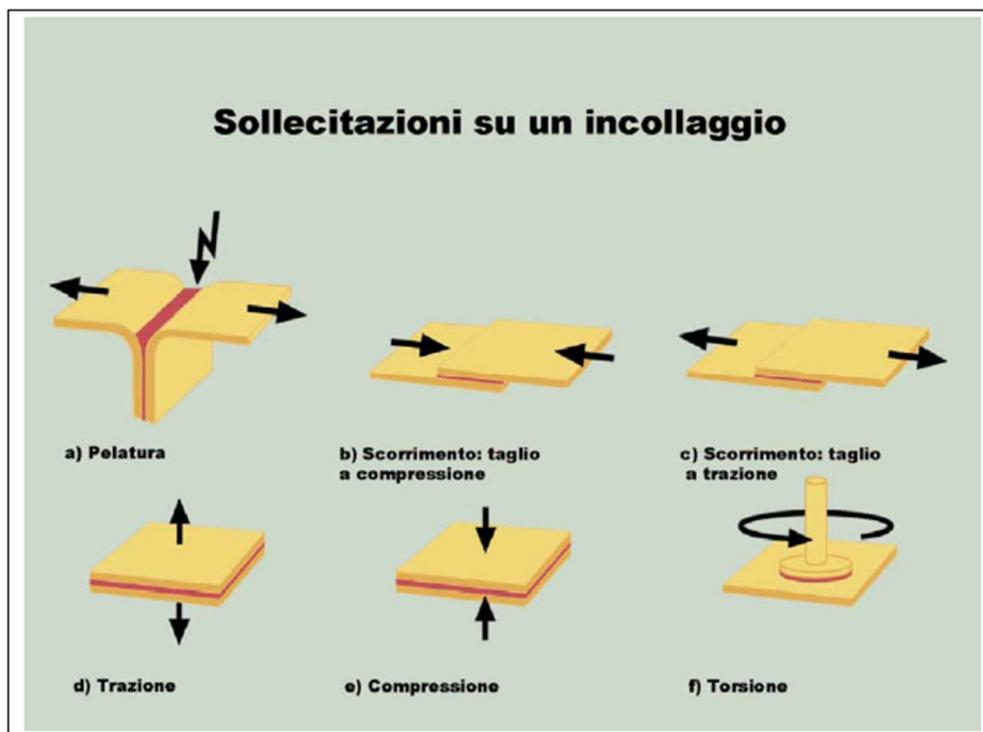


FIGURA 12 - SOLLECITAZIONI SU UN GIUNTO INCOLLATO (4)

2.4 Perché fare test di resistenza a rottura su giunti incollati

“I maggiori impedimenti dei giunti incollati sono dovuti alla difficoltà di determinare la resistenza di un giunto e di prevederne le prestazioni e l’affidabilità una volta che ne sia alterata la geometria (10)”. A sua volta, la difficoltà dell’analisi è dovuta a diversi fattori (10):

- Le condizioni di carico non sono quasi mai semplici, ma date dalla combinazione dei 5 modi elementari (vedi Fig 12) (10);
- “Nessuno dei componenti, né l’adesivo, né gli aderenti sono perfettamente rigidi (10)”;
- Lo spessore dell’adesivo influenza la deformazione sotto carico;
- I giunti incollati sono strutture costituite da materiali con proprietà meccaniche e termo-elastiche molto differenti (sforzi residui) (10).

Ad oggi, quindi, non si riesce a prevedere la forza di un giunto adesivo basandosi esclusivamente sulle proprietà degli adesivi e degli aderenti. Quindi, per determinare la forza di un giunto, si deve ricorrere ai test, che assumono un aspetto molto importante nella scienza adesiva. Esistono un gran numero di test standard, forniti dall’American Society for Testing and Materials (ASTM) e dall’International Organization for Standardization (ISO), correlati all’applicazione. È essenziale, però, non solo selezionare il *test appropriato* ma condurre il test *adeguatamente* e interpretare i risultati *conformemente*. In modo tale da poter confrontare i risultati indipendentemente dal laboratorio o dall’operatore che li ha effettuati (2).

Inoltre, in molti casi, le informazioni riportate dal fornitore sulla scheda tecnica dell’adesivo, sono limitate, ed è quindi opportuno testare attentamente le proprietà adesive di base (15). Queste proprietà sono: il modulo elastico, nel caso in cui l’analisi sia lineare elastica; la tensione di snervamento e quella di rottura nel caso non lineare.

2.5 Prove di taglio a trazione

“La prova di taglio a trazione è la prova standard più utilizzata per determinare la tenuta di legami con una forza medio-alta (4)”. Questo tipo di prova viene effettuata mediante una macchina dinamometrica impostata in modalità di trazione. Andando a sottoporre i substrati a carichi longitudinali, si determina la forza di taglio a trazione nella direzione del giunto incollato. “Per far ciò, il campione viene bloccato nelle ganasce autocentranti dell’unità di prova, in modo tale che la forza agisca al centro dello strato incollato (4)”. La prova, inoltre, viene effettuata con una velocità di movimento costante delle ganasce.

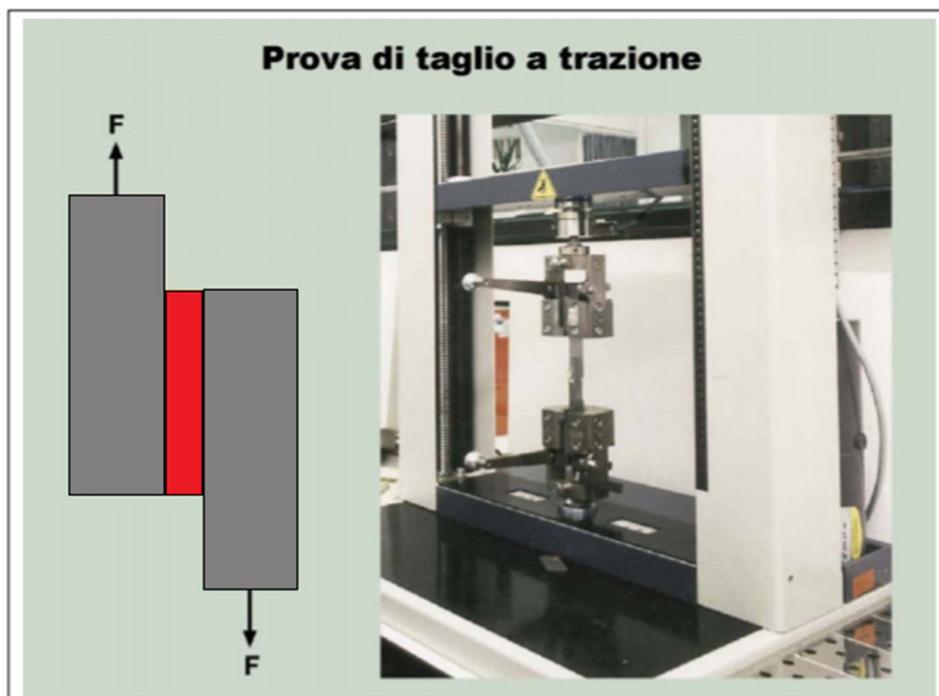


FIGURA 13 - PROVA DI TAGLIO A TRAZIONE (4)

Nel caso ideale di aderenti perfettamente rigidi, la sollecitazione di puro taglio darebbe luogo ad una distribuzione di sforzo uniforme. Nella pratica, però, i giunti sollecitati a taglio assumono diverse morfologie. “Infatti, a causa del disassamento degli aderenti,

della loro cedevolezza e di effetti di flessione, nascono distribuzioni di sforzo non uniformi, come si evince dalla seguente immagine (Fig. 14) (10)”.
Essi possono essere ridotti, andando di conseguenza ad aumentare la resistenza del giunto, grazie ad accorgimenti quali (10):

- Aumento dell'area di *overlap*;
- Aumento dello spessore degli aderendi per aumentare la rigidezza;
- Riduzione dello spessore degli aderendi per facilitare il cedimento flessionale.

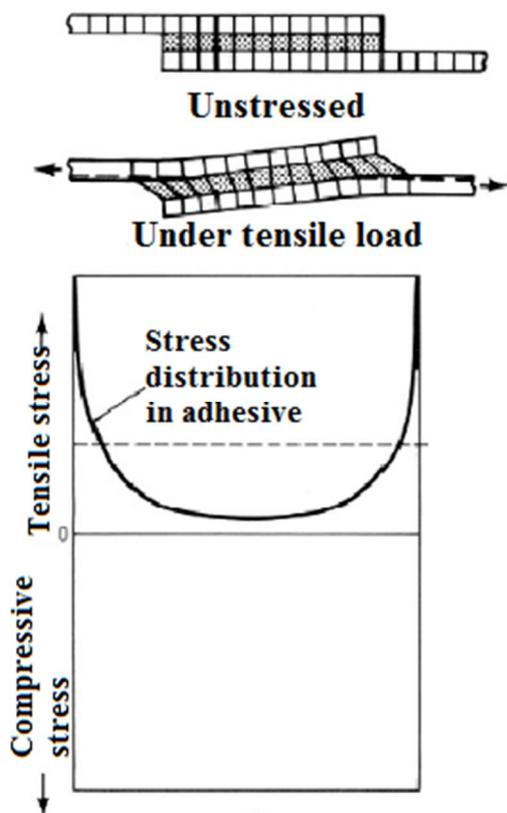


FIGURA 14 - ANDAMENTO DELLE TENSIONI IN UNA PROVA DI TAGLIO A TRAZIONE IN UN SLJ (10)

2.6 Prove di peeling

Le prove di peeling permettono di determinare la resistenza che possiede un giunto incollato alle sollecitazioni di pelatura (4). “Queste prove sono utilizzate principalmente per una valutazione comparativa degli adesivi e dei metodi di trattamento superficiale in quanto sono molto utili nel distinguere il comportamento di adesione e coesione nello strato adesivo” (4).

In questo tipo di prova il giunto incollato presenta una zona dove gli aderendi sono incollati ed una zona, dove, invece, gli aderendi vengono piegati in angoli retti in modo tale da comportarsi come linguette. Durante la prova, esse vengono agganciate alle ganasce di una macchina di trazione, fin quando l’adesivo non si lacera e il giunto adesivo risulta essere diviso in due parti. Proprio per questo, il *peel test* viene spesso considerato un test della frattura, poiché non misura una forza di rottura ma la propagazione di una cricca (4).

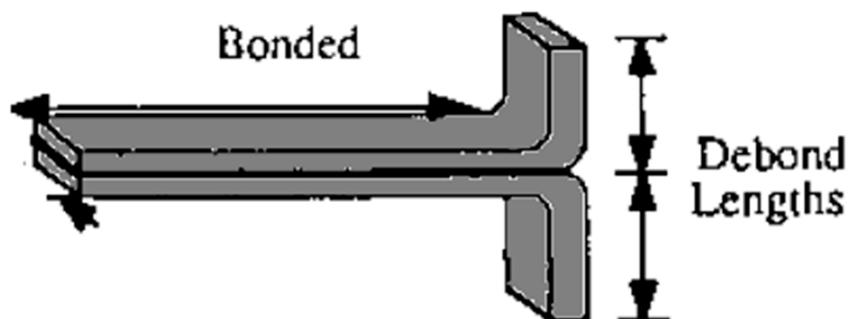


FIGURA 15 - PROVINO PEEL TEST (2)

“La resistenza alla pelatura non è una proprietà intrinseca dell’adesivo” (2). Infatti, il valore della forza richiesta per effettuare la pelatura dipende da numerosi fattori, quali: il metodo di prova, la velocità di caricamento, lo spessore dell’aderente e altri fattori (2).

2.7 Arcan test

Un altro tipo di test comunemente usato è l'Arcan test, che permette di sottoporre il provino a carichi di puro taglio, di pura trazione o una possibile combinazione di entrambi. Nella seguente immagine è riportato lo schema di un dispositivo di prova Arcan.

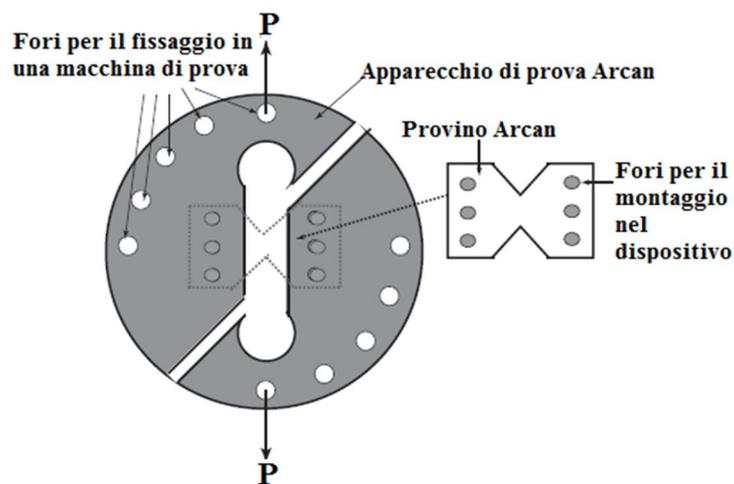


FIGURA 16 - SCHEMA DISPOSITIVO DI PROVA ARCAN (13)

Il supporto semicircolare metallico presenta una serie di fori che permettono il collegamento con la macchina di prova; in base al tipo di ancoraggio si determina il carico applicato. Difatti, nella configurazione rappresentata è applicato un carico P, che genera una tensione di taglio nella regione centrale del provino. Il supporto, però, può essere ruotato e collegato con la macchina di prova attraverso una qualunque coppia di fori 2opposti per generare una differente combinazione di taglio e trazione (13).

“Sebbene lo spessore esatto del campione non è fondamentale per il test, è importante che i campioni siano piatti e presentino uno spessore tale da evitare flessione o torsione durante le prove (15)”. Difatti, “e il campione è troppo sottile presenta una bassa rigidità e durante la prova può essere facilmente danneggiato, piegato o disallineato. Al contempo, però, un campione troppo spesso presenta difficoltà nel serraggio; bisogna, quindi, cercare un giusto compromesso (15)”.

Infine è importante sottolineare come, durante la progettazione di questo test, sono stati studiati due punti (19):

1. Andare a generare un campo di tensione, nel giunto adesivo, il più uniforme possibile con lo sforzo massimo collocato al centro del giunto, lontano dai bordi (19);
2. Il sistema di fissaggio dei substrati all’attrezzatura deve essere progettato per impedire un eventuale precarico del giunto adesivo (19).

2.8 Cedimento di un giunto adesivo

Nei test meccanici i giunti incollati sono caricati fino al punto di rottura. Questo perché il tipo di rottura rivela la qualità del legame e un eventuale errore di produzione. Esistono differenti modalità di cedimento per un giunto incollato, come si può osservare in Figura 17.

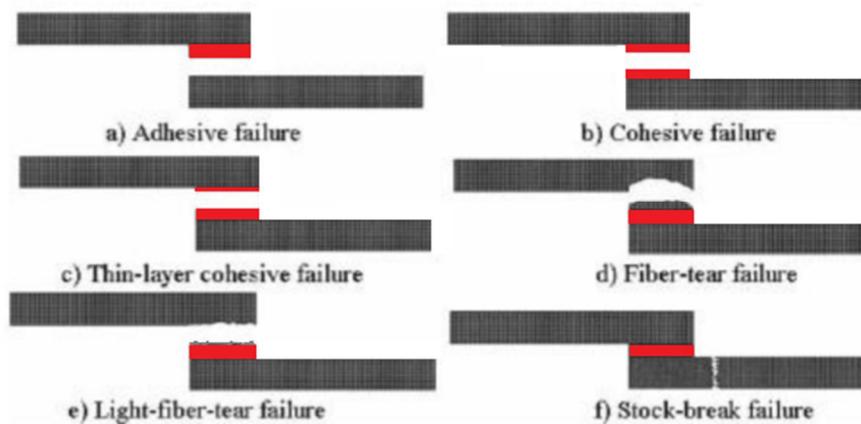


FIGURA 17 - MODALITÀ DI ROTTURA PER UN GIUNTO ADESIVO (20)

- (a) *Adhesive failure*: “cedimento interfacciale in corrispondenza dell’effettiva interfaccia tra adesivo e un aderendo (10)”. Questo cedimento è spesso dovuto o a una errata preparazione del giunto, o a problemi di compatibilità tra adesivo ed aderendo o, ancora, a una forza di coesione superiore a quella di adesione;
- (b) *Cohesive failure*: cedimento per il quale uno strato di adesivo rimane solidale alla superficie di un aderendo e un altro strato, identico a quello precedente, alla superficie dell’altro aderendo. Questo è il cedimento auspicabile durante ogni prova, poiché indica che l’adesione è rimasta stabile nonostante le influenze esercitate sull’adesivo;
- (c) *Thin-layer cohesive failure*: cedimento analogo a quello puramente coesivo (b) ma con una ripartizione dell’adesivo non equa sugli aderendi;
- (d) *Fiber-tear failure*: si può verificare solamente nel caso di materiale composito. Qui il cedimento non avviene all’adesivo, come dovrebbe essere, ma alle fibre del materiale in corrispondenza della zona di sovrapposizione. Questo potrebbe essere causato da una forza di adesione dell’adesivo superiore a quella delle fibre dell’aderendo;
- (e) *Light-fiber-tear-failure*: cedimento delle fibre del materiale, come nel punto (d), ma con un cedimento più in prossimità dell’interfaccia fra aderendo ed adesivo;
- (f) *Stock-break-failure*: dove il cedimento dell’aderendo non coinvolge la zona di sovrapposizione, come nei punti (e) e (d), ma l’aderendo.

3 Stato tensionale in un giunto adesivo

3.1. Tensioni e deformazioni in un giunto adesivo

L'adesione, come accennato in precedenza, è una tecnica che permette di unire materiali molto differenti tra di loro. Questo, difatti, è uno tra i principali vantaggi che ha permesso la diffusione degli adesivi, in un'ampia gamma di applicazioni. Per contro, le applicazioni strutturali meritano una particolare attenzione, poiché occorre assicurare che il giunto adesivo possieda sufficiente resistenza e durata nella condizione operativa. Infatti, quando un corpo, in questo caso il giunto adesivo, è sottoposto ad un carico, in esso si creano tensioni e deformazioni (14). Dove, le tensioni rappresentano l'intensità del carico in qualsiasi punto, le deformazioni, invece, rappresentano la variazione di forma di un corpo (14)“. Quindi, punto fondamentale per prevedere la resistenza di un giunto adesivo, riguarda un'accurata analisi delle tensioni e deformazioni nei suoi punti critici, ovvero lo strato adesivo.

Sebbene le fonti di carico in un giunto adesivo possono essere molteplici, le tensioni principali indotte al suo interno sono o tensioni di taglio (τ) o tensioni normali (σ), che sono rispettivamente causate da una forza che agisce perpendicolarmente e parallelamente alla normale dell'area presa in esame (14).

Infatti, prendendo in considerazione una rappresentazione bidimensionale di un giunto adesivo, come si può osservare in Figura 18, sono presenti due tensioni normali ed una

tensione di taglio. Qualora, invece, ci trovassimo di fronte ad un caso tridimensionale, allora avremmo tre tensioni normali e tre di taglio.



FIGURA 18 - TENSIONI BIDIMENSIONALI IN STRATO ADESIVO (14)

Le tensioni normali, però, a loro volta, producono una compressione o estensione delle fibre del materiale, nota come deformazione normale ϵ . Le tensioni di taglio, invece, generano una deformazione di scorrimento, nota come deformazione di taglio γ . Inoltre, le tensioni e le deformazioni sono legate tra di loro grazie alla rigidità del materiale, infatti (14):

- Nel caso tridimensionale possiamo dire che $[\sigma]=[D][\epsilon]$
- Nel caso monodimensionale, l'equazione si semplifica nel seguente modo $\sigma=E \cdot \epsilon$;

Dove E è il modulo di Young.

3.2. Fonti di tensioni

Esistono molte fonti che generano tensioni e corrispondenti deformazioni in un giunto adesivo. Le principali sono di seguito riportate.

3.2.1. Carico meccanico

“Il carico meccanico, che può essere rappresentato in termini di forza, momento o coppia, è considerato la fonte di tensione più comune in un giunto adesivo (14) “. Questo tipo di carico può essere di svariata natura, esso infatti: può indurre un effetto dinamico, può persistere per un lungo periodo in modo oscillante o costante e sommarsi a carichi quasi statici (14). Prendendo in considerazione carichi quasi-statici, possiamo osservare lo stato tensionale generato all’interno del giunto adesivo.

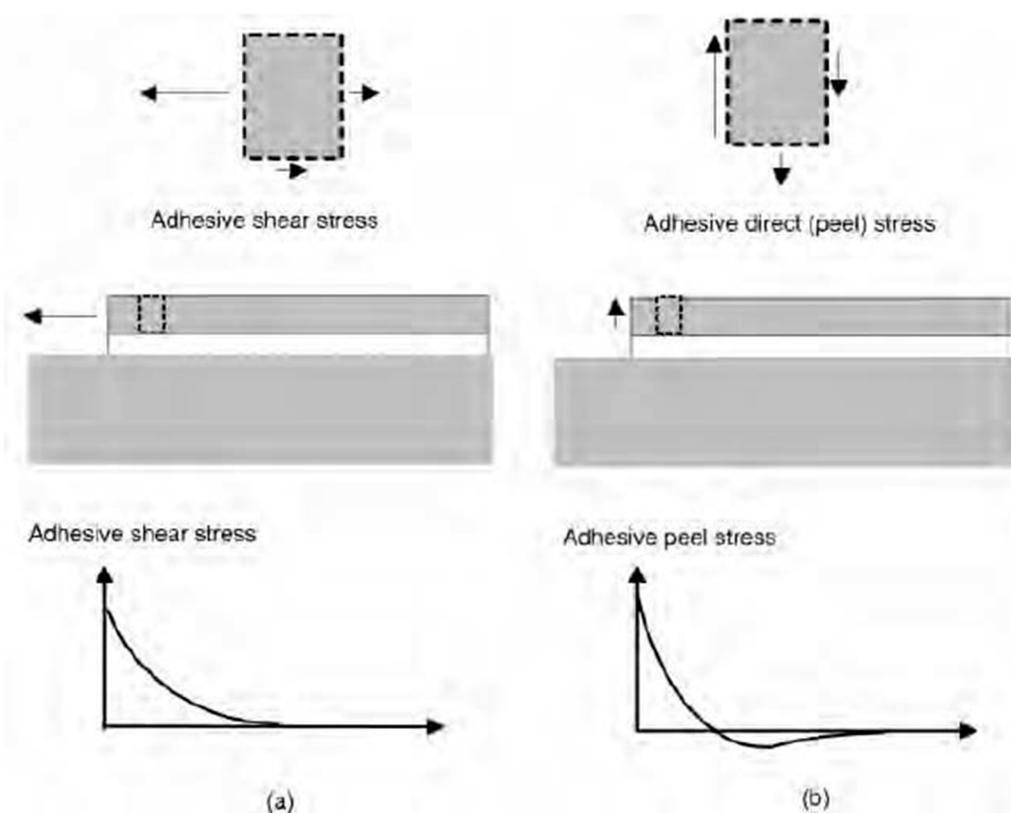


FIGURA 19 - TENSIONI DI SHEAR E PEEL IN UN GIUNTO ADESIVO (14)

In Figura 21(a) è rappresentato un carico che agisce parallelamente alla superficie adesiva e che genera una tensione di *shear* nel giunto adesivo. Infatti, andando ad analizzare un elementino infinitesimo del substrato, su di esso si osserva un carico applicato verso sinistra, mentre, verso destra, ci sono le forze di reazione alla forza applicata. Questa forza di reazione presenta, a sua volta, una componente che agisce sull’elementino

immediatamente adiacente a quello preso in considerazione e, una componente, nella parte inferiore, che agisce sullo strato adesivo. La forza trasmessa all'elementino adiacente e allo strato adesivo, quindi, tende gradualmente a diminuire allontanandosi dal punto di applicazione, fino ad annullarsi completamente.

In Figura 21(b), invece, è applicato un carico perpendicolare allo strato adesivo, che genera una tensione di *peel*. Anche in questo caso, analizzando un elementino infinitesimo del substrato, si osserva una forza applicata verso l'alto e le forze di reazione che agiscono verso il basso. Di cui, una componente, sull'elementino infinitesimo immediatamente adiacente e, l'altra componente, sullo strato adesivo. Poiché, però, l'adesivo subisce una piccola rotazione oraria, questo porta ad una sua compressione, con corrispondente andamento "decadente ed oscillante" della tensione di *peel* (14).

Nel caso bidimensionale, però, i carichi agenti sul substrato sono tre: la forza assiale, quella perpendicolare e il momento flettente, che genera a sua volta tensioni di *shear* e di *peel*, con andamenti analoghi a quelli appena descritti e contributi che si sommano a quelli dati dal puro *shear* e puro *peel*.

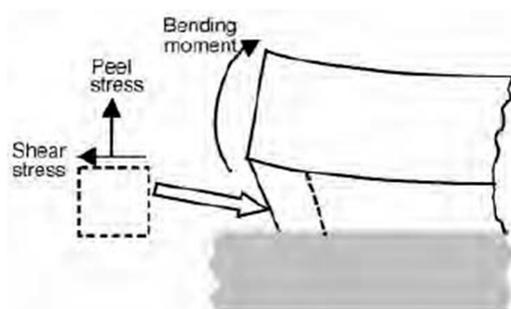


FIGURA 20 - FORZE IN CAMPO IN BIDIMENSIONALE (14)

3.2.2. Effetto termico

Le variazioni di temperatura causate da scambi di calore con l'ambiente circostante producono deformazioni nei componenti in questione. E, se tali deformazioni sono impedito, nascono tensioni che possono essere considerate rilevanti nel caso in cui esse

superano la tensione di rottura del materiale stesso. Il grado di espansione o contrazione di un materiale, dipende dal cambiamento di temperatura e dal coefficiente di espansione termico (CTE), caratteristico per ogni materiale.

“Per quanto riguarda i giunti adesivi, il cambiamento di temperatura più significativo, spesso, si verifica nel raffreddamento, dopo un ciclo di polimerizzazione, avvenuto a temperatura elevata (14)”. L’adesivo solitamente presenta un CTE superiore a quello dei substrati, quindi esso vuole contrarsi di più (14). Una situazione ancora più critica si verifica quando i due substrati presentano un differente CTE; qui, “il substrato con CTE maggiore, si contrae di più, andando a trasmettere una tensione di taglio attraverso l’adesivo, all’altro substrato, che invece subirà una compressione (14)”.

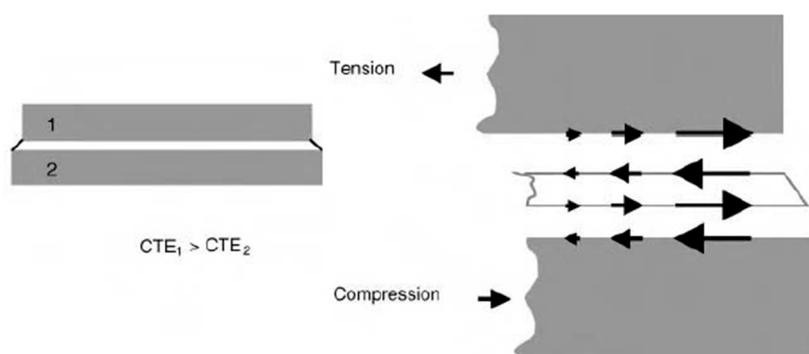


FIGURA 21 - SUBSTRATI CON DIVERSO “CTE” (14)

“In alcuni casi, questi stress da taglio termico indotto, sono stati sufficienti a causare la rottura del giunto adesivo ancor prima di applicare qualsiasi carico (14).”

3.2.3. Rigonfiamento da umidità

Altra causa di stress all’interno di un giunto adesivo è l’umidità, che assorbita, porta ad un suo rigonfiamento. Queste tensioni possono essere trattate in modo analogo a quelle generate da un effetto termico, dove (14):

- Al CTE viene sostituito il coefficiente di rigonfiamento (CS);
- Alla variazione di temperatura una concentrazione di umidità.

Il problema, però, è che questa distribuzione di umidità non è uniforme e per andare a valutare le tensioni nel giunto si devono utilizzare strumenti come il metodo agli elementi finiti (FEA) (14). In queste situazioni si noterà un rigonfiamento maggiore nelle zone vicine agli estremi dell'*overlap*, che comporta una compressione. “Nel caso in cui il giunto adesivo sia sottoposto a *peel* una parte della tensione applicata andrà a compensare prima la compressione e poi genererà la trazione, quindi la tensione risultante sarà più bassa di quella aspettata (14)”. Come nel caso termico, le tensioni possono essere superiori se un substrato si gonfia e l'altro no, ad esempio con un giunto metallo-materiale composito (14).

3.2.4. Tensioni singolari locali

Le cause discusse fino ad ora generano tensioni globali, ma esistono altre due fonti principali per la generazione di tensioni in giunti adesivi (14). “Una è la cricca, che presenta tensioni tendenti a infinito in prossimità dell'apice della stessa. L'altra fonte sono le giunzioni bi-materiali, che portano alla generazione di tensioni o in corrispondenza della fine dell'*overlap* (A) o in corrispondenza dell'angolo di un substrato (B) che è incorporato nello strato adesivo (14)”.

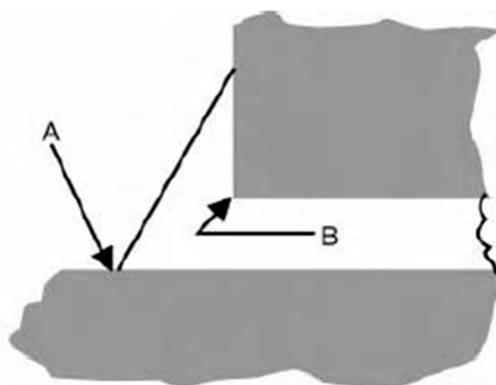


FIGURA 22 - PUNTI DI SINGOLARITÀ IN UN GIUNTO BI-MATERIALE (14)

Adams e Harris, nel 1987, hanno dimostrato che le tensioni seguono il campo locale singolare fino ad una certa distanza dal punto singolare, che è dell'ordine di grandezza

della cricca, solitamente dell'ordine del micron. In tali punti di singolarità risulta inappropriato utilizzare la tensione come metodo di cedimento.

3.3. Analisi delle tensioni.

La distribuzione delle tensioni in un giunto incollato può essere ottenuta mediante un modello in forma chiusa o tramite un'analisi agli elementi finiti (FEA) (14). Sicuramente, per geometrie complesse è preferibile quest'ultima, ma, nel caso si volesse ottenere una risposta veloce e semplice si può adottare la forma chiusa (14). Difatti, “un modello in forma chiusa è basato sulla risoluzione di equazioni differenziali, formulate per una specifica configurazione del giunto (14)”. Inizialmente le analisi erano unidimensionali e le soluzioni erano presentate sotto forma di equazioni esplicite. In seguito, però, le analisi sono diventate più complesse a causa dell'introduzione della non linearità e dell'introduzione di una seconda dimensione; quella dello spessore dell'adesivo. Infatti, “le tensioni nella direzione della larghezza possono essere considerate trascurabili, poiché nettamente più basse di quelle nella direzione del carico (14)”.

In letteratura è presente una vasta rassegna dei modelli analitici esistenti per il SLJ e DLJ, ognuno con le sue condizioni di applicabilità e con le corrispettive componenti tensionali prese in esame.

3.3.1. Analisi classica lineare elastica

L'analisi lineare elastica prende in considerazione la configurazione di SLJ con una forza di taglio applicata e degli aderenti non deformabili. Come si può osservare in Figura 23, la tensione di taglio τ è costante lungo tutta la lunghezza dell'*overlap* ed essa può essere ricavata nel seguente modo:

$$\tau = \frac{P}{bl}$$

Dove P è il carico applicato, b è la larghezza del giunto ed l è la lunghezza dell'*overlap*.

Il valore della tensione di taglio, però, rappresenta un valor medio, quindi, questa analisi non può essere considerata realistica. Ciò nonostante, essa è ancora attualmente utilizzata in molti test come gli standard ASTM e ISO (21).

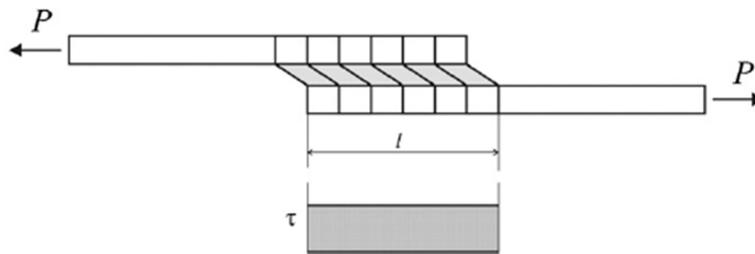


FIGURA 23 - SLJ CON ADERENDI RIGIDI (21)

3.3.2. Analisi classica di Volkersen

L'analisi di Volkersen si basa su un SLJ con una forza di taglio applicata, come nel caso precedente, ma con degli aderendi deformabili. Esso, difatti, "introduce il concetto di "taglio differenziale", poiché la tensione di taglio non ha un andamento costante (21)".

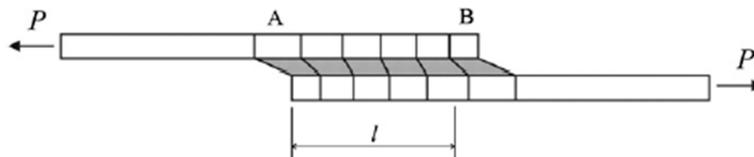


FIGURA 24 - SLJ CON ADERENDI ELASTICI (21)

Andando ad analizzare una piccola sezione infinitesima di adesivo lungo Δx , dopo la deformazione, possiamo osservare che:

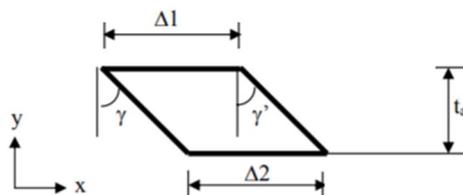


FIGURA 25 - ELEMENTINO INFINITESIMO (22)

Dove:

1. ϵ_{x1} = deformazione longitudinale della fibra superiore;
2. ϵ_{x2} = deformazione longitudinale della fibra inferiore;
3. τ = tensione di taglio;
4. G = modulo di rigidezza dell'adesivo;
5. t_a = spessore adesivo.

Che possono essere ricavati come segue:

$$\epsilon_{x1} = - \frac{F(x)}{E1t1}$$

$$\epsilon_{x2} = - \frac{F(x)}{E1t1}$$

$$\Delta1 = (1+\epsilon_{x1})\Delta x$$

$$\Delta2 = (1+\epsilon_{x2})\Delta x$$

$$\gamma' = \gamma + \frac{d\gamma}{dx}\Delta x$$

E valgono le seguenti uguaglianze:

$$\Delta2 + t_a \gamma = \Delta1 + t_a \gamma' \quad \text{oppure;}$$

$$(1 + \epsilon_{x2}) - t_a \frac{d\gamma}{dx} = (1 + \epsilon_{x1}) \quad \text{oppure;}$$

$$\epsilon_{x2} - \epsilon_{x1} = \frac{t_a}{G} \frac{d\tau}{dx}$$

Dalla Figura 24 si può osservare come, sull'aderendo superiore, la tensione di taglio è massima in A e diminuisce, fino a diventare nulla, in B. Cosa analoga, ed opposta, vale per l'aderendo inferiore. Ciò è causato da una riduzione della forza lungo l'*overlap*, negli aderendi. Complessivamente, l'andamento delle tensioni di taglio lungo l'*overlap* può essere rappresentato in Figura 26 e descritto dicendo che le tensioni di taglio massime sono presenti agli estremi dell'*overlap* e risultano essere nettamente più basse nella zona centrale. Questo modello, quindi, risulta essere un modello molto semplificato poiché non

tiene conto di una eventuale flessione degli aderendi o di un equilibrio alla rotazione non verificato.

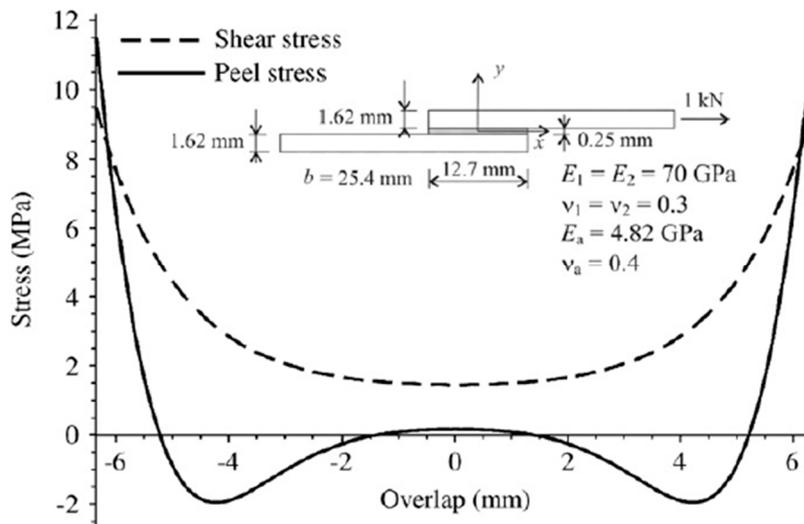


FIGURA 26 - ANDAMENTO DELLE TENSIONI DI TAGLIO E DI PEEL IN OVERLAP CON ADERENDI ELASTICI (21)

3.3.3. Svantaggi dell'analisi classica

Oltre l'analisi di Volkersen, è presente anche quella proposta da Goland e Reissner, i quali “hanno tenuto conto del momento che si genera sul giunto adesivo quando viene applicata una forza di taglio (21)”. Al contempo, però, quest'analisi classica presenta delle limitazioni, tra cui (21):

- Non tiene conto della variazione delle tensioni lungo lo spessore, questo però risulta “importante qualora la rottura del giunto adesivo avvenisse in prossimità dell'interfaccia aderendo/adesivo (21);
- Non considera la presenza di tensioni libere agli estremi dell'overlap, che tende a sovrastimare le tensioni agli estremi del giunto (21);
- “Non vengono prese in considerazione le tensioni di taglio lungo lo spessore degli aderendi, le quali risulterebbero rilevanti qualora si avesse a che fare con aderendi in materiale composito (21)”.

3.3.4. Dalle analisi lineari alla modellazione FEM

Dopo le analisi classiche, anche altri autori hanno cercato nuove soluzioni in forma chiusa; ad esempio per aderenti che differiscono nello spessore o nel materiale, o per aderenti in materiale composito (21). Autori come Renton and Vinson, Srinivas and Allman, si sono occupati delle deformazioni normali e di taglio nello spessore dell'aderendo, soprattutto nel caso in cui esso sia costituito da materiale composito laminato. Adams e Mallick che si sono occupati di analizzare le tensioni sull'interfaccia adesivo/aderendo. Di seguito, Bigwood e Crocombe, hanno fatto notare come la maggior parte delle considerazioni fatte in passato erano riferite solamente al SLJ o al DLJ. Loro, quindi, hanno voluto cercare un'analisi elastica generale che permettesse di adattarsi a varie configurazioni di giunti adesivi sotto configurazioni di carico complesse. Hart-Smith, invece, ha sviluppato un modello di tensioni di taglio elasto-plastico, nel caso in cui la deformazione plastica portasse a cedimento il giunto adesivo. Questo modello, successivamente, è stato ripreso dagli stessi Bigwood e Crocombe, i quali hanno tenuto conto della non completa attendibilità di un'analisi elastica lineare. Tutte queste teorie, che si sono susseguite nel tempo, hanno cercato di andare verso una generalizzazione del fenomeno, in modo tale da avere equazioni che si avvicinano alle condizioni più generali possibili. Al contempo, però, più le analisi tendono ad essere generali e complete, e più ci si dirige verso equazioni sempre più complesse, che richiedono l'ausilio del computer per essere risolte ed avere una soluzione semplice ed effettiva (21). La modellazione mediante gli elementi finiti, infatti, non prevede una specifica geometria o condizione di carico e permette una non linearità del materiale o della geometria. Al contempo, però, è necessaria una conoscenza accurata dei parametri caratteristici del materiale o di mesh molto fitte per poter valutare lo stato tensionale.

4 Prove preliminari

4.1 Descrizione prove preliminari

Lo scopo delle seguenti prove preliminari è stato quello di andare a valutare sia le proprietà meccaniche di due adesivi, applicati a un comune metallo con la configurazione di SLJ, che una eventuale alterazione dei risultati attesi dovuti a un confinamento della zona di incollaggio. Dove, la valutazione delle proprietà meccaniche, è stata fatta in base a:

- Valutazione del carico massimo;
- Tipologia di frattura.

Inizialmente, sono stati realizzati i provini con la configurazione di SLJ, con un *overlap* normale e confinato, con entrambi gli adesivi in dotazione. Di seguito, sul provino, sono state effettuate prove di taglio a trazione mediante una macchina servo-idraulica Instron, rappresentata in Figura 27

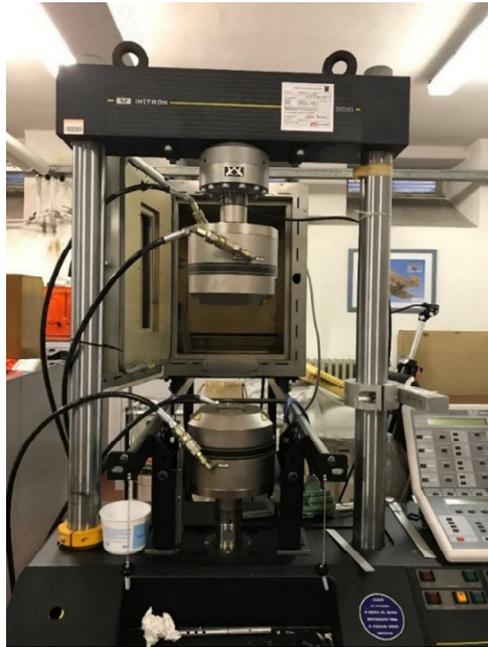


FIGURA 27 - MACCHINA DINANOMETRICA INSTRON

Il provino è stato collegato alla macchina di prova alle sue estremità, mediante due ganasce, una fissa e l'altra solidale alla traversa mobile inferiore della macchina; dove il carico è stato applicato grazie allo spostamento di quest'ultima.



FIGURA 28 - PROVINO NELLA INSTRON

La prova è stata eseguita a velocità costante, fino a provocare il distacco del giunto. La macchina servoidraulica Instron, inoltre, era collegata al software Bluehill®, il quale restituiva i valori numerici del carico applicato in funzione dello spostamento. Questo ci ha permesso, infatti, mediante una elaborazione dei dati ottenuti alla fine di ogni singola prova, di andarne a valutare l'andamento.

Inoltre, al fine di evitare disallineamenti, alle estremità del provino sono stati posizionati dei *tabs* (evidenziati in Figura 29); ovvero dei distanziali messi sul campione da analizzare, al fine di garantire una deformazione uniassiale, cioè di puro taglio.

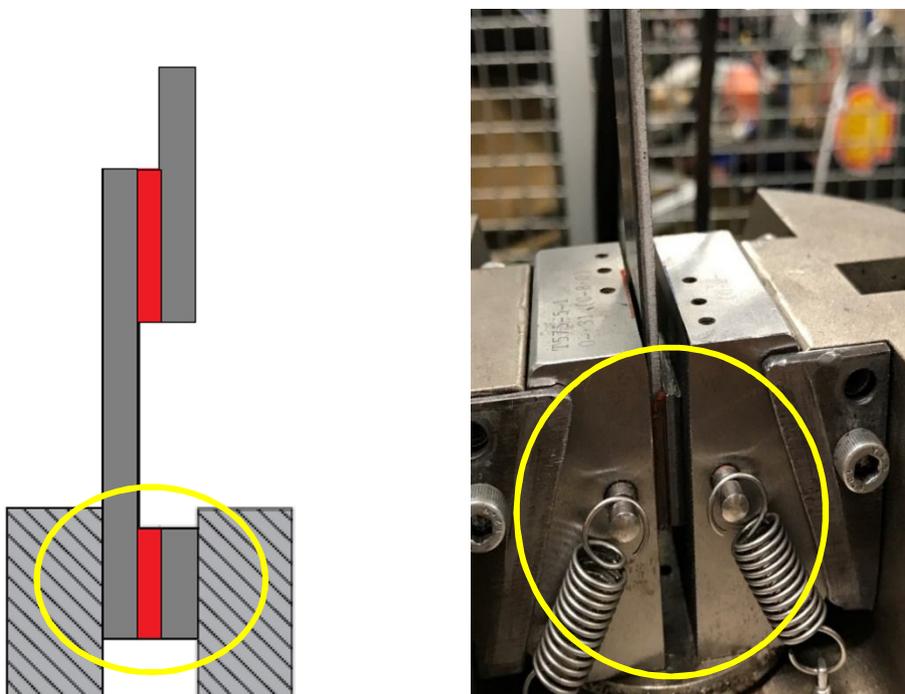


FIGURA 29 - TABS SUL PROVINO

4.2 Adesivi

Gli adesivi, oggetto di studio durante le prove preliminari eseguite, sono entrambe due resine epossidiche, fornite da Dow Automotive. Questi adesivi vengono attualmente utilizzati prevalentemente in ambito *automotive* poiché sono adesivi strutturali che permettono alle strutture di sopportare elevati carichi, permettono di collegare materiali differenti, di resistere a vibrazioni o ad ambienti particolarmente corrosivi.

In Tabella 1 e 2 vengono riportate le caratteristiche tecniche degli adesivi fornite dal produttore.

BETAMATE 4600G	
Base	Resina epossidica
Colore	Arancione
Densità 23°C (DIN 52451)	1.28 g/ml
Cura standard	180 °C/30minuti
Resistenza a trazione (DIN EN ISO 527-1)	56 MPa
Modulo-E (DIN EN ISO 527-1)	2900 MPa
Resistenza a taglio (DIN EN 1465) Area di incollaggio 25x10mm	26 MPa
Resistenza a pelatura (DIN EN) Area di incollaggio 25x100mm	11 N/mm

TABELLA 1 - CARATTERISTICHE TECNICHE BETAMATE 4600G

È importante sottolineare che, il Betamate 4600G, è un adesivo a base di resina epossidica riempito con sfere di vetro appositamente sviluppate per la carrozzeria. Esse permettono di garantire uno spessore adesivo prefissato; in questo caso le sfere di vetro presentano un diametro di 0.2 mm.

BETAMATE 1640	
Base	Resina epossidica
Colore	Viola brillante
Densità 23°C (DIN 52451)	1.22 g/ml
Cura standard	180 C°/30minuti
Resistenza a trazione (DIN EN ISO 527-1)	36 MPa
Modulo-E (DIN EN ISO 527-1)	2270 MPa
Resistenza a taglio (DIN EN 1465) Area di incollaggio 25x10mm	24 MPa
Resistenza a pelatura (DIN EN) Area di incollaggio 25x100mm	11 N/mm

TABELLA 2 - CARATTERISTICHE TECNICHE BETAMATE 1640

4.3 Provini preparati

Le prove sono state effettuate su due tipologie di provini:

- SLJ con *overlap* non confinato;

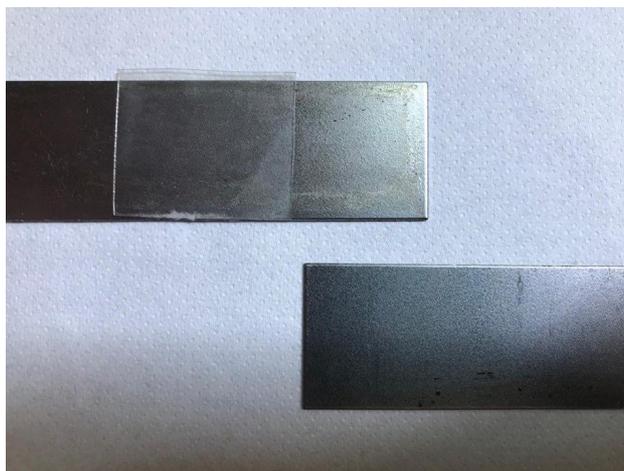


FIGURA 30 - SLJ NON CONFINATO

- Provino con *overlap* confinato (OC) con poliestere o teflon.

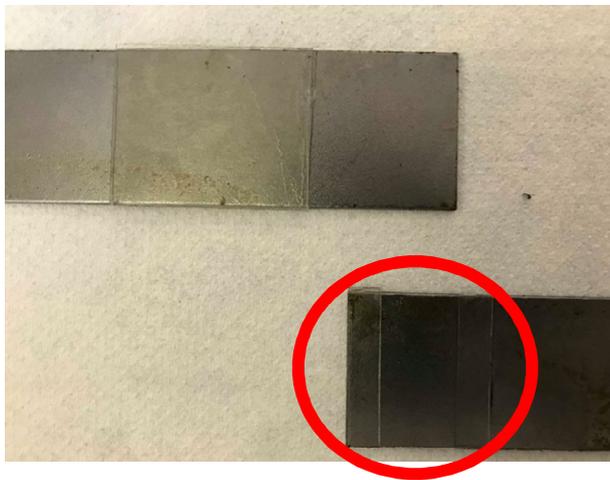


FIGURA 31 - PROVINO CONFINATO

Le prove sono state effettuate sui seguenti provini al fine di andare a valutare un'eventuale alterazione dei risultati sui provini con *overlap* confinato rispetto a quelli con la configurazione di SLJ. Questo perché, un *overlap* confinato, potrebbe andare ad aumentare la forza di adesione tra due aderenti nel caso in cui il materiale utilizzato, nel confinamento, andasse a creare un ulteriore legame adesivo tra i due aderenti. In tal caso, la zona di incollaggio aumenterebbe e conseguentemente la forza di adesione. Nel caso in cui, i giunti adesivi con analogo *overlap* e adesivo, sottoposti a medesimo test, presentano la stessa forza di rottura, allora il confinamento non ha contribuito al legame adesivo. Se, invece, la forza di rottura del giunto incollato con *overlap* confinato presenta una forza di rottura superiore al SLJ, si evince che il confinamento ha contribuito all'adesione e ciò implica un'alterazione dei risultati finali.

4.5 Prove su provini con spessore di 0.74 mm

Le prime prove eseguite sono state effettuate su provini che presentano le seguenti caratteristiche:

Overlap	12.5x25 mm
Spessore lamiera	0.74 mm

TABELLA 3 - CARATTERISTICHE PRIMI PROVINI

Le prove sono state effettuate con una velocità di prova costante di 5 mm/min e sono state eseguite 3 repliche per ogni condizione, al fine di verificare la ripetibilità dei risultati.

Le prove effettuate sono le seguenti:

Adesivo usato	Overlap [mm]	Spessore adesivo [mm]
4600G	12.5x25	0.2
4600G	12.5Cx25	0.75
4600G	12.5Cx25	0.2
1640	12.5x25	0.2
1640	12.5Cx25	0.2

TABELLA 4 - PROVE EFFETTUATE

Di seguito vengono illustrati opportuni confronti.

4.5.1. Betamate 4600G: SLJ vs OC

Dapprima vengono illustrati gli aderendi del giunto adesivo ottenuti alla fine della prova di taglio a trazione.



FIGURA 32 - 4600G 12.5Cx0.2



FIGURA 33 - 4600G 12.5X0.2

Come mostrato in Figura 32 e 33, si evince un cedimento adesivo, poiché l'adesivo risulta essere tutto su un solo aderendo. Una frattura di questo tipo potrebbe denotare un'incompatibilità tra il substrato e l'adesivo, un pretrattamento superficiale inadeguato o una forza di coesione superiore a quella di adesione. Inoltre, si può osservare una prevalenza di rottura a *peeling* sugli aderendi.

In Figura 34 e Tabella 5 vengono riportati i valori numerici ottenuti durante le prove.

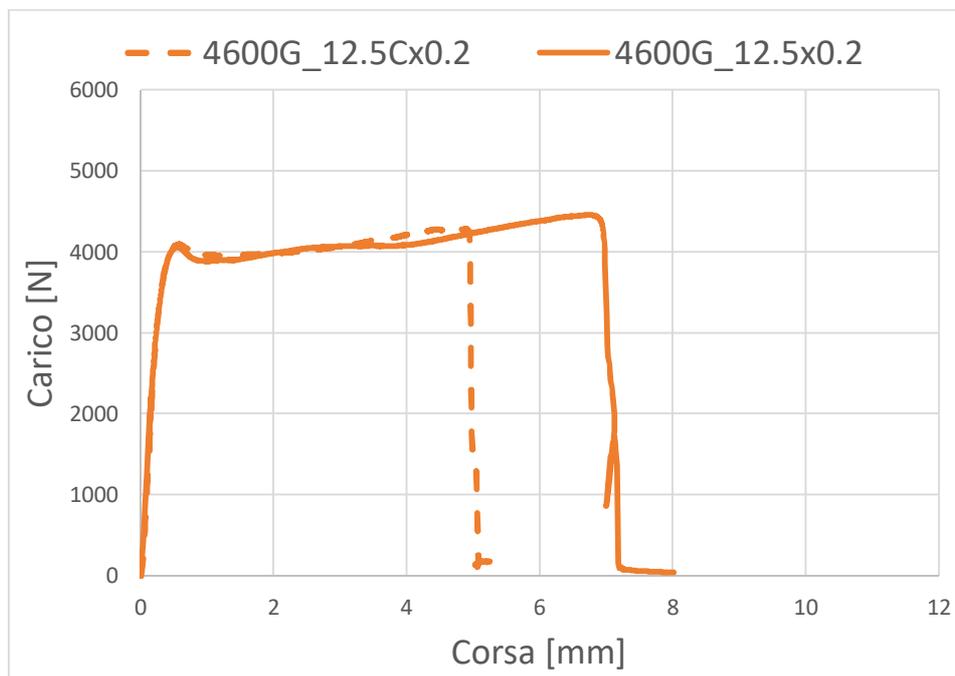


FIGURA 34 - SLJ vs OC 4600G

4600G 12.5Cx0.2 Carico Medio [N]	4600G 12.5x0.2 Carico Medio [N]
4389	4461
Deviazione Standard [N]	Deviazione Standard [N]
207	69

TABELLA 5 - VALORI OTTENUTI 4600G

In Figura 34 si evidenzia, nell'andamento del carico di rottura, una zona con un tratto rettilineo, probabilmente causata dallo scivolamento del provino e da una deformazione plastica degli aderendi. Infatti, l'andamento dovrebbe presentare un tratto con una rapida salita, fino al raggiungimento del picco, che coincide con il carico di rottura, e una successiva repentina discesa, che si annulla quando i substrati del giunto sono completamente distaccati.

Al contempo, un'osservazione importante, è quella di aver ottenuto valori simili del carico medio per entrambi i provini; ciò implica che il confinamento mediante poliestere non genera un contributo nella forza adesiva.

4.5.2. Betamate 1640: SLJ vs OC

Analoghe prove sono state eseguite con l'adesivo Betamate 1640, dalle quali si sono riscontrati i risultati di seguito riportati.



FIGURA 35 - 1640 12.5CX0.2

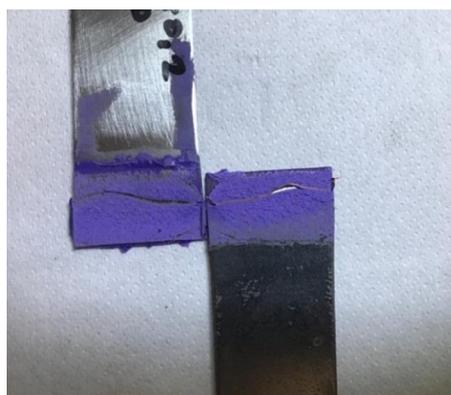


FIGURA 36 - 1640 12.5X0.2

In Figura 35 e 36 si desume, nel giunto adesivo confinato, una frattura di tipo adesivo, mentre, per il SLJ una frattura di tipo coesivo. In questo caso, però, poiché l'adesivo non presentava al suo interno delle sfere di vetro, al fine di garantire uno spessore prestabilito, come nel caso del Betamate 4600G, si è prevista l'interposizione di un filo di rame con uno spessore di 0.2 mm, analogo a quello delle sfere di vetro; questo permette una confrontabilità dei risultati.

Come avvenuto con il Betamate 4600G, anche durante queste prove, si osserva uno scivolamento del provino e una deformazione plastica dei substrati. Inoltre, è presente

una prevalenza di rottura a *peeling* pur avendo previsto dei *tabs* ai provini; questo probabilmente è riconducibile allo spessore ridotto dell'aderendo.

In Figura 37 e Tabella 6 sono riportati i valori numerici ottenuti.

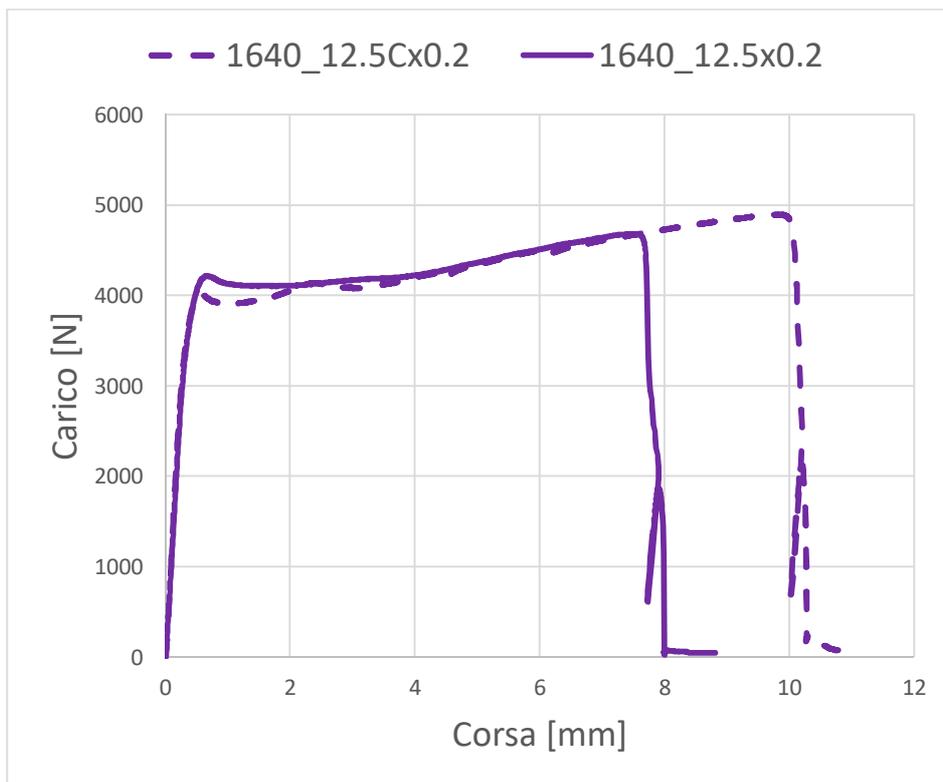


FIGURA 37 - SLJ VS OC 1640

1640 12.5Cx0.2 Carico Medio [N]	1640 12.5x0.2 Carico Medio [N]
4834	4769
Deviazione Standard [N]	Deviazione Standard [N]
130	301

TABELLA 6 - VALORI OTTENUTI 1640

Anche in queste prove, però, non si riscontra un'alterazione della forza di adesione a causa del confinamento. Questo porta a dedurre che il confinamento può essere largamente utilizzato nel caso in cui si vogliano unire provini che presentano una zona di sovrapposizione superiore all'*overlap* adesivo previsto.

4.6 Prove su provini con spessore di 3 mm

Le seconde prove preliminari eseguite sono state effettuate su provini che presentano le seguenti caratteristiche:

Overlap	10x26 mm
Spessore lamiera	3 mm

TABELLA 7 - CARATTERISTICHE SECONDE PROVE

Le prove sono state effettuate con una velocità di prova costante di 5 mm/min e sono state eseguite 3 repliche per ogni condizione, al fine di verificare la ripetibilità dei risultati.

Le prove effettuate sono le seguenti:

Adesivo usato	Overlap [mm]	Spessore adesivo [mm]
4600G	10x26	0.2
4600G	10Cx26	0.2
1640	10x26	0.2
1640	10Cx26	0.2

TABELLA 8 - PROVE EFFETTUATE

Di seguito vengono illustrati opportuni.

4.6.1 Betamate 4600G: SLJ vs OC

Dapprima vengono illustrati gli aderendi del giunto adesivo ottenuti alla fine della prova di taglio a trazione.



FIGURA 38 - 4600G 10Cx0.2

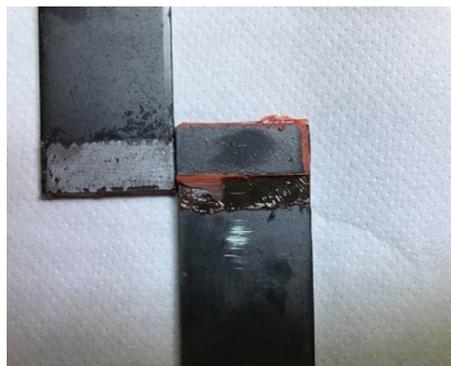


FIGURA 39 - 4600G 10x0.2

Come mostrato in Figura 38 e 39, si denota un cedimento del giunto adesivo non in corrispondenza dell'adesivo, come dovrebbe essere, ma alle fibre del materiale; in corrispondenza della zona di sovrapposizione. Si osserva, infatti, un vero e proprio sfaldamento del materiale.

In Figura 40 e Tabella 9 vengono riportati i valori numerici ottenuti durante le prove con gli opportuni confronti.

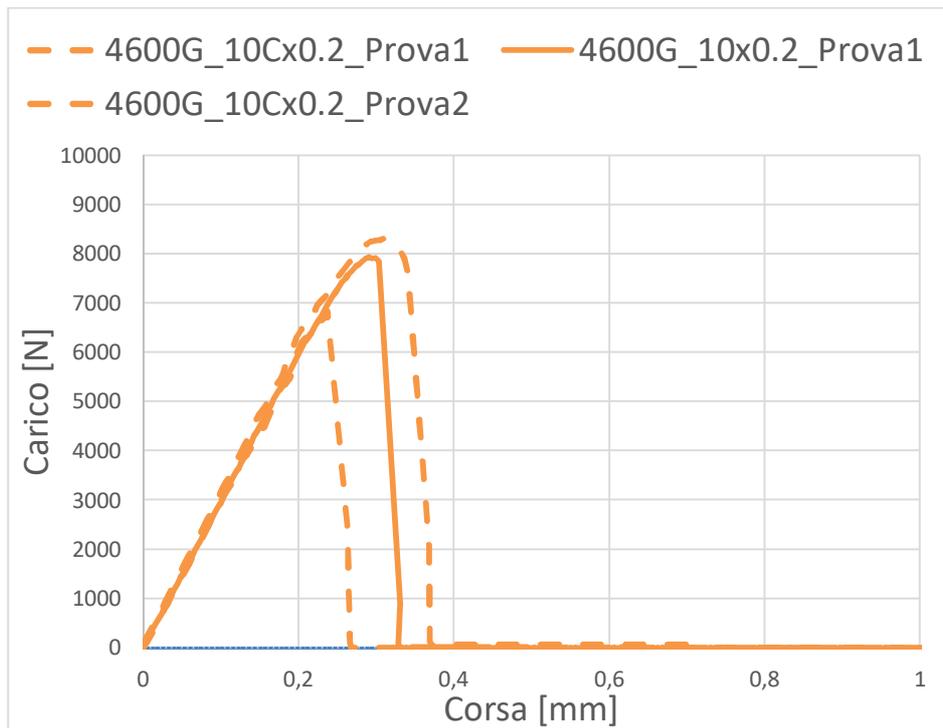


FIGURA 40 - SLJ VS OC 4600G

4600G 10Cx0.2 Carico Medio [N]	4600G 10x0.2 Carico Medio [N]
7581	7930
Deviazione Standard [N]	Deviazione Standard [N]
1038	-

TABELLA 9 - VALORI OTTENUTI 4600G

Durante le prove effettuate, come mostrato in Figura 40, pur avendo utilizzato lo stesso adesivo delle prove precedenti, si evidenzia un andamento del carico di rottura diverso da quello visto nelle prove sui provini con lo spessore di 0.74 mm, poiché è presente una rapida salita fino al punto di rottura ed una successiva repentina discesa. Inoltre, anche i valori dei carichi medi sono nettamente superiori; sicuramente ciò è dato dallo spessore dell'aderendo, che risulta essere circa 4 volte superiore a quello precedente. Difatti, uno

spessore dell'aderendo superiore, comporta una deformazione plastica del provino inferiore. Un'altra considerazione riguarda il fatto che la curva non presenta scivolamenti, ciò è probabilmente dovuto a un attrito superiore. Al contempo, però, un'osservazione importante e analoga a quella fatta nelle prove precedenti, riguarda quella di aver ottenuto valori simili del carico medio per entrambi i provini; ciò implica, che anche in questo caso, il confinamento mediante poliestere non genera un contributo nella forza adesiva.

4.6.2 Betamate 1640: SLJ vs OC

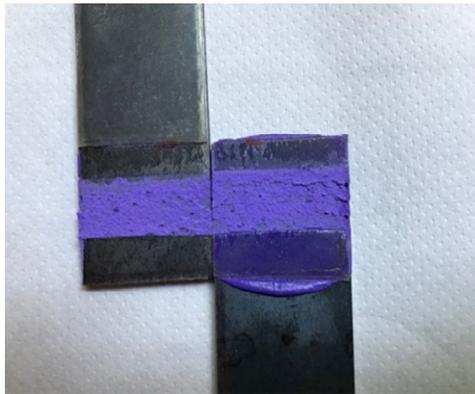


FIGURA 41 - 1640 10CX0.2

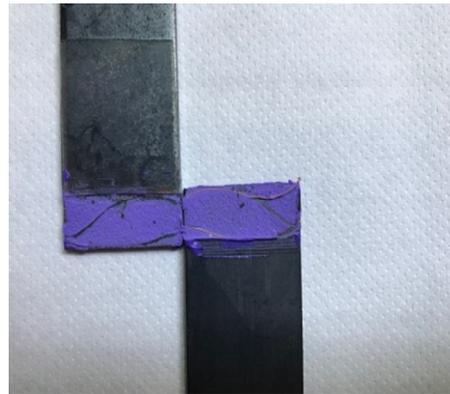


FIGURA 42 - 1640 10X0.2

In Figura 41 e 42 si osserva una frattura di tipo coesivo; ciò implica che l'adesione è rimasta stabile, nonostante le influenze esercitate sugli incollaggi. Anche in questo caso, poiché l'adesivo non presentava al suo interno delle sfere di vetro, si è prevista l'interposizione di un filo di rame con uno spessore di 0.2 mm, analogo a quello delle sfere di vetro, al fine di garantire una confrontabilità dei risultati.

In Figura 43 e Tabella 10 sono riportati i valori numerici ottenuti durante le prove.

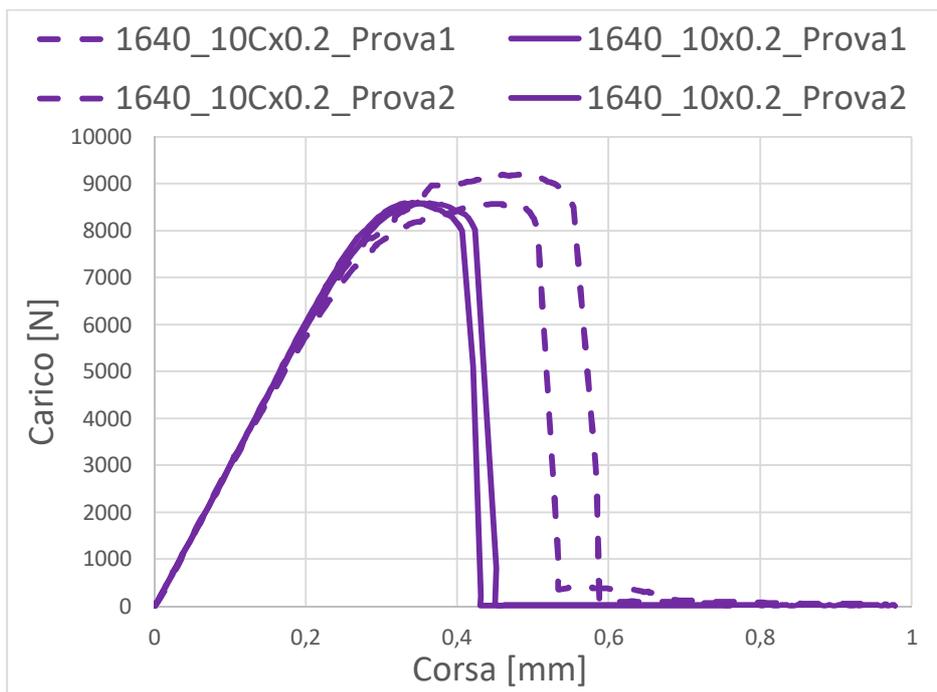


FIGURA 43 - SLJ VS OC 1640

1640 10Cx0.2 Carico Medio [N]	1640 10x0.2 Carico Medio [N]
8910	8598
Deviazione Standard [N]	Deviazione Standard [N]
422	8

TABELLA 10 - VALORI OTTENUTI 1640

Anche in queste prove, si desume un valore del carico medio superiore a quello ottenuto con le prove sui provini con spessore di 0.74 mm e, al contempo, confrontabile tra il provino confinato ed il SLJ.

4.6.3 OC: Betamate 1640 vs Betamate 4600G



FIGURA 44 - 1640 10Cx0.2



FIGURA 45 - 4600G 10Cx0.2

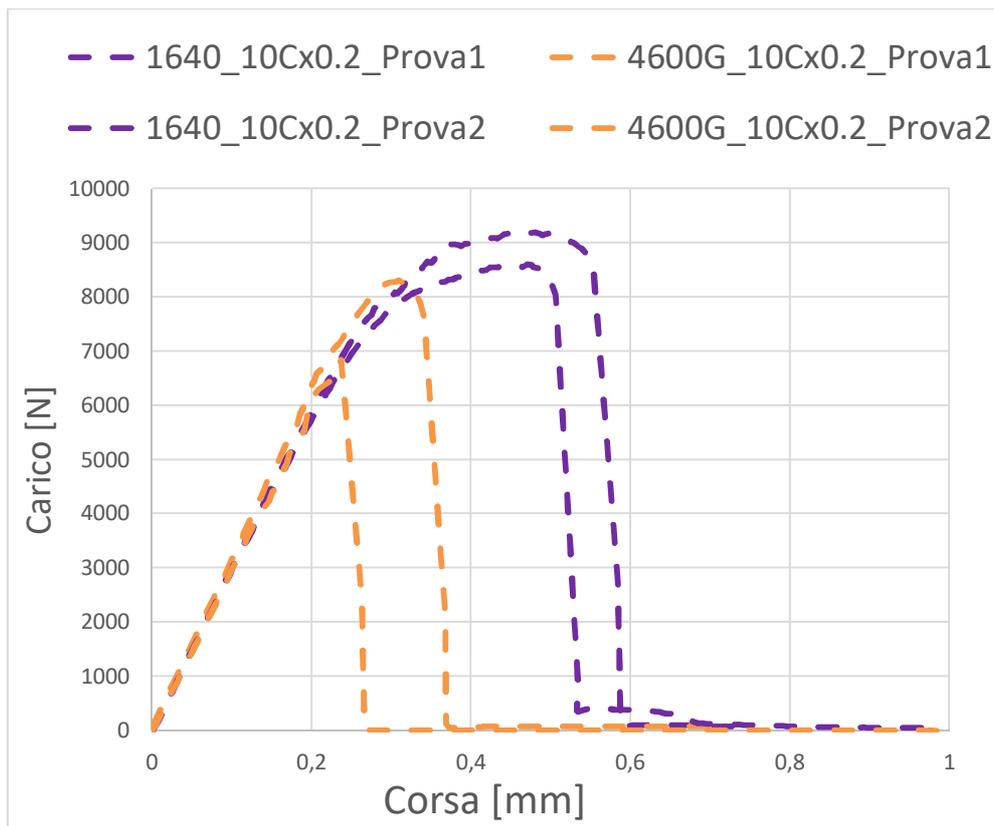


FIGURA 46 - 1640 C vs 4600G C

1640 10Cx0.2 Carico Medio [N]	4600G 10Cx0.2 Carico Medio [N]
8910	7581
Deviazione Standard [N]	Deviazione Standard [N]
422	1038
Tensione [MPa]	Tensione [MPa]
34	29

TABELLA 11 - CONFRONTO VALORI 1640 C vs 4600G C

Come si evince dalla Figura 46 e dalla Tabella 11, l'adesivo 1640 presenta un carico di rottura superiore al 4600G; questo, però, non è causato dalle proprietà intrinseche dell'adesivo, che bensì condurrebbe ad un risultato opposto, ma allo sfaldamento del substrato. Infatti, avendo utilizzato lo stesso materiale per gli aderendi ed essendo state effettuate le medesime prove, il cedimento dovrebbe avvenire in egual modo per entrambe le tipologie di giunto adesivo. Pertanto, è plausibile pensare ad un cedimento anomalo del substrato, causato da un'interazione chimica dell'adesivo Betamate 4600G con il substrato; cosa che non accade con il Betamate 1640.

4.6.4 SLJ: Betamate 1640 vs Betamate 4600G

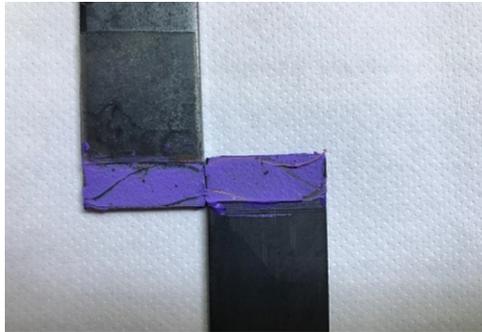


FIGURA 47 - 1640 10x0.2

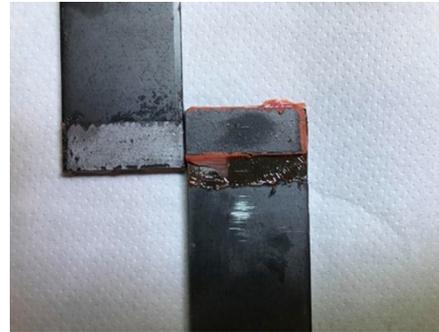


FIGURA 48 - 4600G 10x0.2

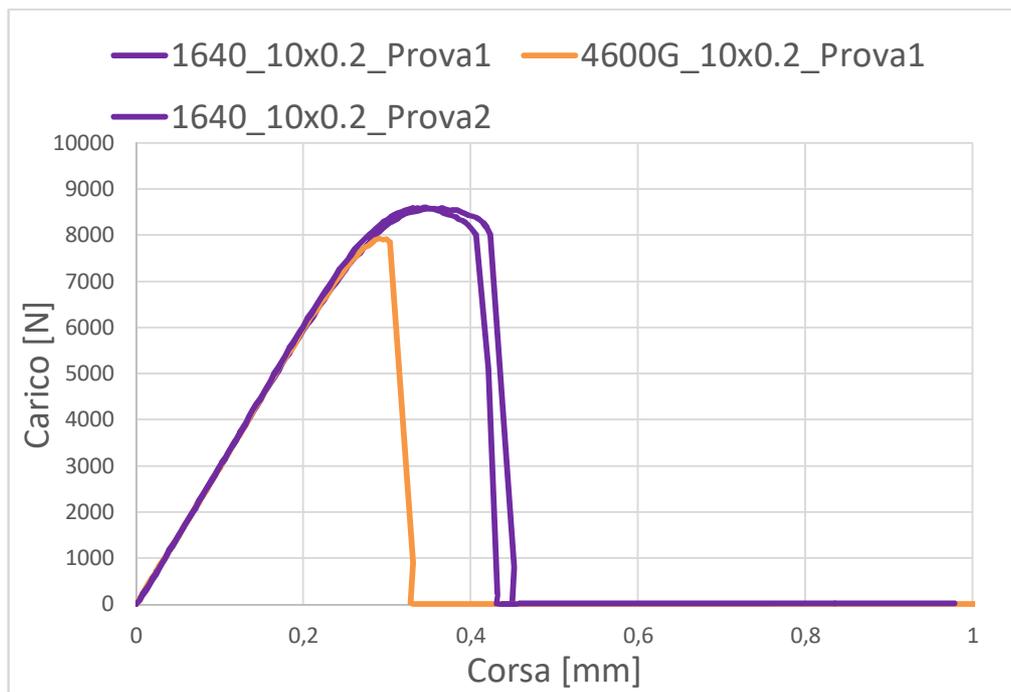


FIGURA 49 - 1640 vs 4600G

1640 10x0.2 Carico Medio [N]	4600G 10x0.2 Carico Medio [N]
8598	7930
Deviazione Standard [N]	Deviazione Standard [N]
8	-
Tensione [MPa]	Tensione [MPa]
33	30

TABELLA 12 - CONFRONTO VALORI 1640 VS 4600G

Anche per i grafici appena illustrati si possono fare considerazioni analoghe a quelle fatte nel sotto paragrafo 3.5.3.

5 Valutazione della deformabilità degli aderendi

5.1 Provino utilizzato

Durante le prove che seguono sono state analizzate le eventuali deformazione degli aderendi del giunto adesivo, quando è sottoposto a prove di trazione o taglio.

Il provino oggetto di studio presenta le seguenti caratteristiche.

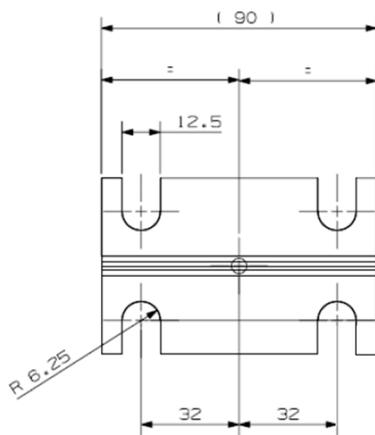


FIGURA 50 - PROVINO CON VISTA LATERALE

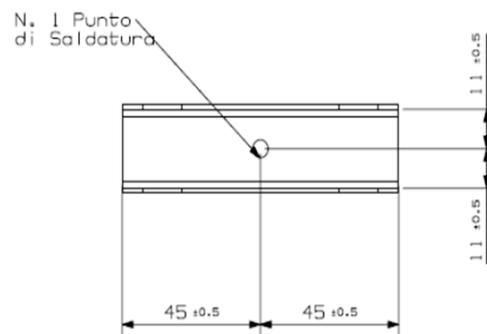


FIGURA 51 - PROVINO CON VISTA DALL'ALTO

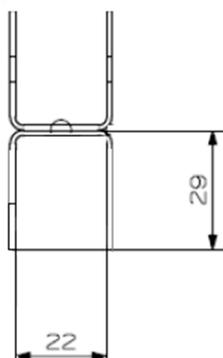


FIGURA 52 - PROVINO CON VISTA FRONTALE

Inizialmente, per quanto riguarda l'area di incollaggio, si è pensato di realizzare un *overlap* coincidente con la superficie di sovrapposizione. Tuttavia, questa configurazione avrebbe potuto condurre a una deformazione degli aderendi del giunto adesivo. Quindi si è deciso di andare a confinare la zona di incollaggio, mediante del poliestere, con il fine di avere un *overlap* più piccolo rispetto alla superficie effettiva di sovrapposizione.

Si sono prese in esame due possibili configurazioni di *overlap* confinato, che vengono di seguito rappresentate.



FIGURA 53 - OVERLAP 22x15 MM

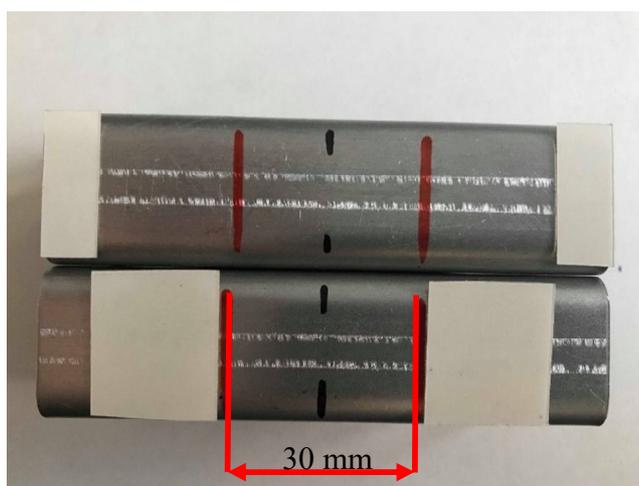


FIGURA 54 - OVERLAP 22x30 MM

Nella Figura 53 si può osservare un *overlap* che presenta un'area di 22x15 mm, nella Figura 54, invece, l'*overlap* presenta un'area di 22x30 mm. La scelta delle due lunghezze, poiché la profondità è ricoperta completamente, è stata puramente arbitraria. Difatti, si sono fatte analisi su entrambe le configurazioni, con il fine di valutare se *overlap* con tali dimensioni potessero condurre ad una deformazione dell'aderendo.

5.2 Preparazione provino

Il provino è stato realizzato con l'adesivo Betamate 4600G, il quale permette di garantire uno spessore di 0.2 mm, poiché presenta al suo interno delle sfere di vetro con questo diametro. Una volta applicato l'adesivo nell'area opportunamente confinata, senza effettuare alcun pretrattamento superficiale, si sono sovrapposti i due substrati e si è messo in pressione il giunto adesivo, con il fine di evitare la presenza di vuoti nell'*overlap* dato che potrebbero condurre a risultati non veritieri.

Per poter ottenere e mantenere tale configurazione, anche durante la cura, il provino è stato collocato tra due fermi, a loro volta posizionati e bloccati su una guida metallica, come rappresentato in Figura 55 e 56.



FIGURA 55 - GIUNTO ADESIVO CON VISTA DALL'ALTO



FIGURA 56 - GIUNTO ADESIVO CON VISTA FRONTALE

Il Betamate 4600G presenta varie combinazioni di Temperatura – Tempo per la cura, come si osserva dalla mappa presente in Figura 57.

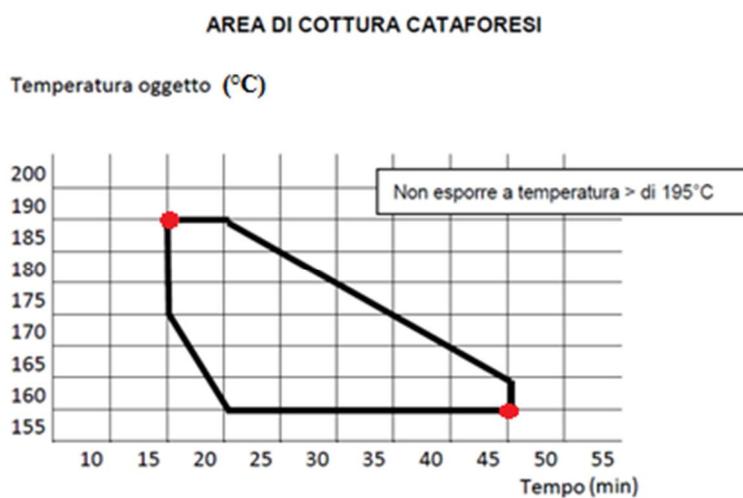


FIGURA 57 - AREA DI COTTURA CATAFORESI

Nella mappa, infatti, sono rappresentate tutte le possibili combinazioni di cura che possono essere applicate. Tra le possibili configurazioni, quelle più critiche risultano essere:

- 15' a 190 °C, il minor tempo alla maggior temperatura;
- 45' a 160 °C, il maggior tempo per la minor temperatura;

Per quanto riguarda le prove effettuate per valutare la deformabilità degli aderendi, è stata analizzata solamente la prima configurazione.

5.3 Estensimetro

Prima di collocare il provino sull'alloggiamento dell'afferraggio Arcan è stato montato, sul provino stesso, un estensimetro. L'estensimetro è uno “strumento di misura, che permette di rilevare le deformazioni dimensionali di un corpo sottoposto a sollecitazioni termiche o meccaniche, come nel nostro caso (23)”.

Esso è costituito da una “griglia metallica di materiale conduttore posizionata su un supporto isolante, costituito da un film plastico di modesto spessore, incollato a sua volta sull'elemento da misurare (24)”.

Lo schema di un estensimetro, o Strain Gage, è rappresentato in Figura 58.

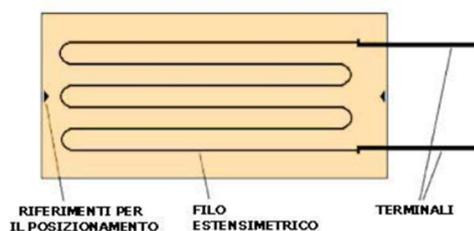


FIGURA 58 - STRAIN GAGE (24)

Spesso vengono posizionati più estensimetri sullo stesso supporto ma con assi concorrenti, questo permette di misurare le deformazioni lungo diversi assi.

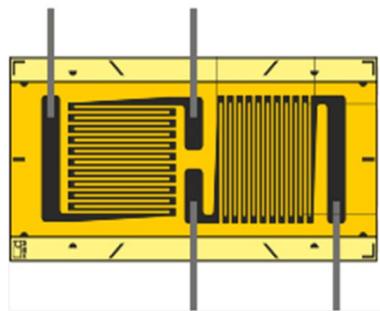


FIGURA 59-STRAIN GAGE CON 2 GRIGLIE DI MISURA

Quando viene applicato un carico sulla superficie in esame, la deformazione della superficie comporta una variazione di resistenza dell'estensimetro che permette di valutare l'entità della deformazione stessa (24). Infatti, prendendo in considerazione una porzione del conduttore, rappresentato in Figura 60.

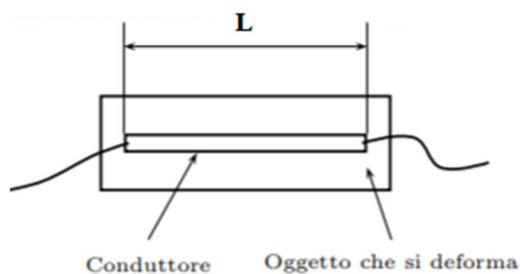


FIGURA 60 - SEZIONE CONDUTTORE STRAIN-GAGE (26)

La resistenza del conduttore vale:

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

Dove:

- ρ : resistività del conduttore [Ωm];
- L : lunghezza del conduttore [m];
- A : sezione del conduttore [m^2].

Nel caso di piccole variazioni, la variazione di resistenza è esprimibile come:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A}$$

Dove, il meno davanti alla variazione in percentuale dell'area, rappresenta ci dice che inversamente proporzionale agli altri membri dell'equazione. Inoltre:

$$A = \pi \frac{D^2}{4}$$

$$\frac{dA}{dD} = 2\pi \frac{D}{4} = 2\pi \frac{D^2}{4D} = 2 \frac{A}{D}$$

$$\frac{dA}{A} = 2 \frac{dD}{D} = 2 \left(-\nu \frac{dL}{L} \right) = -2\nu \frac{dL}{L}$$

Dove “ ν ” è il coefficiente di Poisson. Andando a sostituire nell'equazione della resistenza, avremo:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} = \frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} + 2\nu \frac{dL}{L}$$

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + (1 + 2\nu) \frac{dL}{L}$$

$$K = \frac{\frac{dR}{R}}{\frac{dL}{L}} = 1 + 2\nu + \frac{\frac{d\rho}{\rho}}{\frac{dL}{L}}$$

Dove K è il fattore di guadagno, definito come il rapporto tra la variazione in percentuale della resistenza e la deformazione; poiché, $\frac{dL}{L} = \varepsilon$, ovvero la deformazione.

Quindi, la variazione in percentuale della resistenza, è esprimibile come il prodotto del fattore di guadagno K e la deformazione ε :

$$\frac{dR}{R} = K \cdot \varepsilon$$

La variazione della resistenza elettrica, a sua volta, può essere misurata mediante un Ponte di Wheatstone.

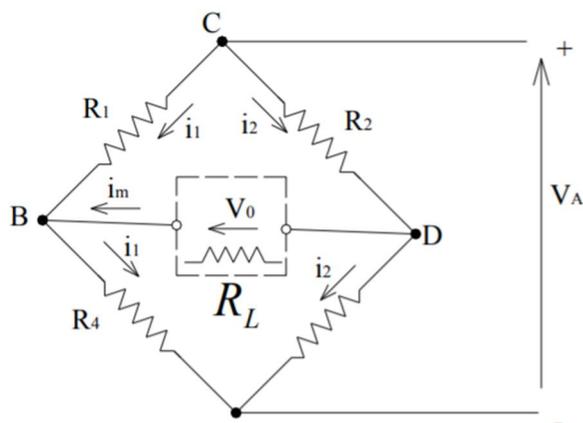


FIGURA 61 - PONTE DI WHEATSTONE (25)

Come si può osservare dallo schema elettrico, in Figura 61, il ponte di Wheatstone risulta formato da 4 resistenze connesse tra di loro in modo da formare una maglia con quattro lati e quattro vertici. Tra due vertici opposti, è collegata una sorgente di alimentazione continua V_a , mentre in V_0 viene inserito un galvanometro. Dove:

$$V_0 = V_a \frac{(R_2 R_4) - (R_1 R_3)}{(R_1 + R_4)(R_2 + R_3)}$$

Nel caso in cui: $R_1=R_2=R_3=R_4$ o $R_2 R_4=R_1 R_3$ allora $V_0=0$ e quindi il ponte risulta bilanciato. Quando, però, un ramo presenta una variazione di resistenza ΔR , si presenta uno sbilanciamento del ponte e quindi, la nascita di una V_0 diversa da zero.

Durante le prove effettuate, sul provino preso in esame, è stato incollato l'estensimetro con due griglie di misura, in modo tale da poter andare a valutare le deformazioni locali in entrambe le direzioni. Essendo due gli estensimetri, in direzioni perpendicolari tra loro, il ponte di Wheatstone ad esso collegato, è un sistema a “mezzo ponte”, come rappresentato nella seguente immagine.

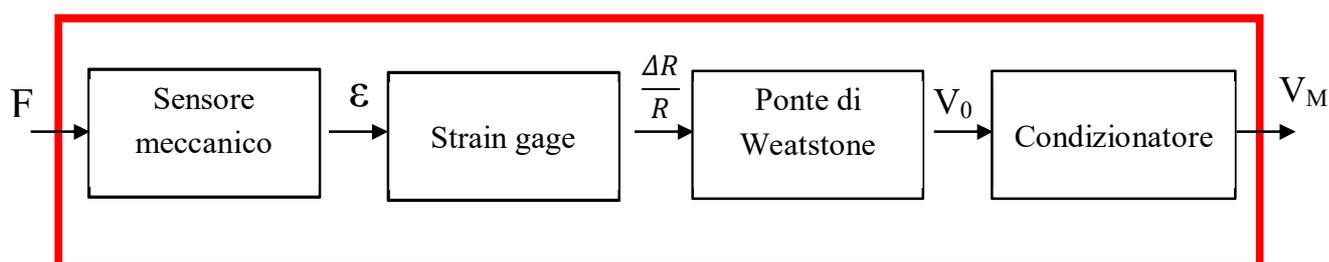


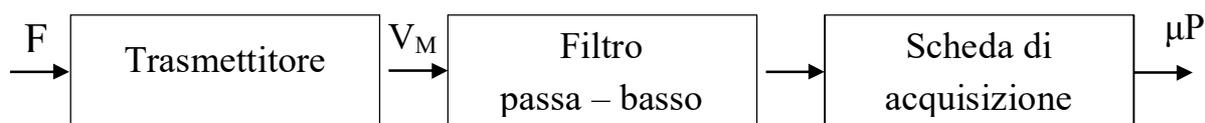
FIGURA 62 - PONTE DI WHETSTONE A MEZZO PONTE (27)

Quindi, da una forza che entra in un sistema, possiamo ricavarne la corrispondente deformazione ϵ , grazie a:

- Uno *strain gage*, che converte la deformazione ϵ in una variazione di resistenza $\frac{\Delta R}{R}$;
- Un ponte di Wheatstone, che converte la variazione di resistenza in una tensione in uscita V_0 ;
- Un condizionatore, che converte la variabile di uscita V_0 in un segnale normalizzato V_M ;
- Una scheda di acquisizione, che è l'interfaccia tra i segnali esterni al PC e il microprocessore μP .
- Un pc che, dai valori entranti dalla scheda di acquisizione e dai dati caratteristici dello *strain gage*, restituisce i valori della deformazione ϵ in funzione del tempo.

Di seguito è rappresentato uno schema di un sistema di acquisizione dati.





5.4 Afferraggio utilizzato

L'afferraggio, utilizzato per effettuare le prove di trazione e taglio, è costituito da una strumentazione Arcan, collegata alla macchina servo-idraulica Instron, utilizzata nelle precedenti prove preliminari. Questo assemblaggio ci permette di poter effettuare un Arcan Test sul giunto adesivo, presso i laboratori del Politecnico di Torino.

La strumentazione è costituita da due mezzi dischi (1), che presentano una guida forata nella parte superiore. Su di essi, una volta scelta la configurazione con la quale effettuare la prova, si blocca la staffa di collegamento (2) tra la strumentazione e la macchina servo-idraulica. La parte inferiore dei dischi, invece, presenta un alloggiamento rettangolare per poter agganciare il provino (3), sul quale effettuare le prove. La configurazione della strumentazione Arcan con il provino è rappresentata in Figura 63 e 64.

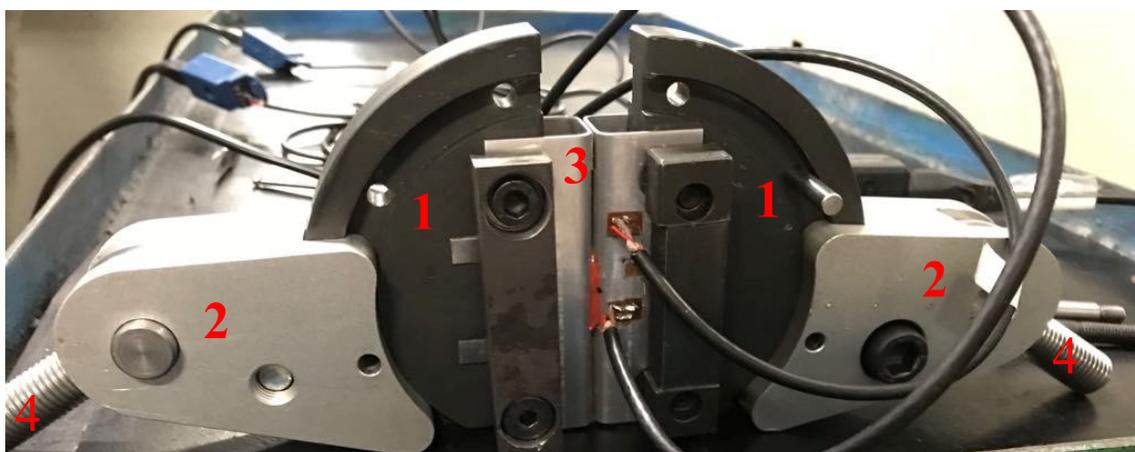


FIGURA 63 - CONFIGURAZIONE STRUMENTAZIONE ARCAN CON PROVINO



FIGURA 64 - AFFERRAGGIO ARCAN VISTA DALL'ALTO

Il collegamento della strumentazione Arcan (a) alla macchina servo-idraulica Instron (b), avviene mediante l'utilizzo di collegamenti filettati (4); esso è rappresentato in Figura 65. Questa configurazione finale ci permette di effettuare l'Arcan test sui giunti adesivi.

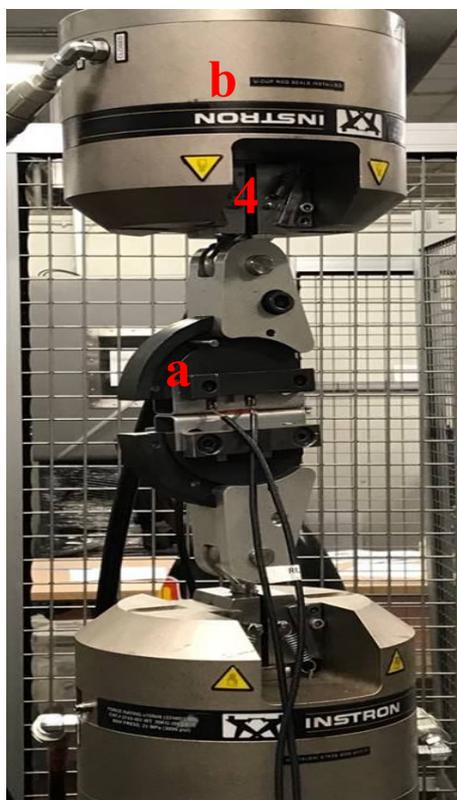


FIGURA 65 - COLLEGAMENTO AFFERRAGGIO ARCAN E INSTRON

5.5 Prove effettuate

Sono state eseguite prove di trazione e taglio su provini in alluminio e acciaio con entrambe le configurazioni di *overlap* ed è stata eseguita una prova per ogni configurazione presa in esame.

5.5.1. Test di trazione

Per quanto riguarda il test di trazione, dapprima sono stati analizzati i provini in alluminio con entrambe le configurazioni di *overlap*, come rappresentato in Figura 66 e 67.

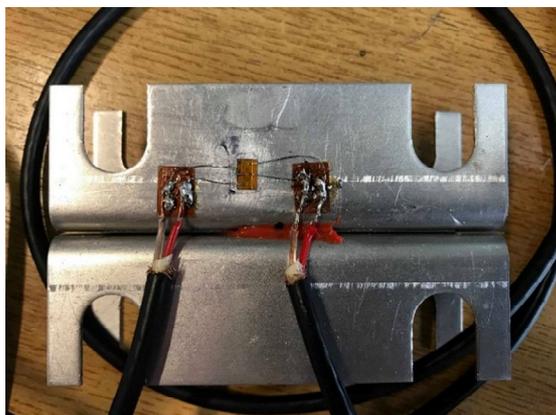


FIGURA 66 - ALLUMINIO 22x15 MM



FIGURA 67 - ALLUMINIO 22x30 MM

I provini, sottoposti ad una velocità di prova di 5 mm/min, hanno riportato le superfici di frattura rappresentate in Figura 68 e 69. Entrambe le superfici presentano una frattura di tipo coesivo; ciò implica una buona adesione dell'adesivo al substrato.



FIGURA 68 - ALLUMINIO OVERLAP 22x15 MM

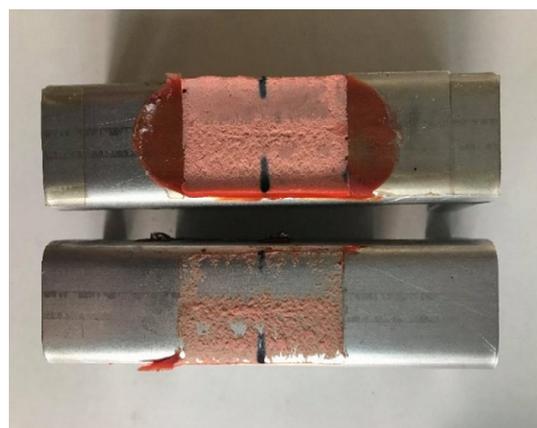


FIGURA 69 - ALLUMINIO OVERLAP 22x30 MM

I corrispettivi andamenti del carico sono riportati in Figura 70 e 71.

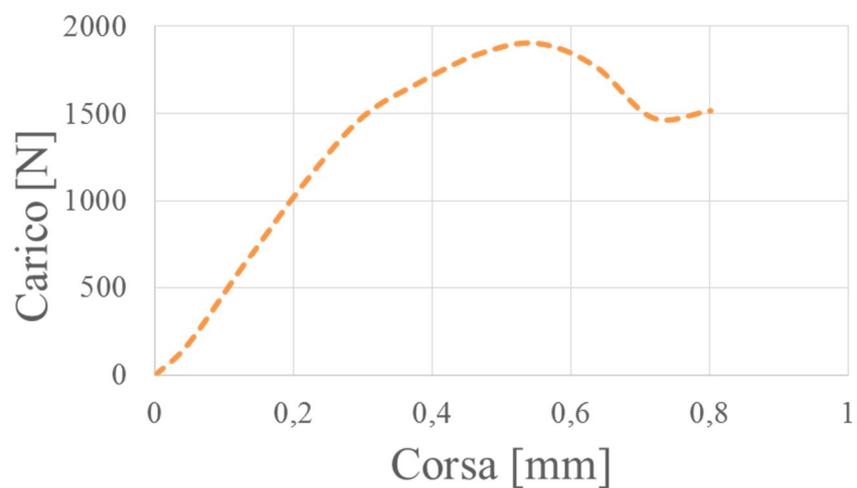


FIGURA 70 - ALLUMINIO: ANDAMENTO CARICO CON OVERLAP 22x15 MM

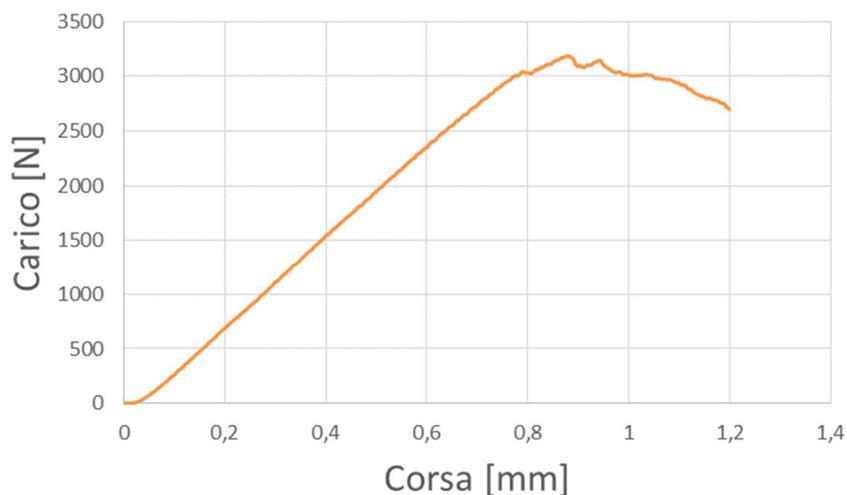


FIGURA 71 - ALLUMINIO: ANDAMENTO DEL CARICO CON OVERLAP 22x30 MM

Queste prove, presentano, inoltre, i seguenti valori di carico e tensione di rottura.

	Overlap 22x15 mm	Overlap 22x30 mm
Carico Max [N]	1947	3247
Tensione [MPa]	6	5

TABELLA 13 - VALORI CARICO DI ROTTURA ALLUMINIO

Successivamente, sono stati sottoposti, a test di trazione, i provini in acciaio, dai quali si sono potute riscontrare le superfici di frattura riportate in Figura 72 e 73.

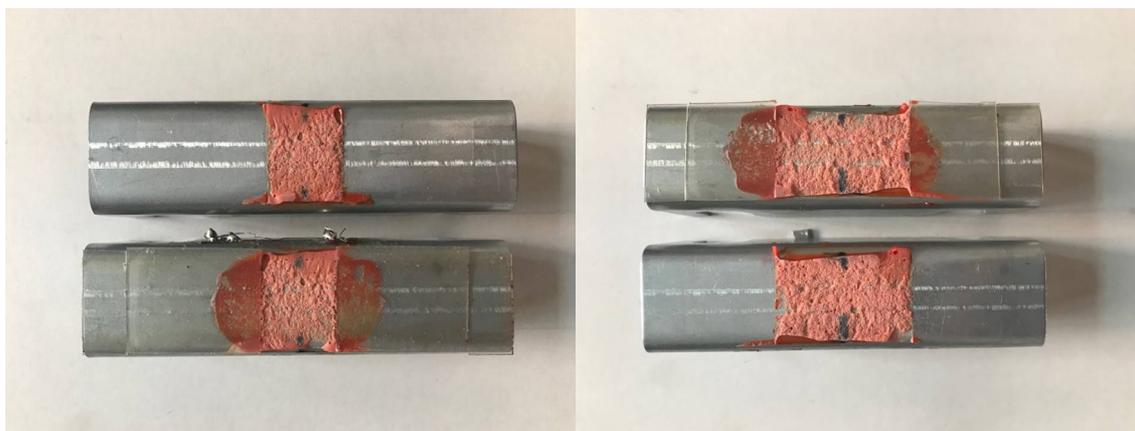


FIGURA 72 - ACCIAIO OVERLAP 22x15 MM

FIGURA 73 - ACCIAIO OVERLAP 22x30 MM

Gli andamenti del carico sono riportati in Figura 74 e 75.

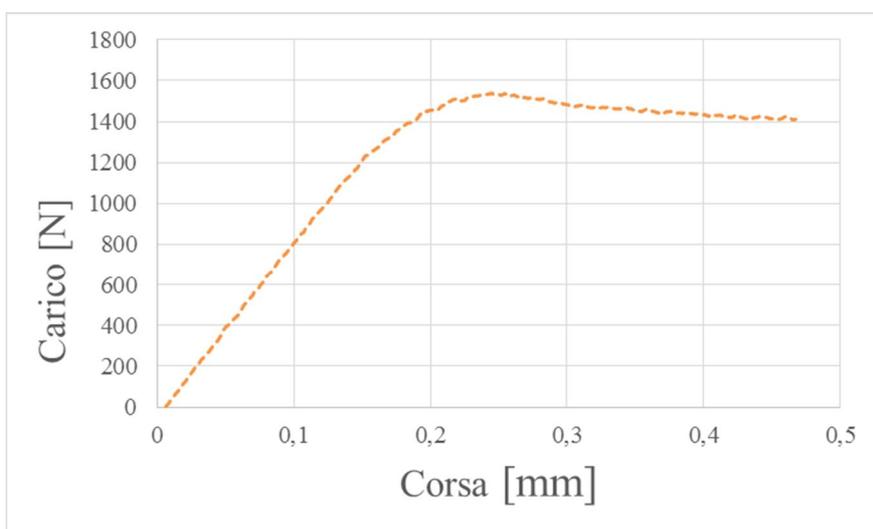


FIGURA 74 - ACCIAIO: ANDAMENTO DEL CARICO CON OVERLAP 22x15 MM

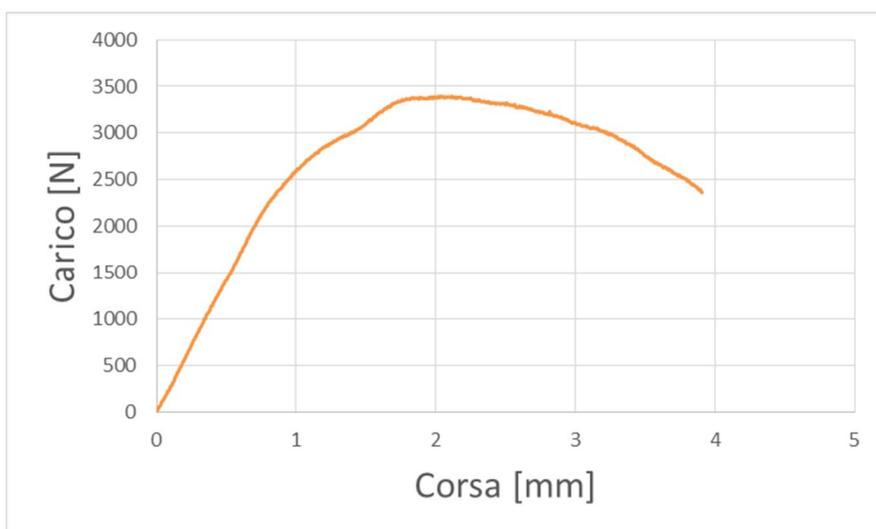


FIGURA 75 - ACCIAIO: ANDAMENTO DEL CARICO CON OVERLAP 22x30 MM

I corrispettivi valori del carico e della tensione di rottura sono riportati in Tabella 14.

	Overlap 22x15 mm	Overlap 22x30 mm
Carico Max [N]	1541	3394
Tensione [MPa]	5	5

TABELLA 14 - VALORI CARICO DI ROTTURA ACCIAIO

Sui provini appena analizzati, come si evince da Figura 66 e 67, sono stati montati degli estensimetri, con il fine di poter andare a valutare le deformazioni degli aderendi del giunto adesivo, durante le prove di trazione.

I risultati acquisiti durante le prove presentano dei valori decisamente trascurabili, come si può osservare dai valori delle deformazioni massime riportati in Tabella 15.

	Deformazione Massima
Alluminio 22x15 mm	0.0021%
Alluminio 22x30 mm	0,02%
Acciaio 22x15 mm	0,04%
Acciaio 22x30 mm	0,08%

TABELLA 15 - VALORI DELLE DEFORMAZIONI IN PERCENTUALE

A fronte di questi valori trascurabili, si è deciso di non collocare l'estensimetro durante le prove di taglio.

5.5.2. Test di taglio

Le prove di taglio sono state effettuate con una velocità di 5 mm/min ed è stata eseguita una prova per ogni configurazione. Anche per queste prove è stato testato, per primo, il provino in alluminio.

Di seguito, dapprima vengono riportati, in Figura 76 e 77, gli andamenti dei carichi per entrambe le configurazioni di overlap.

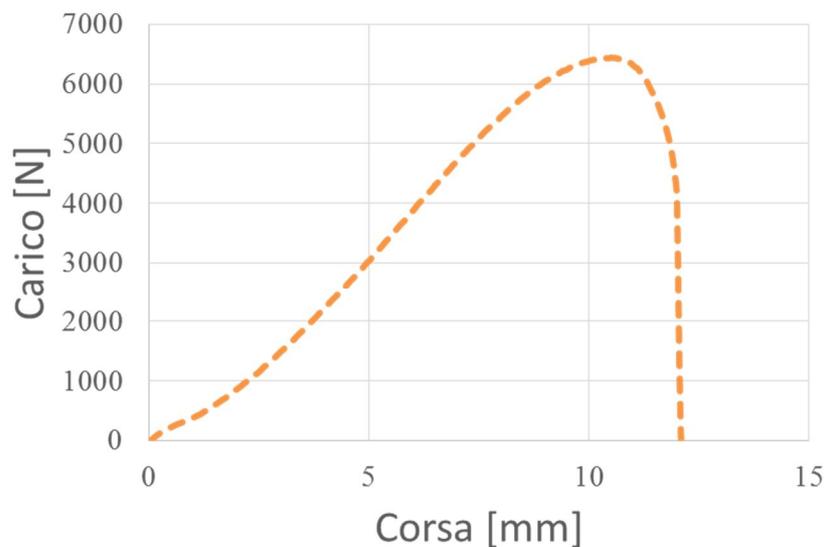


FIGURA 76 - ALLUMINIO: ANDAMENTO DEL CARICO CON OVERLAP 22x15 MM

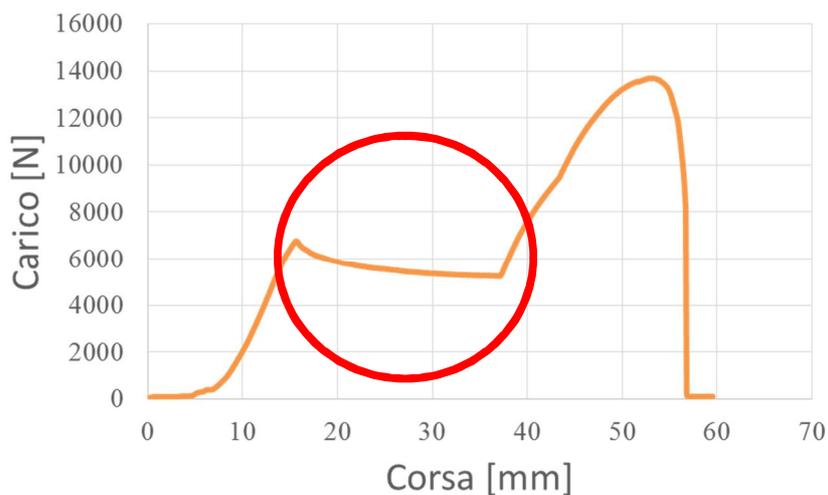


FIGURA 77 - ALLUMINIO: ANDAMENTO DEL CARICO CON OVERLAP 22x30 MM

In Figura 77 si può osservare uno scivolamento del provino, come evidenziato in rosso. Ciò è probabilmente dovuto al fatto che, essendo l'overlap maggiore, è richiesta una forza superiore per far giungere a rottura il giunto adesivo.

In Figura 78 e 79 vengono riportate le superfici di frattura ottenute dopo il test di taglio, dalle quali si evince che: l'overlap più piccolo presenta una frattura di tipo coesivo, mentre per quello più grande una frattura di tipo misto.



FIGURA 78 - ALLUMINIO OVERLAP 22X15 MM FIGURA 79 - ALLUMINIO OVERLAP 22X30 MM

Nella Tabella 16, infine, vengono riportati i valori del carico di rottura con le tensioni ottenute.

	Overlap 22x15 mm	Overlap 22x30 mm
Carico Max [N]	6656	13594
Area [mm²]	330	660
Tensione [MPa]	20	21
Tensione Scheda Tecnica [MPa]	26	26

TABELLA 16 - ALLUMINIO: VALORI CARICO MAX E TENSIONE PER ENTRAMBI GLI OVERLAP

Dai questi risultati si osserva come, le tensioni ottenute, risultano essere molto elevate e prossime a quella presente sulla specifica tecnica fornita dal produttore, pur non avendo effettuato alcun pretrattamento superficiale come consigliato.

Per quanto riguarda i provini in acciaio, in Figura 80 e 81 vengono riportati gli andamenti dei carichi.

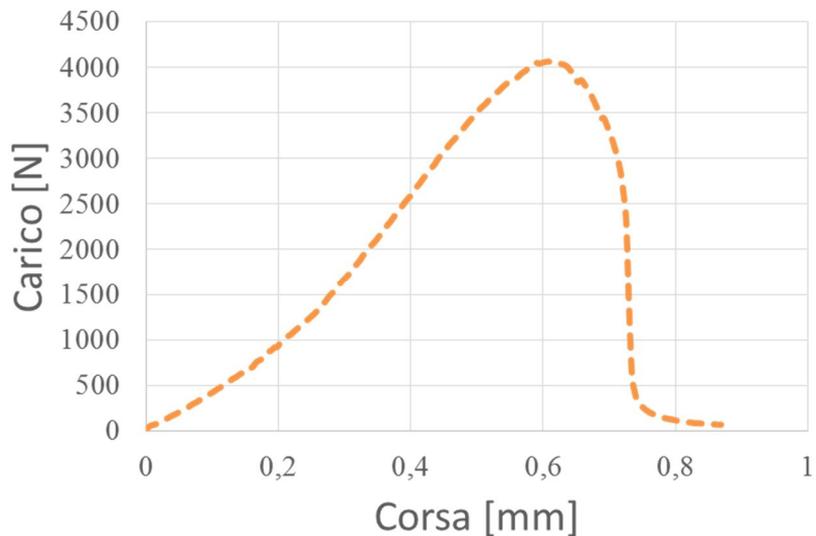


FIGURA 80 - ACCIAIO: ANDAMENTO DEL CARICO CON OVERLAP 22x15MM

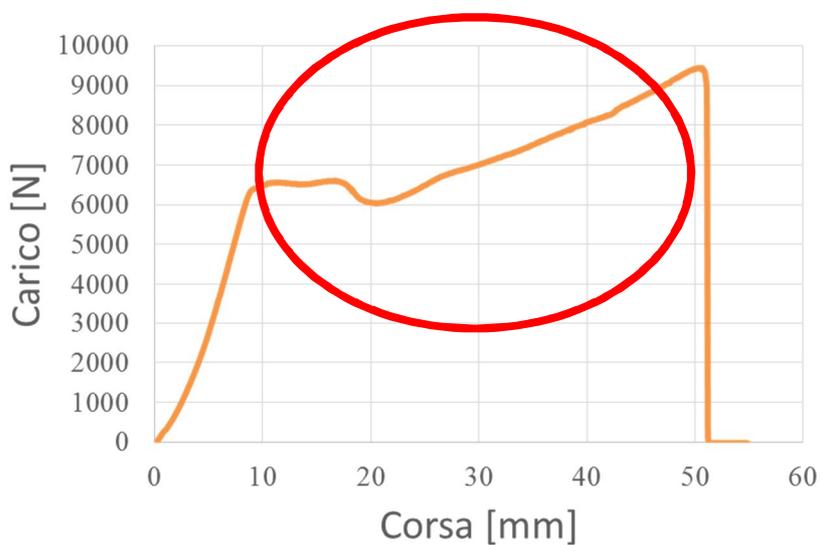


FIGURA 81 - ACCIAIO: ANDAMENTO DEL CARICO CON OVERLAP 22x30 MM

Come nel caso dell'alluminio, anche nella configurazione 22x30 mm si evince uno scivolamento del provino.

In Figura 82 e 83 vengono riportate le superfici di frattura degli aderendi del giunto adesivo.



FIGURA 82 - ACCIAIO OVERLAP 22x15 MM

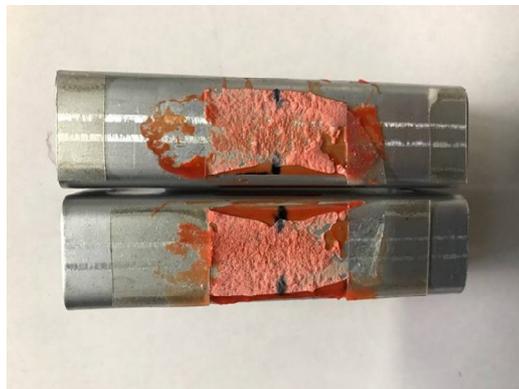


FIGURA 83 - ACCIAIO OVERLAP 22x30 MM

Nella Tabella 18, infine, vengono riportati i valori del carico di rottura con le tensioni ottenute.

	Overlap 22x15 mm	Overlap 22x30 mm
Carico Max [N]	4273	9475
Area [mm²]	330	660
Tensione [MPa]	13	14
Tensione Scheda Tecnica [MPa]	26	26

FIGURA 84 - ACCIAIO: VALORI CARICO MAX E TENSIONE PER ENTRAMBI GLI OVERLAP

Anche in questo caso, i valori delle tensioni ottenute, risultano essere abbastanza elevati, pur trattandosi di un adesivo non ottimizzato per essere applicato a un acciaio.

6 Caratterizzazione giunti adesivi mediante Arcan Test

6.1. Scopo delle prove

Le prove descritte nel seguente capitolo sono state eseguite con lo scopo di effettuare un'analisi preliminare sulla risposta del giunto adesivo sottoposto ad Arcan Test. Questo Test, attualmente utilizzato in azienda su giunti saldati, è stato per la prima volta testato su giunti adesivi, con il fine di valutare la risposta di quest'ultimo quando sottoposto ad un carico non solo di pura trazione o puro taglio, ma anche ad una combinazione di questi due. I giunti adesivi, infatti, in ambito *automotive*, non vengono utilizzati solamente per soccombere a funzioni strutturali ma anche per questioni logistiche e pratiche, che non potrebbero essere risolte con la saldatura o la bullonatura. Quindi, essendo largamente utilizzato all'interno della vettura, deve essere anche adeguatamente progettato e testato per sopperire ad eventuali impatti stradali. Infatti, quando un'automobile viene progettata, bisogna andare anche a valutare la sicurezza della stessa. L'Euro NCAP, che è il "programma europeo di valutazione dei nuovi modelli di automobili", stabilisce protocolli di prova per la valutazione della sicurezza. Tra i vari metodi di valutazione sono presenti le "prove d'impatto", che sottopongono la vettura a incidenti con parametri preimpostati. Nella prova di impatto frontale, dove la vettura, per la normativa Italiana, prevede un *overlap* del 40% con l'ostacolo frontale, il giunto adesivo sarà conseguentemente sottoposto a puro taglio o pure trazione. In un impatto laterale, però, il giunto verrebbe sottoposto ad una forza che presenta entrambe le componenti. Dunque,

risulta importante andare ad analizzare un carico, e quindi una specifica condizione di prova, costituita da una quota parte di trazione e da una di taglio.

6.2. Attrezzatura Arcan

Le seguenti prove sono state effettuate presso i laboratori dello stabilimento di “Magneti Marelli”. I giunti adesivi, precedentemente realizzati nel laboratorio del Politecnico, sono stati successivamente sottoposti ad Arcan Test mediante un’attrezzatura Arcan, attualmente utilizzata per testare giunti saldati. Essa è riportata in Figura 85.

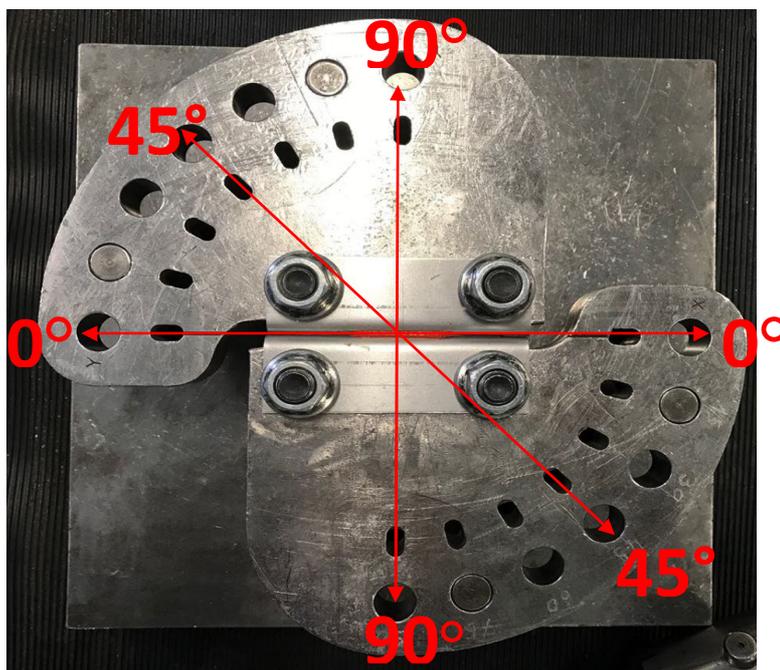


FIGURA 85 - ATTREZZATURA ARCAN MAGNETI MARELLI

Come si può osservare in Figura 85, l'attrezzatura Arcan, sulla quale è stato collocato il giunto adesivo, presenta due piastre forate nella parte esterna. Questi fori permettono il collegamento dell'attrezzatura a una macchina di trazione e, in base alla scelta del foro, viene conseguentemente scelta una configurazione di prova. Infatti, nel caso in cui si optasse per il foro con la dicitura 0° , il giunto adesivo verrebbe sottoposto a carico di puro taglio. Viceversa, nel caso di 90° , il giunto verrebbe sottoposto a pura trazione. Se, invece, venisse collocato in una configurazione intermedia, allora il giunto adesivo verrebbe sottoposto a un carico che presenta una combinazione di entrambi. Durante le prove, sono state adottate le configurazioni di 0° , 45° e 90° , rappresentate rispettivamente in Figura 86, 87 e 88.

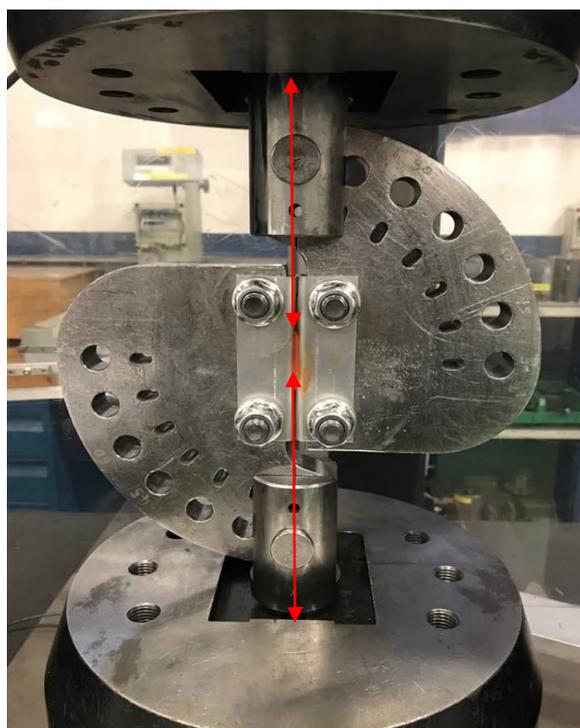


FIGURA 86 - CONFIGURAZIONE 0°

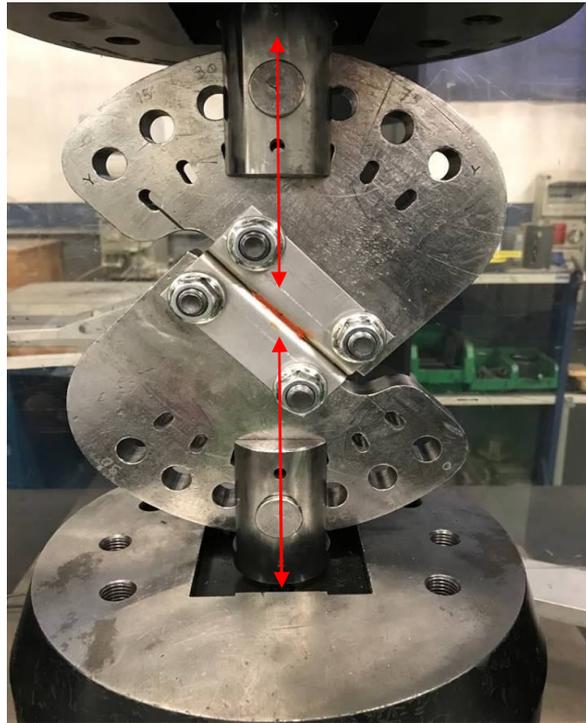


FIGURA 87 - CONFIGURAZIONE 45°

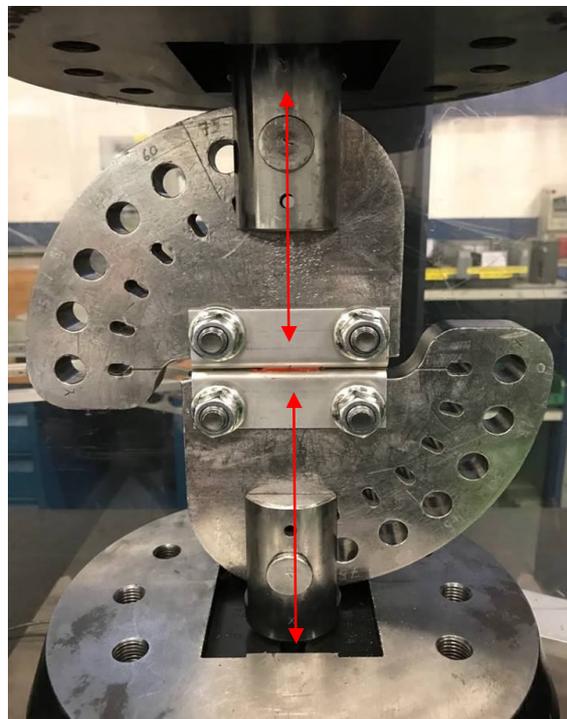


FIGURA 88 - CONFIGURAZIONE 90°

6.3. Prove effettuate

Le seguenti prove sono state effettuate su giunti adesivi in Al 5182 e DP600, entrambi realizzati con l'adesivo Betamate 4600G. Inoltre, ambedue i provini sono stati sottoposti a due condizioni di cura:

- 45 minuti a 165 °C;
- 15 minuti a 190 °C.

Questo col fine di andare a valutare se la risposta del giunto adesivo, sottoposto alle stesse condizioni di prova e con lo stesso spessore adesivo, fosse alterata o meno. Dapprima sono stati analizzati i giunti adesivi in Al 5182 e, successivamente, quelli in DP600. Questi ultimi, pur presentando un adesivo che non risulta essere ottimizzato per l'acciaio, sono stati presi in esame proprio perché le precedenti prove hanno condotto a risultati positivi.

6.3.1. Provini in Al 5182

I primi provini ad essere stati analizzati sono quelli in Al 5182, che presentano le seguenti caratteristiche:

Overlap	22x30 mm
Spessore lamiera	1.2 mm

FIGURA 89 - CARATTERISTICHE AL 5182

Le prove sono state effettuate con una velocità di prova costante di 5 mm/min e sono state eseguite 3 repliche per ogni condizione, col fine di verificare la ripetibilità dei risultati.

Le prove effettuate sono le seguenti:

Adesivo usato	Spessore adesivo [mm]	Cura Effettuata
4600G	0.2	45 minuti a 165 °C
4600G	0.2	15 minuti a 190 °C

TABELLA 17 - PROVE EFFETTUATE

Di seguito vengono illustrati i risultati ottenuti.

6.3.1.1. Condizione di prova a 0°: puro taglio

La condizione di prova in 0°, sull'attrezzatura Arcan, implica un carico di puro taglio sul provino. In Figura 90 e 91 sono riportate le superfici di frattura degli aderendi del giunto.

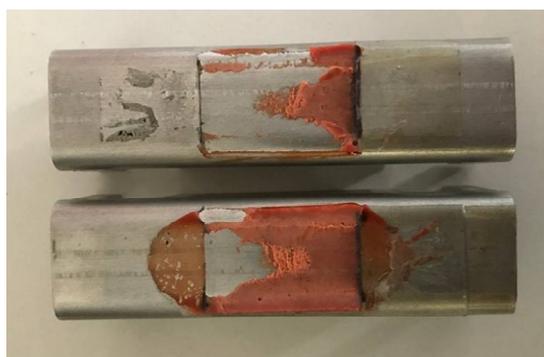


FIGURA 90 - AL: 165 °C

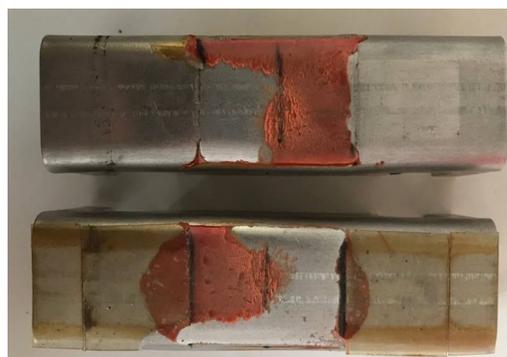


FIGURA 91 - AL: 190 °C

Tutti i provini sono stati analizzati con ispezione visuale e si osserva, come, la frattura risulta essere mista per entrambe le condizioni di cura.

In Figura 92 e 93 vengono riportati gli andamenti del carico.

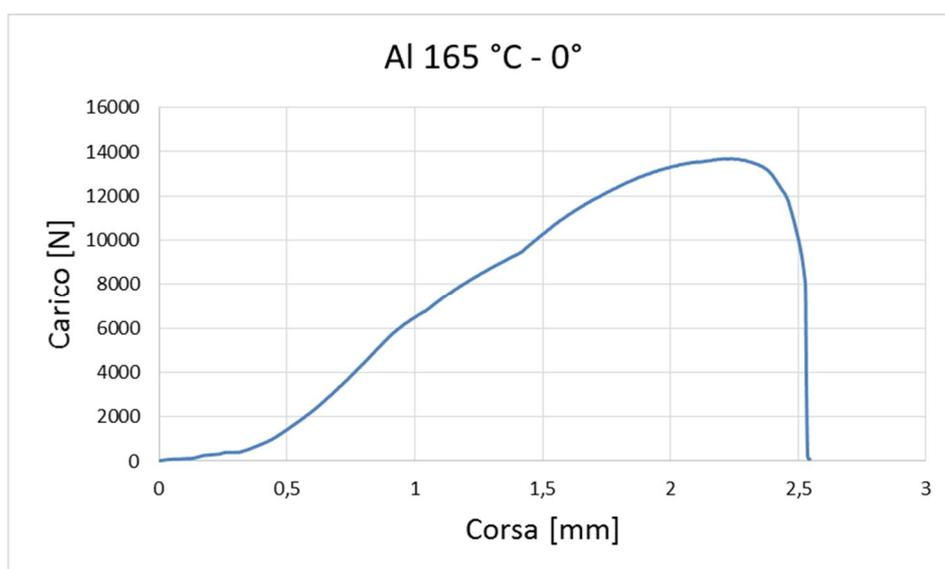


FIGURA 92 - AL: 165 °C

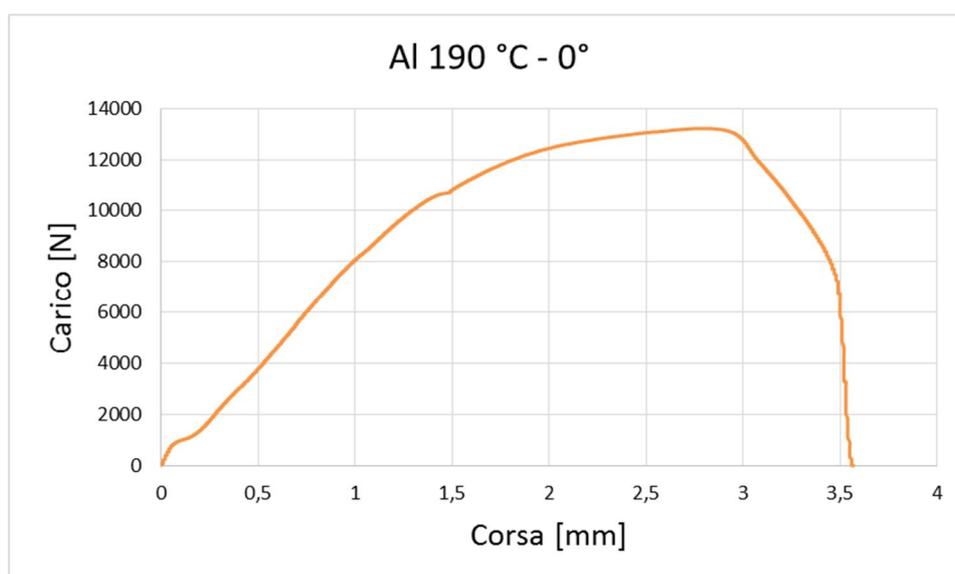


FIGURA 93 - AL: 195 °C

Nella Tabella 18, infine, vengono riportati i valori del carico di rottura con le tensioni ottenute.

	165 °C	190 °C
Carico Max [N]	13886	14362
Deviazione Standard Carico Max [N]	954	763
Tensione [MPa]	21.04	21.76
Tensione Scheda Tecnica [MPa]	26	26
Deviazione Standard Tensione [MPa]	1.44	1.15

TABELLA 18 - VALORI PER ENTRAMBE LE CURE

In Figura 92 sono rappresentati gli andamenti del carico di rottura per entrambe le condizioni di cura. Andando ad analizzare solamente il carico di rottura, però, si denota un valore che permette di avere delle tensioni di rottura molto prossime a quelle fornite dal produttore dell'adesivo, come si può osservare in Tabella 18, nonostante non sia stato effettuato alcun pretrattamento superficiale come suggerito.

6.3.1.2. Condizione di prova a 45°: taglio e trazione combinati

La condizione di prova in 45°, implica, invece, un carico sul provino, che presenta una combinazione di taglio e trazione. Dapprima vengono riportate, in Figura 94 e 95, le superfici di frattura degli aderenti del giunto.

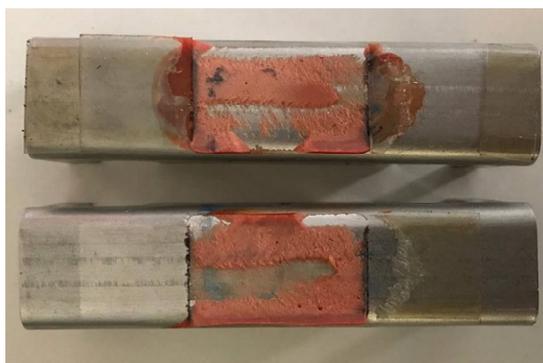


FIGURA 94 - AL: 165 °C

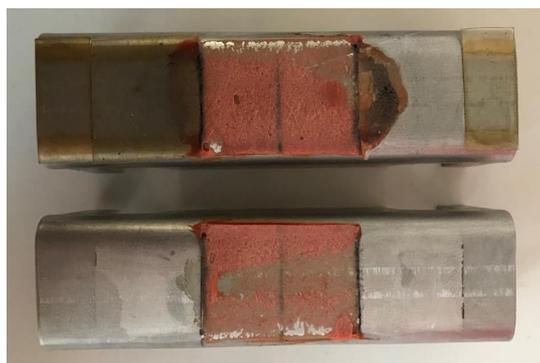


FIGURA 95 - AL: 190 °C

Durante questa configurazione di prova, invece, le superfici di frattura degli aderenti risultano avere una frattura coesiva, indipendentemente dal tipo di cura effettuato.

In Figura 96 e 97 vengono riportati gli andamenti del carico.

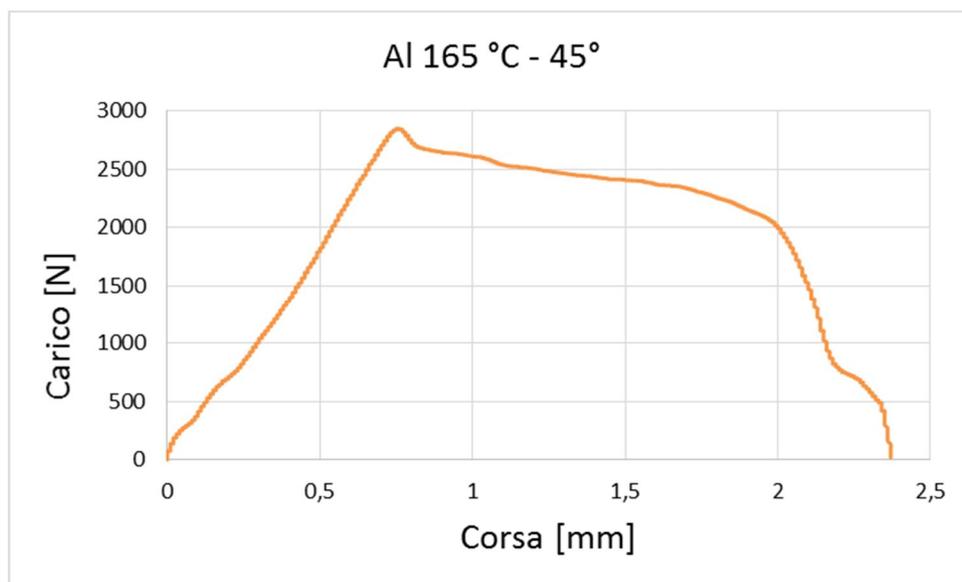


FIGURA 96 - AL: 165 °C

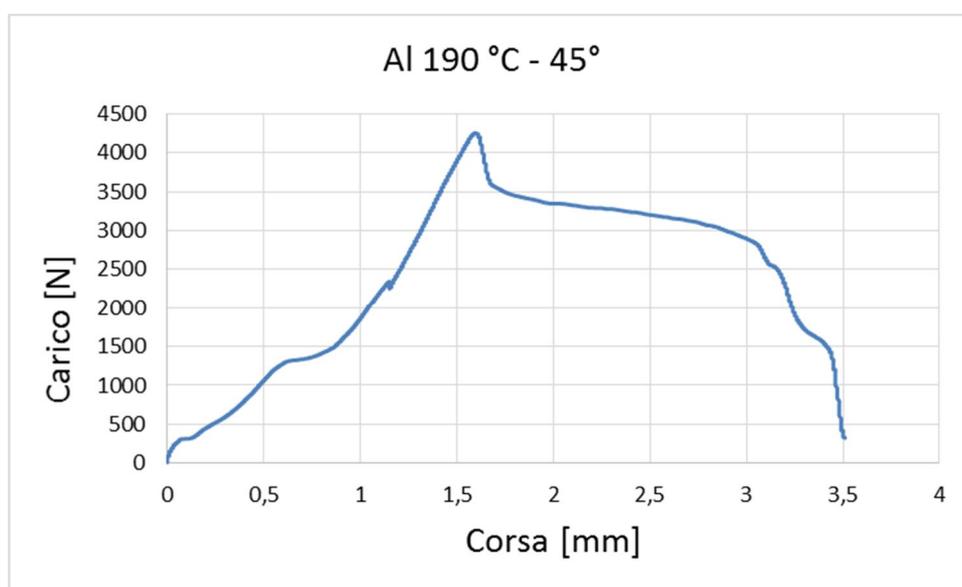


FIGURA 97 - AL: 190 °C

Gli andamenti rappresentati in Figura 96 e 97 fanno riferimento alle due temperature di cura per l'Alluminio. Si può osservare come, non appena raggiunto il carico massimo, il provino non giunge subito a rottura. Questo probabilmente è causato dal fatto che la rottura dell'adesivo non è avvenuta nello stesso istante ma prima si è innescata una cricca che si è propagata fin quando il giunto non ha ceduto completamente.

Nella Tabella 19, infine, vengono riportati i valori del carico di rottura con le tensioni ottenute nella prova a 45°.

	165 °C	190 °C
Carico Max [N]	2997	4008
Deviazione Standard Carico Max [N]	141	867
Tensione [MPa]	4.54	6.07
Deviazione Standard Tensione [MPa]	0.21	0.98

TABELLA 19 – VALORI PER ENTRAMBE LE CURE

Andando ad analizzare i carichi di rottura, in Tabella 19, si osservano dei valori nettamente minori rispetto a quelli presenti nella configurazione a 0° , poiché la resistenza del giunto tende a decadere allontanandosi dalla configurazione di puro taglio.

6.3.1.3. Condizione di prova a 90° : pura trazione

L'ultima configurazione analizzata è quella di 90° , che implica un carico di pura trazione sul giunto adesivo. Dapprima vengono riportate, in Figura 98 e 99, le superfici di frattura degli aderendi del giunto.

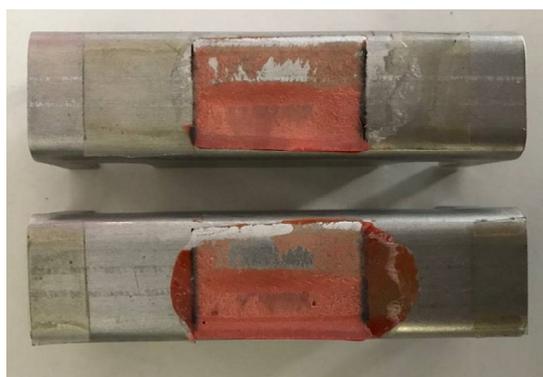


FIGURA 98 - AL: 165°C



FIGURA 99 - AL: 190°C

In Figura 98 e 99, come nella configurazione precedente, si osserva una frattura puramente coesiva per ambedue le condizioni di cura.

In Figura 100 e 101 vengono riportati gli andamenti del carico, in Tabella 20 i valori ottenuti.

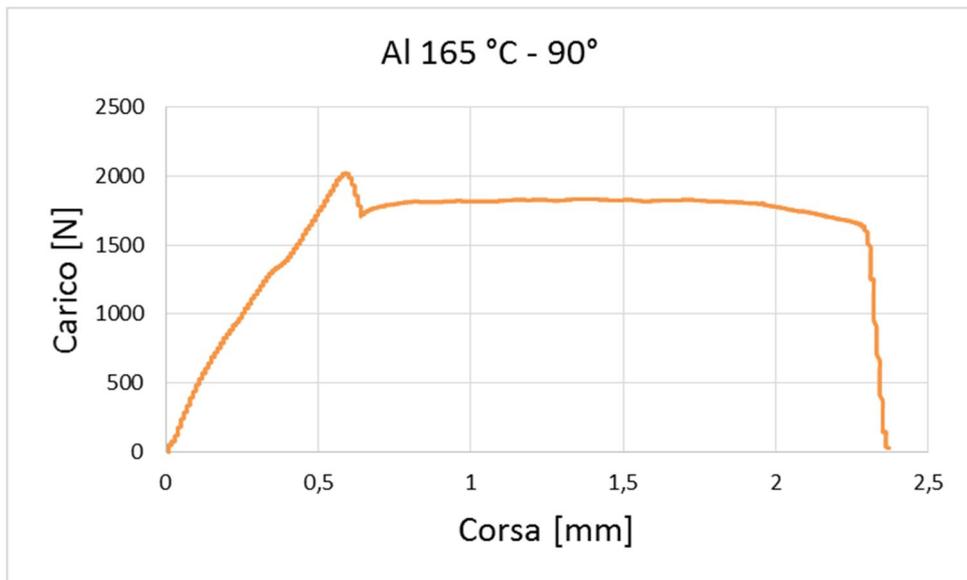


FIGURA 100 - AL: 165 °C

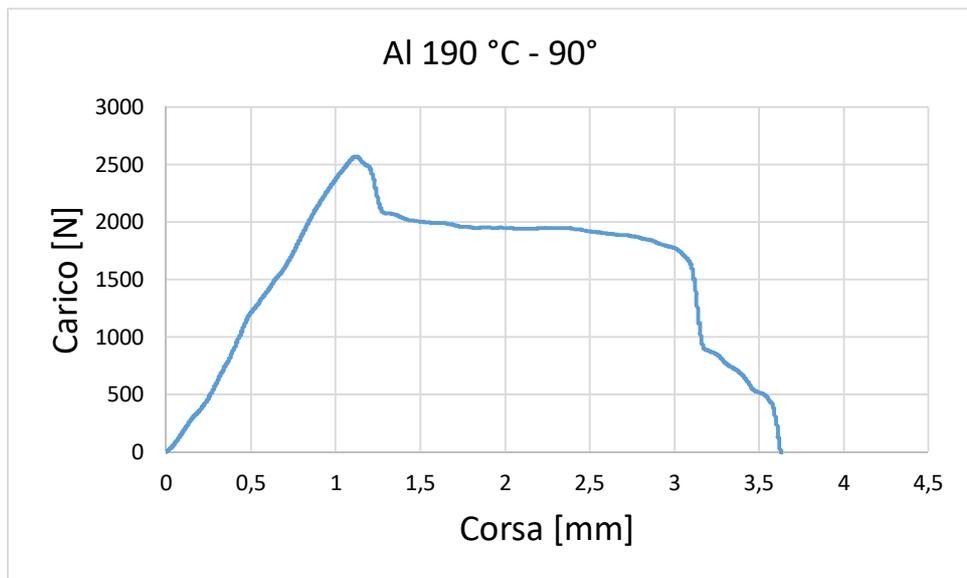


FIGURA 101- AL: 190 °C

	165 °C	190 °C
Carico Max [N]	1991	2588
Deviazione Standard Carico Max [N]	106	596
Tensione [MPa]	3.02	3.92
Deviazione Standard Tensione [MPa]	0.16	0.9

TABELLA 20 - VALORI PER ENTRAMBE LE CURE

Andando ad osservare l'andamento del carico, in Figura 100, si può notare un tratto orizzontale. Questo, come nel caso precedente, implica che la frattura dell'adesivo è avvenuta in modo graduale.

6.3.1.4. Confronto dei risultati per l'Al 5182

In Figura 102 è riportato un confronto tra il giunto adesivo con la cura effettuata a 165 °C e quello con la cura a 190 °C. Dall'immagine si denota che, per tutte le configurazioni con la cura a 190° C, si hanno valori della tensione massima "media" superiori. Questo probabilmente può essere attribuito al fatto che a 190 °C il provino è riuscito a curare meglio rispetto alla condizione di 165 °C. Inoltre, il tratto verticale rosso sta a rappresentare l'errore del valor medio massimo. Esso, risulta essere più piccolo nella configurazione di 45° e 90°, in entrambe le condizioni di cura, poiché il giunto adesivo è sottoposto a forze minori di quelle che raggiunge nella configurazione di 0°.

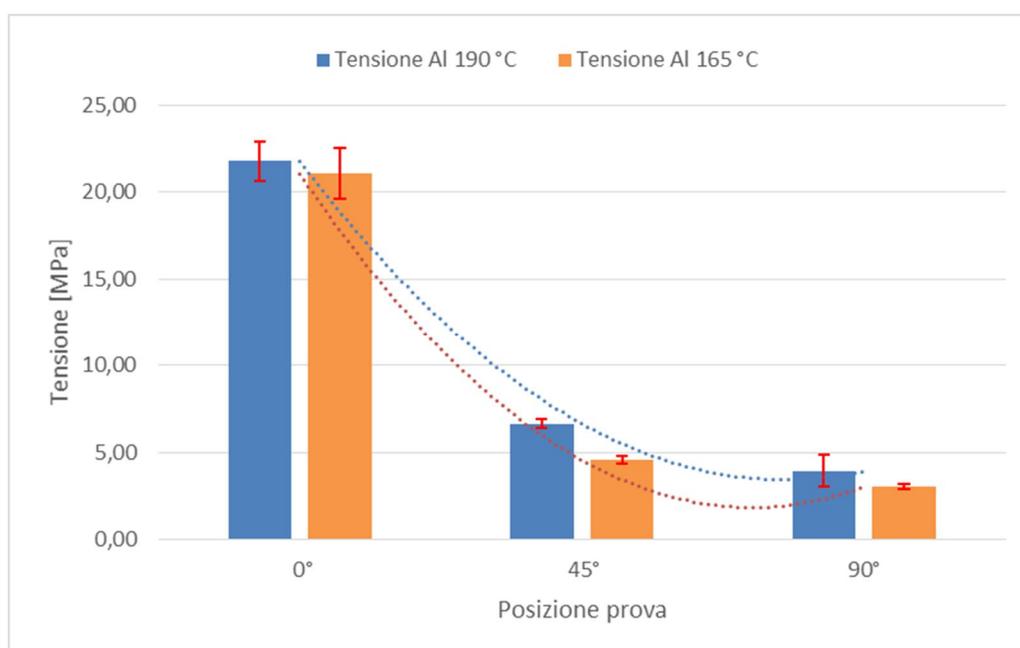


FIGURA 102- CONFRONTO AL 165 °C VS AL 190 °C

6.3.2. Provini in DP600

Di seguito sono stati presi in esame i provini in DP600, che presentano le seguenti caratteristiche:

Overlap	22x15 mm
Spessore lamiera	1.2 mm

TABELLA 21 - CARATTERISTICHE DP600

Le prove sono state effettuate con una velocità di prova costante di 5 mm/min e sono state eseguite 3 repliche per ogni condizione, col fine di verificare la ripetibilità dei risultati.

Le prove effettuate sono le seguenti:

Adesivo usato	Spessore adesivo [mm]	Cura Effettuata
4600G	0.2	45 minuti a 165 °C
4600G	0.2	15 minuti a 190 °C

TABELLA 22 - PROVE EFFETTUATE

Bisogna notare come, con il DP600, è stato scelto un *overlap* minore. Questo perché, il Betamate 4600G, non risulta essere ottimizzato per l'acciaio. Si è deciso, quindi, di eseguire delle “prove preliminari” con un *overlap* più piccolo con il fine di valutare la risposta del giunto sottoposto a test.

Di seguito vengono illustrati i risultati ottenuti.

6.3.2.1. Condizione di prova a 0°: puro taglio

Analogamente a quanto illustrato per l'Al 5182, dapprima vengono illustrate le superfici di frattura degli aderendi del giunto adesivo.

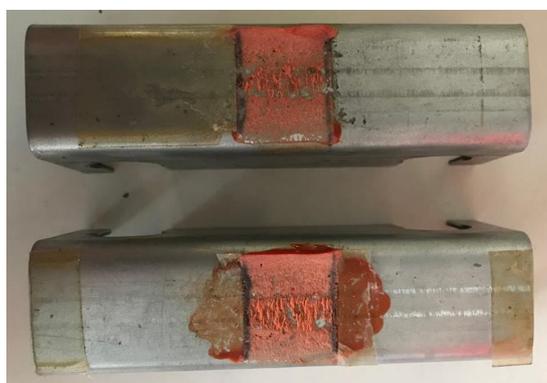


FIGURA 103 - DP: 165 °C



FIGURA 104 – DP: 190 °C

Dalla Figura 103 e 104 si può osservare come le superfici presentano entrambe una frattura prettamente coesiva, pur avendo effettuato due cure differenti.

In Figura 105 e 106 vengono riportati i rispettivi andamenti dei carichi per il DP, in Figura 107 un confronto tra il DP e l'Al a parità di condizioni di cura, carico e *overlap*.

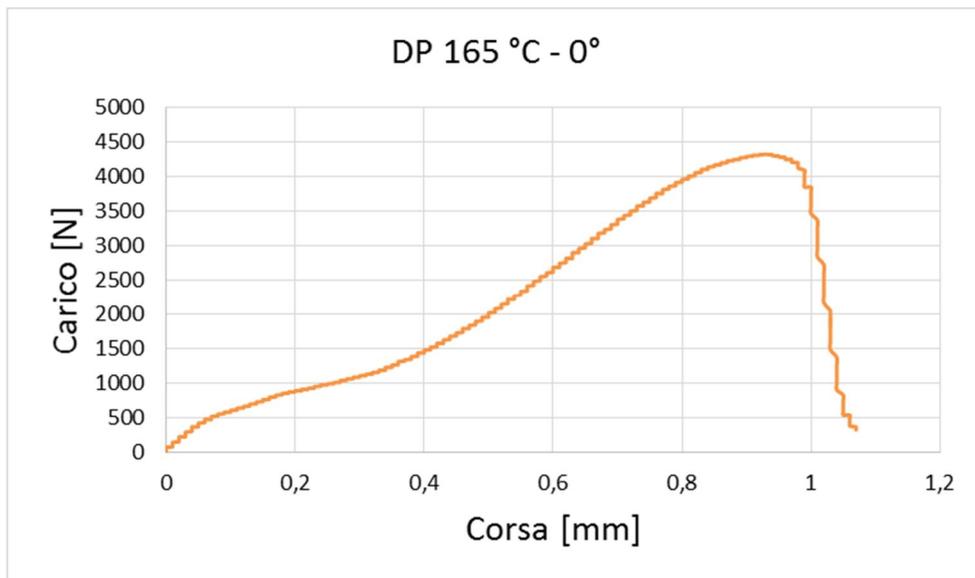


FIGURA 105 – DP: 165 °C

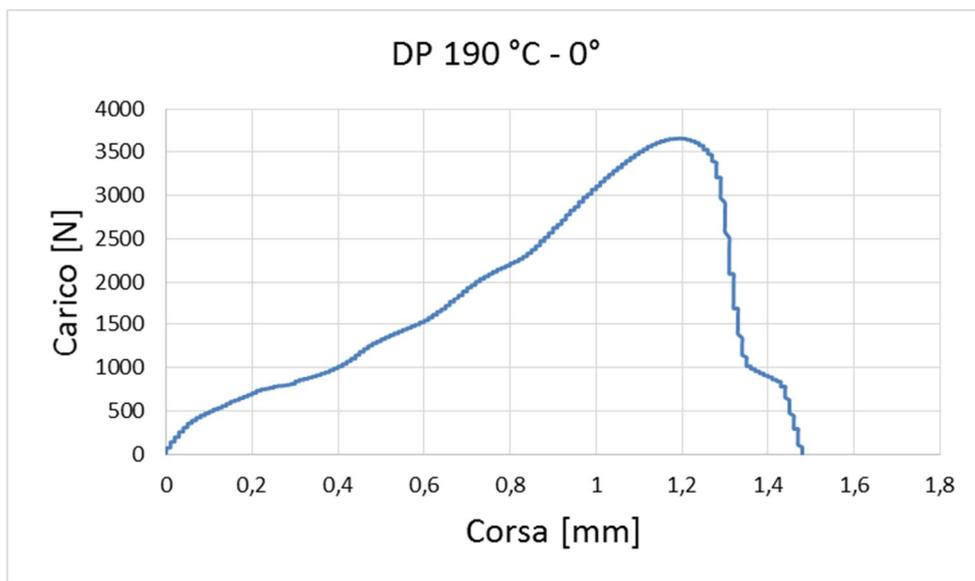


FIGURA 106 - DP: 190 °C

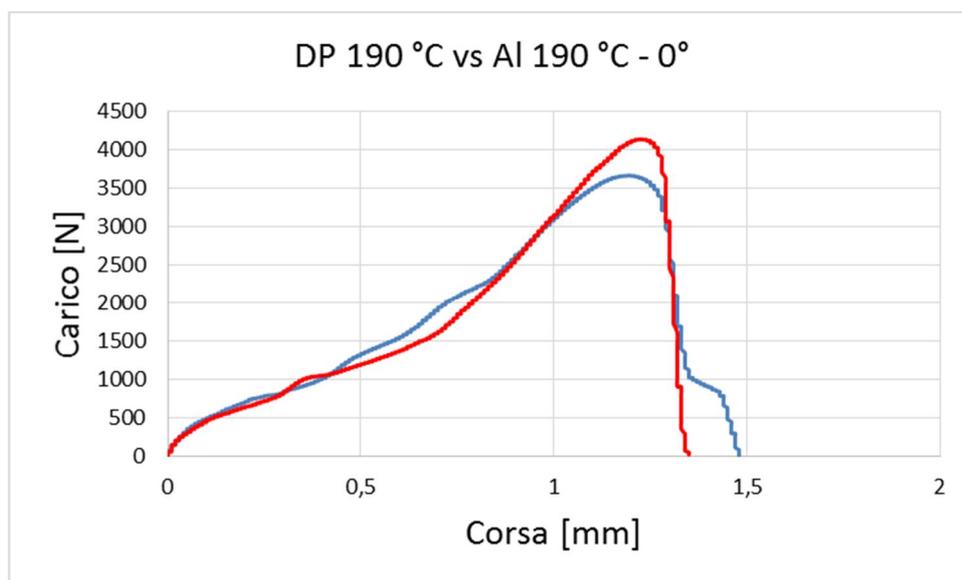


FIGURA 107 - DP vs AL 190 °C

In Figura 105 e 106, si denota un buon andamento della curva, indipendentemente dal tipo di cura. Si può osservare, però, che i valori dei carichi di rottura risultano essere nettamente inferiori a quanto visto nelle prove precedenti. È stato, dunque, sottoposto a test, una coppia di provini in Al 5182, con cura a 190 °C e *overlap* 22x15 mm. Questa prova è stata effettuata con il fine di poter confrontare l'andamento dell'Al nelle stesse condizioni di prova del DP. Si può osservare, in Figura 107, che a pari condizioni, gli andamenti e i corrispettivi valori di carico raggiunti risultano essere “analoghi”, indipendentemente dal materiale del giunto adesivo.

Nella Tabella 23, infine, vengono riportati i valori del carico di rottura con le tensioni ottenute.

	165 °C	190 °C
Carico Max [N]	4293	3660
Deviazione Standard Carico Max [N]	186	280
Tensione [MPa]	13.01	11.09
Tensione Scheda Tecnica [MPa]	26	26
Deviazione Standard Tensione [MPa]	0.56	0.84

TABELLA 23 - VALORI PER ENTRAMBE LE CURE

Aver ottenuto valori analoghi tra l'Al e il DP più piccolo può probabilmente essere ricondotto a un problema geometrico. Infatti, i bordi esterni dell'overlap presentano un raggio di raccordo, che, su un'area più piccola, potrebbero generare delle singolarità che influenzerebbero maggiormente i risultati dei carichi e conseguentemente quelli delle tensioni.

6.3.2.2. Condizione di prova a 45°: taglio e trazione combinati

Dapprima vengono illustrate le superfici di frattura degli aderenti del giunto adesivo.

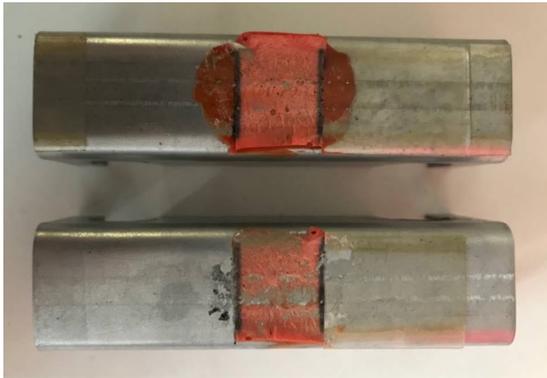


FIGURA 108 - DP: 165 °C



FIGURA 109 – DP: 190 °C

Dalla Figura 108 e 109 si può osservare, come nella configurazione di prova di 0°, che le superfici degli aderendi presentano una frattura coesiva.

In Figura 110 e 111 vengono riportati i corrispettivi andamenti dei carichi.

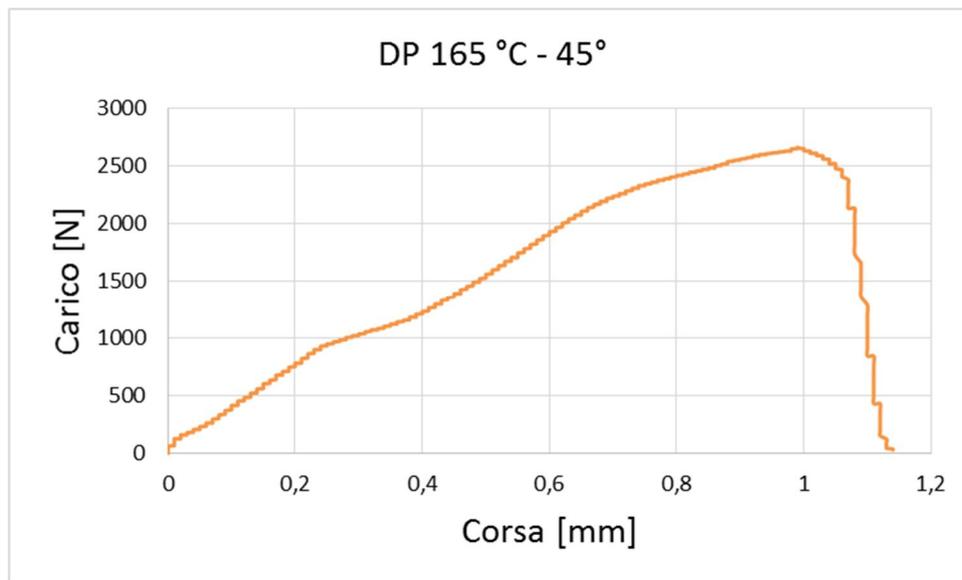


FIGURA 110 - DP: 165 °C

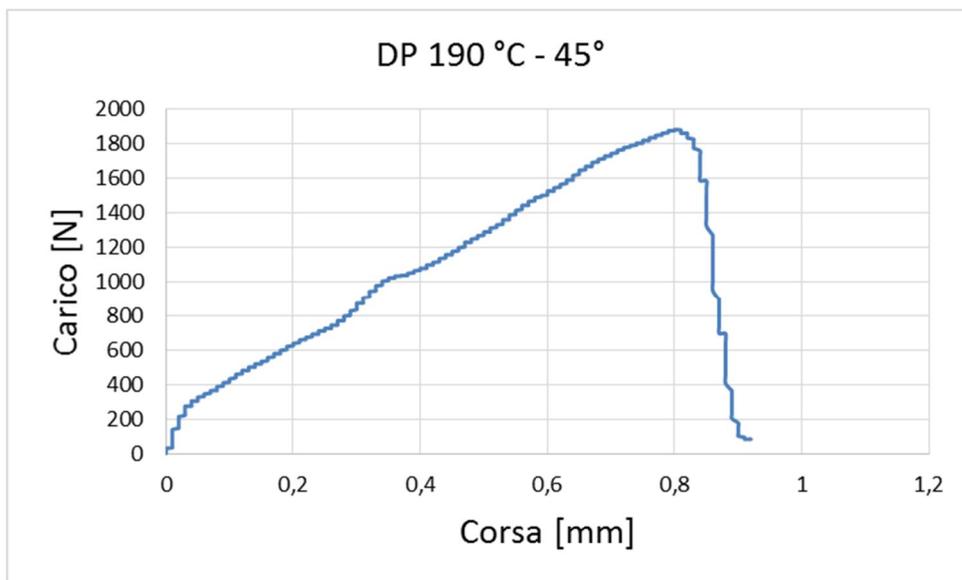


FIGURA 111 - DP: 190 °C

In Tabella 24, infine, vengono riportati i valori dei carichi e delle tensioni ottenute.

	165 °C	190 °C
Carico Max [N]	2330	1923
Deviazione Standard Carico Max [N]	379	36
Tensione [MPa]	7.06	5.83
Deviazione Standard Tensione [MPa]	1.15	0.11

TABELLA 24 - VALORI PER ENTRAMBE LE CURE

6.3.2.3. Condizione di prova a 90°: pura trazione

L'ultima configurazione analizzata è quella di 90°, che implica un carico di pura trazione sul giunto adesivo. Dapprima vengono riportate, in Figura 112 e 113, le superfici di frattura degli aderendi del giunto.

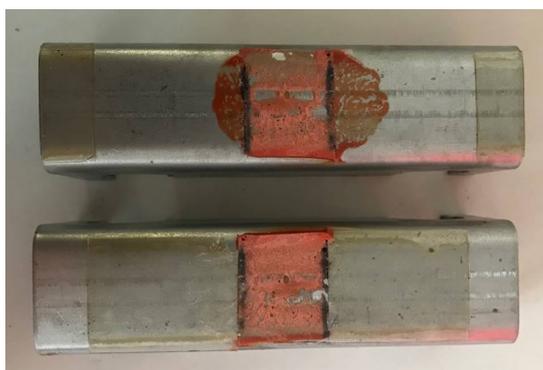


FIGURA 112 - DP: 165 °C

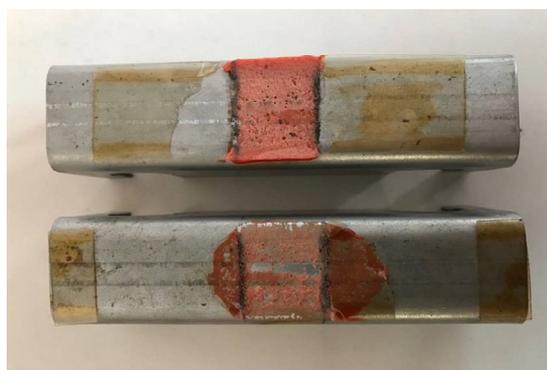


FIGURA 113 - AL: 190 °C

Dalle quali si rileva, come nella configurazione precedente, una frattura di tipo puramente coesiva per ambedue le condizioni di cura.

In Figura 114 e 115 vengono riportati gli andamenti del carico e in Tabella 25 i valori ottenuti.

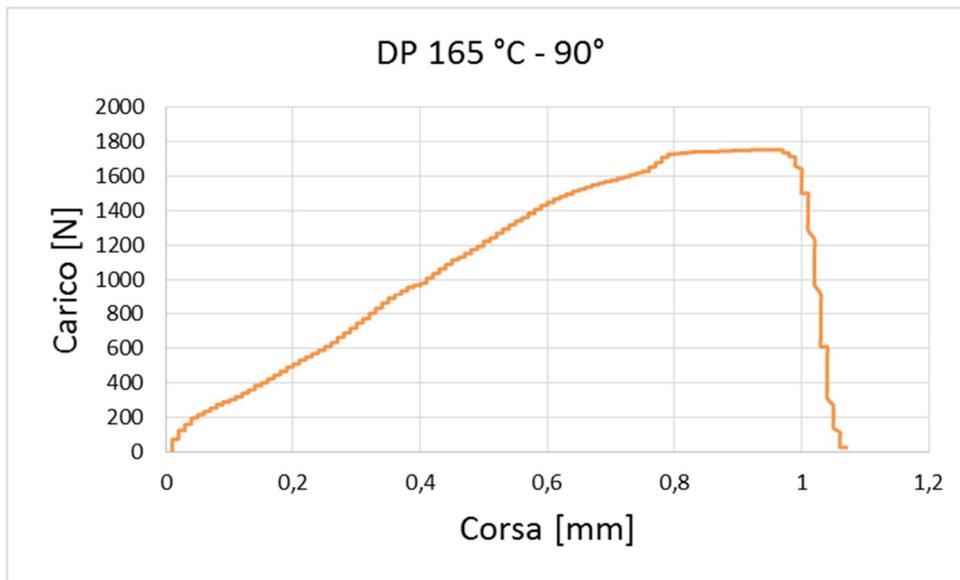


FIGURA 114 - DP: 165 °C

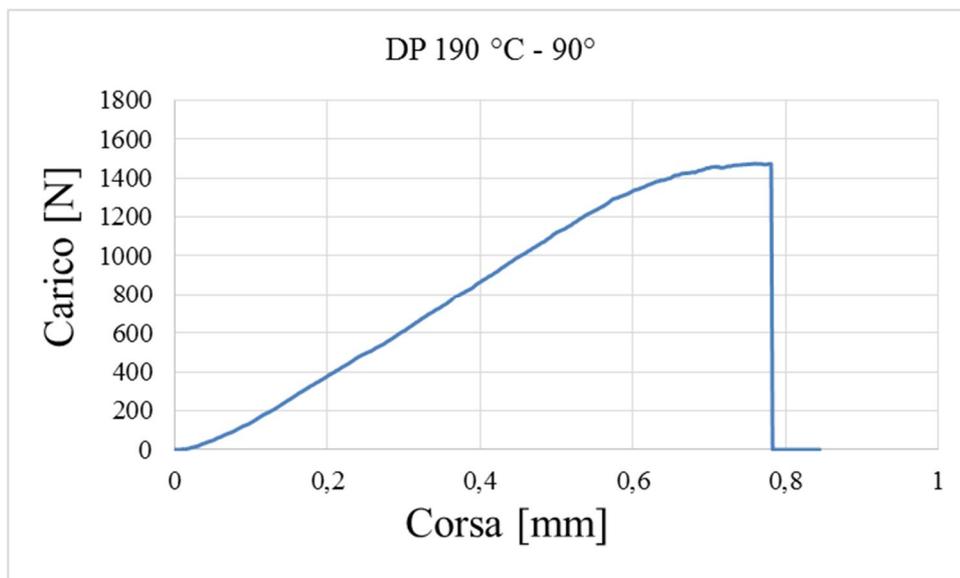


FIGURA 115 - DP: 165 °C DP: 190 °C

	165 °C	190 °C
Carico Max [N]	1665	1504
Deviazione Standard Carico Max [N]	582	84
Tensione [MPa]	5.05	4.56
Deviazione Standard Tensione [MPa]	0.37	0.25

TABELLA 25 - VALORI PER ENTRAMBE LE CURE

6.3.2.4. Confronto dei risultati per il DP600

In Figura 116 è riportato il confronto, in termini di tensioni medie massime, tra il giunto adesivo con la cura effettuata a 165 °C e quello con la cura a 190 °C. Dall'immagine si può osservare come le tensioni ottenute a 165 °C presentano un valore "relativamente" più elevato rispetto ai giunti con una cura a 190 °C.

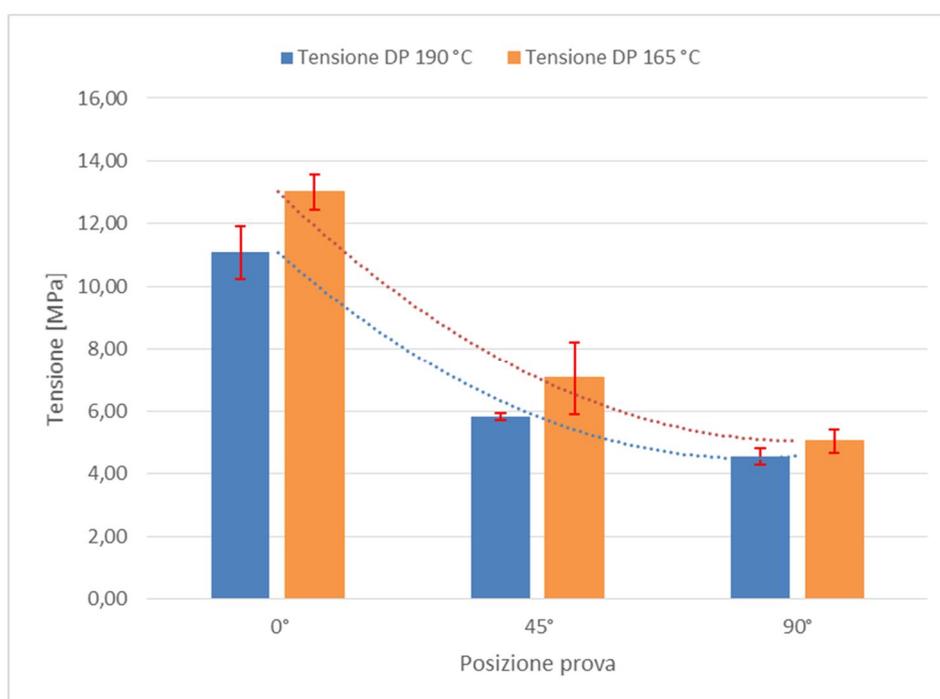


FIGURA 116- CONFRONTO AL 165 °C VS AL 190 °C

6.4. Confronto tensioni Al 5182 vs DP600

In Figura 118 viene mostrato il confronto tra i valori medi delle tensioni massime apparenti ottenuti per ogni configurazione di prova, sia per l'Al che per il DP. Si può osservare:

- La configurazione di 90° sull'asse delle ascisse, che rappresenta la condizione di pura trazione;
- La configurazione di 0° sull'asse delle ordinate, che rappresenta la condizione di puro taglio;
- La configurazione di 45°.

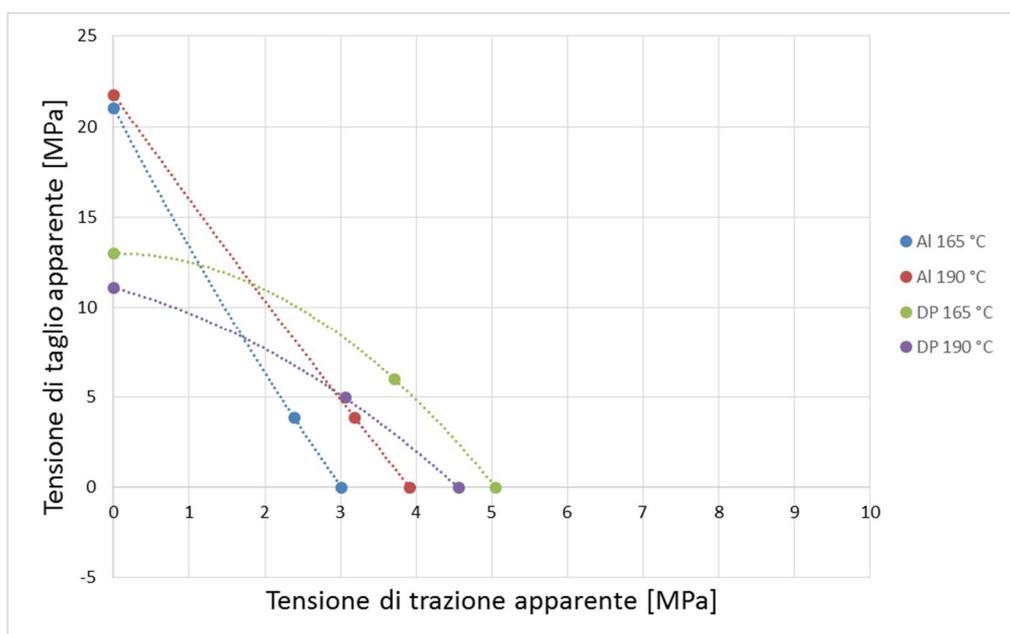


FIGURA 117- CONFRONTO TENSIONI AL VS DP

I valori delle tensioni per ogni configurazione di prova, nella combinazione materiale-cura, sono stati successivamente uniti da una funzione polinomiale passante per i 3 punti. Si può osservare, per la configurazione a 0°, come i valori ottenuti per l'Al 5182 risultano essere molto più alti rispetto a quelli ottenuti per il DP600. Un distacco così evidente non si può osservare, invece, per le configurazioni a 45° e 90°. In queste ultime due

configurazioni, infatti, a prescindere dal tipo di materiale e cura, le prestazioni dell'adesivo tendono a decadere notevolmente rispetto alla configurazione a 0° . Difatti, in letteratura è noto che un giunto adesivo lavora meglio se sottoposto a forze di puro taglio.

Conclusioni

Questo lavoro di tesi si è basato sulla caratterizzazione di giunti realizzati mediante adesivi a base di resine epossidiche, largamente utilizzate in ambito *automotive*.

Una prima fase, ha riguardato la possibilità di poter confinare la zona di adesione mediante poliestere o teflon, senza andare ad alterare il carico di rottura. Infatti, nel caso in cui l'adesivo andasse a creare un legame con il materiale in questione, la forza di adesione aumenterebbe. I risultati delle prove di *Single Lap Joint* hanno dimostrato che, le forze tra giunto adesivo confinato e non confinato, rimangono pressoché uguali.

Questo risulta essere molto importante e fondamentale per le analisi svolte in seguito, poiché ha permesso di realizzare giunti adesivi che presentavano una zona di sovrapposizione superiore all'effettiva area di incollaggio. Infatti, i substrati forniti da FCA presentano una geometria tale da non consentire una configurazione a SLJ, ma gli aderenti dovevano essere completamente sovrapposti. Un *overlap* pari alla sovrapposizione, però, non sarebbe stato possibile, poiché tale area avrebbe portato a deformazione gli aderenti del giunto adesivo quando sottoposti a qualsiasi tipo di test.

Successivamente sono state effettuate delle analisi con il fine di valutare, scelti due *overlap* di riferimento, l'eventuale deformazione dell'aderendo quando il giunto adesivo è sottoposto a test. Queste prove, dunque, hanno permesso di verificare che entrambi gli *overlap* scelti garantiscono una non deformabilità degli aderenti. Alla luce dei risultati trovati è stato deciso di andare ad applicare l'*overlap* superiore, 22x30 mm, sul provino in alluminio e, l'*overlap* inferiore, 22x15 mm, sul provino in acciaio. Tale scelta è resa necessaria dal fatto che, l'adesivo preso in esame, risulta essere ottimizzato per l'alluminio e non per l'acciaio. Al contempo, però, la combinazione adesivo-acciaio nelle prove precedenti ha dato risultati degni di un approfondimento successivo.

Data la possibilità di poter confinare la zona di incollaggio, scelti due *overlap* di riferimento e valutata la non deformabilità dell'aderendo, sono stati preparati provini con differenti temperature di cura e sottoposti ad Arcan Test. Questo test, attualmente

utilizzato in azienda su giunti saldati, ha permesso di valutare sia il comportamento dei giunti adesivi quando sono sottoposti a questo test che la loro reazione a una condizione di carico differente dalla pura trazione o puro taglio. Inoltre, la scelta della variabile “cura” è dettata dall’esigenza dell’azienda di voler ottimizzare i processi, andando ad effettuare la cura dell’adesivo con la verniciatura per cataforesi, non alterando, però, le prestazioni dell’adesivo stesso. Dalle prove sull’alluminio è emerso che la condizione di cura a 190 °C risulta essere più prestante, in termini di polimerizzazione dell’adesivo, poiché fornisce carichi e conseguentemente tensioni di rottura più elevate rispetto all’altra condizione di cura. Per quanto riguarda l’acciaio, invece, si è notato un decadimento delle prestazioni dell’adesivo. Questo, però, non è attribuibile alla combinazione adesivo-acciaio, bensì a un fattore geometrico. Difatti, il provino proposto da FCA presenta, sulla parte esterna, dei raggi di raccordo che possono aver influenzato la forza adesiva, presentando un overlap con dimensioni pari alla metà del provino in alluminio.

Grazie alle prove effettuate, pertanto, si è potuto apprezzare l’utilità del confinamento andando così a ridurre la deformazione dell’aderendo e della buona interazione tra l’acciaio e il Betamate 4600G. Inoltre, uno degli sviluppi futuri potrebbe essere quello di andare a effettuare un’analisi FEM per la valutazione che gli effetti di bordo hanno sulla forza di adesione.

Bibliografia

1. **R. Houwink and G. Salomon, eds.** *Adhesion and Adhesives*. New York : Elsevier, 1965.
2. **A, Pizzi e K, L, Mittal.** *Handbook of Adhesive Technology. Handbook of Adhesive Technology*. 2003.
3. **F, Di Sciullo.** *Incollaggi nell'automobile*.
4. **AVISA.** Federchimica. [Online] 2006 Marzo.
http://dipcia.unica.it/superf/Lauree_Scientifiche/Adesivi.pdf.
5. **G. Belingardi, V. Brunella, B. Martorana, R. Ciardiello.** Thermoplastic adhesive for automotive applications. *Adhesives - Applications and Properties*. 2016.
6. **F, Concli.** file:///C:/Users/Personal/Downloads/PI_2013_009_INT030-034.pdf. [Online] 12 Dicembre 2014.
7. **L, Mascolo.** Elementi di unione e collegamento. [Online]
http://www.itfalco.it/files/CETF05000Q/Elementi-di-unione-e-collegamenti-_parte-1_.pdf.
8. **T, Berruti e E, Brusa.** Elementi di costruzione di macchine. Torino : s.n., 2014.
9. **AICQ.** [Online] 16 Novembre 2015. http://www.qualitaonline.it/aicq_qualita/wp-content/uploads/2016/01/Parte-3-Progettazione-Rev.-01-del-16-11-15.pdf.
10. **G, Sala, et al.** SCRIBD. [Online] <https://www.scribd.com/document/339227976/44Cap-Libro-Incollaggi>.
11. **H, Saechtling.**
https://books.google.it/books?id=WlpNd4MA_TIC&pg=PA581&lpg=PA581&dq=din+en+923+definizione+adesivo&source=bl&ots=4-hM-PAQu-&sig=0VLw8vAc5dIPNGvp0e-eAsXxu3l&hl=it&sa=X&ved=0ahUKEwigkp6j75bcAhVGOBQKHbFzCg0Q6AEIJzAA#v=onepage&q=din%20en%20923%20definizione%20. [Online] Marzo 2006.
12. **Wikipedia.** <https://it.wikipedia.org/wiki/Coesione>. [Online] 8 Dicembre 2017.
13. **L, F,M, da Silva, et al.** *Testing Adhesive Joints*. 2009.
14. **R, D, Adams.** *Adhesive bonding*. 2005.
15. **L, F,M, da Silva, A, Ochsner e R, D, Adams.** *Handbook of Adhesion Technology*. 2011.
16. **E, E,M, Verna.** *Preparazione e caratterizzazione di adesivi hot-melt*. Torino : s.n., 2012.

17. **Wikipedia.** Wikipedia. [Online] 19 Settembre 2017.
https://it.wikipedia.org/wiki/Adesivi_strutturali.
18. **Adhesives.org.** [Online] 2008. [http://www.adhesives.org/adhesives-sealants/adhesives-sealants-overview/adhesive-technologies/chemically-curing/two-component-\(2-c\)/epoxy-adhesives](http://www.adhesives.org/adhesives-sealants/adhesives-sealants-overview/adhesive-technologies/chemically-curing/two-component-(2-c)/epoxy-adhesives).
19. **Analysis of the non linear behavior of adhesives in bonded.** Cognard, J.Y., et al. 2008, International Journal of Adhesion & Adhesives.
20. **M, Montagnin.** [Online] 2013. http://tesi.cab.unipd.it/45905/1/Tesi_Matteo_Montagnin.pdf.
21. **Analytical models of adhesively bonded joints.** L, F, M, daSilva, et al. 2008, International Journal of Adhesion&Adhesives.
22. **Kharagpur, IIT. Design of Adhesive.** [Online]
<https://nptel.ac.in/courses/112105125/pdf/mod10les5.pdf>.
23. **Wikipedia.** [Online] [Riportato: 12 Settembre 2018.]
<https://it.wikipedia.org/wiki/Estensimetro>.
24. **Omega.** [Online] <https://it.omega.com/prodinfo/estensimetri.html>.
25. **Wikipedia.** [Online] [Riportato: 12 Settembre 2018.]
<https://it.wikipedia.org/wiki/Estensimetro>.
26. **M, Sorli. Trasducers.** 2018.
27. **HMB. HMB.** [Online] <https://www.hbm.com/it/7163/wheatstone-bridge-circuit-strain-gauge/>.