

ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITA' DI BOLOGNA

SECONDA FACOLTA' DI INGEGNERIA

CON SEDE A CESENA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE

in INGEGNERIA MECCANICA

Classe LM-33

Sede di Forlì

TESI DI LAUREA

In PROGETTO E COSTRUZIONI DI MACCHINE

Prove di piantaggio e spiantaggio su provini unificati

CANDIDATO

Gianluca Rocchi

RELATORE

Prof. Ing. Dario Croccolo

CORRELATORE

Prof. Ing. Massimiliano De Agostinis

Anno Accademico 2010-2011

III Sessione

Indice

Introduzione pag. 1

1. Capitolo 1 Cenni di teoria preliminare

1.1 Accoppiamenti albero mozzo pag. 3

1.2 Stress e rotture nelle giunzioni incollate pag. 11

Sollecitazioni e distribuzioni di tensione nelle giunzioni

incollate pag. 11

Tipologie di rotture delle giunzioni adesive pag. 19

1.3 Dilatazione termica dei materiali metallici pag. 23

2. Capitolo 2 Gli adesivi

2.1 Storia e cenni introduttivi pag. 27

2.2 Caratteristiche degli incollaggi pag. 28

2.3 La teoria dell'adesione pag. 30

Teoria dell'adsorbimento pag. 33

Teoria dell'interconnessione meccanica pag.34

Teoria della diffusione pag. 35

Teoria elettrostatica pag. 36

Teoria degli strati coesivi deboli pag. 36

2.4 Classificazione delle colle pag. 38

Materiali da incollare pag. 38

Forma fisica dell'adesivo pag.38

Modalità d'indutimento pag. 40

	Composizione chimica	pag. 41
	Costo	pag. 47
2.5	Famiglie di adesivi	pag. 48
	Adesivi epossidici	pag. 50
	Adesivi resorcinolo-formaldeide	pag. 52
	Adesivi melammina-formaldeide	pag. 53
	Adesivi fenolici	pag. 53
	Adesivi poli-imidici per alte temperatura	pag. 54
	Poliesteri	pag. 57
	Adesivi poliuretanicici	pag. 57
	Adesivi ciano acrilici	pag. 58
	Acrilici modificati	pag. 59
	Adesivi elastomerici	pag. 60
2.6	Gli adesivi anaerobici (Loctite 648)	pag. 62
	Adesivo anaerobico Loctite 648	pag. 63
3.	Capitolo 3 Normativa ISO 10123 su giunzioni pin-collar	
3.1	La normativa ISO 10123	pag. 67
3.2	Specifiche dei provini	pag. 72
4.	Capitolo 4 Le prove sperimentali	
4.1	Fasi delle prove	pag. 75
	Misurazione dei provini	pag. 75
	Pulitura dei campioni	pag. 79

Assemblaggio	pag. 81
Prove di sfilamento	pag. 87
4.2 Le attrezzature impiegate nelle prove	pag. 91
Strumenti di misura	pag. 91
Pulitore Loctite 7063	pag. 98
Pressa oleodinamica Italsigma FPF 100	pag. 100
Forno elettrico	pag. 103
Dispositivi di piantaggio e spiantaggio	pag. 103
5. Capitolo 5 Dati e analisi dei risultati	
5.1 Raccolta dati delle prove	pag. 107
Pin-collar con gioco	pag. 107
Pin-collar ad interferenza	pag. 124
5.2 Analisi dei risultati	pag. 133
Pin-collar con gioco	pag. 134
Pin-collar ad interferenza	pag. 138
5.3 Problemi incontrati nelle prove	pag. 142
Conclusioni	pag. 145
Bibliografia	pag. 147
Ringraziamenti	pag. 149

Introduzione

Nel seguente elaborato presento il risultato di una serie di prove sperimentali su provini standard ISO 10123 incollati con adesivo anaerobico Loctite 648. Tali provini, denominati pin-collar, rappresentano delle giunzioni albero-mozzo, essi si dividono nei seguenti gruppi: pin-collar con gioco, pin-collar con interferenza.

Lo scopo delle prove su campioni con gioco è quello di rilevare la resistenza delle giunzioni in tutte le condizioni di montaggio (a caldo, a freddo, a temperatura ambiente) che si presentano comunemente in fase di assemblaggio dei componenti, cercando di valutare la differenza nella forza adesiva tra substrato e adesivo. Per quanto riguarda i provini ad interferenza l'obiettivo è quello di valutare la quota parte di forza trasmissibile causata dalla presenza dell'adesivo e quella attribuibile alla sola interferenza.

Tutte le prove vengono svolte con l'utilizzo di una pressa oleodinamica dotata di cella di carico con portata massima di 100 kN e rispettando la normativa ISO 10123 nelle modalità di esecuzione e determinazione della tensione di rottura dell'adesivo.

Con i dati raccolti nelle prove sperimentali si ha la possibilità di conoscere informazioni aggiuntive sulla resistenza statica a taglio di giunzioni incollate di vario genere. I dati forniti dalle prove rappresentano una base di partenza per lo sviluppo nella progettazione di giunzioni incollate con adesivi anaerobici, tuttavia per garantire le corrette informazioni sulla resistenza di tali giunzioni e consigliabile eseguire prove di resistenza su campioni replicanti la geometria reale, quando questo è possibile.

I capitoli dell'elaborato sono strutturati in questa maniera; nel primo capitolo sono riportate le nozioni teoriche di base necessarie sia per lo sviluppo che la comprensione delle prove sperimentali svolte. Nel secondo capitolo è riportata una descrizione della teoria dell'adesione e dei principali tipi di adesivi, soffermandosi soprattutto sugli adesivi strutturali e sull'adesivo in uso nelle prove.

Introduzione

Nel terzo capitolo viene descritta la normativa di riferimento ISO 10123 e le specifiche tecniche degli elementi utilizzati come campioni nelle prove. Il quarto capitolo descrive in maniera dettagliata le operazioni principali eseguite durante la preparazione e lo svolgimento delle prove nonché le attrezzature impiegate. Il capitolo cinque è il principale e riporta tutti i dati delle prove e l'analisi dei risultati ottenuti.

Capitolo 1

Cenni di teoria preliminari

1.1 Accoppiamenti albero mozzo

In questo elaborato vengono testati giunzioni cilindriche incollate, parte di questi sono accoppiamenti ibridi che, oltre l'incollaggio, sono accoppiati ad interferenza. Di conseguenza per valutare le pressioni di contatto all'interfaccia è necessario porre l'attenzione alla teoria dei tubi di grosso spessore che è alla base degli accoppiamenti ad interferenza. I collegamenti albero mozzo ad interferenza sono molto diffusi perché permettono di collegare elementi cilindrici in maniera semplice sfruttando l'attrito e l'interferenza, generata dalla differenza dei diametri. La trasmissione del momento tra albero e mozzo avviene grazie alla pressione all'interfaccia di collegamento, tale pressione nasce dal forzamento dell'albero nel mozzo che, evidentemente, avrà un diametro interno minore rispetto al diametro dell'albero. Il valore di pressione è noto se sono noti geometrie e materiali di albero e mozzo. La strada che porta alla determinazione della pressione inizia isolando una porzione trasversale di tubo e mettendo in luce le forze che su di esso agiscono. Per semplicità il calcolo non considera la forza centrifuga perché gli accoppiamenti in esame sono testati dal punto di vista statico.

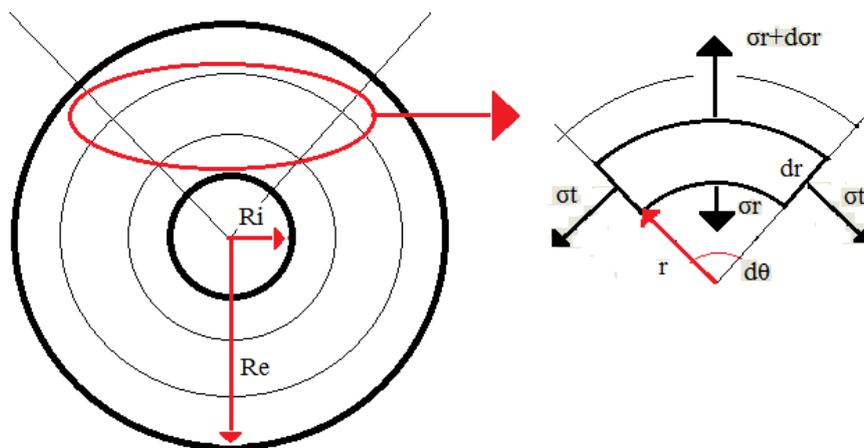


Figura 1.1 Porzione infinitesima di tubo

Per prima cosa si scrive l'equilibrio in direzione radiale dell'elemento rappresentato in figura 1.1, da cui otteniamo l'espressione:

$$\sigma_r r d\theta dl + \sigma_r dr d\theta dl + d\sigma_r r d\theta dl + d\sigma_r dr d\theta dl - \sigma_r r d\theta dl - 2 \sigma_t dr dl \sin \frac{d\theta}{2} = 0$$

Semplifichiamo l'equazione considerando che la porzione di angolo $d\theta$ è infinitesima perciò il seno si confonde con l'angolo, e che lo sviluppo infinitesimo dl , in direzione longitudinale, compare in tutti i termini. Otteniamo un'equazione di equilibrio in direzione radiale più compatta e con questa forma:

$$\frac{d(\sigma_r r)}{dr} - \sigma_t = 0$$

Le espressioni di σ_r e σ_t si possono determinare dalle espressioni delle deformazioni in direzione radiale ϵ_r e in direzione circonferenziale ϵ_t :

$$\begin{cases} \sigma_r = \epsilon_r E + \nu \sigma_t \\ \sigma_t = \epsilon_t E + \nu \sigma_r \end{cases}$$

Nelle espressioni non compare la tensione in direzione longitudinale perché è costante lungo tutto l'asse del tubo. Sostituendo l'una nell'altra è possibile ricavare le espressioni delle tensioni esclusivamente in funzione delle deformazioni e del materiale:

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{E}{1 - \nu^2} (\epsilon_r + \nu \epsilon_t) \\ \sigma_t = \frac{E}{1 - \nu^2} (\epsilon_t + \nu \epsilon_r) \end{cases}$$

Queste espressioni si sostituiscono nell'equazione di equilibrio radiale indicando le deformazioni in funzione di una quota z che rappresenta la quantità di interferenza radiale che causa la deformazione:

$$\frac{d(\sigma_r r)}{dr} - \sigma_t = \frac{E}{1 - \nu^2} \left(\frac{d^2 z}{dr^2} + \frac{dz}{dr} + \nu \frac{dz}{dr} \right) - \frac{E}{1 - \nu^2} \left(\frac{z}{r} + \nu \frac{dz}{dr} \right) = 0$$

Operando una serie di sostituzioni delle derivate contenute nelle parentesi si ottiene l'espressione ridotta:

$$\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d(z r)}{dr} \right] = 0$$

L'espressione ottenuta va integrata due volte per ottenere l'espressione dell'interferenza z:

$$z = C1 \frac{r}{2} + C2 \frac{1}{r}$$

Dall'espressione dell'interferenza si possono ottenere le espressioni delle deformazioni in funzione del raggio:

$$\begin{cases} \varepsilon_t = \frac{z}{r} = \frac{C1}{2} + \frac{C2}{r^2} \\ \varepsilon_r = \frac{dz}{dr} = \frac{C1}{2} - \frac{C2}{r^2} \end{cases}$$

Tali espressioni si sostituiscono nelle formule delle tensioni funzione delle deformazioni e del materiale otteniamo:

$$\sigma_r = \frac{E}{1-\nu^2} \frac{C1}{2} (1+\nu) - \frac{E}{1-\nu^2} C2(1-\nu) \frac{1}{r^2}$$

$$\sigma_t = \frac{E}{1-\nu^2} \frac{C1}{2} (1+\nu) + \frac{E}{1-\nu^2} C2(1-\nu) \frac{1}{r^2}$$

I gruppi indicati con in blu sono raggruppati in una costante indicata con A mentre quelli in rosso sono indicati con B'. Moltiplicando il termine $1/r^2$ per re^2/re^2 possiamo mettere in evidenza il rapporto re^2/r^2 indicato con la lettera Q e inglobare $1/re^2$ nella costante B' indicandola semplicemente con B. otteniamo così le equazioni fondamentali dei gusci:

$$\begin{cases} \sigma_r = A - \frac{B}{Q^2} \\ \sigma_t = A + \frac{B}{Q^2} \end{cases}$$

Esse rappresentano l'andamento della tensione in direzione radiale e in direzione circonferenziale in funzione del parametro Q. Le costanti sono determinabili applicando le condizioni al contorno. Le pressioni, interna ed esterna al tubo, agiscono in direzione radiale perciò σ_r coincide con il valore di pressione stesso agli

estremi dello spessore del tubo. Quello che interessa in questo elaborato è conoscere il valore di pressione all'interfaccia di accoppiamento, la pressione è legata alle tensioni che, a loro volta, sono legate al materiale costituente di albero e mozzo e alle deformazioni, funzioni della geometria. Da ora in poi chiamerò pin l'albero e collar il mozzo, termini tratti dalla normativa internazionale ISO 10123 di riferimento. Possiamo applicare le equazioni fondamentali dei gusci sia per pin che per collar indicando con P la pressione che si genera all'interfaccia di accoppiamento. Come solito si applica una convenzione per i segni, la trazione è considerata positiva mentre la compressione negativa. Le condizioni al contorno per il caso specifico saranno:

- per collar

$$\sigma_r = -P \text{ se } Q = Q_A$$

$$\sigma_r = 0 \text{ se } Q = 1$$

definiamo $Q_A = r_{Ai}/r_{Aa}$ dove i raggi sono quelli indicati in figura 1.2

- per pin (in prima battuta considero il pin forato)

$$\sigma_r = -P \text{ se } Q = 1$$

$$\sigma_r = 0 \text{ se } Q = Q_I$$

definiamo $Q_I = r_{Ii}/r_{Ia}$ dove i raggi sono quelli indicati in figura 1.2

Sostituendo le condizioni al contorno si determinano i valori delle costanti nei due casi, perciò si possono ottenere le seguenti espressioni delle tensioni:

- per collar

$$\begin{cases} \sigma_r = P \frac{Q_A^2}{Q_A^2 - 1} \left(1 - \frac{1}{Q^2}\right) \\ \sigma_t = P \frac{Q_A^2}{Q_A^2 - 1} \left(1 + \frac{1}{Q^2}\right) \end{cases}$$

- per pin

$$\begin{cases} \sigma_r = P \frac{Q_I^2}{1 - Q_I^2} \left(\frac{1}{Q_I^2} - \frac{1}{Q^2} \right) \\ \sigma_t = P \frac{Q_I^2}{1 - Q_I^2} \left(\frac{1}{Q_I^2} + \frac{1}{Q^2} \right) \end{cases}$$

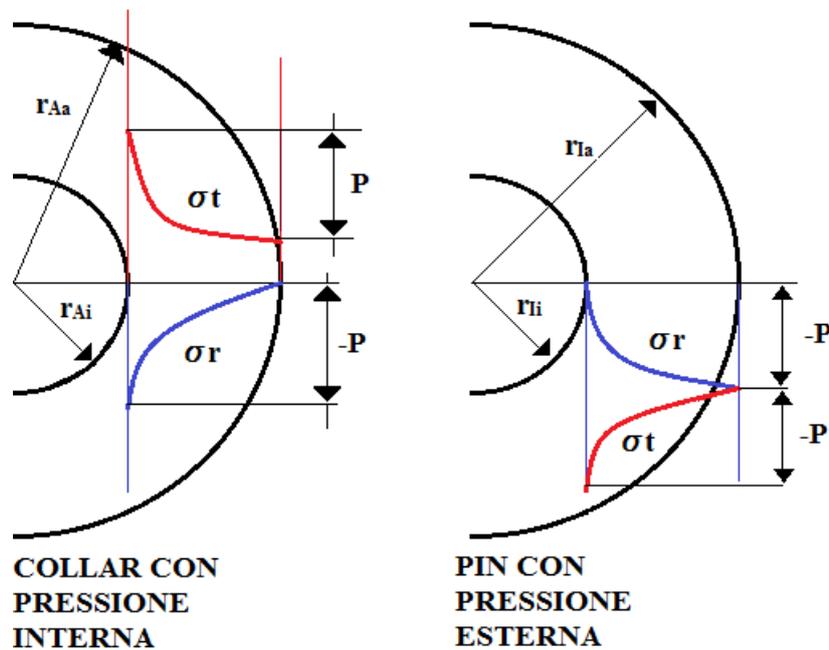


Figura 1.2 Tensioni nel pin e collar

Con le tensioni appena trovate posso collegare la pressione al valore di interferenza di montaggio degli elementi attraverso l'espressione della deformazione in direzione circonferenziale che ha questa forma:

$$\varepsilon_t = \frac{Z}{r} = \frac{1}{E} (\sigma_t - \nu \sigma_r)$$

L'interferenza totale radiale può essere espressa come differenza tra raggio esterno del pin meno raggio interno del collar, mentre le interferenze radiali dei singoli componenti possono essere espresse come raggio d'accoppiamento r_f meno raggio interno del collar e raggio d'accoppiamento r_f meno raggio esterno del pin. Otteniamo pertanto:

$$Z_{tot} = r_{la} - r_{Ai} = r_f - r_{Ai} - (r_f - r_{la}) = Z_{Ai} - Z_{la}$$

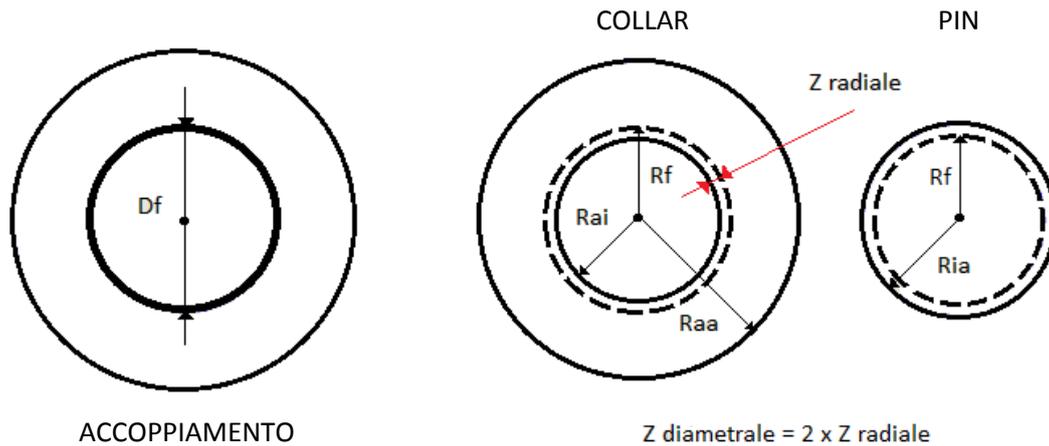


Figura 1.3 Interferenza

Dall'espressione della deformazione in direzione circonferenziale è possibile ricavare le interferenze per pin e collar, in seguito da sostituire nell'espressione dell'interferenza totale:

- per collar

$$Z_{Ai} = \frac{r_{Ai}}{E_A} \left[P \frac{1 + Q_A^2}{1 - Q_A^2} + \nu_A P \right]$$

Con σ_r e σ_t valutate in r_{Ai} cioè dalle precedenti espressioni delle tensioni con Q_A al posto di Q .

- per pin

$$Z_{Ia} = \frac{r_{Ia}}{E_I} \left[-P \frac{1 + Q_I^2}{1 - Q_I^2} + \nu_I P \right]$$

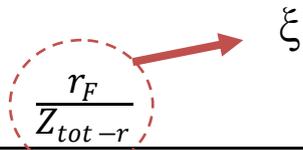
Con σ_r e σ_t valutate in r_{Ia} cioè dalle precedenti espressioni delle tensioni con Q_I al posto di Q

Pertanto l'interferenza totale vale:

$$Z_{tot} = Z_{Ai} - Z_{Ia} = \frac{r_{Ai}}{E_A} \left[P \frac{1 + Q_A^2}{1 - Q_A^2} + \nu_A P \right] - \frac{r_{Ia}}{E_I} \left[-P \frac{1 + Q_I^2}{1 - Q_I^2} + \nu_I P \right]$$

Siccome i valori dei moduli di Young sono molto elevati, posso considerare $r_{Ai}=r_{Ia}=r_f$ senza introdurre un errore eccessivo. Con questa semplificazione posso raccogliere r_f e portarlo a primo membro facendo comparire l'interferenza specifica ξ , cioè il rapporto tra interferenza radiale e raggio d'accoppiamento o interferenza diametrale e

diametro d'accoppiamento. Raccolgo anche la pressione d'accoppiamento P e la isolo ricavando l'espressione della pressione in funzione dell'interferenza e del materiale di pin e collar:



$$P = \frac{\frac{r_F}{Z_{tot} - r}}{\frac{1}{E_A} \left[\frac{1 + Q_A^2}{1 - Q_A^2} + \nu_A \right] + \frac{1}{E_I} \left[\frac{1 + Q_I^2}{1 - Q_I^2} - \nu_I \right]} \xi$$

L'espressione della pressione può ulteriormente essere semplificata poiché, osservando le caratteristiche dei provini, si nota che pin e collar sono dello stesso materiale per cui modulo di elasticità e coefficiente di poisson hanno lo stesso valore ($E_A = E_I = E$, $\nu_A = \nu_I = \nu$). Un'altra considerazione è che il pin è stato considerato cavo nell'analisi appena effettuata, in realtà è pieno e questo comporta che Q_I sia uguale a zero. Introducendo queste informazioni nell'equazione della pressione all'interfaccia otteniamo:

$$P = 0,5 E \xi (1 - Q_A^2)$$

Una delle fasi che costituisce il processo di prova è la misurazione dei campioni, pertanto è nota la geometria di tutte le coppie di pins e collars. A questo aspetto si unisce la conoscenza del materiale di cui sono costituiti i campioni, perciò è possibile determinare la pressione all'interfaccia d'accoppiamento delle coppie assemblate di pins e collars. La pressione ci serve per poter stabilire la forza da attribuire all'interferenza nella forza complessiva di sfilamento delle giunzioni ibride. La forza di sfilamento, rilevate nelle prove alla pressa, sarà data dall'adesivo nelle giunzioni con gioco, e dall'adesivo più l'interferenza nelle giunzioni ibride. La forza assiale di sfilamento per una giunzione ibrida ha questa forma:

$$F_{SFILAMENTO} = F_{AD} + F_{INT.}$$

Dove la forza dovuta all'interferenza è riconducibile alla pressione secondo questa espressione:

$$F_{INT.} = \mu_A P \pi D_F L_F$$

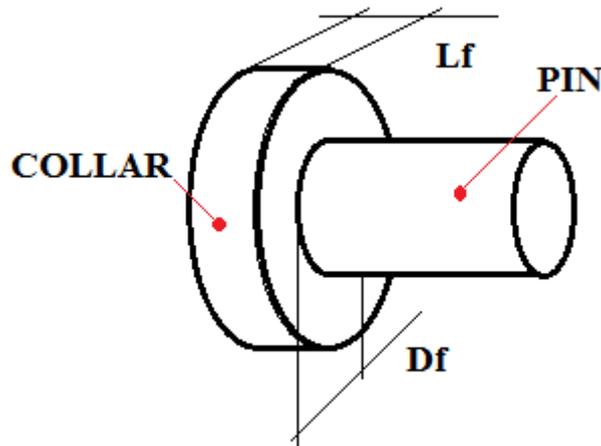


Figura 1.4 Pin collar ibrido assemblato

Per poter risalire alla forza e quindi alla tensione dell'adesivo nell'accoppiamento ibrido è necessario determinare la forza dovuta all'interferenza. Si può notare come il termine μ_A e D_F siano incogniti, per il diametro si assume con buona approssimazione il diametro medio tra il diametro interno del collar ed esterno del pin. Per determinare il coefficiente d'attrito statico assiale μ_A è necessario eseguire una serie di prove su giunzioni senza adesivo. Determinato il coefficiente d'attrito statico assiale, è possibile calcolare, per ogni accoppiamento, la forza da imputare all'interferenza e quindi risalire alla tensione dell'adesivo secondo l'espressione:

$$\tau_{adesivo} = \frac{F_{tot} - F_{int.}}{\pi D_F L_F} = \frac{F_{tot}}{\pi D_F L_F} - \mu_A P$$

Con le equazioni descritte verranno ricavate la maggior parte delle informazioni che seguiranno il seguente capitolo

1.2 Stress e rotture nelle giunzioni incollate

In questo paragrafo vengono descritte sia la tipologia di carichi applicabili su una giunzione incollata che le principali modalità di rottura. Capire come si distribuisce la tensione in funzione del modo con cui viene caricata la giunzione permette al progettista di realizzare delle geometrie dei giunti che limitano i picchi di sollecitazione che inducono alla rottura nello strato adesivo. Analizzare il modo con cui si genera la rottura fornisce lo strumento di analisi per la valutazione dei risultati raccolti nelle sperimentazioni descritte in questo elaborato. L'analisi visiva dei provini spiantati permette di capire la modalità di rottura. Successivamente, noto il tipo di rottura, è possibile stabilire eventuali problemi di adesione superficiale o sforzi superficiali troppo elevati per i substrati.

SOLLECITAZIONI E DISTRIBUZIONI DI TENSIONE NELLE GIUNZIONI INCOLLATE

È piuttosto raro che in seguito all'applicazione di forze esterne al giunto si ottenga una distribuzione uniforme della tensione nello strato adesivo. Normalmente la tensione non è uniforme e presenta dei picchi localizzati, nell'eventualità che tali picchi superino la tensione limite dell'adesivo, si osserva la formazione di fratture che danno inizio al processo di rottura della giunzione. Comunemente si possono individuare cinque modalità di sollecitazione semplice: compressione, trazione, taglio, pelatura (o peeling) e strappamento (o cleavage). Nelle situazioni reali è difficile incontrare giunzioni caricate in modo da avere una sola sollecitazione semplice, è più probabile che la condizione di carico sia data da una combinazione delle sollecitazioni sopraindicate. Tuttavia è comunque utile studiare solo la sollecitazione semplice e per di più i provini analizzati nello sviluppo di questo elaborato sono riconducibili ad un caso di sollecitazione semplice, il taglio.

COMPRESSIONE: si genera compressione quando le forze sono applicate perpendicolarmente rispetto la sezione del giunto e dirette verso lo strato adesivo (figura 1.5). Le forze devono essere applicate lungo lo stesso asse in modo da ottenere compressione pura. E' evidente come questo tipo di sollecitazione sia il più favorevole dal punto di vista della resistenza poiché non si verifica la formazione di fratture nello strato adesivo. Per la verità se la forza di compressione è

sufficientemente elevata le parti del giunto restano in posizione anche senza la presenza dell'adesivo. L'unica rottura in compressione si può verificare a causa di deformazioni non uniformi dei materiali che causano un distribuzione degli sforzi non uniforme.

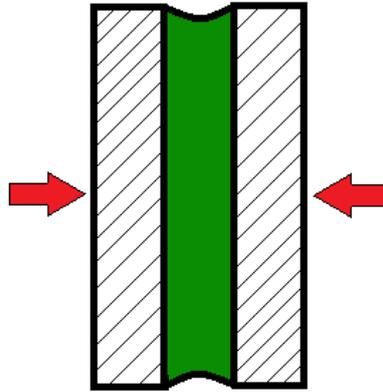


Figura 1.5 Sforzo di compressione

TRAZIONE: come per la compressione, anche per la trazione le forze devono essere posizionate perpendicolarmente alla sezione longitudinale del giunto ma questa volta dirette in maniera opposta (figura 1.6).

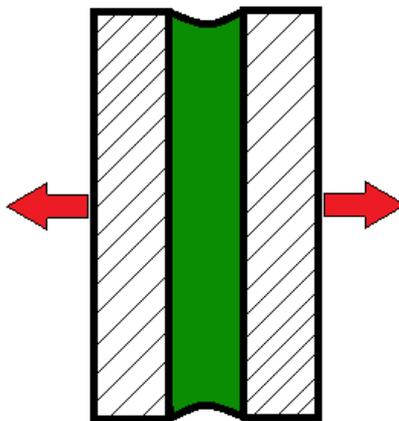


Figura 1.6 Sforzo di trazione

La tensione normale che si genera nella sezione dell'adesivo non è uniforme e la forma che assume dipende dalla posizione della forza. Come illustrato in figura 1.7 la tensione si distribuisce in maniera non uniforme con dei picchi posizionati sul bordo della giunzione. Se i picchi di tensione superano il valore di resistenza dell'adesivo otteniamo la formazione di una frattura, questo provoca la diminuzione di area resistente perciò la tensione aumenta e la rottura si propaga molto rapidamente fino

alla completa separazione del giunto. La frattura diventa la causa probabile della rottura perché in genere gli adesivi sono molto rigidi e non si riscontra un effetto di plasticizzazione e redistribuzione delle tensioni che è tipica dei materiali metallici. È quindi improbabile che la tensione si distribuisca in maniera uniforme proprio per la caratteristica precedentemente citata, l'unica possibilità sarebbe avere gli aderendi infinitamente rigidi mentre l'adesivo deformabile ma non rappresenterebbe la situazione reale.

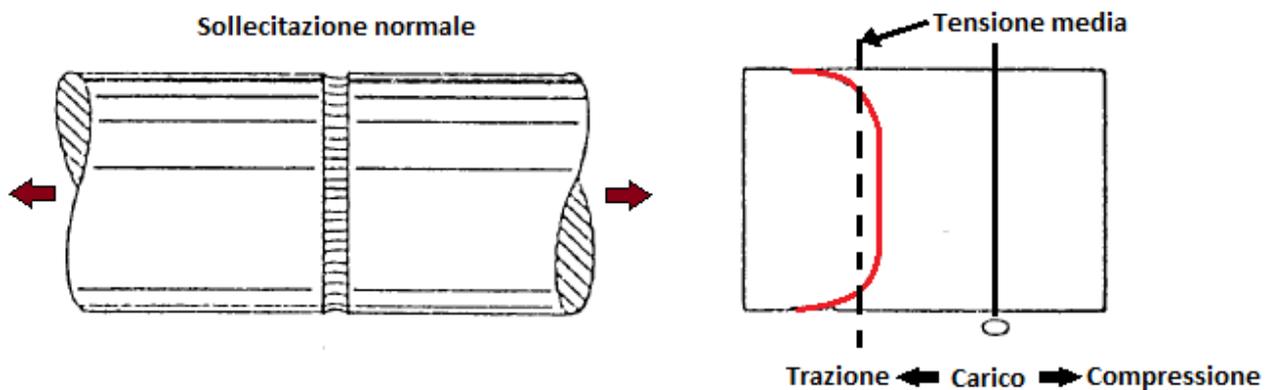


Figura 1.7 Distribuzione di tensione in direzione normale

La sollecitazione dovuta alla trazione, come per quella di compressione, è calcolata come rapporto tra la forza applicata al giunto divisa per l'area di accoppiamento:

$$\sigma_{N - adesivo} = \frac{F_{Normale}}{A_{accoppiamento}}$$

Nel sistema internazionale S.I. è misurata in Newton su millimetro quadrato cioè MPa.

TAGLIO: il taglio è la forma più comune di sollecitazione che si riscontra nelle giunzioni adesive. Si genera quando le forze agiscono in direzione parallela allo spessore adesivo (figura 1.8). In generale gli adesivi sopportano molto bene questa sollecitazione perché tutta la zona incollata contribuisce alla resistenza del giunto e, in aggiunta a questo, è facile mantenere allineati gli aderendi.

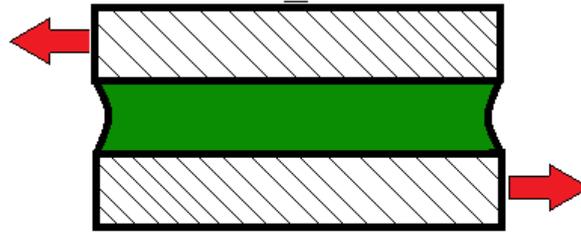


Figura1.8 Sollecitazione di taglio

Questa forma di sollecitazione si presenta nelle prove trattate in questo elaborato e si può approssimare il comportamento dell'accoppiamento con un giunto a semplice/doppia sovrapposizione che è la forma più comune e semplice di incollaggio. Essendo gli adesivi comunemente sollecitati a taglio, la prova permette di valutare le prestazioni dell'adesivo sotto questo tipo di sollecitazione. Analizzando il comportamento di una giunzione a semplice sovrapposizione si può notare che alle estremità si concentrano maggiormente le tensioni. Tale effetto è da imputare al massimo scorrimento dell'adesivo che si verifica proprio alle estremità. La situazione si può schematizzare suddividendo l'area di incollaggio in porzioni di uguale entità. Applicando il carico agli estremi della giunzione, l'aderendo, subisce una deformazione variabile la quale è elevata nella prima zona incollata e man mano si riduce lungo la giunzione poiché l'adesivo frena la deformazione (figura 1.9). Alle estremità della giunzione l'adesivo passa da una alta deformazione in corrispondenza di un aderendo fino ad una bassa deformazione nell'aderendo successivo. Questo scorrimento non uniforme lungo la giunzione ci dice che anche la tensione è distribuita in maniera non uniforme poiché legate dalla relazione:

$$\tau = G \gamma$$

Essendo G modulo di elasticità tangenziale costante, se lo scorrimento γ è variabile allora lo è anche la tensione τ .

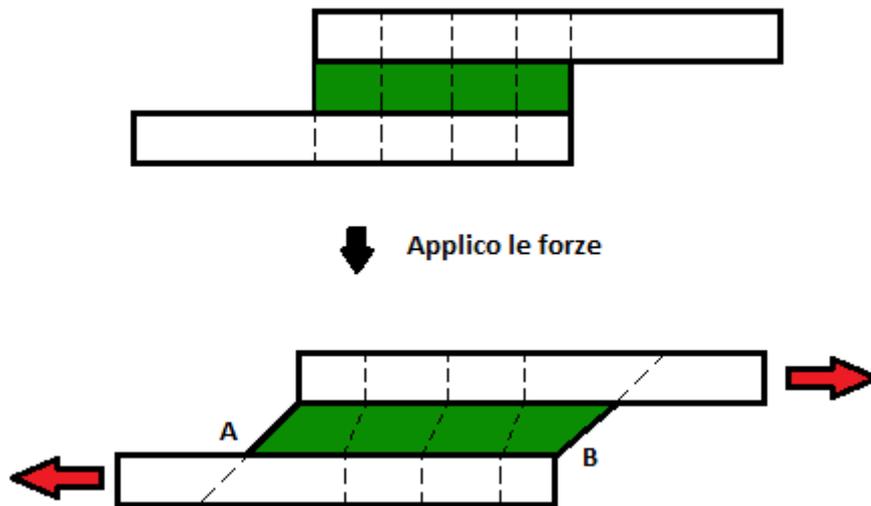


Figura 1.9 Deformazione adesivo a taglio

Il modello rappresentativo di aderendi deformabili e adesivo deformabile, è stato introdotto da Volkersen (1938) ed è chiamato anche effetto shear-lag. Questo modello assume che la tensione sull'adesivo è massima nel punto A e va a zero nel punto B. Tale modello però rappresenta una semplificazione del caso reale poiché non tiene conto dello squilibrio generato dalle forze non allineate. Il rapporto tra tensione massima e media, che definisce la concentrazione di tensione, secondo Volkersen, ipotizzando aderendi di ugual spessore e materiale, è data da questa espressione:

$$\frac{\tau_{max}}{\tau_{med}} = \sqrt{\frac{G_a l^2}{2 E t t_a}} \times \cosh \sqrt{\frac{G_a l^2}{2 E t t_a}}$$

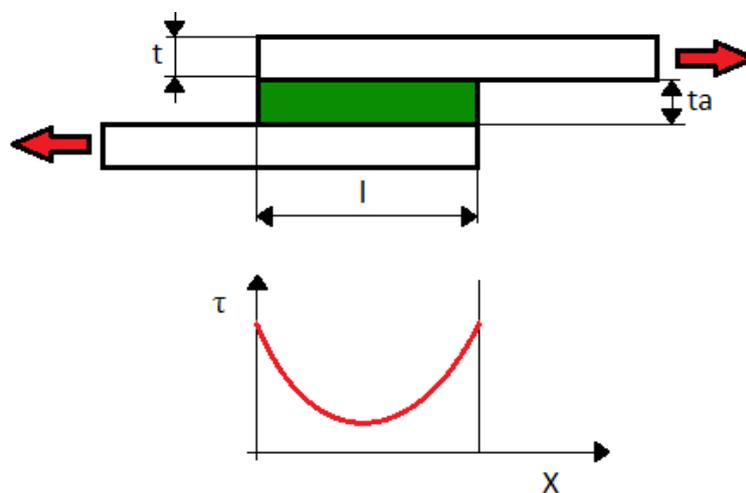


Figura 1.10 Distribuzione di tensione secondo Volkersen

Dove E è il modulo di elasticità (o modulo di Young) degli aderendi in MPa, G_a è il modulo di elasticità tangenziale dell'adesivo in MPa mentre la geometria è in mm. Come detto in precedenza questo modello non considera lo squilibrio dato dalle forze disallineate, un modello che ne tiene conto fu sviluppato da Goland e Reissner (1944) nel quale è introdotto un momento per mettere in equilibrio le due forze non allineate. Il risultato è un andamento come quello rappresentato in figura 1.11, l'azione del momento equilibrante porta al passaggio da una tensione di taglio puro ad una sollecitazione di peeling che gli adesivi in genere mal sopportano.

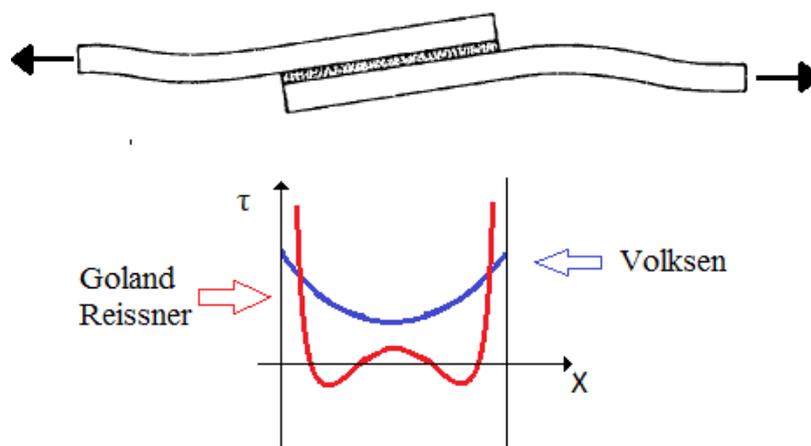


Figura1.11 Distribuzione di tensione secondo Goland e Reissner

Tuttavia per i casi in esame la normativa non richiede dati accurati sulle tensioni ma è sufficiente una tensione media utilizzabile come dato di confronto o come controllo qualità degli adesivi. Di conseguenza il modello da seguire è il più semplice di tutti e considera l'adesivo deformabile e gli aderendi indeformabili. In questo modello estremamente semplificato la deformazione è costante lungo tutta la lunghezza di incollaggio di conseguenza il valore di tensione sarà una quantità interpretabile come valore medio costante e pari a:

$$\tau_{medio} = \frac{F}{A}$$

Dove F è la forza applicata agli aderendi in N e A è l'area di accoppiamento in mm^2 .

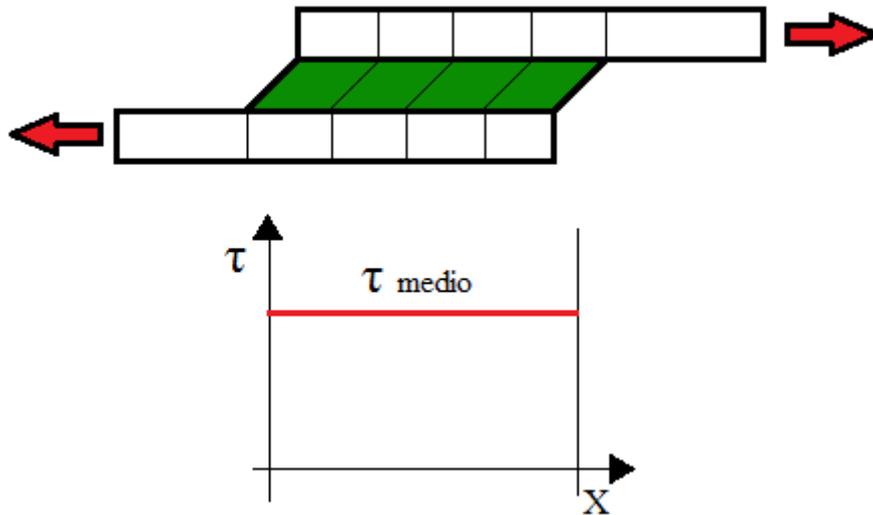


Figura 1.12 Distribuzione di tensione costante

Questo modello non tiene conto di:

- Deformabilità degli aderendi
- Disallineamento delle forze in gioco
- Adesivo infinitamente sottile, tensioni lungo la linea media
- Deformazione nella direzione dello spessore trascurabile
- Effetti di bordo

Di conseguenza è un modello molto poco raffinato e spiega perché nella normativa ISO10123 è chiaramente specificato che i dati delle prove non possono essere considerati fruibili in sede di progetto delle giunzioni.

STRAPPAENTO (CLEAVAGE): questo tipo di sollecitazione si presenta quando le forze tendono ad aprire la giunzione da un'estremità (figura 1.13).

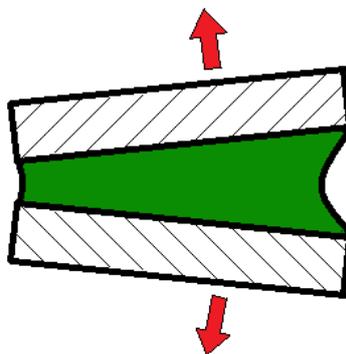


Figura 1.13 Strappamento (cleavage)

Gli elementi della giunzione devono essere piuttosto rigidi come degli elementi metallici altrimenti lo stesso tipo di sforzo prenderebbe il nome di pelatura. Questo tipo di sollecitazione non è sopportata particolarmente bene dalla grande maggioranza degli adesivi poiché la tensione si concentra particolarmente solo nella zona di applicazione del carico. Siccome lo strato adesivo non viene sollecitato abbastanza uniformemente la quantità di forza che si ripartisce sui legami coesivi e adesivi non è distribuita in maniera equa, di conseguenza dove i legami sono più sollecitati si localizza la prima frattura che da inizio alla propagazione della rottura. In figura 1.14 è rappresentata la distribuzione di tensione tipica di questo stato di sollecitazione.

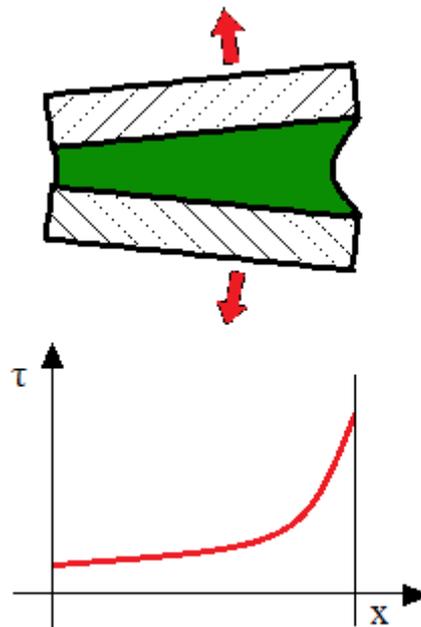


Figura 1.14 Distribuzione di tensione da strappamento

PELATURA (PEELING): è l'analogo dello strappamento con l'unica differenza che in questo caso uno o più aderenti sono dotati di grande elasticità e possibilità di deformarsi. È la condizione di carico peggiore ed insieme allo strappamento rappresenta la condizione da evitare in fase di progettazione del giunto. Il peeling è da considerare il più sfavorevole di tutte le condizioni perché la deformabilità dell'aderendo concentra maggiormente la tensione ad una estremità della giunzione. È da sottolineare che più un adesivo è rigido e più soffre di problemi di peeling e strappamento poiché la mancata deformazione negli strati iniziali corrisponde ad una ripartizione sbilanciata del carico concentrata maggiormente negli stessi strati.

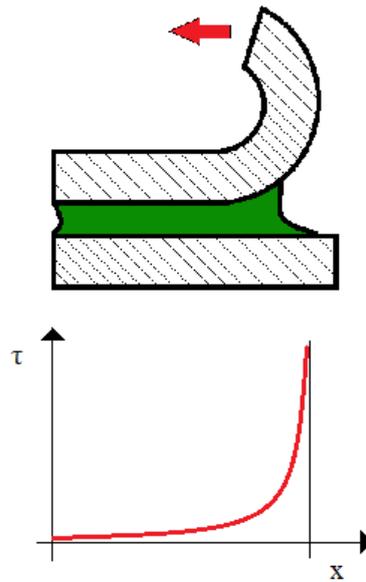


Figura 1.15 Distribuzione di tensione da peeling

TIPOLOGIE DI ROTTURE DELLE GIUNZIONI ADESIVE

Come esistono diversi tipi di sollecitazione esistono anche diverse modalità di rottura della giunzione incollata. Alla base della modalità di rottura ci sono svariati fattori ma in generale la frattura si genera dove la resistenza è minore. I legami all'interno di un adesivo sono due, coesivo e adesivo. Si parla di legami adesivi intendendo l'insieme di legami che ancorano la superficie dello strato adesivo a quella del substrato. I legami coesivi sono le forze che trattengono le catene polimeriche all'interno dello strato adesivo. Si possono elencare una serie di rotture che si presentano frequentemente nelle giunzioni incollate, le modalità sono: rottura coesiva, rottura adesiva, rottura mista adesiva e coesiva, cedimento del substrato, rottura coesiva interlaminare

CEDIMENTO COESIVO: è la modalità di rottura attesa nelle prove di resistenza delle giunzioni adesive poiché caratterizza unicamente la resistenza dell'adesivo. Si presenta quando l'insieme delle forze di legame è di entità inferiore sia delle forze adesive che della tensione limite superficiale dell'aderendo. Descrivendo l'aspetto della rottura si nota che è posta circa a metà dello strato adesivo in modo che una parte di questo rimanga su di un aderendo e il restante sul secondo. Questa rottura è indice di una corretta progettazione del giunto e di una corretta preparazione delle superfici poiché le forze adesive dipendono dallo stato superficiale degli aderenti,

altrimenti non si sarebbe verificato che le forze coesive fossero inferiori a quelle adesive.



Figura 1.16 Cedimento coesivo

In figura 1.16 è possibile notare un esempio di cedimento coesivo, sia la superficie del perno che della boccola sono ricoperte da uno strato adesivo (foto tratta dallo spiantaggio di pin-collar con gioco).

CEDIMENTO ADESIVO: si verifica quando le forze adesive sono di entità inferiore rispetto le forze coesive e alla tensione limite superficiale dell'aderendo. È una modalità di rottura non desiderata perché indice di una polimerizzazione non completa o di una non corretta preparazione superficiale anche se ci sono casi in cui semplicemente l'adesivo non genera legami adesivi forti quanto quelli coesivi. Riguardo alla preparazione delle superfici è importante considerare la compatibilità tra substrato e adesivo. Un esempio correlato con l'adesivo anaerobico, utilizzato nelle prove, è l'utilizzo di un attivatore superficiale da applicare alla superficie del substrato se di materiale non attivo poiché la polimerizzazione risulterebbe troppo lenta. La rottura adesiva si osserva quando l'intero strato adesivo rimane attaccato soltanto ad uno dei due aderendi mentre l'altro rimane perfettamente pulito

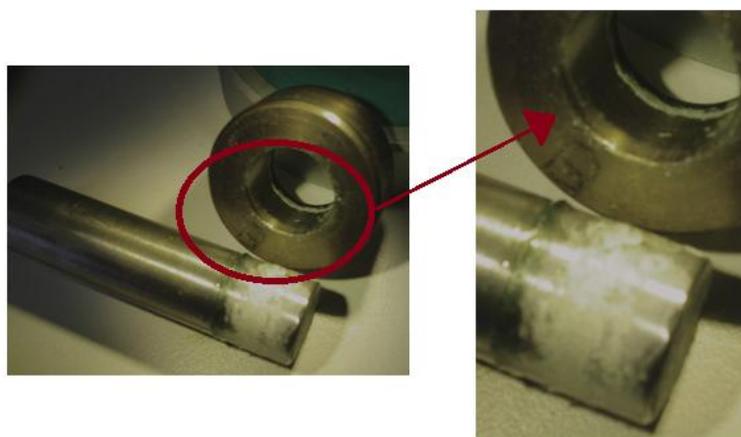


Figura 1.17 Cedimento adesivo

Si può osservare in figura 1.17 la superficie del collar completamente priva di residui, mentre l'adesivo si trova interamente sul pin.

CEDIMENTO MISTO ADESIVO E COESIVO: è consuetudine constatare che le rotture si presentano con aree di cedimento coesivo mentre altre con cedimento adesivo. Tali rotture vengono dette miste e si generano quando le forze di legame coesivo e adesivo hanno circa la stessa entità. Osservando un'aderendo la giunzione si presenta con zone in cui c'è uno strato adesivo e zone perfettamente pulite



Figura 1.18 Cedimento misto

Nella figura 1.18 è possibile notare zone di cedimento coesivo (di colore chiaro) e zone di cedimento adesivo (metallo pulito), inoltre è possibile notare delle aree di colore verde che rappresentano zone di mancata polimerizzazione.

CEDIMENTO DEL SUBSTRATO : può succedere che le forze adesive e coesive dell'adesivo siano talmente elevate che la rottura del giunto venga causata dal cedimento della porzione sottostante alla superficie dell'aderendo. Materiali con bassa resistenza superficiale possono essere soggetti a questo tipo di frattura poiché risultano superiori le forze di adesione e coesione rispetto alla resistenza dell'aderendo. Osservando la rottura si nota la zona di frattura, su di un aderendo rimane sia lo strato adesivo che parte del secondo aderendo.

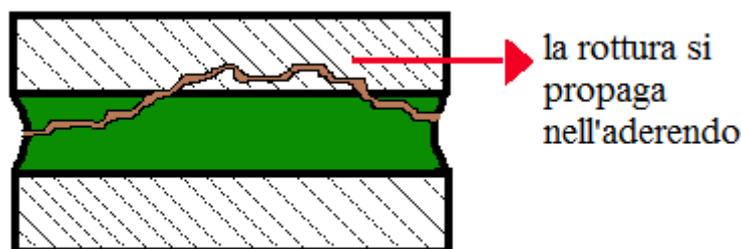


Figura 1.19 Cedimento del substrato

Non sarà una rottura tipica delle prove di questo elaborato poiché il materiale utilizzato è acciaio il quale ha una resistenza superficiale superiore alle forze di legame dell'adesivo.

CEDIMENTO COESIVO DELL'ADERENDO (O INTERLAMINARE): è di poco interesse per questo elaborato poiché è il distacco dell'adesivo in regioni interlaminari nei materiali compositi. La rottura si verifica come distacco delle fibre dall'adesivo all'interno dello spessore dell'elemento composito.

Quelli appena elencati sono i principali modi di rottura di una giunzione, tuttavia dall'analisi della rottura è difficile risalire alla causa del cedimento del giunto poiché le cause sono molteplici. Per dare un'idea qualitativa degli effetti che intaccano la resistenza ottimale di una giunzione si può osservare la seguente figura:

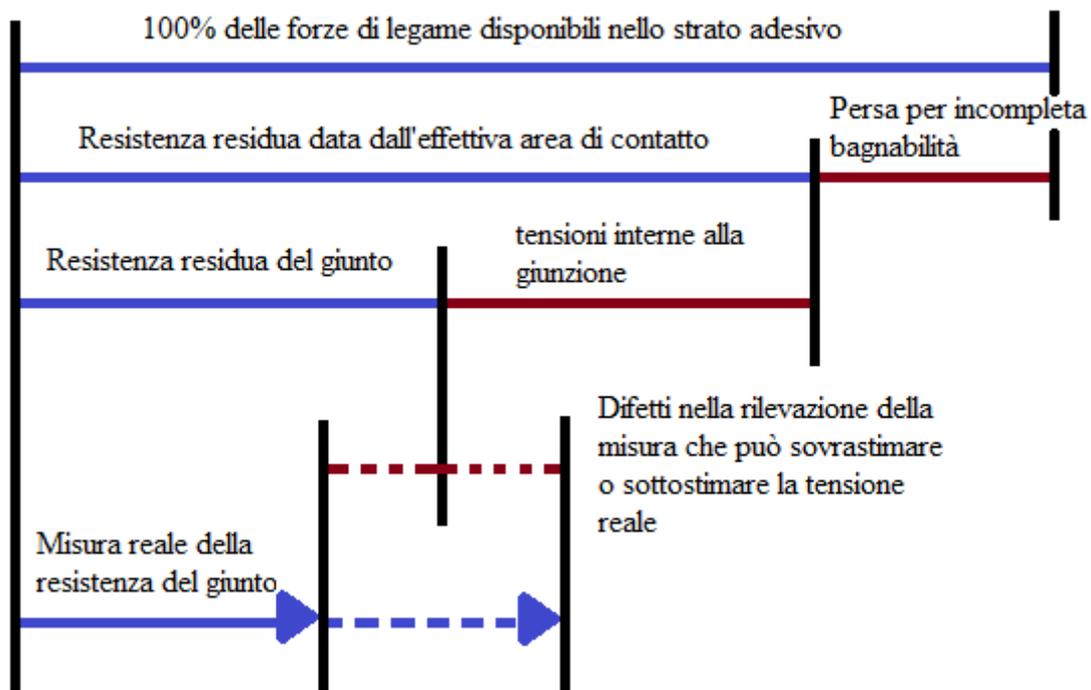


Figura 1.20 diagramma qualitativo perdite di resistenza giunzione

I segmenti non rappresentano in maniera proporzionale le percentuali reali, dicono solo cosa influisce sulla resistenza finale del giunto.

1.3 Dilatazione termica dei materiali metallici

La maggior parte dei materiali in natura è soggetto a variazioni di volume se sottoposti a variazioni di temperatura, sia che si trovino in forma solida, liquida o gassosa. Questo fenomeno fisico è chiamato dilatazione termica ed in particolare fa riferimento all'aumento di volume conseguente all'aumento di temperatura. A livello atomico l'aumento di temperatura comporta una maggiore oscillazione degli atomi attorno il proprio punto di equilibrio. L'oscillazione è sbilanciata nel senso dell'allontanamento degli atomi e questo comporta, a livello macroscopico, un aumento di volume. In natura si parla sempre di dilatazione volumica cioè la variazione di volume proporzionale alla variazione di temperatura. Tuttavia ci sono casi in cui le dimensioni del corpo permettono di trascurare le dilatazioni in certe direzioni spaziali. I corpi per i quali possiamo trascurare le dilatazioni in certe direzioni sono le lastre sottili e lunghe barrette. Nel caso di lastre sottili la dilatazione è detta di superficie poiché le dimensioni planari del corpo sono molto più rilevanti dello spessore, essendo proporzionale il legame tra variazione di dimensione e temperatura posso trascurare la variazione di spessore perché piccola. In maniera analoga, le lunghe barrette hanno una dimensione rilevante rispetto le altre due, ad una differenza di temperatura si osserva l'incremento rilevante di una sola dimensione. L'esempio più noto di strumento che utilizza questa proprietà fisica è il termometro, nel quale una colonna di mercurio allo stato liquido o una fitta spirale metallica allo stato solido, a seguito di una differenza di temperatura, risponde con una variazione di lunghezza proporzionale, indicando su una scala graduata il livello di temperatura raggiunta.

DILATAZIONE CUBICA:

La variazione di volume è direttamente proporzionale alla variazione di temperatura e al volume iniziale:

$$\Delta V = k V_1 \Delta T$$

Con:

$\Delta V = V_2 - V_1$ variazione di volume in mm^3

k coefficiente di dilatazione cubica in K^{-1}

V_1 volume iniziale in mm^3

$\Delta T = T_2 - T_1$ variazione di temperatura in K

DILATAZIONE SUPERFICIALE:

La variazione di superficie e' direttamente proporzionale alla variazione di temperatura e all'area iniziale:

$$\Delta A = \sigma A_1 \Delta T$$

Con:

$\Delta A = A_2 - A_1$ variazione di superficie in mm^2

σ coefficiente di dilatazione superficiale in K^{-1}

A_1 superficie iniziale in mm^2

$\Delta T = T_2 - T_1$ variazione di temperatura in K

DILATAZIONE LINEARE:

La variazione di lunghezza e' direttamente proporzionale alla variazione di temperatura e alla lunghezza iniziale:

$$\Delta l = \lambda l_1 \Delta T$$

Con:

$\Delta l = l_2 - l_1$ variazione di lunghezza in mm

λ coefficiente di dilatazione cubica in K^{-1}

l_1 lunghezza iniziale in mm

$\Delta T = T_2 - T_1$ variazione di temperatura in K

Il legame tra i coefficienti di dilatazione è $\lambda = \sigma/2 = k/3$ ma vale solo nel caso di materiali isotropi. Diversamente da quanto si possa immaginare i coefficienti di dilatazione possono variare anche per lo stesso tipo di materiale perche è influenzato dalle diverse forme allotropiche presenti nel materiale. Ne consegue la ricerca dello specifico coefficiente di dilatazione termica dell'acciaio utilizzato nelle prove.

Introduco il concetto di dilatazione termica perché tra le possibilità di assemblaggio di accoppiamenti albero-mozzo ad interferenza ci sono il montaggio a freddo o a caldo che sfruttano proprio questa proprietà fisica. Nel montaggio a caldo il concetto è quello di riscaldare il mozzo per ottenere una dilatazione tale da permettere l'assemblaggio come se fossero elementi con gioco. Viceversa nel montaggio criogenico si raffredda l'albero in modo da ottenere una contrazione tale da permettere l'assemblaggio come se fossero elementi con gioco. La differenza tra assemblaggio alla pressa e gli assemblaggi termici è quello di preservare la rugosità in maniera da ottenere un coefficiente d'attrito superiore e quindi una maggiore forza trasmissibile da parte dell'accoppiamento.

CALCOLO DELLA TEMPERATURA DI MONTAGGIO

Consideriamo l'accoppiamento pin collar utilizzato nelle prove. Per eseguire il montaggio si deve recuperare il valore d'interferenza e ottenere un gioco di qualche decimo per permettere un assemblaggio "facile". Perciò i dati di partenza sono le dimensioni pre e post riscaldamento/raffreddamento (l_1, l_2), il coefficiente di dilatazione termica lineare λ e la temperatura iniziale T_1 , l'incognita è la temperatura finale o di montaggio T_2 . Per l'analisi considero la circonferenza interna del mozzo che rettifico su un piano dopodiché posso applicare la dilatazione lineare.

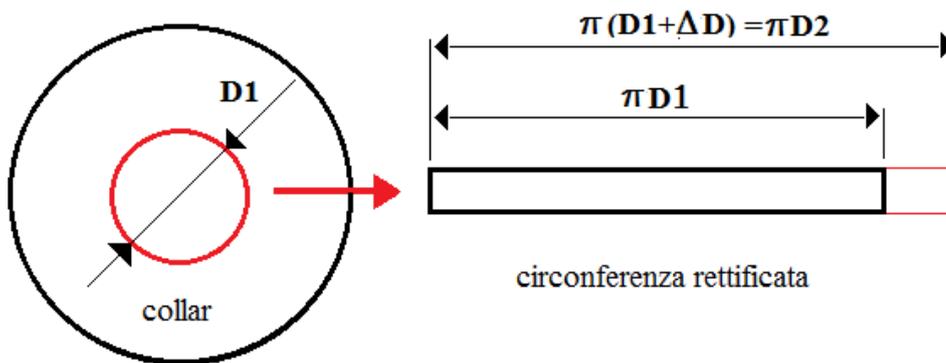


Figura 1.21 Dilatazione termica collar

Il diametro D_2 che devo raggiungere con il collar sarà:

$$D_2 = D_{Ai} + Z_d + 0,2 = D_{Ai} + \Delta D$$

Cioè devo recuperare il valore d'interferenza diametrale Z_d più due decimi di millimetro. La scelta di 0,2 mm è data dalla difficoltà che si incontrerebbe

nell'assemblaggio se si usassero giochi inferiori. Applicando l'equazione della dilatazione lineare otteniamo:

$$\pi(D_{Ai} + \Delta D) - \pi D_{Ai} = \alpha \pi D_{Ai} \Delta T$$

Semplificando i termini otteniamo:

$$\Delta D = \alpha D_{Ai} \Delta T$$

Da cui possiamo mettere in evidenza la temperatura di montaggio T_2 :

$$T_2 = \frac{\Delta D}{\alpha D_{Ai}} + T_1$$

Analogamente per il pin considero la circonferenza esterna che rettifico su un piano. In questo caso il diametro che devo raggiungere deve essere inferiore rispetto al diametro di partenza, si tratta di contrazione termica.

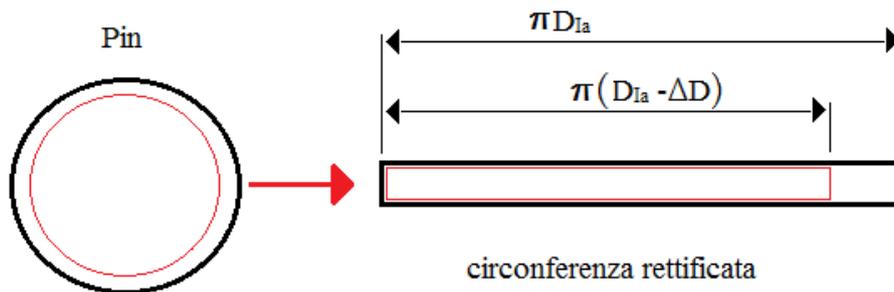


Figura 1.22 Contrazione termica del pin

Il diametro da raggiungere in questo caso vale:

$$D_2 = D_{Ia} - (Z_d + 0,2) = D_{Ia} - \Delta D$$

Ed in maniera analoga al collar otteniamo:

$$\Delta T = \frac{\Delta D}{\alpha D_{Ia}}$$

In questo caso è necessario fare attenzione perché la temperatura T_1 è di circa 20°C , poiché è la temperatura ambiente, mentre la temperatura T_2 sarà sicuramente sotto lo zero perciò con segno negativo:

$$T_2 = -\frac{\Delta D}{\alpha D_{Ia}} + T_1$$

Gli Adesivi

2.1 Storia e cenni introduttivi

Fino a circa sessant'anni fa le colle comunemente usate erano di origine animale tra le quali colle alla gelatina e colle alla caseina ricavate prevalentemente da ossa, pellame, tessuto connettivo e dai pesci. Tra le colle utilizzate fin dal passato esistono colle vegetali come la colla di farina a base di amido, utilizzata per l'incollaggio di vari tipi di carta, e la gomma arabica. Oggi la produzione di adesivi riguarda soprattutto sostanze inorganiche con grande potere incollante che sono diventate molto importanti nell'industria.



Figura 2. 1 Tipologie di colle

Le tecniche d'incollaggio si sono molto evolute negli ultimi anni e si sono dimostrate in molti casi preferibili alle tecniche tradizionali di giunzione (chiodatura, bullonatura e saldatura). Tale tecnica teoricamente è da preferire alle giunzioni classiche poiché è una giunzione continua che permette di collegare qualsiasi tipo di materiale (duttile, fragile, isotropo, anisotropo) La discontinuità e la difettosità delle tecniche alternative provocherebbe concentrazioni di sforzo che l'incollaggio non presenta. Tuttavia le tecniche classiche sono tuttora diffuse poiché l'incollaggio è molto sensibile alle condizioni ambientali che ne peggiorano la prestazione e si aggiunge a questo anche l'impossibilità di smontaggio e d'ispezione della giunzione. L'incollaggio di strutture è molto diffuso sia in ambito aeronautico sia nell'industria del legno, dove resistenza

e durata delle giunzioni sono state dimostrate nel corso degli anni, in altre applicazioni strutturali invece l'impiego di tale tecnica è, in paragone, ancora molto limitata. Le tecniche d'incollaggio di tipo non strutturale hanno un grande impiego nel settore degli imballaggi, dove l'unione delle parti con adesivi, non particolarmente prestazionali, risulta vantaggiosa dal punto di vista economico. Gli adesivi vengono a volte utilizzati anche con la funzione di sigillare le parti nonché isolarle, ma spesso questi compiti sono svolti da adesivi specifici per i quali l'adesione svolge una funzione necessaria ma non di prestazione importante. In definitiva possiamo riassumere i principali vantaggi dell'incollaggio in: efficienza strutturale, migliore aerodinamicità, minor peso, tenuta idraulica, isolamento termico ed elettrico, smorzamento dinamico.

2.2 Caratteristiche degli incollaggi

Un adesivo è una sostanza che riesce a tenere insieme materiali in maniera funzionale tramite l'adesione superficiale. Il processo tecnologico di incollaggio è l'unione di materiali per mezzo di un adesivo. Gli incollaggi possono essere non strutturali o strutturali: nel primo caso l'adesivo è poco sollecitato e l'incollaggio svolge una funzione più che altro di posizionamento che di vera e propria continuità materiale utile alla trasmissione di forze da un aderendo all'altro, pensiamo per esempio agli incollaggi nel settore degli imballaggi o a incollaggi di viti e dadi contro lo svitamento. Nel secondo caso l'adesivo garantisce la trasmissione di forze da un aderendo all'altro e il giunto è sollecitato con tensioni vicine al carico di rottura degli aderenti, tipici esempi d'incollaggi strutturali si trovano, in larga misura, nell'industria aerospaziale. Come per ogni cosa anche gli incollaggi hanno tanti pregi quanti difetti. In base all'adesivo scelto, al modo in cui è stato applicato, alle preparazioni delle superfici, al tipo di giunto, possiamo dire che l'incollaggio ha uno o più dei seguenti pregi:

- Possibilità di unire materiali differenti in: composizione, moduli elastici, spessori e coefficienti di dilatazione.
- Il giunto non presenta sporgenze come nel caso di chiodatura, bullonatura per cui l'aspetto è migliore come anche l'aerodinamicità.

- Realizzazione di giunti di forma complessa che non sarebbero realizzabili con altre tecnologie.
- Non ci sono concentrazione di tensione come nel caso di chiodature o tensioni residue e infragilimenti come nel caso di saldature, poiché l'incollaggio è continuo e realizzato a temperature relativamente basse.
- L'incollaggio non ha bisogno di forature ne consegue il mantenimento dell'integrità strutturale.
- La bassa rigidezza di molti adesivi smorza le vibrazioni migliorando la resistenza a fatica.
- Diminuzione del peso rispetto le tecniche di giunzione alternative.
- Si possono unire materiali che non sopportano alte temperature che quindi non possono essere ne saldati né brasati.
- Le giunzioni hanno buone proprietà sigillanti e d'isolamento elettrico, termico e acustico.
- Risparmio economico dato dalla diminuzione di operazioni in fase di costruzione (non richiede forature e processi di serraggio viti o dadi).
- Buon livello di automatizzazione.

I vantaggi appena descritti potrebbero far pensare che gli adesivi siano in tutti i casi da preferire alle tecniche alternative, in realtà esistono condizioni in cui l'incollaggio non è efficiente per cui tecniche di chiodatura, bullonatura e saldatura diventano i metodi di giunzione da preferire. Tra gli svantaggi della colla si evidenziano:

- Bassa resistenza ai carichi di peeling e strappamento.
- Necessario trattamento di pulitura e sgrassaggio delle superfici da porre a contatto.
- I tempi per il raggiungimento della resistenza ottimale del giunto sono spesso lunghi e non istantanei come per saldatura e collegamento meccanico.

- Molti adesivi sono infiammabili e tossici perciò hanno bisogno di un livello di sicurezza abbastanza elevato per diminuire eventuali incidenti in fase di montaggio.
- La resistenza di un giunto incollato è molto sensibile alle condizioni ambientali (caldo, freddo, agenti chimici, radiazioni, biodeterioramento), una resina termoindurente, per esempio, a temperature molto elevate si "brucia". Spesso non è nota la dipendenza dell'incollaggio dalle condizioni ambientali.
- Non è possibile ispezionare il giunto in maniera diretta, necessita di controlli non distruttivi.
- Strutture incollate guaste sono molto difficili da riparare, lo smontaggio non è semplice come in un collegamento meccanico.

Questo elenco di pregi e difetti mette in luce la bontà della tecnica d'incollaggio, preferibile alle tecniche più convenzionali, seppur con qualche restrizione nel campo d'impiego. Più avanti saranno descritte le caratteristiche di giunti, adesivi, trattamenti preliminari da eseguire per ottenere una giunzione che in base all'impiego riduca al minimo gli effetti svantaggiosi appena elencati, in modo da ottenere giunzioni con ottime prestazioni.

2.3 La teoria dell'adesione

Non esiste una teoria unica che definisca l'interazione che avviene tra adesivo e aderendo. Le teorie esistenti sono frutto di osservazioni pratiche e cercano di spiegare perché a volte l'adesivo tenga con forza mentre altre volte la tenuta risulta troppo debole. Per prima cosa bisogna distinguere due tipologie di forze coinvolte; la coesione e l'adesione. La coesione rappresenta le forze di legame tra le varie molecole dell'adesivo e quindi è una caratteristica intrinseca del solo adesivo. L'adesione rappresenta, invece, le forze che si instaurano nel contatto tra adesivo e aderendo. La situazione dei legami è rappresentata nella figura 2.2.

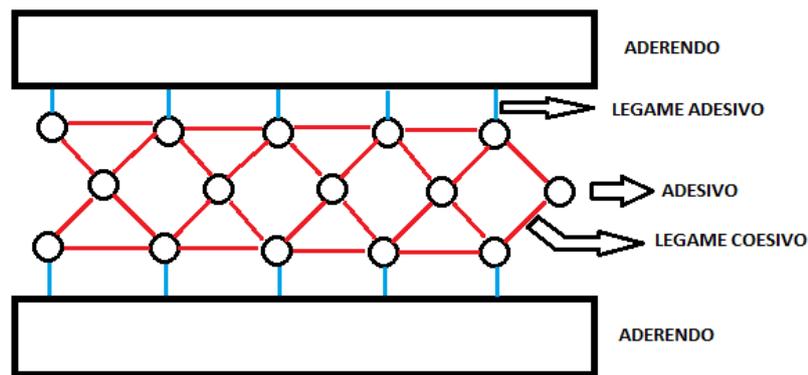


Figura 2. 2 Legami adesivi e coesivi

In una giunzione incollata entrambi i legami sono importanti perché il cedimento si localizza nel punto in cui i legami sono più deboli. Se cedono i legami coesivi parliamo di rottura coesiva, se cedono i legami adesivi parliamo di rottura adesiva mentre se cede la parte superiore del substrato parliamo di rottura superficiale del substrato. Tuttavia il meccanismo di coesione interessa meno rispetto l'adesione perché, dopo una corretta polimerizzazione, il valore di tensione ammissibile riferita alla coesione è quello fornito dal produttore della colla e viene poco influenzato dalle condizioni di giunzione e dalle condizioni operative. Ciò che influenziamo sono i meccanismi di adesione che dipendono fortemente da tutta una serie di fattori operativi. L'adesione va studiata perché può essere superiore o inferiore al valore di coesione. Infatti il valore di tensione di una rottura per coesione è più facile da prevedere e quindi in fase di progetto risulta più facile verificare una giunzione incollata. In sostanza il valore di tensione dovuta all'adesione è molto variabile e dipende da una serie di fattori quali per esempio materiali degli aderendi, condizioni superficiali e rugosità. Il valore di coesione, se la polimerizzazione è avvenuta correttamente, rimane praticamente costante pertanto disponiamo di una tensione ammissibile per la coesione stabile con la quale verificare la giunzione. Sia l'adesione che la coesione coinvolgono un certo numero di legami chimici, primari e secondari, più o meno forti che sono riportati e descritti nella seguente tabella (figura 2.3):

Tipo di forza	Tipo di legame	Energia di legame (KJ/mol)	Descrizione
Primario o forze a corto raggio	Legame covalente	60-700	Diamante o polimeri reticolati (cross-linked). Alta direzionalità.
	Legame ionico o elettrostatico	600-1000	Cristalli. Minor direzionalità rispetto ai covalenti
	legame metallico	100-350	Tipiche forze di legami presenti nella saldatura
Secondarie o forze di Van der Waals	Forze di London o di dispersione	0,1-40	deriva dall'interazione di dipoli temporanei. Decresce con la distanza alla sesta. Rappresenta il 75-100% della coesione molecolare
	Polarizzazione o forze di Keesom	4-20	Deriva dall'interazione di dipoli permanenti. Decresce con la distanza alla terza
	legame a idrogeno	superiore a 40	Si crea tra molecole formate da atomi piccoli e molto elettronegativi. Non decresce con la distanza quanto i precedenti

Figura 2. 3 Tabella dei legami chimici

Nel caso in cui le forze di adesione siano inferiori alle forze di coesione non possiamo utilizzare la tensione ammissibile della coesione per verificare l'incollaggio. Allora ci serve capire come funziona l'adesione per cercare di prevedere la tensione ammissibile con la quale eseguire la verifica. Non esiste un'unica teoria sull'adesione ma ne esistono diverse applicabili a condizioni d'incollaggio differenti. Spesso però sono una combinazione di tutte queste a generare la forza di adesione tra adesivo e substrato. Tra tutte le teorie proposte negli'anni le principali e più attendibili sono:

- Teoria dell'adsorbimento.
- Teoria dell'interconnessione meccanica.
- Teoria della diffusione.
- Teoria dell'interazione elettrostatica.
- Teoria degli strati coesivi deboli.

Nonostante la teoria dell'adsorbimento sia quella che si adatta meglio alla maggior parte dei casi, ci sono situazioni in cui le altre teorie risultano essere più appropriate quindi è giusto citarle.

TEORIA DELL'ADSORBIMENTO

La teoria dell'adsorbimento afferma che l'adesione si realizza grazie a forze interatomiche ed intermolecolari tra atomi e molecole appartenenti alle superfici di aderendo e adesivo. La forza di attrazione che si genera tra substrato e adesivo è, in genere, una forza secondaria o forze di Van der Waals. Il contatto tra le molecole dell'adesivo e dell'aderendo deve essere intimo, poiché per generare le forze di Van der Waals non si può superare una distanza maggiore a 5 angstrom. Parlando di contatto intimo è opportuno introdurre il concetto di bagnabilità, essa stabilisce il meccanismo di contatto tra adesivo e aderendo; una buona bagnabilità si riscontra quando l'adesivo riempie totalmente le rugosità del substrato, mentre una cattiva bagnabilità si ha quando l'adesivo non riempie alcune concavità presenti sul substrato (figura 2.4).

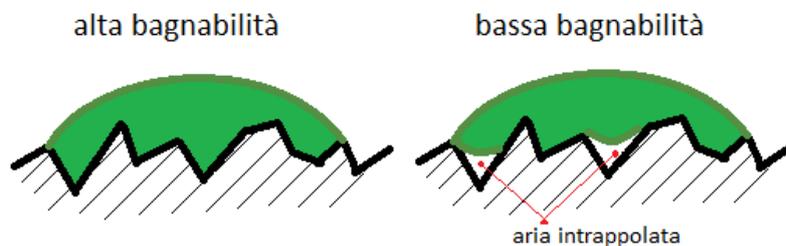


Figura 2. 4 Bagnabilità

La bagnabilità è strettamente collegata alla misura dell'angolo di contatto all'equilibrio. E' possibile determinare tale misura riferendosi all'equazione di Young, la quale mette in equilibrio le componenti di tensione all'interfaccia.

$$\gamma_{lv} \cos\theta = \gamma_{sv} - \gamma_{sl}$$

- γ_{lv} = tensione superficiale del fluido in equilibrio col suo vapore.
- γ_{sv} = tensione all'interfaccia del solido in equilibrio col vapore del fluido.

- γ_{sl} = tensione all'interfaccia tra solido e liquido.

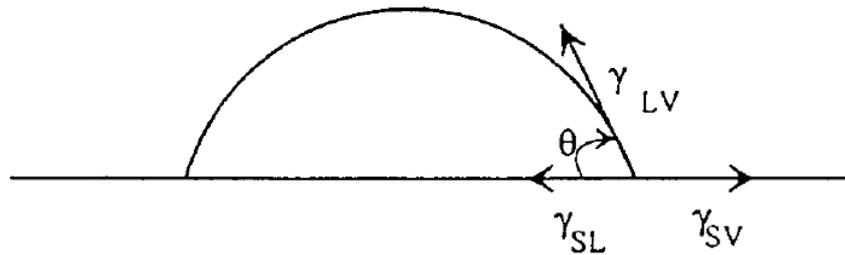


Figura 2. 5 Equilibrio liquido su superficie solida

Si ha il massimo della bagnabilità quando $\theta = 0^\circ$, cioè quando il fluido ricopre completamente la superficie solida, un esempio di questa situazione è dato da una goccia di acqua distillata su una superficie di vetro pulita. Per ottenere una migliore bagnabilità è necessario che la tensione γ_{sv} del substrato, o la tensione superficiale critica di bagnabilità γ_c , sia molto maggiore della tensione superficiale del liquido γ_{lv} . La tensione superficiale critica di bagnabilità γ_c deriva dal valore di γ_{lv} al tendere di θ a 0° . Gli adesivi polimerici più comuni hanno un valore di γ_{lv} molto basso rispetto al valore di tensione superficiale γ_{sv} di substrati metallici o ceramici, perciò tipicamente nell'incollaggio di superfici metalliche con adesivi liquidi otteniamo un elevato grado di bagnabilità. Una volta stabilito il contatto intimo tra adesivo e aderendo si instaurano all'interfaccia forze di Van der Waals e anche altri tipi di legami. Infatti oltre alle forze di Van der Waals si possono generare: legami ad idrogeno, anch'essi appartenenti alla categoria dei legami secondari, legami chimici, che si aggiungono ai precedenti creando un meccanismo detto *chemisorption* (chemi-adsorbimento). Tra i legami chimici del chemi-adsorbimento sono presenti legami di tipo ionico, covalente e metallico, appartenenti alla categoria dei legami primari. Oltre ai legami già citati si possono instaurare all'interfaccia interazioni di tipo donatore ricevente e possono crearsi strutture molecolari complesse, la cui resistenza si posiziona a metà tra legami secondari e primari.

TEORIA DELL'INTERCONNESSIONE MECCANICA

Questa teoria deriva dall'osservazione della morfologia superficiale dei materiali. Ogni materiale solido presenta sullo strato superficiale un bordo frastagliato

composto da concavità e sporgenze, dell'ordine di qualche μm , derivanti dalle lavorazioni meccaniche a cui è stato sottoposto. L'adesivo quando si trova allo stato liquido fluisce nelle concavità, all'atto della solidificazione si crea un ostacolo tra adesivo e aderendo permettendo la trasmissione della forza. È evidente che per poter considerare valida questa teoria l'adesivo deve riempire le concavità spostando l'aria che vi è intrappolata. Quindi l'adesivo deve possedere una buona bagnabilità rispetto al materiale che compone l'aderendo. Da dati sperimentali si evidenzia che più è elevata la rugosità più l'adesione è forte. Questo è da imputare, sia al meccanismo sopra descritto che all'aumento di superficie di contatto. Infatti se si generano forze di adesione, di natura interatomica e intermolecolare, dovute al contatto intimo, queste sono proporzionali all'area di contatto. Più la rugosità è elevata più l'area reale di contatto aumenta e con essa la forza di adesione. L'interconnessione meccanica, quindi, lavora insieme all'adesione intermolecolare per tenere unite le parti del giunto. Si potrebbe pensare che l'interconnessione sia uno dei meccanismi di adesione principali ma in realtà l'aumento di prestazioni del giunto all'aumentare della rugosità dipende almeno da quattro fattori quali: interconnessione meccanica (come citato in precedenza), formazione di una superficie pulita, formazione di una superficie più reattiva, realizzazione di una superficie reale di contatto più ampia. Allora l'abrasione della superficie dell'aderendo modifica le proprietà chimiche e fisiche permettendo lo sviluppo di interazioni di intensità maggiore rispetto alla semplice interconnessione meccanica che risulta perciò, un meccanismo di adesione secondario ma presente.

TEORIA DELLA DIFFUSIONE

La teoria della diffusione venne proposta da Voyuskii, tale fenomeno si presenta quando le molecole di due componenti posti in contatto si "diffondono" l'uno nell'altro cioè alcune molecole penetrano nel materiale adiacente. La diffusione è permessa solo se le molecole sono dotate di grande mobilità e se i materiali coinvolti sono due polimeri compatibili. La compatibilità è data dalla solubilità δ_s che deve essere, per i due polimeri, simile. La solubilità si valuta con questa relazione:

$$\delta s = \sqrt{\frac{\Delta H_v - RT}{V}}$$

Con:

ΔH_v = calore molare di vaporizzazione;

R = costante dei gas;

T = temperatura;

V = volume molare.

In realtà queste condizioni non sono molto frequenti e si trovano solo nel caso in cui i due polimeri coinvolti sono solubili l'un l'altro. In definitiva la teoria della diffusione è applicabile solo ad un numero ristretto di casi perciò non rappresenta una delle teorie più utilizzate per spiegare il fenomeno dell'adesione.

TEORIA ELETTROSTATICA

Come accadeva per la teoria della diffusione anche la teoria elettrostatica non riveste un ruolo fondamentale nel meccanismo di adesione ma spiega alcuni fenomeni che si verificano alla rottura del giunto incollato per carichi di pelatura. Questa teoria fu introdotta da Deryagin il quale osservò la formazione di qualche scarica elettrica all'interfaccia durante la rottura. La spiegazione è che nel momento dell'incollaggio si ha la formazione di un doppio strato elettrico dovuto al movimento di qualche elettrone per bilanciare i livelli di Fermi. Durante la rottura del giunto si crea una separazione di carica e quindi una differenza di potenziale che va via via aumentando fino a che si genera la scarica. Non è ancora chiaro se la forza elettrostatica partecipa attivamente nel meccanismo di giunzione o se manifesta la sua presenza solo come conseguenza alla rottura ma da rilevazioni sperimentali è certo che non rappresenta un contributo fondamentale all'adesione.

TEORIA DEGLI STRATI COESIVI DEBOLI

La teoria degli strati coesivi deboli nasce dalle sperimentazioni del dott. Bikerman il quale, analizzando le rotture di giunzioni incollate, osservò che la rottura avviene

sempre dove la forza dell'incollaggio è minore. Normalmente l'adesione è più forte della coesione che si ha negli strati immediatamente sottostanti l'interfaccia. Apparentemente la rottura sembra essere causata dal distacco del collante dall'aderendo perché è situata vicinissimo all'interfaccia in realtà questa situazione non si verifica molto spesso ma normalmente la rottura interessa lo strato più debole tra strato coesivo e substrato. Da qui deriva il nome "strati coesivi deboli" poiché non si conosce in che modo è strutturato l'intero strato coesivo ma è certo che la rottura si genera dove esso è più debole. La nascita di questi strati deboli può generarsi in nelle tre fasi di vita di un giunto incollato, che sono: l'applicazione dell'adesivo, l'indurimento dell'adesivo e la vita operativa della giunzione. Durante la prima fase una possibile causa della formazione degli strati deboli è la bassa bagnabilità dell'adesivo che non permette allo stesso di spingere l'aria fuori dagli interstizi del substrato. Altri meccanismi riguardano per esempio l'esistenza di strati deboli sulle superfici degli aderendi, un materiale come il rame può avere in superficie uno strato di ossido non particolarmente resistente che intacca la resistenza finale del giunto, per migliorare questa situazione è sufficiente asportare lo strato superficiale debole o, per altri materiali, eseguire trattamenti termici superficiali che conferiscano alla superficie maggiore resistenza. Nella fase d'indurimento la formazione di strati deboli può avvenire per le interazioni tra materiale del substrato e sostanze liberate durante il processo di polimerizzazione dell'adesivo. Un esempio di questa condizione è l'incollaggio di substrati di titanio, essendo un materiale attivo può reagire con i solventi dell'adesivo formando delle reazioni chimiche secondarie che determinano un indebolimento dello stato coesivo immediatamente prossimo all'interfaccia. Nella messa in servizio di una giunzione incollata la formazione di strati deboli può verificarsi per esempio se l'umidità ambientale penetra nella giunzione indebolendo lo strato di adesivo. Un altro caso è l'esposizione della giunzione al calore. Per substrati fenolici, il calore può continuare a liberare umidità come sottoprodotto della reazione di polimerizzazione indebolendo gli strati coesivi limitrofi. Questa teoria non spiega esattamente la natura dell'adesione ma descrive in quale maniera essa è intaccata perciò risulta essere utile per capire se le condizioni operative nelle tre fasi di vita del giunto possono influire negativamente sul suo valore di resistenza finale.

2.3 Classificazione delle colle

In commercio esistono molte tipologie di adesivi per cui è necessaria una classificazione secondo caratteristiche comuni degli incollaggi. Possiamo classificare gli adesivi in base a:

1. materiali da incollare;
2. forma fisica dell'adesivo;
3. modalità di indurimento;
4. composizione chimica;
5. costo.

MATERIALI DA INCOLLARE: tale classificazione è fatta dividendo i materiali di cui sono composti gli aderenti in categorie ampie come metalli, plastiche e gomme. Tuttavia questa classificazione non è molto soddisfacente perché, per esempio, un adesivo che può andare bene per l'acciaio non necessariamente sarà adatto al rame. Esistono tabelle (fig 2.6 tabella scelta adesivo secondo aderendo) che in base al materiale degli aderenti, che possono essere uguali o dissimili, elenca una serie di adesivi ritenuti adatti per lo scopo. In realtà queste tabelle non hanno grande valore poiché un adesivo può andare bene per qualsiasi materiale di una certa classe allora la modalità di scelta si sposta considerando diverse esigenze che il giunto deve soddisfare come per esempio il costo.

FORMA FISICA DELL'ADESIVO: questa classificazione si basa sullo stato fisico in cui si trova l'adesivo prima dell'applicazione. Essi sono reperibili in diverse forme e la scelta è data da considerazioni sul montaggio, progetto, costo. Tipicamente si trovano sottoforma di liquidi ma sono reperibili anche in forma di mastice, nastri, polvere o altre forme solide come barre o blocchetti. Di seguito riportiamo le principali caratteristiche delle forme più comuni:

- **Liquido:** la maggior parte è reperibile in questo stato, sono caratterizzati dalla facilità di utilizzo e offrono la possibilità all'operatore di controllare la viscosità.

<i>Aderendi</i>	cuoio	carta	legno	tessuti	plastiche viniliche	plastiche fenoliche	gomme	vetri, ceramiche	metalli
Metalli	1, 4, 11, 14, 15	1, 11, 12	1, 4, 6, 8, 11, 16, 17, 18, 20	1, 11, 12, 14	15	3, 8, 11, 16, 17, 18, 20	8, 11, 12, 16, 17, 18, 20	8, 17, 18, 19, 20	6, 8, 16, 17, 18
vetri, ceramiche	1, 4, 8, 14	1, 11, 12	1, 8, 11, 16, 17, 18, 20	1, 11, 12, 14	15	3, 8, 11, 16	11, 12, 16, 20	4, 8, 17, 20	
Gomme	11, 14	11, 12	11, 12, 18, 20	11, 12, 13	15	11, 12	11, 12, 16, 20		
plastiche fenoliche	11, 14, 15	11, 12	6, 8, 11, 14, 17, 18, 20	11, 12, 14	15	8, 17, 18			
plastiche viniliche	11	11	11	11	1, 11, 12, 13				
Tessuti	11, 12, 13, 14	1, 11, 12	11, 12, 13	5, 11, 12, 13					
Legno	11, 12, 13, 14	2, 11, 12	1, 6, 7, 9, 10						
Carta	11, 12, 13, 14	2, 4, 11							
Cuoio	1, 4, 11, 12, 13, 14								

<p>Termoplastici:</p> <p>1) Polivinilacetato</p> <p>2) Polivinil alcool</p> <p>3) Acrilici</p> <p>4) Cellulosa nitrato</p> <p>5) Asfalto</p>	<p>Termoindurenti:</p> <p>6) Fenolo-formaldeide</p> <p>7) Fenolo-resorcinolo</p> <p>8) Epossidici</p> <p>9) Urea-formaldeide</p> <p>10) Melammina-formaldeide</p>
<p>Elastomeri:</p> <p>11) Gomma naturale</p> <p>12) Gomma riciclata</p> <p>13) Gomma stirene-butadiene</p> <p>14) Neoprene</p> <p>15) Gomme nitriliche</p>	<p>Miscele:</p> <p>16) Fenolici-vinilici</p> <p>17) Fenolici-Polivinilbutirrale</p> <p>18) Fenolici-polivinilformale</p> <p>19) Fenolici-nylon</p> <p>20) Fenolici-neoprene</p>

Figura 2. 6 Scelta adesivo in base al materiale degli aderendi

- **Mastice o pasta:** sono disponibili con una vasta scelta di consistenze diverse e sono adatti per produzioni di serie e laddove sia necessario il riempimento di vuoti nonché un ritiro limitato.

- Pellicole o nastri: la caratteristica principale è la facilità di applicazione e uno spessore uniforme dell'adesivo, essendo nastri si riduce la possibilità di usarne in dosi eccessive eliminando gli sfridi. Possono essere montati su materiali di supporto o direttamente forniti come pellicole o nastri di solo adesivo.
- Polvere: la particolarità di questi adesivi è la necessità di portarli allo stato liquido per l'applicazione perciò sono mescolati con liquidi o attivati a caldo. I vantaggi sono un costo limitato e tempi di conservazione elevati.
- Granuli barre blocchetti: vengono utilizzati per la facilità di applicazione, essi sono in forma solida e vengono portati allo stato liquido per l'applicazione, anche questa forma di adesivo è caratterizzata da ottimi tempi di conservazione.

MODALITA' D'INDUTIMENTO: gli adesivi si possono classificare in questa maniera poiché sono varie le tipologie d'indurimento e dipendono essenzialmente dalla natura dell'adesivo. Classificando in questa maniera si possono distinguere tre classi:

- Adesivi a base di solvente: essi sono mischiati con un solvente che viene fatto evaporare nel momento della polimerizzazione dell'adesivo. Di questa categoria fanno parte alcune colle naturali come la gomma lacca, resine sintetiche come resine acriliche e viniliche, polimeri stirenici e elastomeri basati sul poliuretano.
- Adesivi a caldo: questa è la categoria tipica delle resine termoplastiche, esse vengono portate, durante la fase di applicazione, allo stato liquido attraverso il calore. Per ottenere l'indurimento è sufficiente lasciare raffreddare l'adesivo che ritornerà allo stato solido. Di questa categoria si possono citare i poliammidi, i polieteri saturi, i poliacrilati e i polieteri.
- Adesivi indurenti per reazione chimica: in questa categoria di adesivi l'indurimento è attivato da un agente, di varia natura, che innesca nella colla delle reazioni chimiche di polimerizzazione. A differenza delle resine termoplastiche esse sono infusibili ed insolubili e hanno la caratteristica di premiare delle particolari proprietà rispetto altre semplicemente variando il tipo di formulazione.

Come appena citato, le reazioni chimiche di polimerizzazione sono generate in base all'agente d'indurimento. Questi agenti sono di varia natura e definiscono il processo al quale il giunto deve essere sottoposto per ottenere l'indurimento dell'adesivo. Di seguito riporto in principali agenti d'indurimento:

- **Calore:** viene apportato calore al giunto per ottenere la reazione chimica di polimerizzazione. Tipicamente le temperature vanno da quella ambiente a circa 250 °C
- **Pressione:** gli adesivi polimerizzabili a pressione sono tipicamente disponibili sottoforma di polvere o liquido. La pressione di trattamento del giunto varia tra la pressione di un semplice contatto a circa 2 MPa.
- **Tempo:** Ogni adesivo richiede del tempo per terminare tutte le reazioni di polimerizzazione. Questo tempo può variare tra i 30 minuti e le 24 ore. Spesso il tempo di polimerizzazione è fortemente legato ai valori di pressione e temperatura del giunto incollato.
- **Catalizzatore chimico:** qualche istante prima della fase di applicazione l'adesivo viene mescolato ad un secondo componente catalizzante che attiva la fase di polimerizzazione. Spesso è necessario anche un apporto di calore al giunto incollato.
- **Vulcanizzazione:** è tipica degli elastomeri ai quali viene aggiunto un agente catalizzante e aggiunta di calore per ottenere l'indurimento.

COMPOSIZIONE CHIMICA: questa modalità di classificazione si basa sulla composizione chimica o sui componenti principali che formano l'adesivo. Possiamo dividerli in cinque macro classi che a loro volta saranno divise in altre sottocategorie, le principali tipologie sono:

- Prodotti naturali
- Termoplastici
- Termoindurenti
- Elastomeri
- Ibridi a due polimeri

Di seguito è riportata una tabella in cui vengono indicati le classi sopracitate con le principali caratteristiche.

Classificazione	Termoplastiche	Termoindurenti	Elastomeri	Ibridi
Il gruppo comprende:	Cellulosa acetato, cellulosa nitrato, polivinilacetato, polivinil alcool, poliammide, acrilici.	Cianoacrilato, poliestere, urea formaldeide, melamina formaldeide, epossidici, fenolo resorcinolo.	Gomma naturale, gomma riciclata, poliuretano, neoprene, gomma stirene butadiene, silicone.	Epossidico fenolico, epossidico nylon, fenolico neoprene, fenolico vinilico.
Forma comunemente usata:	Liquido, nastro	Liquido, esistono in tutte le forme	Liquido, nastro	Liquido, paste, nastro
Tipo d'indurimento:	Adesivi a caldo, evaporazione del solvente.	Reazione chimica dovuta a calore, pressione, e catalizzatori.	Reazione chimica, evaporazione del solvente	Reazione chimica, evaporazione del solvente, adesivi a caldo
Caratteristiche dell'incollaggio:	Scorrimento per carichi elevati, resistenza buona fino a 90 °C.	Ottime caratteristiche e buona resistenza fino a 250 °C.	Bassa resistenza, alta deformabilità e resistenza buona fino a 190 °C.	Combinazione delle caratteristiche dei materiali con cui è composto.
Materiali comunemente incollati:	Applicabile su tutti i materiali in particolare legno, pelle, carta e nonmetalli in genere.	Applicabile su tutti i materiali di giunzioni strutturali.	Non comunemente usato per incollare ma per sigillare delle giunzioni.	Metalli, ceramiche, vetro, ma in generale sempre dipendente dai materiali con cui è composto.

Figura 2. 7 Tabella di classificazione secondo composizione chimica

PRODOTTI NATURALI:

Di questa categoria fanno parte adesivi di origine animale e vegetale. Sono molto in disuso rispetto al passato e gli unici utilizzi correnti si trovano nell'incollaggio della carta come per esempio le rilegature dei libri eseguite con colle vegetali. Colle animali sono più resistenti all'umidità rispetto a quelle vegetali perciò sono utilizzate

negli incollaggi di parti in legno. In generale sono caratterizzate da bassa resistenza meccanica e sono disponibili sottoforma di dispersioni in solvente, paste, polveri, emulsioni e solidi. In questa categoria troviamo: Amido, destrina, colle animali e di pesce, caseina, colofonia, gomma lacca, balsamo del Canada, gomma.

ADESIVI TERMOPLASTICI:

In questo gruppo rientrano gli adesivi che hanno la particolarità di essere fusibili, infatti dopo l'indurimento per polimerizzazione l'aumento della temperatura fa diminuire la viscosità così la resina passa dallo stato vetroso a quello gommoso fino a quello fluido in maniera reversibile. Questo è possibile perché i polimeri (catene di monomeri legati tra loro da legami covalenti) che costituiscono l'adesivo termoplastico, sono semplicemente intrecciate e aggrovigliate con interazioni di debole entità. Durante la fase di riscaldamento dell'adesivo termoplastico i legami deboli, che collegano le catene polimeriche, si rompono e questo permette la diminuzione della viscosità dell'adesivo poiché le catene sono libere di scorrere. Nella fase di raffreddamento si ristabiliscono i legami tra le catene di polimeri e l'adesivo torna ad avere la consistenza solida. Questo tipo di struttura, in parte realizzata da legami deboli, conferisce all'adesivo la caratteristica di scorrimento viscoso quando il giunto è sottoposto a notevoli tensioni. Quindi è necessario progettare la giunzione in maniera da limitarne questo fenomeno. Un'altra particolarità degli adesivi termoplastici è la possibilità di ottenere una soluzione se viene aggiunto un opportuno solvente, mentre una caratteristica negativa è che la colla non resiste a temperature molto elevate perché si disgregano tutti i legami che costituiscono la struttura. Quando accade ciò si dice che la resina rammollisce cioè letteralmente brucia, in questo modo la prestazione adesiva crolla. Anche ripetere per tante volte l'operazione di riscaldamento e raffreddamento tende a degradare l'adesivo per cui lo si può fare per un numero limitato di cicli. Rispetto agli adesivi naturali, i termoplastici, hanno una robustezza maggiore e una migliore resistenza all'umidità e alla biodegradazione.

ADESIVI TERMOINDURENTI:

Gli adesivi termoindurenti hanno la caratteristica di essere insolubili e infusibili. L'adesivo si presenta sottoforma di fluido e all'atto della polimerizzazione le catene di polimeri si legano tra loro formando una struttura reticolare tenuta insieme da legami covalenti difficili da rompere. Per questo, a differenza di quanto avveniva per i termoplastici, non si ha la possibilità di fondere e risolidificare il materiale a piacimento. A seconda del tipo di adesivo l'indurimento, cioè la formazione della struttura reticolare, può avvenire a temperatura ambiente o ad alte temperature. In realtà l'indurimento può avvenire a temperatura ambiente perché la reazione chimica di polimerizzazione è esotermica ed è lei stessa a fornire il calore necessario per completare la solidificazione. In commercio sono disponibili sotto varie forme come liquidi, paste solidi o forniti su supporto solvente per facilitare l'applicazione. Tra le forme in commercio distinguiamo il caso in di resina e agente attivante separati o

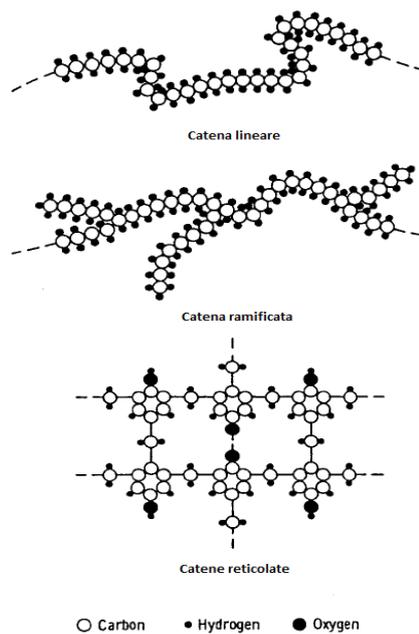


Figura 2. 8 Tipi di legami nell'adesivo

prodotto premiscelato. La differenza è che per gli adesivi con agente indurente separato il mescolamento avviene subito prima dell'applicazione sul substrato, avere i componenti separati favorisce la conservazione del prodotto per tempi lunghi. Nei prodotti premiscelati la reazione di polimerizzazione è attivata però la velocità di questa reazione chimica è molto dipendente dalla temperatura. La reazione è estremamente lenta per temperature molto basse per cui la conservazione del prodotto avviene in frigoriferi, mentre per temperature alte è veloce di conseguenza per

indurire la colla si deve fornire del calore al giunto. È evidente che, per quanto sia lenta la reazione a temperature basse, la conservazione del prodotto premiscelato non può avvenire per tempi molto elevati. La conformazione del reticolo di polimeri di un adesivo termoindurente influisce sulle caratteristiche meccaniche, infatti questi adesivi hanno una buona resistenza meccanica e un'alta rigidità. È molto buona anche la resistenza al calore e ai solventi. L'insieme di queste caratteristiche favorevoli rendono la categoria degli adesivi termoindurenti i più utilizzati nel campo degli adesivi strutturali. In questa categoria si possono citare il gruppo degli epossidici e il gruppo degli uretanici.

ADESIVI ELASTOMERICI:

Questa categoria raccoglie gli adesivi che presentano la particolarità di avere una grande deformabilità e quindi un modulo elastico abbastanza basso. Questi adesivi sono realizzati con resine polimeriche sia di origine naturale che sintetica in grado di offrire una buona tenacità e notevoli allungamenti. L'adesivo deformato ritorna alle sue dimensioni originarie nel momento in cui togliamo il carico e segue un ciclo di isteresi nel quale tra carico e scarico dissipa una buona parte di energia. Questa caratteristica porta all'uso di questi adesivi nel caso in cui vogliamo smorzare delle vibrazioni. Gli adesivi elastomerici possono essere sia termoindurenti che termoplastici, quelli termoindurenti vengono usati anche per applicazioni strutturali. Questa categoria di adesivi può essere fornita in vario modo, per esempio, come soluzioni con solvente, dispersioni acquose, nastri a pressione e come componente singolo o multi componente sia in forma liquida che di pasta. La forma e la modalità d'indurimento dipendono dalla formulazione della resina elastomerica che viene scelta in base al tipo di applicazione e alle esigenze che deve soddisfare. Da sottolineare tra le caratteristiche di questi adesivi la ottima resistenza allo sforzo di pelatura. La caratteristica di deformabilità di questi adesivi li rende estremamente efficaci nell'incollaggio di substrati con differente coefficiente di espansione poiché lo strato di adesivo si fa carico della diversa deformazione degli aderenti. Gli adesivi di questa categoria vengono usati soprattutto per sigillare delle giunzioni, smorzare le vibrazioni e come isolante acustico.

ADESIVI IBRIDO:

Gli adesivi ibridi sono una combinazione di resine termoplastiche, termoindurenti ed elastomeri in un'unica resina le cui proprietà sono determinate dalla formulazione scelta. Questi adesivi particolari sono stati sviluppati per sfruttare e combinare le proprietà migliori degli adesivi delle categorie citate in precedenza. Per esempio gli adesivi termoindurenti denotano una grande rigidità e una buona resistenza ad alte temperature, essi vengono combinati con resine termoplastiche e elastomeriche per rendere l'adesivo ibrido meno rigido e con resistenza migliore ai carichi di pelatura. Tuttavia i primi tentativi di combinazione non hanno portato ad adesivi che avessero le caratteristiche migliori delle resine costituenti. I primi approcci per limitare la rottura fragile delle colle termoindurenti furono quelli di mischiare alla resina principale una componente flessibilizzante così resine come le fenoliche o epossidiche mischiate ad adesivi elastomerici come le gomme nitriliche vedevano incrementare la loro caratteristica di resilienza. Tuttavia la componente elastomerica tende ad abbassare la temperatura di transizione vetrosa così la colla ibrida degrada a temperature più basse e non manifesta una resistenza elevata ad agenti chimici, caratteristiche tipiche della resina termoindurente che ne costituisce la percentuale maggiore. Più di recente sono state sviluppate resine ibride in grado di fornire elevate prestazioni meccaniche senza limitare la resistenza alle alte temperature. Possiamo distinguere due sistemi:

1. Ibridi reattivi: dove due componenti liquidi reagiscono insieme piuttosto che essere semplicemente mischiati.
2. Ibridi con fase in dispersione: dove il mezzo flessibilizzante è disperso sottoforma di particelle discrete in una matrice di resina.

Negli ibridi reattivi la resina flessibilizzante viene fatta reagire insieme alla resina di base e questo conferisce all'adesivo ottime proprietà meccaniche e solo un lieve abbassamento della resistenza ad alte temperature. Un esempio di questa categoria è l'adesivo epossidico-uretanico. Per gli ibridi con elastomeri in dispersione l'aumento di prestazione avviene introducendo microstrutture di elementi flessibilizzanti nella struttura principale dell'adesivo. Le microstrutture in dispersione non sono semplicemente presenti in maniera discreta ma creano dei veri e propri legami con la resina principale (figura 2.9). Per esempio polimeri quali il vinile e il CTBN possono

essere posti in dispersione in una fase di resina epossidica o acrilica. Questi adesivi ibridi hanno come punti di forza resistenza a taglio, alla pelatura e all'impatto senza sacrificare la resistenza alle alte temperature e agli agenti chimici. Essi hanno anche la capacità di aderire a substrati oleosi e si pensa che l'olio venga assorbito dall'adesivo e agisca come ulteriore elemento flessibilizzante.

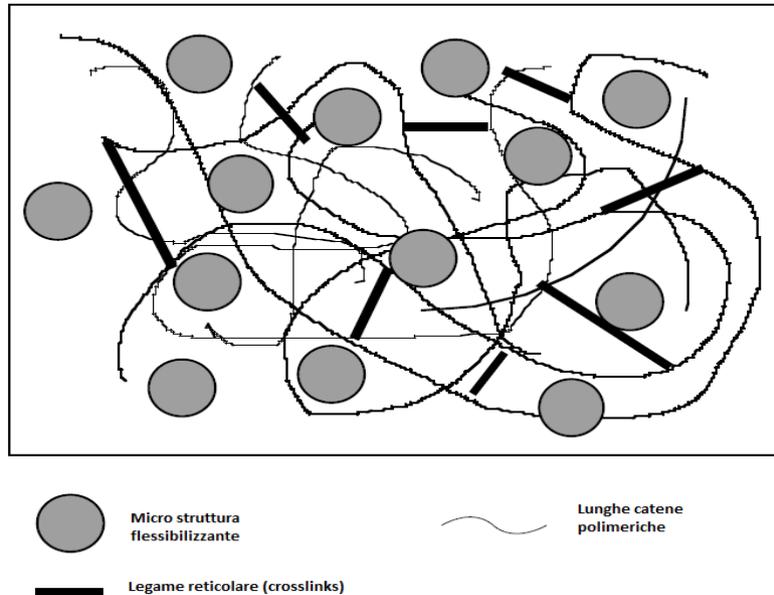


Figura 2. 9 Struttura ibrido con dispersione di flessibilizzante

COSTO: non è una maniera classica di classificare un adesivo ma risulta essere un fattore determinante nella scelta della colla adatta per l'applicazione a cui sarà rivolta. Perciò questa classificazione diviene importante nella scelta degli adesivi. Il prezzo di un adesivo può variare significativamente e dipende sostanzialmente dal volume di acquisto e dallo sviluppo che c'è dietro alla realizzazione di tale adesivo. Per esempio gli adesivi che sono stati sviluppati specificatamente per resistere a condizioni ambientali particolari risultano più costosi di adesivi comuni. I prezzi possono variare da qualche centesimo di euro al Kg per adesivi inorganici e colle animali fino a centinaia di euro al Kg per colle sintetiche ad alta resistenza per temperature elevate. Adesivi forniti su nastri, pellicole e adesivi in polvere richiedono processi tecnologici più elaborati rispetto a colle liquide o paste perciò sono solitamente più costose. Quando si stima il prezzo di un adesivo si deve tenere conto anche di aspetti inerenti al processo di realizzazione del giunto incollato. Quando si realizza una giunzione si deve tenere conto anche di costi che riguardano la manodopera che richiede il processo, i costi delle attrezzature, i costi legati al tempo necessario per

l'indurimento e le eventuali perdite dovuti a scarti di giunzioni difettose. Di seguito sono riportati i parametri che vanno considerati nell'analisi dei costi di una giunzione incollata:

- Efficienza di ricoprimento in funzione della superficie d'incollaggio o del numero dei componenti da incollare.
- Attrezzature per l'applicazione e per lavorazioni successive (forni, presse, applicatori...).
- Tempo di lavorazione totale (preparazione, incollaggio, indurimenti...).
- Costo per operazioni di montaggio e ispezione delle giunzioni incollate.
- Costi per lo smaltimento come rifiuto speciale di avanzi di adesivo post-lavorazione.
- Quantità di scarto rispetto ad altri metodi di incollaggio.

Il costo complessivo viene calcolato in funzione dell'area di incollaggio. Siccome molti adesivi sono venduti come soluzioni diluite con diluente non è corretto un confronto di costi per unità di volume o di peso poiché porterebbe ad un confronto errato.

2.4 Famiglie di adesivi

Per famiglie di adesivi si intendono le resine polimeriche, naturali, inorganiche che, con l'aggiunta di additivi ed altri prodotti, formano la struttura chimica dell'adesivo. Come si è osservato in precedenza esistono molti modi per classificare gli adesivi, per questo capitolo è utile soffermarsi sulla distinzione tra adesivi strutturali e non strutturali in particolare mettendo in luce le famiglie di resine utilizzate nel gruppo dei strutturali poiché l'elaborato tratta esclusivamente i dati raccolti da prove su

incollaggi strutturali. Di seguito è riportata la tabella in figura 2.6 la quale espone in maniera sintetica le caratteristiche delle più comuni famiglie di adesivi esposte poi in maniera più approfondita in seguito. Tipicamente le caratteristiche che permettono ad un adesivo di rientrare nella famiglia dei strutturali sono una elevata resistenza paragonabile alla resistenza degli aderendi che compongono l'incollaggio e tale resistenza deve essere poco influenzabile da fattori ambientali esterni. Tuttavia ci sono adesivi che rientrano in questa famiglia anche se non rispettano pienamente i canoni sopra citati. Per esempio gli adesivi hot-melt utilizzati in industria tessile vengono considerati strutturali poiché gli viene richiesto di sopportare dei carichi, ma più in generale questi adesivi non rientrano nella categoria dei strutturali. Non si può dire lo stesso dei cianoacrilati considerati strutturali anche se non presentano particolare resistenza se esposti al calore o ambienti umidi. In generale nella famiglia degli adesivi strutturali troviamo resine di tipo termoindurente che richiedono, per la formazione di legami reticolati, l'aggiunta di un catalizzatore o fonti di calore. Oltre a queste resine si sono aggiunte, nel corso degli anni, delle combinazioni di varie famiglie di adesivi creando delle resine modificate o ibride. Anche alcuni elastomeri ad alta resistenza possono essere considerati adesivi strutturali, un esempio può essere il poliuretano.

Di seguito sono riportate in sequenza tutte le famiglia più comuni di adesivi strutturali.

Famiglia	strutturali	sigillante	rigido T= tenace	elastomerico	forma	indurimento
Epossidico	x		x		F, S, 1C, 2CC	TA, ET
Epossidici modificati:						
epossidico ibrido tenace	x		x		2CC	TA, ET
epossidico fenolico	x		x		F, 1C	ET
epossidico nylon	x		T		F, 1C	ET
epossidico polisolfuro	x	x	T		2CC	TA
Resorcinolo e fenolformaldeide	x		X		2CC	TA
Melamina e urea formaldeide	x		X		1WR	TA,ET
Fenolici modificati:						
fenolico nitrile	x		T		F, 1S	ET
fenolico vinilico	x		T		F, 1S	ET
fenolico neoprene	x		T		F, 1S	ET
aromatici ad alta temperatura:						
Poliamide	x		X		F, 1S	ET, P, V
bismaleimide	x		X		F, 2CC	ET
polibenzimidizole	x		X		F	ET, P, V
Poliestere	x		X		2CC	TA

Poliuretano	x			X	2CC	TA
Resina anaerobica	x	x	X		1C	TA
Cianoacrilati	x		X		1C	TA
Acrilici modificati	x		X		2CC	TA
Elastomeri:						
neoprene	x	x		x	1S, CT	TA
acrilonitrile butadiene	x	x		x	1S, CT	TA
polisolfuro	x	x		x	2CC	TA
silicone	x	x		x	1C, 2CC	TA

Legenda:

Forma: F = film, S = solido, 1C = monocomponente a indurimento per reazione chimica, 1S = mono componete a indurimento per evaporazione del solvente, 2CC = bicomponete liquido o pasta, CT = a contatto, 1WR = monocomponente a base d'acqua.

Indurimento: TA = temperatura ambiente, ET = elevata temperatura, P = a pressione, V = Sottovuoto.

Figura 2. 10 Famiglie di adesivi strutturali

ADESIVI EPOSSIDICI

Gli adesivi epossidici vengono ampiamente utilizzati nel settore automobilistico, industriale e aerospaziale. Introdotti nel 1946, rappresentano la famiglia più versatile di adesivi. La versatilità è data dalla buona attitudine di questo adesivo di legarsi a substrati differenti e, a tale caratteristica, si aggiunge la capacità di essere modificato con semplicità per ottenere determinate caratteristiche chimiche ma soprattutto fisiche e meccaniche. L'adesione ad una grande varietà di supporti è data dalla buona bagnabilità che contraddistingue questa resina la quale trova difficoltà solo nel bagnare superfici a energia limitata come materie plastiche o elastomeri non trattati. La facilità con cui può essere modificata la resina epossidica non permette di definire delle caratteristiche comuni poiché tra una formulazione e l'altra cambia in maniera decisa il modo di comportarsi. Tuttavia qualche caratteristica predominante c'è, come la buona attitudine a sopportare carichi di trazione e taglio, molto meno quelli di pelatura. Inoltre gli adesivi epossidici offrono una buona resistenza all'umidità, oli, e alcuni solventi, con un basso ritiro nella fase di polimerizzazione e una buona resistenza a fatica. Gli adesivi epossidici si trovano in commercio sottoforma di resina più indurente, talvolta l'agente indurente viene integrato nella resina e venduto come monocomponente mentre in altri casi è fornito come bi componente da premiscelare prima dell'applicazione. Questi adesivi sono reperibili in tutte le forme tipiche come liquidi, paste, film, e solidi. In base al tipo di agente indurente, gli adesivi epossidici possono polimerizzare sia a temperatura ambiente che ad alte temperature. La differenza tra le due modalità è che la polimerizzazione ad alta

temperatura crea una struttura più reticolata e questo migliora la resistenza a taglio e alle condizioni ambientali più critiche. Tuttavia una struttura più reticolata rende meno tenace, e quindi più fragile, l'adesivo con un peggioramento delle prestazioni sotto carichi di pelatura. Come citato in precedenza, per ottenere particolari caratteristiche meccaniche, la resina epossidica viene associata ad altri elementi. In questa maniera nasce una sottofamiglia degli epossidici detta epossidici ibridi. Tipicamente i polimeri associati sono: resine fenoliche, nylon, resine nitrili e polisolfuri. La maniera in cui è introdotto la seconda sostanza si divide in due casi, nel primo si ha l'aggiunta di una sostanza che reagisce insieme alla resina alterando le proprietà della seconda o alternativamente il polimero è aggiunto in maniera discreta nella matrice di resina senza che reagisca con essa. Di seguito riporto in elenco i principali adesivi epossidici ibridi con le caratteristiche primarie:

- **RESINA EPOSSIDICA TEMPERATA:** la resina epossidica tradizionale è molto fragile perciò si sono cercati modi per ridurre questa caratteristica fastidiosa. L'idea è quella di introdurre particelle termoplastiche, nylon e elastomeri (che tipicamente sono molto elastici) all'interno della resina. Il risultato migliore è l'introduzione di particelle discrete di gomma nitrilica. Tipicamente queste resine sono disponibili come componente singolo e necessitano di una cottura a 120°C per un'ora circa. Le caratteristiche migliori sono un elevato valore di resistenza a trazione, taglio anche a temperature relativamente alte.
- **RESINA EPOSSIDICA-FENOLICA:** queste resine sono state studiate per ottenere grandi prestazioni in ambienti a temperature elevate. La resina epossidica-fenolica mantiene inalterate le proprietà per grandi range di temperatura fino ad un massimo di circa 180°C. molto buona risulta essere anche la resistenza alle condizioni ambientali come olio, solventi e umidità. Entrambe le resine che compongono questo adesivo ibrido sono di natura fragile perciò non sopporta bene gli urti, carichi di pelatura e shock termici. Sono disponibili in commercio sotto varie forme quali: paste, soluzioni con solvente, pellicole, film. Per ottenere l'indurimento solitamente è richiesta la cottura a 180°C sotto una pressione variabile tra 1-3,5 bar per circa un'ora.

- **RESINA EPOSSIDICA-NYLON:** questa resina è stata una delle prime studiate appositamente per avere un'elevata resistenza a taglio e ai carichi di peeling. Tale resina è costituita dall'unione tra la resina epossidica e un copolimero solubile derivante dal monomero del nylon, senza che le due sostanze reagiscano. I vantaggi di questa unione sono una migliore resistenza a taglio e alla pelatura unitamente ad un buon comportamento a fatica e agli urti. Tra i limiti ci sono una temperatura tollerabile in esercizio bassa, circa 85°C, problemi di resistenza a creep e soprattutto la scarsa resistenza all'umidità a causa della presenza di nylon idrofilo. In commercio sono disponibili pellicole e soluzioni mentre l'indurimento è ottenuto tramite cottura in forno a 180°C per circa un'ora sotto una pressione di circa 1,8 bar.
- **RESINA EPOSSIDICA-POLISOLFURO:** è una resina utilizzata sia come adesivo che sigillante. Le principali caratteristiche sono la resistenza agli agenti chimici, atmosferici, oli, grassi, solventi, una notevole elasticità e resistenza al peeling abbastanza buona mentre è molto scarsa la tenuta a taglio. Le proprietà elastiche di questa resina sono buone fino a temperature di circa -65°C mentre l'adesione resta efficace fino a -100°C. Le temperature massime tollerabili dipendono dalla quantità di resina epossidica contenuta nell'adesivo ma comunque restano tra i 50°C e 80°C. Tipicamente è composto di due componenti e l'indurimento si ottiene a temperatura ambiente o a temperatura ambiente più un catalizzatore per una polimerizzazione più veloce.
- **RESINA EPOSSIDICA-VINILICA:** questa miscela di polimeri genera una resina con ottima resilienza e resistenza a carichi di pelatura. Tuttavia l'aggiunta della resina vinilica tende a peggiorare la resistenza ad alte temperature. Tipicamente sono disponibili in forma di film o di soluzione con solvente.

ADESIVI RESORCINOLO-FORMALDEIDE

Le resine di resorcinolo-formaldeide vengono solitamente impiegate per incollaggi di strutture in legno anche se l'adesione è efficace su tutti i tipi di materiali tranne il metallo a meno che non riceva una copertura di fondo. Il resorcinolo-formaldeide è molto resistente ad ambienti critici, infatti dimostra una buona resistenza all'acqua, acqua calda, olio, vari tipi di solventi e muffe. Possono resistere fino a temperature di circa 180°C. In commercio sono reperibili come sistema a due componenti, il

resorcinolo è liquido e va unito con un catalizzatore (paraformaldeide) in polvere. Una volta miscelato il tempo di applicazione è breve perché il composto, grazie alle reazioni chimiche che scaturiscono, sprigiona una buona quantità di calore che accelera la polimerizzazione. L'indurimento può quindi avvenire a temperatura ambiente o con un piccolo apporto termico. Questa resina è costosa perciò spesso sono modificate con l'aggiunta di resina fenolica formando l'adesivo fenolo resorcinolo.

ADESIVI MELAMMINA-FORMALDEIDE

Le resine di melammina-formaldeide sono utilizzate per l'incollaggio di strutture in legno tuttavia offrono prestazioni inferiori rispetto alle resine di resorcinolo-formaldeide anche se economicamente sono più convenienti. Resistono bene all'acqua e a temperature di circa 60°C. Sono disponibili sotto forma di polvere da unire a acqua e all'agente indurente. Necessitano di un processo d'indurimento che prevede la cottura a temperature vicino a 100°C.

ADESIVI FENOLICI

Le resine fenoliche sono il risultato della condensazione di fenolo e formaldeide. Sono relativamente poco costosi e rivestono una parte importante nell'incollaggio di strutture di legno poiché mostrano una buona resistenza unita ad una discreta insensibilità a fattori ambientali come temperature sia basse che alte, acqua calda, muffe e funghi. Molto frequentemente questi adesivi sono utilizzati per incollaggio di strutture in legno posizionate all'aperto. Le resine fenoliche hanno la caratteristica di essere fragili e non resistere in maniera adeguata ad urti e vibrazioni. Come accadeva per le resine epossidiche, anche gli adesivi fenolici vengono miscelati con elementi elastomerici per generare resine ibride che limitano la fragilità dell'adesivo di partenza. Comunemente gli adesivi fenolici ibridi che troviamo in uso sono:

- **ADESIVO FENOLICO-NITRILICO:** l'adesivo ibrido fenolico-nitrilico è ottenuto dall'adesivo fenolico introducendo gomma nitrilica che in alcuni casi può arrivare fino al 50% in peso della formulazione. Questa composizione porta ad un incremento di resistenza sotto carichi di pelatura senza ridurre significativamente le prestazioni a temperature elevate. Da rilevare anche un'elevata resilienza e, su

giunzioni metalliche, una buona resistenza a fatica. Questo adesivo si trova comunemente sottoforma di soluzione con solvente e film adesivo. L'indurimento di questa resina si ottiene scaldando la giunzione a temperature di circa 150°C-260°C a una pressione di circa 14 bar, la polimerizzazione ottenuta nel campo di temperatura più alto da origine a giunzioni che in condizioni operative hanno una migliore resistenza alle alte temperature.

- **ADESIVO VINILICO-FENOLICO:** l'adesivo vinilico fenolico nasce dalla combinazione della resina fenolica con un polimero termoplastico vinilico. Sono uno degli adesivi più utilizzati nell'incollaggio di componenti metallici per via dell'elevata resistenza alle sollecitazioni di taglio e al peeling. Un limite di questo adesivo è la resistenza alle temperature elevate poiché la parte termoplastica che compone l'adesivo tende ad ammorbidire quando si superano temperature di circa 95°C. Tuttavia a temperature ambiente dimostrano un'eccellente resistenza ad urti e ad agenti chimici. In commercio si trovano in forma di soluzione con solvente e come pellicola con o senza supporto. L'indurimento, se viene effettuato ad alte temperature e pressioni, avviene in tempi limitati. L'applicazione industriale più nota di questi adesivi è nell'incollaggio dei fogli di rame sui supporti dei circuiti stampati.

ADESIVO FENOLICO-NEOPRENE: questo adesivo è l'unione della resina fenolica con il neoprene che è un elastomero. Da questa unione si ottiene un adesivo in grado di sopportare carichi per tempi molto lunghi poiché ha una elevata resistenza al creep. Oltre alla caratteristica precedente si aggiunge una ottima resistenza agli urti e alla fatica. Il range di temperatura di utilizzo che non abbassa significativamente la resistenza del adesivo va da 20°C a 95°C. Le forme più comuni disponibili in commercio sono film e soluzioni con solvente. L'indurimento si ottiene con temperature superiori a 150°C e pressioni maggiori di 3,5 bar.

ADESIVI POLI-IMIDICI PER ALTE TEMPERATURE

I poliaromatici ad alte temperature appartengono alla famiglia dei polimeri eterocicli aromatici noti per la loro straordinaria resistenza termica. Sfortunatamente questa straordinaria qualità si scontra con una lavorazione molto complicata della resina. Molti adesivi aromatici induriscono attraverso un meccanismo di condensazione che

genera acqua come sottoprodotto della resina polimerizzata, perciò è solito notare la formazione di bolle lungo lo strato adesivo. I poliaromatici trovano impiego nel campo aerospaziale anche se in maniera limitata a causa del costo e della difficoltà nella lavorazione. L'indurimento richiede, a seconda del tipo di formulazione, una temperatura che oscilla tra 280°C-350°C e una pressione molto elevata. Spesso la pressione applicata nel processo d'indurimento non è costante ma in una prima fase è molto leggera per poi passare a valori di pressione superiori. La polimerizzazione produce sostanze volatili che devono essere smaltite. In questo caso è difficile ottenere adesivi ibridi con questa resina perché i polimeri termoplastici o elastomerici che possono essere introdotti non riuscirebbero ad avvicinare le temperature raggiungibili dalla resina di base. Della famiglia dei poliaromatici per alte temperature fanno parte:

ADESIVO POLIIMMIDICO: sono resine sviluppate in ambito aerospaziali che forniscono resistenza a temperature molto elevate. Gli adesivi poliimidici si dividono in due categorie che differiscono per la modalità d'indurimento, abbiamo:

- a) Poliimidi ad indurimento per condensazione; sono stati i primi introdotti in commercio e presentano la caratteristica di produrre umidità durante il processo di polimerizzazione. Questo si traduce in porzioni vuote lungo la linea di giunzione che compromettono parte della resistenza generale del giunto. In aggiunta a quest'aspetto negativo, si sottolinea la necessità di utilizzare grandi quantità di solventi da applicare all'adesivo per renderlo lavorabile. Tale aspetto rende le resine poliimidiche molto difficili da lavorare rispetto ai comuni adesivi. Il processo d'indurimento è effettuato in due passaggi, si procede con una cottura a 180 °C sotto pressione, dopo un paio di ore si procede con un post-trattamento ad una temperatura tra i 260 °C ÷ 320 °C. L'adesivo indurito risultante si evidenzia per la resistenza a temperature di circa 300 °C per esposizione prolungata mentre per brevi esposizioni ci si avvicina a circa 500 °C.
- b) Poliimidi ad indurimento per reazione di addizione hanno il vantaggio, rispetto ai precedenti, di non liberare umidità durante la fase di polimerizzazione. Tuttavia anche questa resina richiede grandi quantità di solventi per poterla rendere lavorabile. L'indurimento si ottiene attraverso un primo riscaldamento

da temperatura ambiente fino a 200°C sotto una leggera pressione di contatto e una successiva cottura a circa 290°C. Le prestazioni alle elevate temperature sono leggermente inferiori rispetto il precedente adesivo, si parla di resistenza a temperature di circa 260°C in esposizione continua fino a 320°C per brevi esposizioni.

ADESIVO BISMALIMIDICO: l'adesivo bismaleimidico è utilizzato in tutti quei casi in cui è richiesta resistenza elevata alle alte temperature che gli epossidici non possono fornire ma senza arrivare alle prestazioni estreme del poliimidico. Sono piuttosto rigidi di conseguenza presentano una resistenza ai carichi di peeling non molto elevata. La resina bismaleimidica resiste a temperature di circa 200°C in servizio continuo, mentre per esposizioni brevi si arriva a circa 230°C. Sono resine più facili da lavorare rispetto le poliimidiche e richiedono anch'esse un doppio ciclo di cura composto da un primo riscaldamento a 180°C sotto pressione per qualche ora ed un successivo trattamento alla massima temperatura di esercizio senza l'aggiunta di pressione.

ADESIVO POLIBENZIMIDAZOLE: come tutti gli adesivi della famiglia dei poliimidici, anche il polibenzimidazole offre resistenza alle elevate temperature. Sono impiegati in tutti quei casi in cui è richiesta la massima resistenza alle alte temperature per tempi limitati. L'adesivo polibenzimidazole presenta un vasto range di temperature di utilizzo che variano da -180°C fino a 500°C per tempi limitati. Anche questo adesivo produce sostanze volatili durante la polimerizzazione che possono generare delle cavità lungo lo strato adesivo, di conseguenza si è soliti compiere l'operazione sotto vuoto parziale in modo da attenuarne l'effetto. L'indurimento di questo adesivo richiede temperature di circa 290°C ÷ 320°C e pressioni di circa 200 psi, dopo il ciclo di cura è necessaria la permanenza in ambiente inerte. Le difficoltà nel processo di cura rendono questo adesivo non adatto all'incollaggio di ampie superfici. Attualmente questi adesivi non sono molto impiegati ma quasi totalmente sostituiti dai poliimidici e i bismaleimidici.

POLIESTERI

I poliesteri rappresentano una grande famiglia di adesivi che, tuttavia, possiamo dividere in due gruppi principali: i poliesteri saturi (termoplastici) e i poliesteri insaturi (termoindurenti). Le resine di poliestere insature sono utilizzate sia come sistemi adesivi che nella produzione di laminati compositi in fibra di vetro. Tipicamente si presentano come prodotto bi componente ai quali si aggiunge un catalizzatore per favorire la polimerizzazione della resina. In base al tipo di catalizzatore impiegato, l'indurimento può avvenire sia a temperatura ambiente che a temperature più basse ma comunque la polimerizzazione rimane un processo piuttosto veloce. Alcuni tipi di poliestere non riescono ad indurire se esposti al contatto con l'aria, si crea in superficie uno strato appiccicoso. Per evitare questo problema è necessario fornire una copertura all'adesivo come per esempio confinarlo tra due substrati. Gli adesivi di poliestere hanno una buona resistenza al taglio mentre la rigidità è fortemente variabile e funzione della formulazione impiegata. Gli adesivi di poliestere saturi hanno la caratteristica di essere chiari e con un'elevata stabilità del colore, per questo vengono spesso impiegati nelle apparecchiature ottiche. Si trovano spesso sotto forma di soluzione o pellicola solida ai quali si possono aggiungere agenti indurenti (isocianati) che favoriscono la reticolazione realizzando strutture più resistenti dal punto di vista meccanico e chimico. Questi adesivi hanno un'ottima resistenza al peeling perciò vengono spesso impiegati nella produzione di laminati incollati. Infatti una delle applicazioni più frequenti è l'incollaggio della lamina metallica sulla superficie di un polimero dielettrico per la produzione di schede per circuiti stampati.

ADESIVI POLIURETANICI

Gli adesivi poliuretanicici sono caratterizzati da un'elevata resistenza alle temperature criogeniche che solo adesivi siliconici possono fornire. Tuttavia a differenza dei siliconi, gli adesivi poliuretanicici, offrono una maggiore resistenza ai carichi di trazione. Tra le buone caratteristiche di questo adesivo ci sono anche una buona elasticità, resistenza all'abrasione e tenacità. Anche la resistenza ad agenti chimici è buona ma non al livello di un epossidico o di un acrilato. Tra gli aspetti negativi c'è una resistenza limitata alle alte temperature, gli adesivi poliuretanicici possono resistere fino a 140°C anche se normalmente vengono utilizzati al di sotto di 120°C. Un ulteriore elemento negativo è la degradazione dell'adesivo se esposto ad ambienti

molto umidi. Nel caso di grandi quantità di adesivo, per prevenire il contatto con l'umidità si mantengono coperti i componenti con dell'azoto prima che essi vengano dosati e miscelati. Il poliuretano gode di grande bagnabilità, ne consegue la propensione ad aderire su substrati plastici. Questa proprietà, unitamente all'elasticità, rende l'adesivo uno dei più impiegati nel settore automobilistico dove le componenti plastiche da unire sono numerose. In commercio sono disponibili sotto varie forme: solidi, a base di solvente, monocomponente, bi-componente. L'indurimento dipende dal tipo di formulazione, per gli adesivi poliuretanici monocomponente l'indurimento avviene per mezzo del contatto con l'umidità sia a temperatura ambiente che attraverso apporto di calore. Per gli adesivi bi-componente la velocità d'indurimento dipende dal tipo di catalizzatore e può variare da qualche minuto a svariate ore. Recentemente sono stati sviluppati adesivi hot-melt poliuretanici che offrono buone proprietà adesive e allungamenti dell'ordine di 500% ÷ 700%. Essi vengono applicati attraverso il riscaldamento della resina proprio come accade per un normale hot-melt termoplastico, tuttavia il contatto con l'umidità presente sul substrato e con l'aria circostante innesca una reazione di polimerizzazione trasformando il materiale termoplastico in un termoindurente. Una volta applicato l'adesivo hot-melt poliuretanico le superfici vanno unite rapidamente. La resistenza al verde della giunzione è garantita già dopo qualche secondo mentre per il completo indurimento è necessario un tempo compreso tra un giorno e tre giorni. Le prestazioni in termini di resistenza meccanica e a fattori ambientali superano in valori raggiunti da hot-melt convenzionali.

ADESIVI CIANOACRILICI

Gli adesivi cianoacrilici ebbero una grande espansione commerciale negli anni '70. Quest'adesivo è caratterizzato da una polimerizzazione molto veloce e da ottime proprietà meccaniche. La polimerizzazione così veloce avviene grazie ad un meccanismo anionico che richiede la presenza di umidità, naturalmente presente sulle superfici dei substrati. Il meccanismo di polimerizzazione trova difficoltà nel svilupparsi se il substrato è di natura acida (legno, sughero, carta) o si sviluppa male se la superficie è bagnata. Per ottenere il completo indurimento è necessario che l'umidità penetri completamente nello strato adesivo, questo provoca la dipendenza della velocità di polimerizzazione dallo spessore di adesivo. Tipicamente la forma più

comune di quest'adesivo è liquido monocomponente. La viscosità di tale liquido è prossima a quella dell'acqua perciò nella fase d'incollaggio gli spessori di adesivo che si formano sono molto esigui perciò richiedono tempi dell'ordine dei secondi per polimerizzare completamente. Recentemente, gli adesivi cianoacrilici, sono stati sviluppati anche sottoforma di gel per impieghi particolari. Tra le proprietà più importanti è giusto sottolineare la facilità di utilizzo e la possibilità di incollare substrati molto diversi come: plastiche, gomme, metalli, ceramiche, pelle. Anche quest'adesivo ha degli svantaggi come la resistenza limitata alle alte temperature, bassa resistenza ai carichi di peeling, scarsa resistenza all'umidità ed elevata rigidità, anche se quest'ultima è stata limitata in alcune formulazioni caricate con elastomeri. Tipicamente sui substrati più comuni non sono richiesti attivatori o primer, contrariamente a quanto accade per substrati di natura acida i quali bloccherebbero la polimerizzazione se non trattati preventivamente.

ACRILICI MODIFICATI

Gli adesivi acrilici modificati fanno parte degli adesivi termoindurenti e spesso vengono chiamati acrilici reattivi per distinguerli da un'altra categoria di resine acriliche della classe dei termoplastici. Vennero sviluppati all'inizio degli anni '70 come l'alternativa più valida all'adesivo principe che a quel tempo era l'epossidico. L'acrilico modificato ha la caratteristica di essere un bi-componente che non richiede un contatto intimo tra resina e attivatore, è sufficiente la sovrapposizione dei due. Di conseguenza una delle tecniche di giunzione più comune prevede di cospargere con metodi classici come: rullo, spatola, spray, la superficie dei due elementi da unire che eventualmente possono essere messi da parte e conservati per diverso tempo. Nel momento in cui si desidera eseguire l'incollaggio si prendono gli elementi e si cospargono di resina come se fosse un adesivo monocomponente, dopodiché si può procedere all'assemblaggio del giunto. In alternativa si può cospargere un elemento di attivatore e uno di resina per poi assemblare, ma questa tecnica è meno diffusa e impiegata solo nei casi d'incollaggio di grandi superfici. La forma fisica dell'adesivo acrilico modificato è quindi un liquido, bi-componente, con elevata viscosità che permette la riempitura di giochi rilevanti. L'indurimento non richiede particolari condizioni, solo un tempo variabile tra i due minuti e un'ora a temperatura ambiente.

Sotto il punto di vista combinato di resistenza e di processabilità gli adesivi acrilici modificati sono da considerarsi migliori rispetto ai più comuni adesivi come: cianoacrilati, anaerobici, epossidici, uretanici speciali.

ADESIVI ELASTOMERICI

Si è soliti pensare agli adesivi elastomerici come sostanze la cui funzione è esclusivamente sigillare componenti per garantire isolamento e tenuta. Questa idea è giusta in parte poiché le grandi deformazioni che possono subire, unitamente alla viscosità elevata, li rendono adatti a riempire giochi elevati e garantire una buona mobilità delle parti. Tuttavia alcuni elastomeri possono essere utilizzati con funzione strutturale oltre che di sigillatura, in particolare parliamo di neoprene, nitrile, polisolfuro e silicone. Vediamo una breve descrizione dei quattro:

POLICLOROPRENE (NEOPRENE): il neoprene è un adesivo elastomerico dotato di buone proprietà meccaniche. Frequentemente è impiegato con solventi organici e fornito come adesivo a contatto (a spruzzo o pennello) o come mastice estrudibile. L'incollaggio avviene cospargendo l'adesivo sulle superfici del giunto, si lascia evaporare il solvente e poi si procede all'unione forzata tramite pressione. L'adesivo neoprene ha la caratteristica di esibire subito un livello, seppur basso, di forza adesiva che impedisce spostamenti nel caso in cui i giunti siano disallineati. Una giunzione in neoprene ha la caratteristica di assorbire bene le vibrazioni, garantire una elevata resistenza alla trazione e un ottimo comportamento a fatica. Tuttavia per applicazioni strutturali, l'adesivo neoprene, non sarebbe particolarmente adatto poiché la resistenza a taglio non è eccezionale. Si lavora su questo aspetto includendo delle resine sintetiche alla formulazione. Si trovano perciò adesivi in neoprene strutturali ai quali sono state aggiunte resine fenoliche permettendo all'adesivo un miglioramento delle proprietà meccaniche unitamente ad una stabilità al calore migliorata. Gli adesivi in neoprene strutturali sono stati sviluppati specificatamente per realizzare ottime giunzioni metallo su metallo. Le giunzioni migliori si ottengono per substrati metallici in alluminio, magnesio, acciaio, acciaio inox.

ACRILONITRILE-BUTADIENE (NITRILE): meno popolare del neoprene, la gomma nitrilica è costituita da copolimeri di butadiene e acrilonitrile. Il nitrile è molto compatibile con riempitivi e modificatori perciò le proprietà possono essere modificate con facilità. Solitamente l'adesivo nitrilico è disponibile sia sottoforma di soluzione con solvente sia come film adesivo attivabile mediante la pressione. L'indurimento richiede temperature di circa 150 per 20 minuti anche se con indurimenti a temperature superiori si ottiene una migliore resistenza termica. Le caratteristiche migliori di questo adesivo sono la resistenza a sostanze esterne come olio, grasso, acqua e molti solventi organici e buone proprietà adesive anche se la maggior parte delle formulazioni non si adatta ad impieghi strutturali. Tuttavia esiste una formulazione di adesivo strutturale nitrilico che contiene resine fenoliche, le quali garantiscono all'adesivo ottime proprietà meccaniche su giunzioni metalliche.

POLISOLFURO: dotato di bassa resistenza meccanica ed alta elasticità, l'adesivo polisolfuro è considerato molto spesso più un sigillante che un vero e proprio adesivo. È molto viscoso e si applica attraverso una pistola estrusore. Solitamente necessita l'utilizzo di un catalizzatore che permette l'indurimento a temperatura ambiente anche se la resistenza massima si raggiunge dopo 3-7 giorni. L'unica proprietà degna di nota è la resistenza agli agenti esterni quali acqua, solventi organici, oli, grassi e acqua salata. È stato introdotto negli adesivi strutturale solo perché viene utilizzato insieme alla resina epossidica per mitigarne la rigidità. L'adesivo che si ricava è utilizzato nelle giunzioni in alluminio e garantisce buone prestazioni in termini di durata anche se la resistenza a trazione risulta inferiore rispetto la resina epossidica originaria.

SILICONE: gli adesivi siliconici si fanno notare per una bassa resistenza a taglio ma alta resistenza a peeling e alle elevate temperature. Tipicamente li possiamo trovare in tre forme: soluzione con solvente, liquido mono-componente e bi-componente. La formulazione con solvente indurisce grazie alla pressione generata nel contatto, e può unire una grande varietà di substrati. Tuttavia il giunto che ne risulta non ha grande resistenza a peeling ma solo resistenza alle elevate temperature. L'energia superficiale di questa forma di adesivo è bassa perciò è adatto all'incollaggio di materie plastiche. In commercio è reperibile la formulazione sensibile alla pressione anche sottoforma di film attivabile con la pressione. La forma liquida mono-

componente è anche detta gomma siliconica RTV (room-temperature-vulcanizing), essa indurisce a temperatura ambiente grazie all'umidità dell'aria formando giunzioni con elevata resistenza a peeling. L'inconveniente di questa formulazione è la produzione di sottoprodotti acidi nella reazione di polimerizzazione che possono corrodere i materiali metallici di cui sono formati gli aderenti. Per eliminare questo inconveniente sono stati introdotti gli adesivi siliconici liquidi a due componenti che non liberano sottoprodotti di polimerizzazione acidi. Gli adesivi siliconici RTV bicomponente induriscono totalmente con un ciclo di cura per tempo prolungato a 230°C ed un passaggio breve a 280°C. I siliconi RTV aderiscono bene a substrati quali metalli puliti, vetro, legno, ceramica e molte plastiche.

2.5 Gli adesivi anaerobici (Loctite 648)

La storia degli adesivi anaerobici risale agli anni '40 quando due ricercatori scoprirono che riscaldando a 70°C monomeri di diacrilato con una corrente d'aria si otteneva un composto che polimerizzava spontaneamente a temperatura ambiente. Qualche anno dopo si cercò di eliminare la fase di ossigenazione dei monomeri per ottenere un adesivo d'interesse commerciale. Il professore Vernon Kriable osservò che ponendo a contatto la sostanza con un materiale metallico attivo in assenza d'aria, l'ossigeno intrappolato si consumava dando origine alla polimerizzazione. Da qui il nome di anaerobico, cioè senza ossigeno. Tuttavia i primi adesivi non spiccavano per ottime caratteristiche meccaniche, di conseguenza furono studiate formulazioni alternative per aumentare tali proprietà senza perdere la qualità fondamentale di polimerizzazione anaerobica. Alla formulazione furono aggiunti metacrilati uretanici creando una nuova categoria di adesivi degni dell'aggettivo strutturali. Sono in genere utilizzati per l'unione di elementi cilindrici, bloccaggio di cuscinetti su alberi, fissaggio di boccole e bronzine, come dispositivo anti svitamento di viti e bulloni, tenuta di parti flangiate. Il fatto che l'adesivo sia mono componente con viscosità relativamente bassa e che polimerizzi in tempi ragionevolmente brevi li rende molto utilizzabili in processi industriali garantendo prestazioni a volte superiori alle resine epossidiche. I substrati migliori su cui applicare l'adesivo sono quelli metallici, ciò nonostante i materiali metallici possono comportarsi in maniera differente. Dividiamo i substrati metallici in attivi e passivi:

- Si dicono attivi quando il substrato è ricco di ioni che favoriscono la velocità della polimerizzazione e comprendono materiali quali: acciaio, bronzo, ottone e rame.
- I materiali passivi permettono comunque la polimerizzazione ma questa avviene a velocità molto più lenta e la resistenza finale risulta più bassa. Tra i materiali passivi abbiamo: acciaio molto legati e ad alto tenore di cromo, alluminio, nichel, zinco, stagno, oro, strati di ossido, rivestimenti anodici, ed acciaio inossidabile.

Esiste anche una terza classe di substrati definiti inerti i quali non permettono la polimerizzazione della resina, tuttavia è possibile applicare dei trattamenti alle superfici per permettere l'indurimento. Gli adesivi anaerobici sono caratterizzati da un costo elevato che, tuttavia è mitigato dal fatto che è necessario solo un piccolo velo di colla per ottenere grande tenuta. La velocità di polimerizzazione dipende, come citato in precedenza, dal materiale del substrato ma anche dallo spessore di adesivo, dalla temperatura e dall'utilizzo di primers. Lo spessore incide sulla velocità di polimerizzazione perché, a causa di giochi troppo elevati, si perde l'effetto anaerobico, in genere è difficile riempire giochi superiori a 3 mm. L'adesivo anaerobico può indurire sia a temperatura ambiente che con apporto di calore se si desidera limitare il tempo di polimerizzazione. Anche i primers o attivatori accelerano la polimerizzazione ma in genere non si utilizzavano se gli aderenti sono metalli attivi. L'adesivo anaerobico spicca anche per elevata resistenza ad agenti chimici e resistenza a temperature piuttosto elevate, circa 150°C in servizio continuo.

ADESIVO ANAEROBICO LOCTITE 648

Di seguito è riportato il data sheet dell'adesivo utilizzato nelle prove, i dati forniti dal produttore sono solo a titolo informativo ma comunque da considerarsi attendibili. Tuttavia è responsabilità dell'utilizzatore finale determinare la validità all'uso di tale adesivo.

L'adesivo loctite 648 è un adesivo della famiglia degli acrilici di natura metacrilato uretanico, è un liquido monocomponente di colore verde, fluorescente alla luce ultravioletta. Ha una viscosità bassa che facilita l'applicazione su componenti

solitamente cilindrici. È dotato di una elevata resistenza meccanica che garantisce grande adesione anche sotto urti e vibrazioni.

Proprietà del prodotto non polimerizzato:

- Peso specifico a 25°C: 1,13
- Viscosità, Brookfield-RTV, 25°C, mPa•s: 400-600
Girante 2, velocità 20 rpm
- Viscosità EN 12092-MV, 25°C, dopo 180 s, mPa•s: 300-600
- Velocità di deformazione 129 s⁻¹

Velocità di polimerizzazione:

- La velocità di polimerizzazione dipende dal tipo di substrato, di seguito è riportato il grafico di sviluppo resistenza a taglio di provini secondo normativa ISO 10123 in funzione del tempo di polimerizzazione.

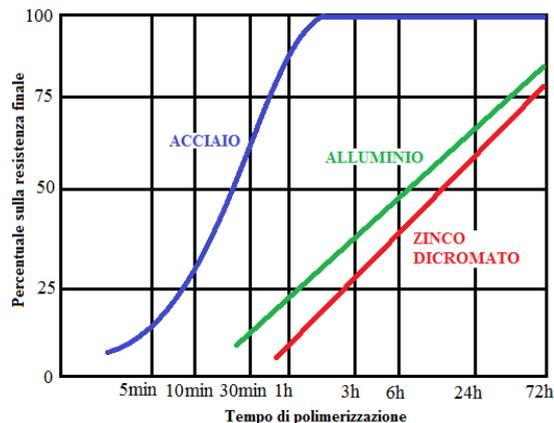


Figura 2. 11 Resistenza in funzione del substrato

- La velocità di polimerizzazione dipende dal gioco, il grafico sottostante riporta la resistenza a taglio secondo ISO10123 in funzione del tempo di polimerizzazione per giochi differenti

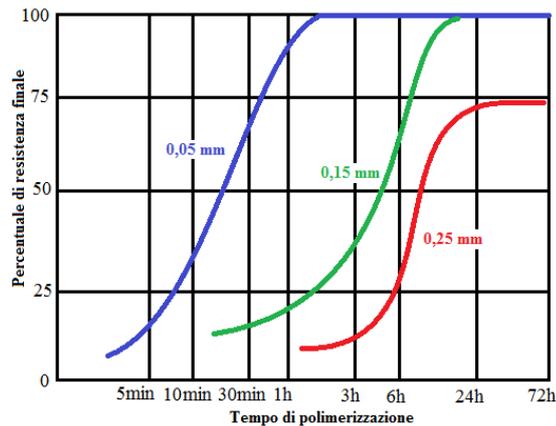


Figura 2. 12 Tempo di polimerizzazione in funzione del gioco

- La velocità di polimerizzazione dipende dalla temperatura, il grafico sottostante riporta la resistenza a taglio secondo ISO 10123 in funzione del tempo di polimerizzazione per temperature differenti

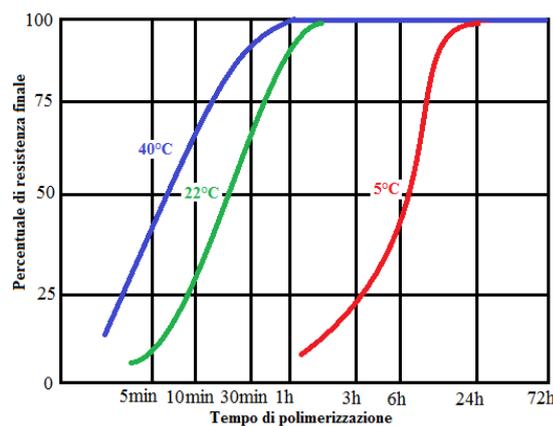


Figura 2. 13 Tempo di polimerizzazione in funzione della temperatura

- La velocità di polimerizzazione può essere aumentata nel caso di substrati metallici passivi o nel caso di giochi elevati, di seguito è riportato il grafico della resistenza a taglio secondo ISO 10123 in funzione della velocità di polimerizzazione per diversi attivatori su provini in acciaio zinco dicromato

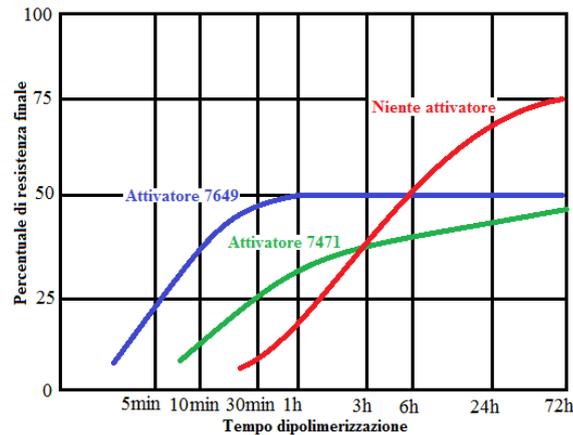


Figura2.14 Polimerizzazione in funzione dell'attivatore

Proprietà tipiche del prodotto polimerizzato:

- Proprietà fisiche:

Coeff. di dilatazione termica, ASTM D 696: $80 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Coeff. di conducibilità termica, ASTM C 177: 0,1 W/mK

Calore specifico: 0,3 kJ/KgK

Prestazioni dell'adesivo polimerizzato:

- Polimerizzazione per 15 minuti a 22°C
Resistenza a taglio secondo ISO 10123 materiale acciaio: $\geq 13,5 \text{ N/mm}^2$
- Polimerizzazione per 24 ore a 22°C
Resistenza a taglio secondo ISO 10123 materiale acciaio: $\geq 25 \text{ N/mm}^2$

Resistenza ai fattori ambientali:

- Il grafico sottostante mostra la resistenza a taglio secondo ISO 10123 in funzione della temperatura, materiale acciaio

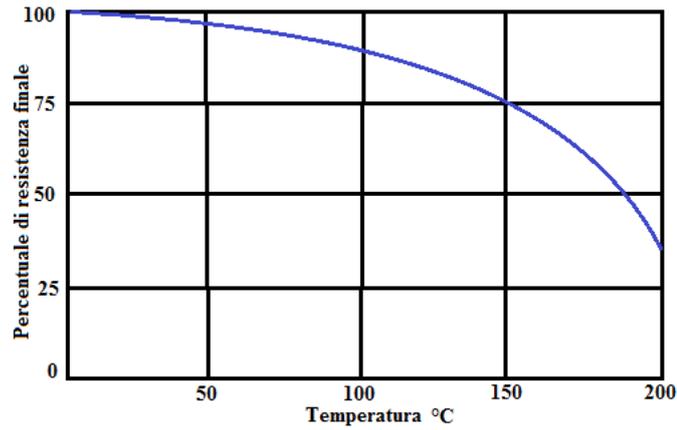


Figura 2.15 Resistenza in funzione della temperatura

- Il grafico sottostante mostra la resistenza a taglio secondo ISO 10123 in funzione della temperatura e tempo d'invecchiamento, provini in acciaio testati a 22°C

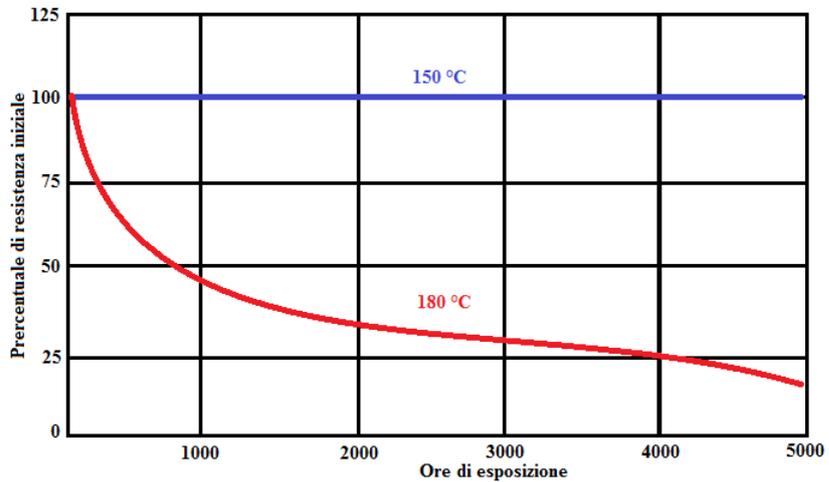


Figura 2.16 Resistenza all'invecchiamento

- La tabella sottostante riporta la resistenza dell'adesivo agli agenti chimici, resistenza a taglio secondo ISO 10123 e testato a 22°C

		% di resistenza iniziale		
AMBIENTE	°C	100h	500h	1000h
Olio motore	125	100	100	100
Benzina verde	22	100	100	100
Liquido dei freni	22	100	100	100
Acqua/glicole 50%	87	100	90	75

Etanolo	22	100	100	100
Acetone	22	100	100	100

Figura 1.17 Tabella resistenza agli agenti chimici

Istruzioni per l'applicazione:

- Per ottenere le prestazioni massime in termini di adesione, trattare le parti con pulitori (LOCTITE 7068) e lasciare evaporare il solvente.
- Se il metallo è inattivo la polimerizzazione sarà lenta, per accelerarla applicare un attivatore (LOCTITE 7471 o 7649).
- Per accoppiamenti con gioco applicare l'adesivo sia al perno che alla boccola e assemblare le parti con leggero movimento rotatorio per ottenere la migliore bagnabilità.
- Per accoppiamenti ad interferenza applicare l'adesivo sia al perno che alla boccola e procedere all'assemblaggio alla pressa.
- Per accoppiamenti a caldo applicare l'adesivo al perno, scaldare la boccola e procedere all'assemblaggio.
- I componenti non possono essere sollecitati prima del completamento della polimerizzazione.

Istruzioni per lo stoccaggio:

Si consiglia di conservare il prodotto in luogo chiuso e asciutto. Per uno stoccaggio a lungo termine la temperatura ottimale è tra gli 8°C e 21°C, se la temperatura di immagazzinamento è inferiore a 8°C o superiore a 28°C si potrebbe avere l'alterazione delle proprietà meccaniche dell'adesivo. Non rimettere l'adesivo utilizzato nel contenitore originale.

Capitolo 3

Normativa ISO 10123 su giunzioni pin-collar

3.1 La normativa ISO 10123

SCOPO DELLA NORMATIVA: la norma internazionale definisce un metodo per la determinazione della resistenza al taglio di giunti cilindrici formati da perno (pin) e boccia (collar) incollati con adesivi anaerobici. Tuttavia il metodo è utilizzabile anche con adesivi di diversa natura. Il test è utilizzato come classificazione o come controllo qualità degli adesivi. I risultati dei test non rappresentano in maniera fedele le prestazioni dei componenti in uso tantomeno i dati raccolti possono essere utilizzati nella progettazione delle giunzioni. Per ottenere dei dati utili alla progettazione è necessario che il test sia riprodotto con le specifiche reali dei componenti. Per completare la comprensione della seguente normativa è necessario far riferimento ad altre normative aggiuntive che sono:

- ISO 683-9:1988, Acciai da bonifica, acciai legati, acciai lavorati a freddo.
- ISO 4588:1989, Adesivi - Preparazione di superfici metalliche per giunzioni incollate.
- ISO 7500-1:1986, Materiali metallici - Verifica delle macchine per prove statiche di trazione monoassiali – Parte 1: Macchina per prova di trazione.

PRINCIPIO DI BASE: si determina attraverso una macchina per prove di trazione o compressione il valore statico di forza necessaria per rompere la giunzione. Dal valore di forza ottenuto si risale al carico di rottura statico a taglio dell'adesivo.

APPARECCHIATURE: per eseguire la prova di spiantaggio registrando il valore massimo di forza è necessaria una macchina universale per prove di trazione e compressione in accordo con la norma ISO 7500-1. La forza necessaria allo spiantaggio deve rimanere tra il 10% e 80% del valore di fondo scala. Inoltre la macchina dovrà avere una buona sensibilità e un'elevata frequenza di campionamento per non commettere errori nella registrazione del valore di forza massima alla rottura. Attenendosi alle specifiche la forza registrata differirà da quella

reale per non più del 1%. Se si dispone di una macchina che esegue unicamente prove di trazione è lecito utilizzare una gabbia (figura 3.1) per ottenere in maniera indiretta il movimento di compressione.

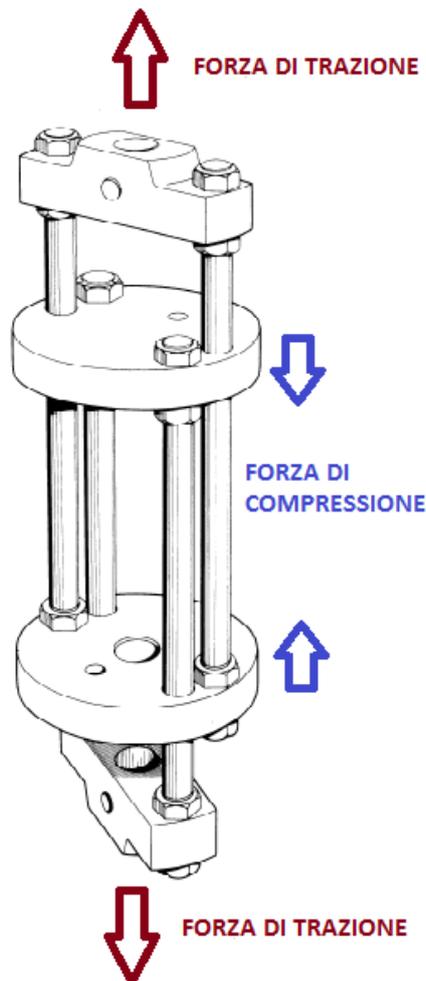


Figura 3. 1 Apparecchiatura di conversione trazione-compressione

PREPARAZIONE DEI PROVINI: si devono assemblare almeno 5 provini che sono realizzati secondo queste specifiche:

- I perni (pin) sono di diametro $12,675^{+0}_{-0,025}$ mm (figura 3.2).
- Le boccole (collar) hanno diametro interno di $12,700_{-0}^{+0,025}$ mm con una larghezza di $11,10 \pm 0,05$ mm (figura 3.2).

Entrambi i componenti devono presentare una rugosità superficiale compresa tra 0,8 μm e 1,6 μm . Il materiale di cui sono costituiti perno e collare dipende dal test che si vuole eseguire perciò v'è annotato nella relazione della prova.

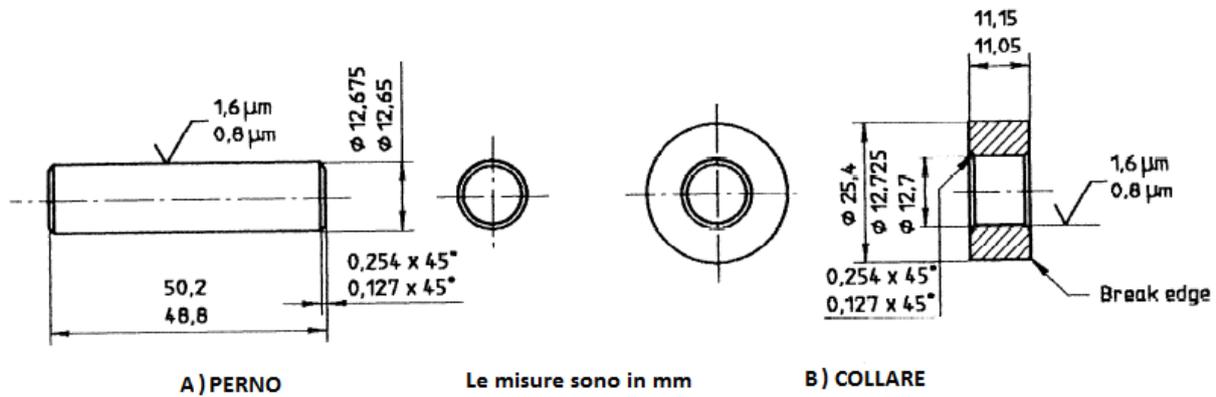


Figura 3. 2 Dimensioni di pin e collar unificati

Gli oli refrigeranti utilizzati nella lavorazione dei campioni devono essere completamente solubili dal solvente impiegato nell'operazione di sgrassaggio e non devono contenere lanolina. Dopo aver realizzato i campioni è necessario sottoporli ad un processo di pulitura per eliminare le tracce di oli della lavorazione. La pulitura si realizza con un solvente dopodiché i provini sgrassati vengono riposti in un essiccatore (per l'evaporazione completa del solvente) ad una temperatura di $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ in conformità con la normativa riguardo la preparazione delle superfici ISO 4588. I campioni sgrassati vanno utilizzati entro quattro giorni altrimenti devono essere scartati poiché l'ossidazione prodotta in superficie influisce sul risultato della prova. È consentito immergere e lavare nel solvente i componenti più ostici da pulire prima del processo di evaporazione del solvente. Non si deve applicare del primer o attivatori alle superfici da collegare, in caso contrario si deve annotare nella relazione della prova quale prodotto e in che modalità è stata trattata la superficie dei campioni in esame. Dopo la completa evaporazione del solvente si può procedere con l'incollaggio delle parti avendo cura di eseguire un pre-assemblaggio di verifica. Se il collare scivola nel perno senza ostacoli si possono disaccoppiare le parti e procedere all'applicazione dell'adesivo su una estremità del perno e all'interno del collare. Si procede all'inserimento del perno nel collare con un leggero movimento elicoidale fino al completo accoppiamento in modo da poter garantire la completa bagnabilità delle superfici a contatto. Appoggiare l'accoppiamento dalla parte del collare di modo che non si verifichi il disassemblaggio. Se nell'assemblaggio non si genera un

cordone di adesivo lungo la circonferenza interna del collar, applicare una quantità superiore di adesivo. L'indurimento deve avvenire secondo le modalità indicate dal produttore della colla, in genere per adesivi anaerobici applicati su superfici in acciaio la polimerizzazione richiede un tempo di 24 ore a temperatura ambiente.

DETERMINAZIONE DELLA TENSIONE STATICA DI TAGLIO: la determinazione del valore di tensione statica a taglio avviene con questa modalità; si posiziona il provino pin-collar in un supporto di guida in acciaio come in figura 3.3.

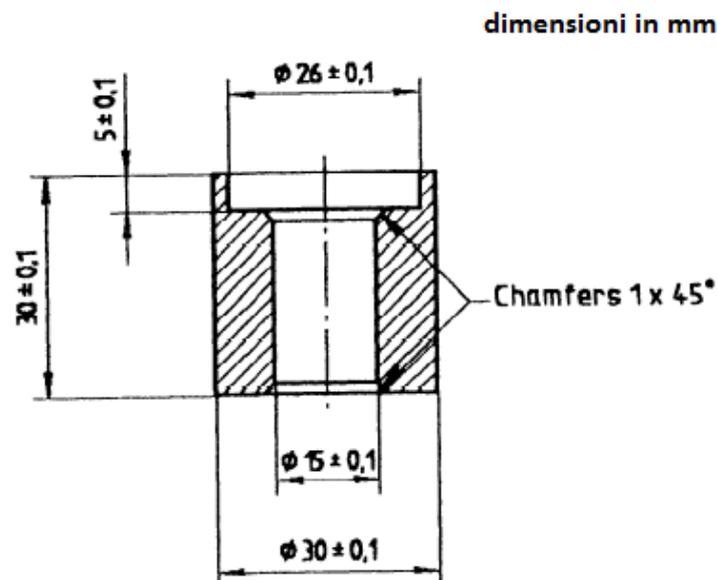


Figura 3. 3 Supporto di guida per lo sfilamento.

Si fa partire la prova con una velocità di movimento della testa della macchina di circa 1 mm/min ÷ 2 mm/min. Una velocità così ridotta permette di registrare in maniera più accurata il picco di tensione di rottura.

Il valore massimo del calcolo di rottura in Newton determina il valore di tensione statica di taglio secondo questa relazione:

$$\tau = \frac{F}{S}$$

Dove:

- F = forza massima registrata in Newton.
- S = superficie di accoppiamento in mm².

- τ = tensione statica di rottura a taglio N/mm².

La precisione di questo test non è definita con chiarezza perciò i dati raccolti non devono costituire la base di partenza per il progetto di giunzioni incollate.

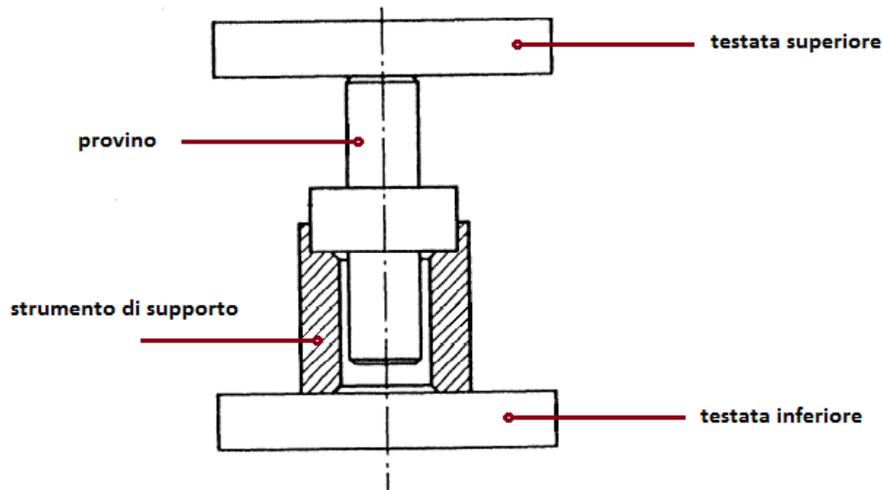


Figura 3. 4 Strumento per la prova di sfilamento

INFORMAZIONI DA RIPORTARE: al termine delle prove sui campioni è necessario completare una scheda in cui vanno riportate le seguenti informazioni:

- riferimento alla normativa appena descritta.
- Completa descrizione dell'adesivo utilizzato, tipologia, forma fisica, produttore, data di produzione, codice del prodotto.
- Completa descrizione del materiale delle giunzioni e della modalità di pulitura superficiale.
- Modalità di applicazione dell'adesivo e modalità di assemblaggio dei campioni.
- Numero di campioni testati.
- Velocità di avanzamento della testa della macchina.
- Valore medio e deviazione standard del valore di carico massimo e della tensione massima statica a taglio.

3.2 Specifiche dei provini

I provini utilizzati nelle prove sono di due tipologie, pin-collar con gioco e pin-collar ad interferenza. Di seguito si riportano di entrambi i disegni con quote dei due provini.

PROVINO PIN-COLLAR CON GIOCO

(le misure sono in mm)

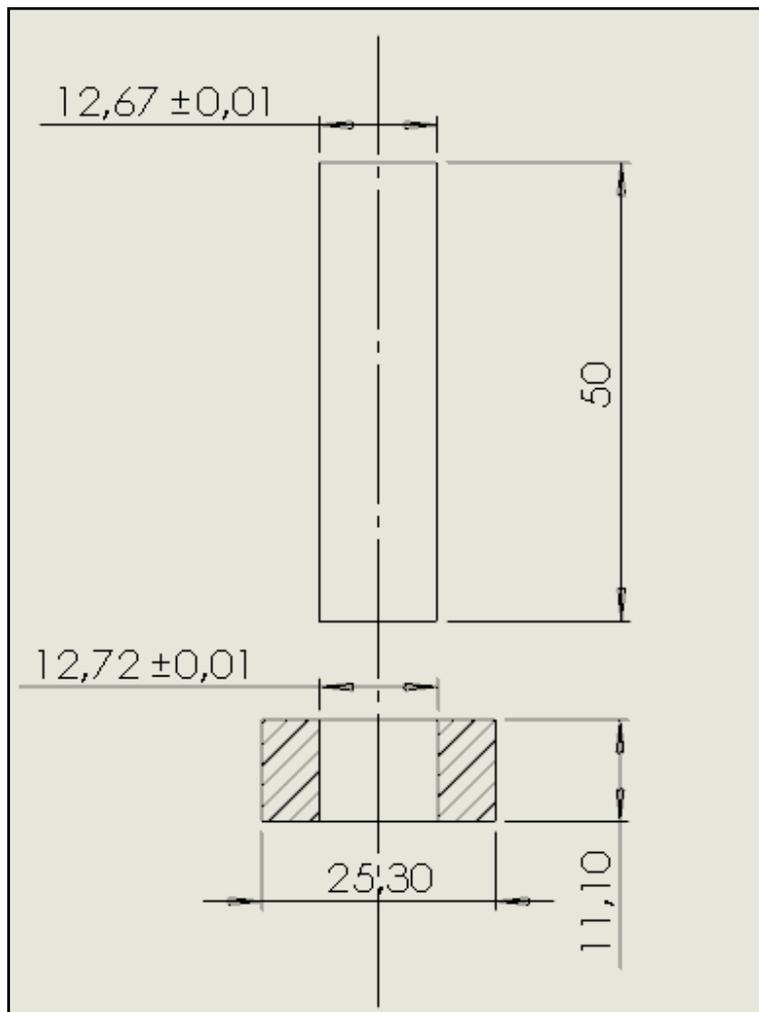


Figura 3. 5 Provino pin-collar con gioco

PROVINO PIN-COLLAR AD INTERFERENZA

(le misure sono in mm)

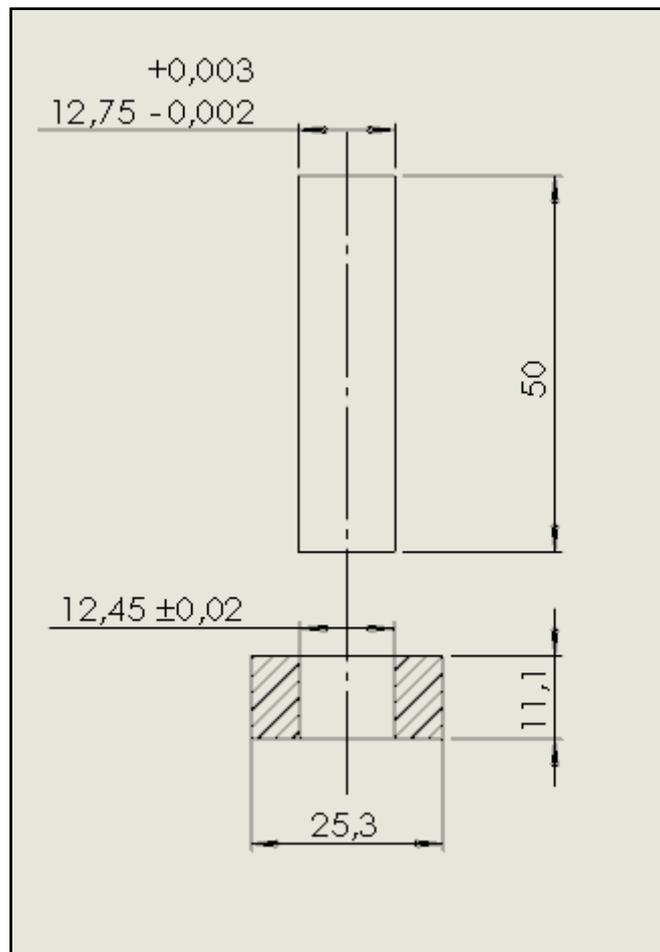


Figura 3. 6 Provino pin-collar ad interferenza

Entrambi i provini sono realizzati in acciaio C40 secondo UNI EN 10277-2 e presenta le seguenti caratteristiche:

- Composizione chimica:

	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Ni%	Mo%	Cr+Mo+Ni%
MIN	0,37	-	0,5	-	-	-	-	-	-
MAX	0,44	0,4	0,8	0,04	0,04	0,4	0,4	0,1	0,63

Figura 3. 7 Tabella composizione chimica acciaio C40

- Proprietà meccaniche:

Trattamento	diametro (mm)	Re (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)	A min. %	HB max.	E (N/mm ²)	α_h (1/K)	α_c (1/K)
Bonificato	16	490	700÷840	15	190	205000	0,000011	0,000009
	16÷40	420	640÷780	17	190			
	40÷100	370	590÷740	18	190			
Normalizzato	16÷100	325	570÷720	18				

Figura 3. 8 Proprietà meccaniche acciaio C40

Capitolo 4

Le prove sperimentali

4.1 Fasi delle prove

In questo capitolo saranno descritte le procedure seguite nello sviluppo dei test sui campioni pin-collar. È importante descrivere accuratamente tutte le operazioni perché piccole variazioni nella procedura di preparazione dei provini possono influenzare in maniera importante il dato numerico di tensione statica a taglio. Si possono dividere le operazioni nei seguenti gruppi:

- misurazione dei provini
- trattamento di sgrassaggio delle superfici
- assemblaggio
- prove di sfilamento

di seguito sono riportate in dettaglio le varie fasi.

MISURAZIONE DEI PROVINI

La prima operazione da eseguire è la rilevazione della geometria dei provini. Nonostante la geometria sia legata alle specifiche fornite dalla normativa, la lavorazione di tornitura non produce oggetti di dimensione costante ma con dimensioni che oscillano nel campo di tolleranza specificato. È importante eseguire la misurazione in maniera molto accurata poiché, la rilevazione dell'esatta interferenza, ci permette di calcolare il contributo preciso dovuto all'accoppiamento forzato. Le grandezze da rilevare sono:

- diametro del pin D_{Ia}
- diametro interno del collar D_{Ai}
- diametro esterno del collar D_{Aa}
- lunghezza d'accoppiamento L_f
- rugosità

Di ogni grandezza si rilevano tre misure in tre posizioni differenti per poi considerare la media. Questa procedura mi permette di mitigare eventuali errori di cilindricità dei provini e, contemporaneamente, limitare gli eventuali errori accidentali nell'operazione di misura. La misura del diametro interno del collar ed esterno del pin serve per poter calcolare la quantità di gioco o interferenza dei provini. La misura dei diametri esterni dei collar serve per poter valutare il Q_A e di conseguenza la pressione di contatto. La lunghezza L_f di accoppiamento si utilizza per stabilire l'area di contatto tra pin e collar mentre la rugosità ci può dare l'indicazione dell'attrito coulombiano che genera la forza assiale di spiantaggio. La misurazione viene effettuata attraverso l'utilizzo di tre strumenti: il micrometro per esterni, il micrometro per interni e l'alesometro. La misura è effettuata con questa modalità: si parte prendendo una coppia formata da pin e collar, sulle superfici gli viene impresso numero e tipologia (gioco o interferenza) utilizzando una penna elettronica (figura 4.1).



Figura 4. 1 Marcatura dei provini

Dopo la marcatura si eseguono le misurazioni dei provini rilevando, per prima cosa le dimensioni del pin con l'utilizzo del micrometro da esterni con campo di misura 0 – 25 mm. Si posiziona il pin all'interno del micrometro avendo cura nel centrare il

provino tra le facce di contatto (figura 4.2). Si eseguono tre rilevazioni in per tre posizioni angolari differenti e si annotano i dati.

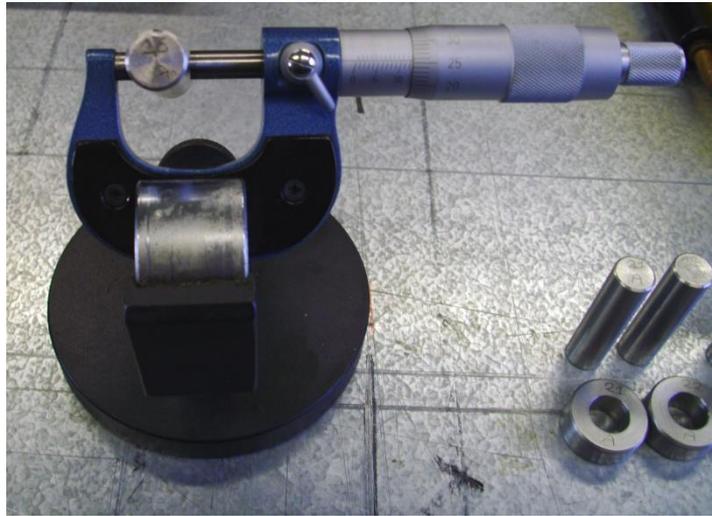


Figura 4. 2 Rilevazione dimensione del pin

Per la rilevazione della misura esterna del collar D_{Aa} si esegue lo stesso procedimento utilizzato nella misurazione del pin (figura 4.3).

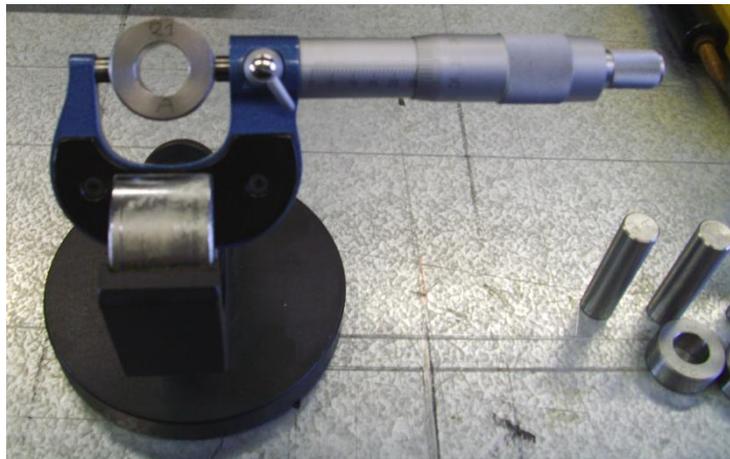


Figura 4. 3 Misurazione del diametro esterno del collar

Sfruttando sempre il micrometro per esterni, si esegue la misurazione della lunghezza d'accoppiamento L_F posizionando il collar nel senso dello spessore all'interno dei piattelli del micrometro. Anche in questo caso si rilevano tre misure ruotando ogni volta il provino in tre posizioni diverse. Per la misurazione del diametro interno è necessario cambiare strumento, in questo caso si utilizza sempre un micrometro ma da interni, con campo di misura 11-16 mm, il quale è dotato di tre griffe estensibili. Si procede posizionando il collar su un piano di riscontro metallico, si inserisce il micrometro all'interno del collar finché la base, che si trova all'estremità, non poggia

completamente, a questo punto si agisce sulla ghiera che sposta la vite di manovra fino ad udire un click il quale avverte che la misura è raggiunta (figura 4.4). Si eseguono tre misure ruotando ogni volta il collar in tre posizioni angolari diverse.



Figura 4. 4 Misurazione diametro interno dei collar

I dati delle misurazioni sono statati riportati in un foglio excel il quale calcola la misura media delle grandezze rilevate per ogni coppia di provini. Il foglio è strutturato in questa maniera; nelle prime colonne sono riportate tutte le misure effettuate sui pin con media e deviazione standard. Nelle successive sono riportate le misure su collar con relative medie e deviazioni standard. Le ultime due colonne riportano, in base al tipo di provino, interferenza radiale e diametrale o gioco radiale e diametrale. Siccome questi campioni sono accoppiati ad interferenza è utile conoscere il valore di rugosità nelle superfici di accoppiamento di pin e collar. Lo strumento in grado di misurarlo è un rugosimetro digitale. Si procede alla misurazione iniziando con il posizionamento corretto dello strumento di misura, il tastatore deve poggiare sulla superficie senza che l'asta tocchi le pareti dello strumento. Regolata l'altezza, ci si assicura che lo strumento e il campione siano sufficientemente bloccati, dopodiché si procede alla misurazione premendo il pulsante apposito sulla centralina digitale (figura 4.5). Si eseguono tre misurazioni in tre posizioni diverse e si registra il valore medio di rugosità.

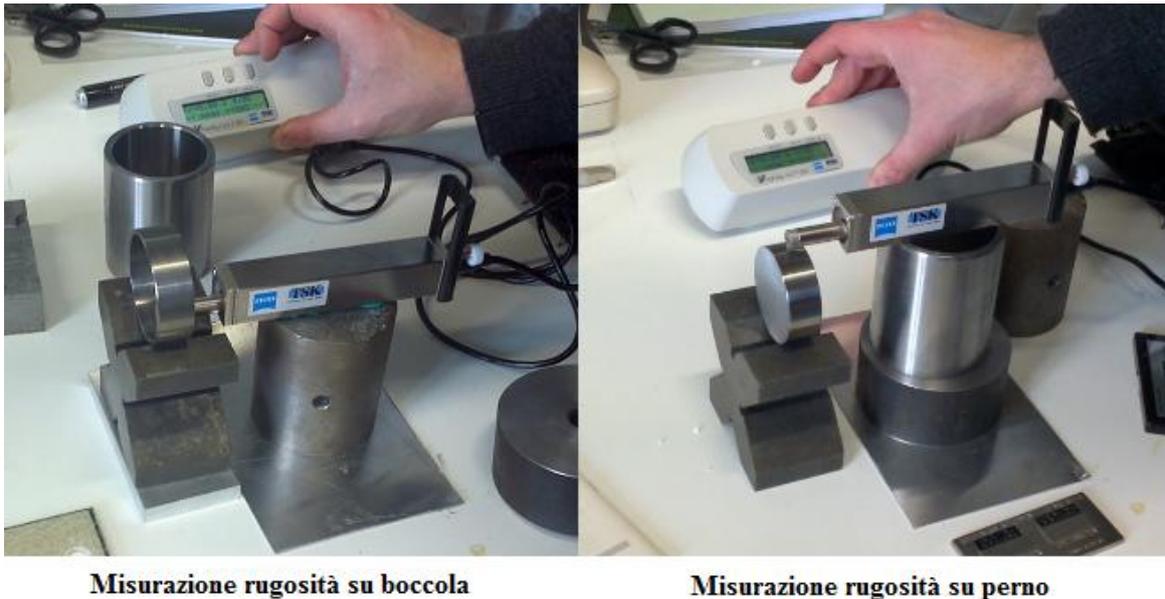


Figura 4. 5 Misure di rugosità

PULITURA DEI CAMPIONI

Per ottenere un incollaggio di qualità è necessario eliminare ogni traccia di grasso, olio e sporcizia dalle superfici di giunzione (vedi capitolo 3 “*preparazione dei provini*” pag. 68 e capitolo 2, paragrafo 2.5 “*adesivo anaerobico LOCTITE 648*” pag. 61). I residui di olio refrigerante della lavorazione di tornitura dei provini, inibisce il processo di polimerizzazione poiché gli adesivi anaerobici, per indurire, necessitano di contatto con materiale metallico attivo e assenza di ossigeno. La fase di pulizia avviene in due passaggi, la prima pulizia si effettua durante la preparazione delle coppie pin-collar. In questo passaggio si spruzza una abbondante quantità di sgrassatore LOCTITE 7063 (consigliato dalla LOCTITE stessa), e con l’ausilio di carta si strofinano le superfici dei campioni (figura 4.6).



Figura 4. 6 Pulizia dei campioni

In questo processo è necessario l'ausilio di guanti in lattice, sia per prevenire il contatto con lo sgrassatore ma anche per non intaccare i provini con il grasso naturalmente presente sulle mani. Il secondo passaggio di pulitura si esegue appena prima dell'incollaggio, si prende la coppia da incollare, la si posiziona su un panno e la si ricopre con un abbondante getto di sgrassatore (figura 4.7).



Figura 4. 7 Pulizia pre-assemblaggio coppia di pin-collar

Si attende un minuto in modo che lo sgrassatore (solvente estremamente volatile) evapori completamente dalla superficie di pin e collar o perno e boccola per poi procedere all'assemblaggio con adesivo.

ASSEMBLAGGIO

L'assemblaggio dei provini è la fase principale della prova perché replica le varie condizioni di montaggio che più frequentemente si incontrano nell'assemblaggio di accoppiamenti albero mozzo. L'assemblaggio dei campioni è molto differente a seconda del tipo di condizione che vogliamo sperimentare in più si aggiunge qualche assemblaggio standard utilizzato come sia come campione di verifica che per valutare, nel caso di accoppiamenti ibridi, il contributo di forza della sola interferenza. Gli incollaggi che sono stati sviluppati sono:

- pin-collar con gioco:
 - Assemblaggio a temperatura ambiente
 - Assemblaggio a freddo
 - Assemblaggio a caldo
- pin-collar ad interferenza:
 - Assemblaggio alla pressa a secco
 - Assemblaggio alla pressa con adesivo
- pin-collar ad interferenza (non testati):
 - Assemblaggio a caldo a secco
 - Assemblaggio a caldo con adesivo
 - Assemblaggio a freddo a secco
 - Assemblaggio a freddo con adesivo

Gli accoppiamenti sottolineati servono soltanto per valutare il contributo dell'interferenza. Vediamo in dettaglio le operazioni eseguite nel processo di assemblaggio.

PIN-COLLAR CON GIOCO A TEMPERATURA AMBIENTE

Quando il solvente utilizzato per rimuovere i residui di olio e grasso è totalmente evaporato si può procedere all'assemblaggio dei campioni. Con l'ausilio di guanti in lattice protettivi si procede applicando la colla sia all'interno del collar che sulla superficie esterna del pin cospargendola in modo che tutta la superficie d'incollaggio risulti bagnata. Si appoggia il collare su di una superficie piana e si inserisce il pin

con un leggero movimento rotatorio come se lo si stesse avvitando, finché il pin non arriva ad appoggiarsi anch'esso sulla superficie piana d'appoggio (figura 4.8).



Figura 4. 8 Assemblaggio pin-collar con gioco

La polimerizzazione necessita esclusivamente di tempo perciò i provini sono lasciati nella stessa posizione per almeno 24 ore. Questa condizione di assemblaggio replica la modalità nominale di incollaggio, la stessa che utilizza la casa produttrice dell'adesivo per fornire i valori di tensione di rottura statica a taglio riportati nella scheda tecnica dell'adesivo (vedi capitolo 2 paragrafo 2.5 “adesivo anaerobico *LOCTITE 648*” pag. 61).

PIN-COLLAR CON GIOCO ASSEMBLATI A FREDDO

Dopo che il solvente per lo sgrassaggio è evaporato si posizionano i pin all'interno di un congelatore particolare ad una temperatura di -30°C , si attende circa due ore per il raggiungimento dell'equilibrio termico tra ambiente refrigerato e pin. Quando i pin sono alla temperatura di -30°C si prende una boccola, con l'ausilio di un guanto in lattice la si cosparge con abbondante adesivo la parte interna e si posiziona l'elemento su di una superficie piana. Molto velocemente si preleva dal congelatore il pin corrispondente e lo si inserisce nel collar con un leggero movimento rotatorio come se lo si stesse avvitando finché non si arriva alla superficie piana d'appoggio (figura 4.9).

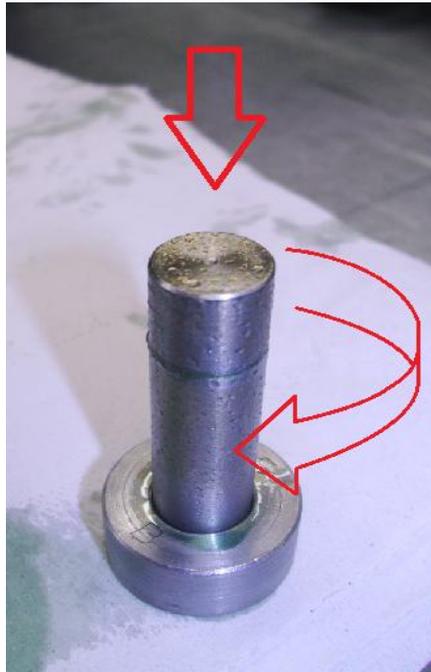


Figura 4. 9 Assemblaggio criogenico pin-collar

La velocità di polimerizzazione è legata fortemente alla temperatura, più la temperatura è bassa più è lento l'indurimento dell'adesivo, per questo si sono lasciati a riposo i provini per circa 72 ore anche se molto probabilmente sarebbe bastato un tempo inferiore. Questa condizione di assemblaggio vuole verificare la prestazione adesiva nel caso di accoppiamenti (tipicamente ad interferenza) assemblati in condizioni criogeniche.

PIN-COLLAR CON GIOCO ASSEMBLATI A CALDO

Dopo che il solvente utilizzato per lo sgrassaggio dei campioni è evaporato, si prendono i collar e si posizionano in forno a 150°C per circa un paio d'ore in modo che i collar raggiungano l'equilibrio termico (figura 4.10).



Figura 4. 10 Riscaldamento dei campioni collar in forno a 150°C

Dopo questo tempo si prende un pin e con l'ausilio di un guanto in lattice si cosparge la superficie d'accoppiamento dell'elemento, si preleva dal forno il collar corrispondente e lo si posiziona su una superficie piana. Molto velocemente si fa scivolare il pin all'interno del collar finché la testa non poggia sulla superficie piana. In questo caso il movimento rotatorio per cospargere l'adesivo non è permesso poiché la velocità polimerizzazione dipende fortemente dalla temperatura che in questa prova è elevata, tale condizione provoca il raggiungimento del bloccaggio leggero in pochissimi secondi. Come già citato in precedenza la velocità di polimerizzazione dipende fortemente dalla temperatura, in questo caso la temperatura è talmente elevata che l'indurimento ottimale si ottiene dopo solo un'ora perciò, solo per motivi precauzionali, i provini sono lasciati a riposo per circa 4 ore prima di procedere allo spiantaggio. Questa situazione di prova replica le condizioni tipiche di assemblaggio a caldo di accoppiamenti albero-mozzo ad interferenza in maniera tale da poter valutare eventuali variazioni sulla prestazione adesiva.

PIN-COLLAR AD INTERFERENZA ASSEMBLATI ALLA PRESSA

Dopo che il solvente applicato della fase di pulitura è evaporato si procede all'assemblaggio dei campioni ad interferenza con l'ausilio di una pressa oleodinamica. Si preleva una coppia pin-collar, con l'ausilio di un guanto in lattice si cosparge l'adesivo nella parte interna del collar, dopodiché lo si posiziona nel dispositivo di supporto. Si inserisce il perno nel dispositivo di supporto e si posiziona il tutto nella pressa.



Figura 4. 11 Preparazione assemblaggio pin-collar con interferenza

Nella schermata della macchina di prova si setta lo spostamento in questo modo; in maniera manuale si fa avvicinare la testata fino quasi sfiorare la parte superiore del pin, dalla misura segnalata si toglie 12 mm poiché la lunghezza d'accoppiamento è mediamente di 11,1 mm. Si fa la sottrazione perché la macchina considera lo spostamento in questa maniera: l'intera corsa è 100mm considerati in una scala che va da 50 mm, quando le testate sono nella posizione più lontana tra loro, a -50 mm quando le testate sono nella posizione più vicina tra loro. Di conseguenza la compressione è considerato un movimento che percorre la scala in senso negativo. Settato il parametro di spostamento si avvia la macchina che assembla i componenti e si ferma in automatico al completamento. Si procede in questa maniera per tutti i componenti tranne per 5 campioni che vengono assemblati saltando l'applicazione dell'adesivo e per questo denominati "a secco". Questi provini servono per valutare il contributo della sola interferenza, il valore ricavato sarà sottratto dalla forza di spiantaggio complessiva dei provini ibridi per valutare il contributo che fornisce l'adesivo. Questi provini rappresentano un caso tipico di assemblaggio albero-mozzo ad interferenza e questa prova serve per valutare l'aumento di prestazione se dall'accoppiamento tradizionale si passa ad un accoppiamento ibrido adesivo più interferenza.

PIN-COLLAR AD INTERFERENZA ASSEMBLATI A CALDO.

Dopo che il solvente utilizzato per lo sgrassaggio dei campioni è evaporato, si prendono i collar e si posizionano in forno a 150°C per circa un paio d'ore in modo che raggiungano l'equilibrio termico. Dopodiché si prende un pin e con l'ausilio di un guanto in lattice lo si cosparge con abbondante adesivo. Si posiziona il pin sulla

superficie piana, si preleva dal forno il collar corrispondente e la si fa scivolare sul pin con un leggero movimento rotatorio fino al completo assemblaggio.

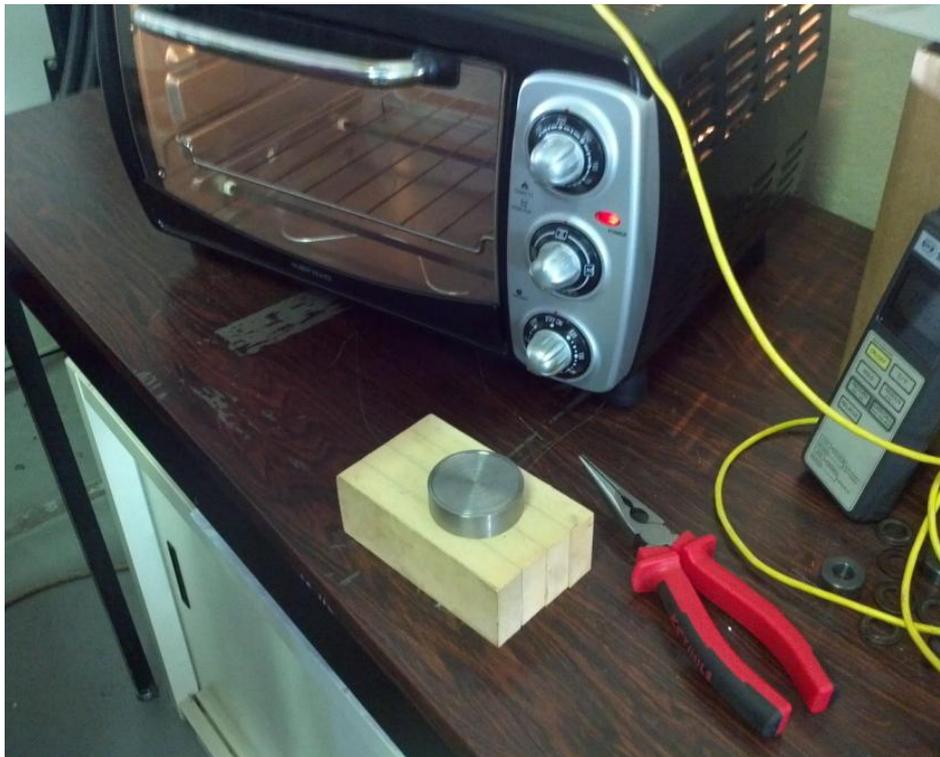


Figura 4. 12 Perno e boccola assemblati a caldo

In questo caso il movimento rotatorio per cospargere l'adesivo è permesso per un tempo molto limitato poiché la velocità polimerizzazione dipende fortemente dalla temperatura che in questa prova è elevata, tale condizione provoca il raggiungimento del bloccaggio leggero in pochissimi secondi. Come detto la velocità di polimerizzazione dipende fortemente dalla temperatura, in questo caso la temperatura è talmente elevata che l'indurimento ottimale si ottiene dopo solo un'ora perciò, solo per motivi precauzionali, i provini sono lasciati a riposo per circa 4 ore prima di procedere allo spiantaggio. La prova rappresenta a pieno l'assemblaggio ibrido colla+interferenza, lo scopo è stabilire, oltre alla forza massima statica a taglio, i pesi dei contributi rispettivamente di adesivo e d'interferenza.

PIN-COLLAR ASSEMBLATI A FREDDO

Dopo che il solvente utilizzato per lo sgrassaggio dei campioni è evaporato, si prende il primo collar e con l'aiuto di un guanto in lattice si cosparge di colla l'anello interno, dopodiché lo si posiziona su una superficie piana. Si prende il pin corrispondente e lo si immerge per qualche minuto nell'azoto liquido ad una

temperatura di -170°C , al raggiungimento dell'equilibrio termico lo si preleva e lo si inserisce nel collar fino a raggiungere l'accoppiamento completo. La velocità di polimerizzazione dipende fortemente dalla temperatura che in questo caso è molto bassa, di conseguenza si lasciano a riposo i campioni per 72 ore prima di procedere allo spiantaggio, il tempo sarebbe inferiore ma per precauzione si lasciano per così tanto tempo. La prova rappresenta fedelmente un assemblaggio ad interferenza con aggiunta di adesivo in una condizione di assemblaggio utilizzata non frequentemente ma possibile nell'industria.

PROVE DI SFILAMENTO

In questa fase della sperimentazione si testano i provini nella pressa oleodinamica registrando il picco di forza massima sopportabile che si verifica appena prima del cedimento della giunzione. Per quanto riguarda la macchina di prova si seleziona nella schermata iniziale l'opzione static test, questa impostazione richiama una seconda schermata per lo svolgimento di prove statiche. Il pannello principale di controllo della prova ha la forma riportata in figura 4.13.

I parametri da settare partendo da in alto a sinistra sono:

- ramp rate; rappresenta la velocità con cui si muove la testata inferiore della macchina di conseguenza rappresenta la velocità della prova, si è selezionato 0,5 mm/s.
- start at; rappresenta il canale di inizio prova, cioè al raggiungimento di una determinata misura il programma inizia a registrare i dati, su questo campo di selezione si è sempre agito in maniera manuale avvicinando il più possibile la testata al perno di spiantaggio, tipicamente era sufficiente inserire un valore di 25 mm.
- Stop at; rappresenta il canale di fine registrazione prova, cioè al raggiungimento della misura si interrompe la registrazione e la prova, il valore da inserire deve coprire l'intera lunghezza di accoppiamento che mediamente vale 11,1 mm di conseguenza, per essere più sicuri, dal valore di start di 25 è stato tolto un valore di 14 mm perciò il valore inserito sarà 11 mm (ricordiamo che il movimento in compressione percorre l'asse di spostamento in senso negativo).

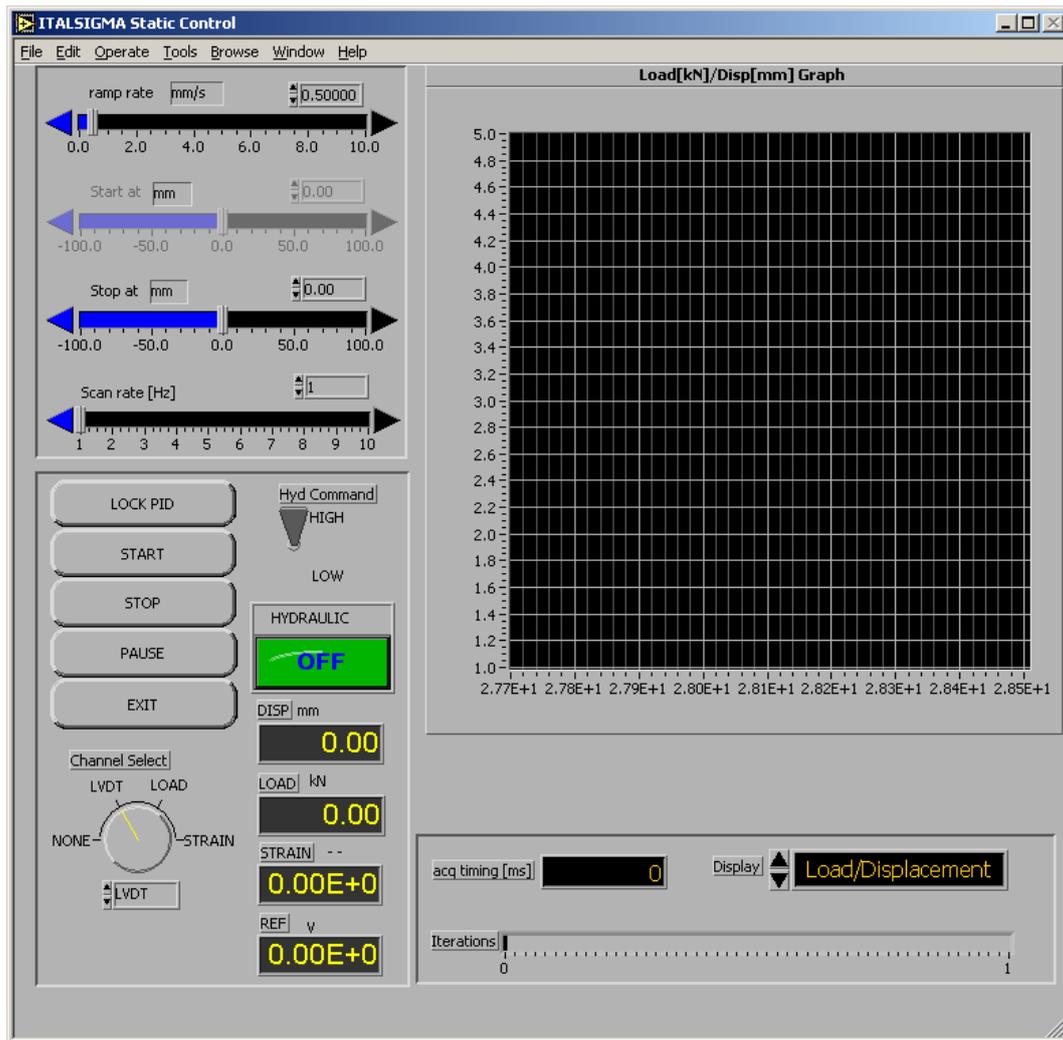


Figura 4. 13 Schermata macchina di prova

- Scan rate; è il valore in Hz della frequenza di oscillazione nelle prove dinamiche che in questo caso non serve poiché è una prova statica.
- Hyd control; è il comando per passare da bassa pressione ad alta pressione, nelle prove spuntiamo sempre questa opzione perché le prove sono tutte in alta pressione, se non si spunta l'opzione il valore massimo di carico che si registra è 15 kN anche se la forza in realtà è maggiore.
- Start/stop; sono il comando di inizio prova, da azionare dopo aver settato i parametri ed aver disposto il provino nella macchina, e il comando di fine prova, da azionare quando il perno è totalmente spiantato e cade dal supporto.
- Display; è il menù a tendina che permette di scegliere il tipo di grafico che si desidera e di conseguenza la tipologia di dati da salvare, in questo caso trattandosi di prove statiche si seleziona load/displacement cioè forza e

spostamento, in maniera automatica l'area del grafico riporterà questi valori negl'assi.

Per quanto riguarda il dispositivo di supporto e guida del perno di spiantaggio è composto da tre elementi: supporto del campione, boccola di guida e centraggio in teflon, perno di spiantaggio (figura 4.14).

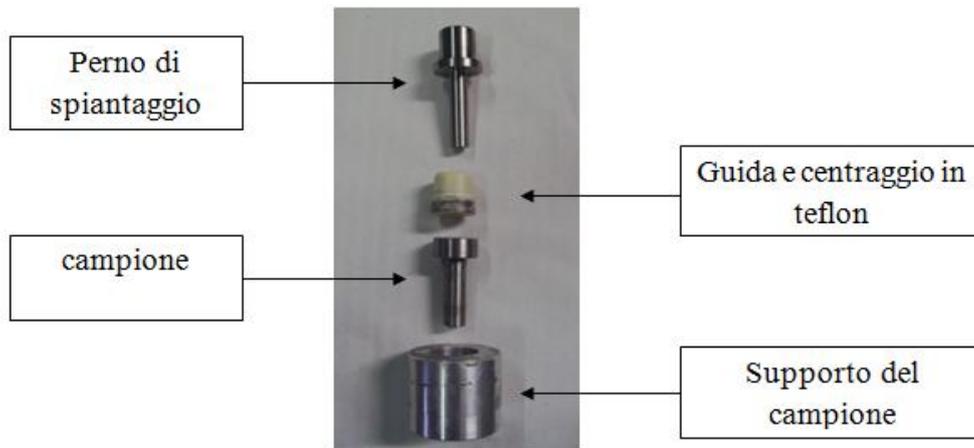


Figura 4. 14 Elementi dispositivo di supporto campioni pin-collar

La disposizione di questi componenti avviene con questa modalità; si prende il supporto del campione e lo si dispone in macchina di prova all'interno di una apposita scanalatura circolare, si inserisce il campione assemblato all'interno del supporto finché non si appoggia completamente. Successivamente si inseriscono il dispositivo di guida in teflon e, all'interno di esso, il perno di spiantaggio. Si chiude bene lo sportello protettivo, poiché fornito di allarme che impedisce alla macchina di partire, e si dà inizio al test.

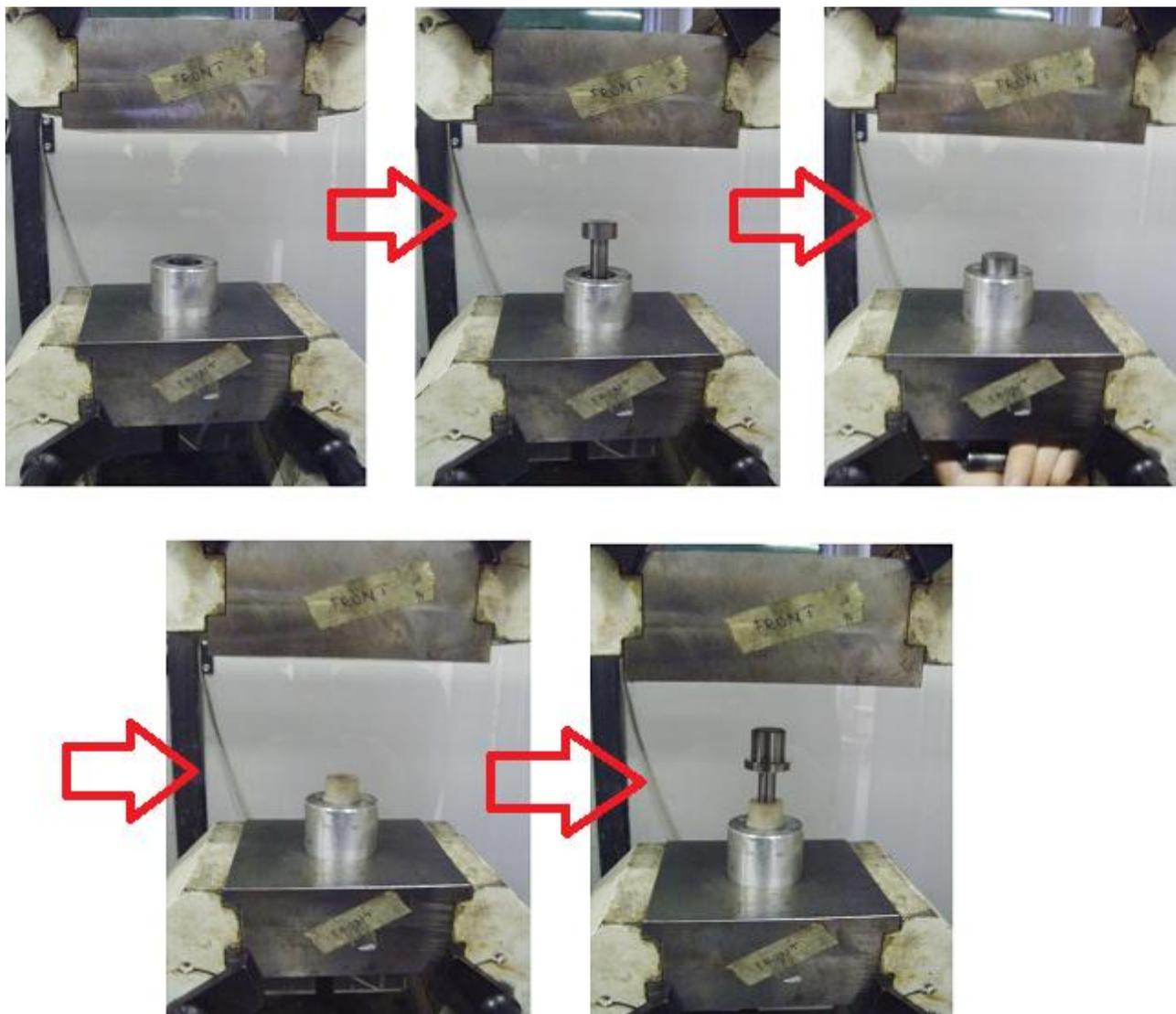


Figura 4. 15 Sequenza di preparazione supporto di spiantaggio

I dati delle prove sono salvati in un documento di testo come elenco di numeri disposti in questa maniera: nella prima colonna sono indicati i tempi di registrazione in millisecondi (ms), nella seconda colonna è riportato il carico con segno negativo (perché è una compressione) in kN e nella terza colonna è riportato lo spostamento in mm. Per ottenere un grafico leggibile da questi dati è necessario portare i valori della forza da negativi a positivi e cambiare riferimento allo spostamento azzerandolo sul primo valore registrato. Otteniamo, per esempio, grafici in questa forma:

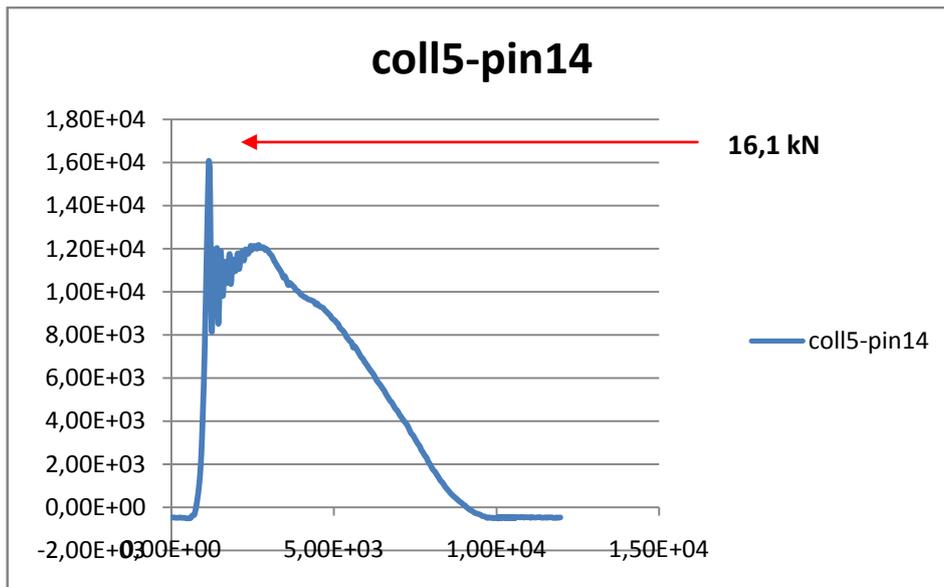


Figura 4. 16 Esempio di grafico forza spostamento ottenuto dalle prove

Nell'esempio riportato si parla di un collegamento pin-collar con gioco, dall'informazione sulla forza massima ottenuta si ricava il valore di tensione dividendo per l'area d'incollaggio che per l'accoppiamento 5-14 con gioco vale 442,1 mm² da cui risulta una tensione di rottura a taglio dell'adesivo di 36,4 N/mm² (vedi capitolo 3 paragrafo 3.1 "La normativa ISO 10123" determinazione della tensione a di rottura statica a taglio).

4.2 Le attrezzature impiegate nelle prove

Nelle fasi descritte nel paragrafo precedente si sono utilizzati una serie di strumenti necessari per lo sviluppo delle prove. Dalla misurazione allo spiantaggio, passando per pulitura e assemblaggio, le attrezzature impiegate sono svariate ed elencandole troviamo: micrometro per esterni, micrometro per interni, alesometro, calibro a corsoio digitale, rugosimetro, pulitore LOCTITE 7063, pressa oleodinamica, forno, dispositivi di piantaggio e spiantaggio. Di seguito saranno riportate le principali caratteristiche degli strumenti utilizzati.

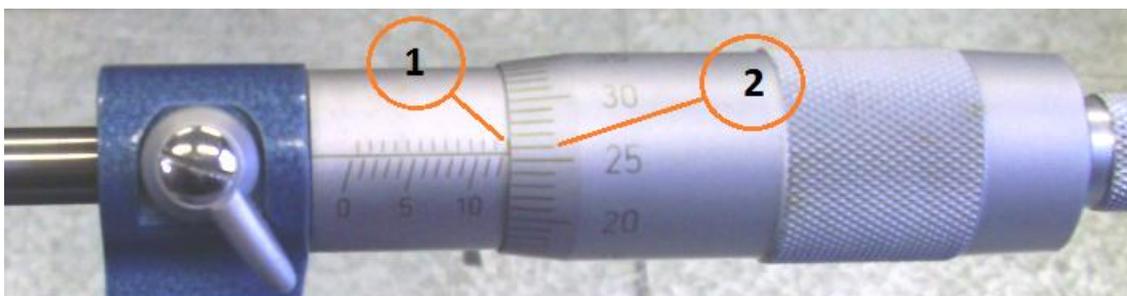
STRUMENTI DI MISURA

Nel processo di rilevazione delle geometrie esatte dei provini si sono impiegati i più comuni strumenti di misura che si utilizzano in ambiti di metrologia d'officina. Gli strumenti utilizzati sono micrometro per esterni, micrometro per interni, alesometro, calibro digitale e rugosimetro.

MICROMETRO DA ESTERNI: è un tipico strumento che si incontra in officina ed ha la caratteristica di fornire una buona precisione di misura. È strutturato come una sorta di “U” dove ad un estremo è posta una vite micrometrica dal passo molto fine. Il micrometro sfrutta proprio la caratteristica della vite che se ruotata di un giro avanza di un passo. Infatti la vite ha un passo di 0,5mm di conseguenza un giro della vite la fa avanzare di questa quantità. Attorno alla vite è disposto, in maniera solidale, un tamburo graduato la cui circonferenza è suddivisa in 50 tacche, questo significa che ogni tacca del tamburo rappresenta una misura di 0,01 mm poiché è dato dalla proporzione:

$$50 \text{ tacche} : 0,5 \text{ mm (un giro)} = 1 \text{ tacca} : X$$

Il tamburo a sua volta scopre un’ulteriore scala graduata posta in direzione assiale rispetto a quest’ultimo e solidale con la struttura del micrometro. Essa è divisa in unità di 0,5 mm poiché il tamburo ad ogni rotazione copre o scopre questa quantità. Dalla struttura dello strumento ne consegue la modalità di lettura che si opera in questa maniera: si legge la misura fornita dall’ultima tacca scoperta dal tamburo sulla scala solidale alla struttura del micrometro, al valore letto si somma la misura riportata dalla scala graduata solidale al tamburo, la quantità che risulta dalla somma è la misura definitiva.



ESEMPIO DI LETTURA:

1) misura dalla scala graduata fissa:	12,5 mm
2) misura dalla scala graduata solidale al tamburo:	0,26 mm
Misura del componente:	12,76 mm

Figura 4. 17 Esempio di lettura micrometro da esterni

In particolare i micrometri da esterni utilizzati nello sviluppo dei test hanno le seguenti caratteristiche:

Micrometro 1

- Campo di misura 0÷25 mm.
- Sensibilità 0,01 mm.

Micrometro 2

- Campo di misura 25÷75 mm.
- Sensibilità 0,005 mm.

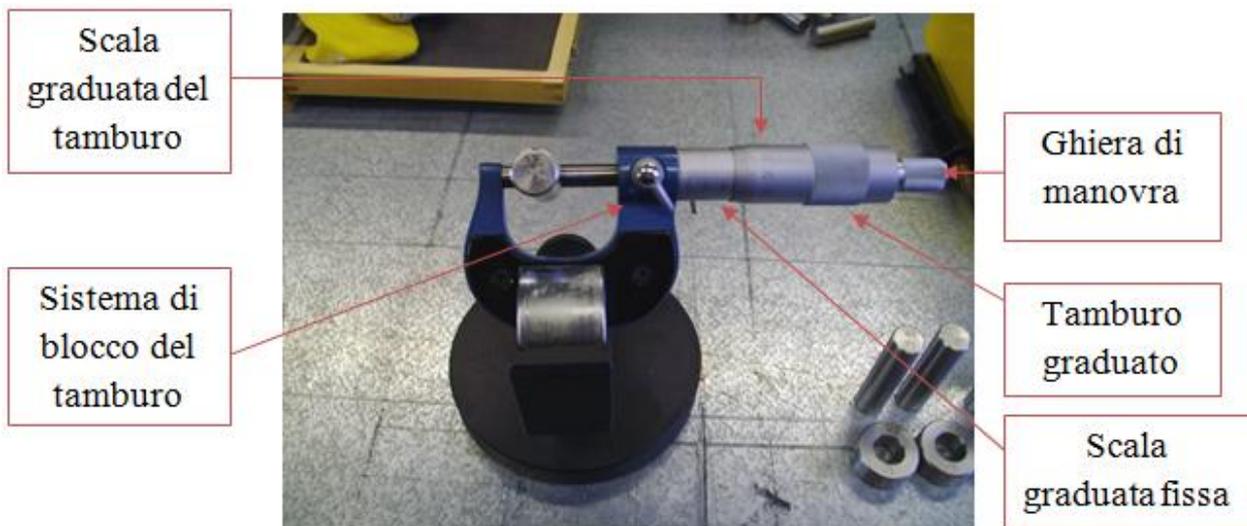


Figura 4. 18 Micrometro da esterni

È consuetudine prima, di effettuare le misurazioni, azzerare gli strumenti poiché l'utilizzo frequente può in qualche modo aver alterato la taratura iniziale. Per compiere questa operazione sul micrometro 1 è sufficiente portare a contatto il perno, solidale col tamburo, con l'estremità opposta, svitare la ghiera posizionata all'estremità del micrometro e gire sul tamburo posizionandolo sullo zero e poi avvitare la stessa ghiera. Nel micrometro 2 l'operazione è analoga ma tra i perni di misura si inserisce un blocchetto di taratura calibrato alla dimensione precisa di 25 mm.

MICROMETRO DA INTERNI: è un micrometro appositamente realizzato per la misura di diametri interni di elementi cilindrici. È sostanzialmente un'asta che ad una estremità ha il tamburo graduato mentre all'estremità opposta ha tre griffe disposte a 120° gradi l'una dall'altra. Le griffe sono gli elementi che vanno a contatto con le superfici e possono muoversi in direzione radiale. Il loro movimento è legato ad una vite micrometrica come nel caso di micrometri da esterni. Tuttavia in questo caso ad

un giro del tamburo corrisponde lo spostamento di 0,25 mm delle griffe, di conseguenza rappresenta un incremento di diametro di 0,5 mm. Il tamburo è diviso in 100 tacche ciascuna da 0,005 mm poiché è il risultato della proporzione seguente:

$$100 \text{ tacche} : 0,5 \text{ mm} = 1 \text{ tacca} : X$$

Il tamburo nel suo movimento scopre una seconda scala graduata solidale al micrometro la quale è divisa in unità di 0,5 mm, ovviamente ogni unità viene coperta o scoperta ad ogni giro completo del tamburo. La lettura è molto simile al micrometro per esterni e si realizza in questa maniera, si legge il valore dato dall'ultima tacca scoperta della scala graduata solidale al micrometro, a tale misura si somma la quantità indicata sul tamburo graduato, la misura complessiva è la grandezza dell'elemento misurato.



Figura 4. 19 Esempio di lettura micrometro da interni

Il micrometro da interni utilizzato ha le seguenti caratteristiche:

- Campo di misura 14÷16 mm.
- Sensibilità 0,005 mm.
- Tre griffe di misura.



Figura 4. 205 Micrometro da interni

È consigliabile azzerare il micrometro prima di effettuare le misure poiché l'utilizzo prolungato può portare allo scorrimento della vite rispetto al tamburo introducendo un errore nella misura. L'azzeramento si realizza misurando una boccia calibrata, se il micrometro non rileva tale misura, con una apposita chiave, si allenta la ghiera posta ad una estremità, si fa ruotare il tamburo finché non si raggiunge la misura della boccia e successivamente si avvita la ghiera.

ALESAMETRO: è un tipico strumento per il controllo di geometrie cilindriche. Questo strumento è l'unione di un comparatore ed un sistema meccanico che trasforma il movimento del tastatore in un movimento lineare in un piano perpendicolare. Tipicamente si utilizza per controllare eventuali difetti di fori come ovalizzazioni o conicità ma si può utilizzare anche per rilevare la misura di diametri interni. Essendo uno strumento comparativo, prima dell'utilizzo, richiede un azzeramento che può essere effettuato in diversi modi. In questo caso l'azzeramento è effettuato attraverso l'utilizzo di un micrometro da esterni tarato sul diametro esterno dell'elemento perno. L'azzeramento dell'alesametro si ottiene inserendo la coppia di tastatori all'interno del micrometro dopodiché si ruota la ghiera esterna collegata al quadrante finché la lancetta non coincide con lo zero. All'interno del comparatore ci sono una serie di piccole ruote dentate che, oltre a trasformare il movimento lineare in rotatorio della lancetta, agiscono come moltiplicatore rendendo molto visibili piccolissimi spostamenti del tastatore. L'alesametro utilizzato nelle prove ha le seguenti caratteristiche:

- Campo di misura del comparatore 0÷10 mm
- Sensibilità del comparatore 0,01 mm
- Prolunga alesametro a due punto di contatto

Il quadrante è composto da due scale graduate, quella principale è divisa in 100 unità ciascuna corrispondente ad uno spostamento del tastatore di 0,01mm. Perciò ogni giro della lancetta corrisponde ad un millimetro di variazione di diametro. La seconda scala graduata è più piccola ed è divisa in dieci unità ciascuna corrispondente a 1 mm di spostamento del tastatore perciò tale lancetta tiene conto dei giri effettuati dalla lancetta principale.

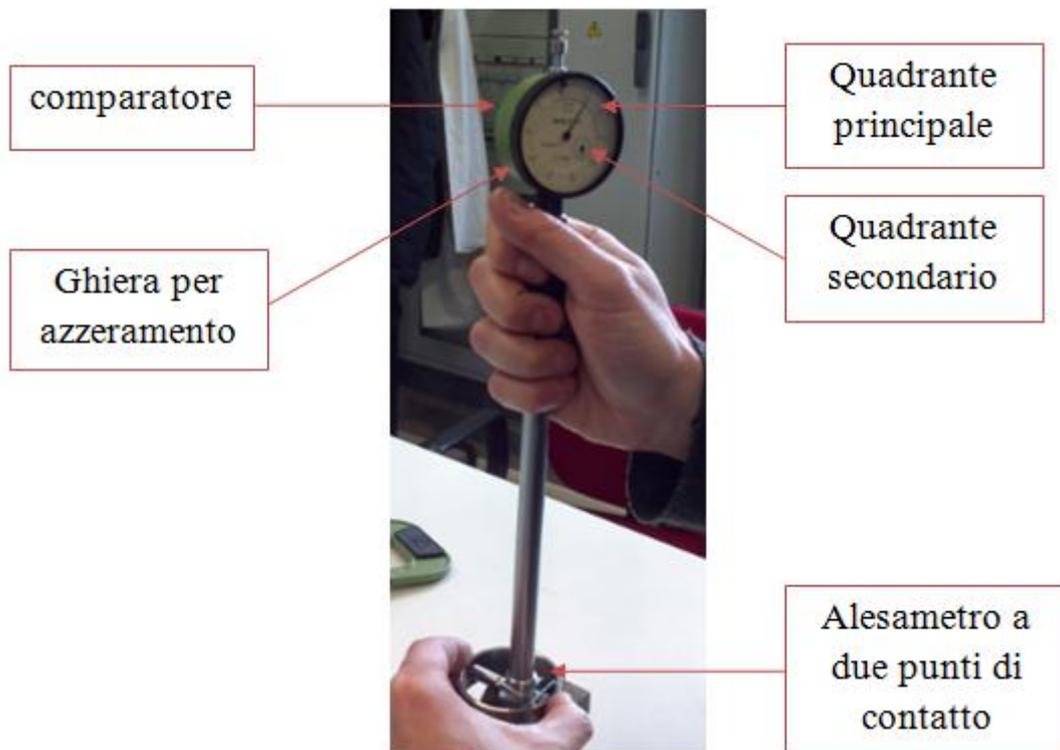


Figura 4. 216 Alesametro

RUGOSIMETRO: è uno strumento piuttosto sofisticato che permette di rilevare, attraverso il contatto tra una piccola puntina e il componente, la rugosità superficiale. Il dispositivo in uso è costituito da due parti essenziali, una centralina che elabora i segnali dotata di interfaccia utente e il tastatore che contiene il sensore LVDT (linear variable displacement transducer). È proprio grazie a questo sensore che è permessa la misura, il suo principio di funzionamento si basa sulla mutua induzione tra avvolgimenti. Il movimento verticale fa spostare un elemento cilindrico che possiede

un nucleo ferromagnetico, attorno al nucleo sono posti tre avvolgimenti di cui solo quello centrale è alimentato mentre su quelli posti all'estremità si genera una forza elettromotrice indotta, le variazioni di tensione indotta vengono misurate ed elaborate per tradurle in informazioni di spostamento del tastatore. Il dispositivo utilizzato nelle prove è un TSK ZEISS Handysurf E-30A del quale si possono citare le seguenti caratteristiche:

- Campo di misura asse Z $\pm 160 \mu\text{m}$
- Campo di misura asse X 12,5 mm
- Sensibilità $0,01 \mu\text{m}$
- Standard di riferimento ISO 1984
- 28 parametri visualizzabili tra i quali Ra, Rq, Rmax, Rz, Rk, Pc, Tp.



Figura 4. 22 Rugosimetro

CALIBRO A CORSOIO DIGITALE: è lo strumento più semplice tra quelli citati fin'ora ma anche il meno preciso. Il calibro a corsoio digitale ha il vantaggio di essere molto versatile e si adatta alla rilevazioni di tanti tipi di geometrie. Le superfici del calibro che vengono poste a contatto con le superfici dei pezzi da misurare sono molto ridotte perciò è facile posizionare in maniera errata lo strumento ed introdurre così degli errori nella misura. La lettura della misura risulta molto semplice poiché compare direttamente sul display del calibro. È consigliabile effettuare l'azzeramento dello strumento prima di eseguire le misure e lo si fa chiudendo il calibro e premendo l'apposito pulsante posizionato sul bordo del display. Il calibro utilizzato ha le seguenti caratteristiche:

- Campo di misura 0÷150 mm
- Sensibilità 0,01 mm



Figura 4. 23 Calibro a corsoio digitale

PULITORE LOCTITE 7063

Una fase molto importante nel processo di preparazione dei provini incollati è la pulizia e lo sgrassaggio delle superfici che influisce in maniera decisa sulla prestazione adesiva. In questa fase è stato impiegato il prodotto LOCTITE 7063, il quale è consigliato come prodotto per trattamento preliminare all'incollaggio. Dalla scheda tecnica fornita dal produttore si riportano le seguenti caratteristiche:

Pulitore a solvente chimicamente composto da isoparaffina, dimetossimetano e miscela di etanolo, fornito come bomboletta a pressione. Si presenta come liquido trasparente a bassa viscosità. Si utilizza come sgrassatore per superfici nelle operazioni di manutenzione o come pulitore di aree che devono essere incollate. Le proprietà tipiche sono:

- Peso specifico a 25°C 0.74
- Spettro infrarosso standard^{LMS}
- Viscosità a 20°C 2 mPa·s
- Tempo di asciugatura a 20°C ≤60 s
- TLV (ACGIH) 600 ppm

Il prodotto LOCTITE 7063 non ha effetti sulla velocità di polimerizzazione ma garantisce una pulizia superficiale completa che favorisce la polimerizzazione e la formazione dei legami adesivi in quanto superfici sporche possono alterare le prestazioni dell'adesivo. Il prodotto è classificato come materiale infiammabile perciò devono essere prese tutte le precauzioni possibili per evitare il contatto del liquido e dei suoi vapori con le fiamme libere o dispositivi elettrici non protetto

contro il fuoco. Il solvente può non essere compatibile con alcune tipologie di plastiche o rivestimenti e potrebbero danneggiarsi. Si deve sempre verificare la compatibilità del prodotto con le superfici su cui è da applicare. Per quanto riguarda le istruzioni per l'uso si devono seguire queste indicazioni:

- Trattare le superfici da pulire spruzzando il prodotto o mediante un panno di carta imbevuto di solvente.
- Strofinare la superficie bagnata con un panno di carta pulito per assicurare che i contaminanti e l'eccesso di solvente vengano eliminati.
- Ripetere il processo di pulizia se necessario.
- Attendere la completa evaporazione del solvente .
- Applicare immediatamente l'adesivo e assemblare le parti.

Per quanto riguarda lo stoccaggio si ricorda che il prodotto è infiammabile perciò è necessario immagazzinare il prodotto secondo le norme vigenti e comunque non vicino ad agenti ossidanti o materiali combustibili. La temperatura ottimale di stoccaggio è compresa tra 8°C e 21°C, per immagazzinamenti a temperature inferiori a 8°C o superiori a 28°C non si assicura la piena performance del prodotto.



Figura 4. 24 Sgrassatore LOCTITE 7063

PRESSA OLEODINAMICA ITALSIGMA FPF 100

Lo strumento principale che permette la rilevazione della forza massima sopportabile da una giunzione incollata è la pressa oleodinamica. La pressa presente in laboratorio hangar a Forlì utilizzata nelle prove è una ITALSIGMA FPF 100 dove il numero 100 sta ad indicare la portata massima della cella di carico pari a 100 kN. L'azienda ITALSIGMA con la sigla FPF indica una famiglia di macchine universali servoidrauliche per prove di materiali, in particolare la macchina utilizzata è in grado di eseguire prove di trazione e compressione sia in condizioni statiche che in condizioni dinamiche. Un componente fondamentale delle macchine prova materiali è un chiaro e semplice sistema elettronico di controllo e misura in grado di offrire le migliori prestazioni e di garantire una redditività a lungo termine attraverso l'impiego delle tecnologie conosciute e con standard di qualità elevata. Caratteristiche rilevanti dell'elettronica sono: dati di prova registrati sincronizzati nella scala temporale in alta risoluzione e frequenza di misura, elaborazione in tempo reale dei dati di prova per monitorare e attivare sequenze di prova o limiti di sicurezza, controllo adattivo per l'esatta riproducibilità di velocità e spostamenti, connessione a computer ausiliari attraverso interfacce standard, visualizzazione personalizzabile su display. La macchina si può schematizzare come in figura 4.25 :

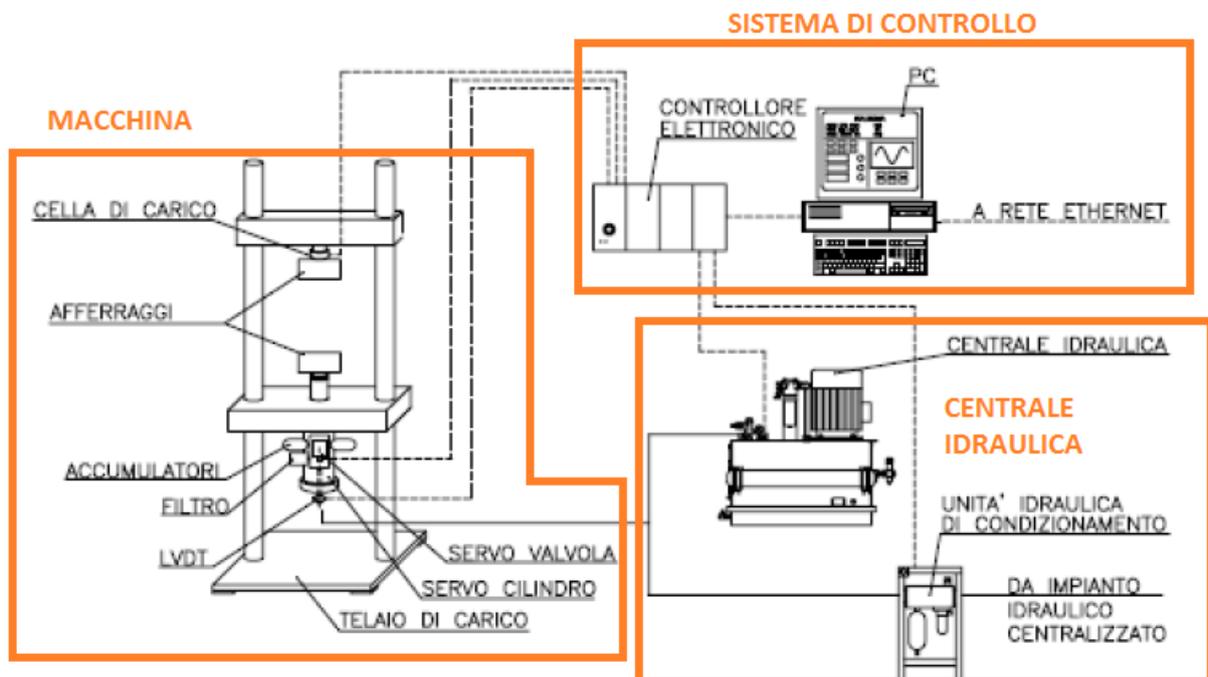


Figura 4. 25 Schema macchina di prova

Si possono individuare tre blocchi principali costituiti dalla macchina, dal sistema di controllo e dalla stazione idraulica.

STRUTTURA TELAIO MACCHINA:

I telai di carico sono composti da una traversa inferiore fissa, 2 colonne cilindriche che garantiscono una guida precisa per la traversa superiore mobile. L'altezza della traversa superiore è regolabile manualmente oppure per mezzo di cilindri idraulici di sollevamento. La traversa è meccanicamente bloccabile alle colonne. Il servocilindro a doppio effetto è fissato alla traversa inferiore. La servovalvola che controlla la portata di olio al cilindro è montata direttamente sul servocilindro. La cella di carico, fissata direttamente sulla traversa superiore, completa il telaio.



Figura 4. 26 Macchina di prova

Per la macchina delle prove abbiamo le seguenti caratteristiche dimensionali:

- Forza 100 kN
- Corsa del pistone 100 mm
- Spazio netto tra le colonne 530 mm
- Luce verticale netta 1163 mm
- Altezza 2515 mm
- Larghezza 890 mm
- Profondità 610 mm
- Peso 550 kg

CENTRALE IDRAULICA:

Progettata per funzionamento in continuo, i blocchi di sicurezza sul livello dell'olio, temperatura ed intasamento dei filtri garantiscono che la centrale idraulica sia sempre protetta. E' dotata di un sistema molto efficiente di filtrazione per assicurare la massima affidabilità sia della centrale sia della macchina di prova. Ciò è ottenuto utilizzando dispositivi filtranti opportunamente dimensionati per il sistema specifico. Un accumulatore opzionale è installabile sulla mandata dalla pompa per smorzare pulsazioni della pressione e ridurre la rumorosità idraulica. Il quadro elettrico delle centrali è progettato per interfacciarsi col sistema elettronico di controllo. Ciò permette il comando remoto ed una chiara gestione degli allarmi e monitoraggio per funzionamento in automatico. La centrale idraulica ha le seguenti caratteristiche:

- Portata nominale pompa 8 l/min
- Pressione nominale pompa 207 bar
- Potenza motore elettrico 3 kW
- Capacità serbatoio 50 l
- Portata acqua refrigerante 5 l/min
- Peso 210 kg

SISTEMA DI CONTROLLO:

E' costruito sulla piattaforma hardware Real Time della National Instrument e il software è interamente sviluppato in LabView. In particolare il sistema RT3 è composto da un computer embedded e da una o più schede di acquisizione e generazione che sono scelte e collegate secondo le particolari necessità dell'applicazione finale. Il sistema di controllo RT3 è gestito da un software applicativo che lavora con un sistema operativo in Real Time (lavorando così in modo deterministico senza l'inconveniente di tempi di latenza causati dall'ambiente Windows) ed è interfacciato tramite connessione ethernet ad un normale PC in ambiente Windows, dove risiede il software applicativo sviluppato con LabView per la gestione del sistema, per l'interfaccia utente, il database delle configurazioni, l'acquisizione dei dati. Nel sistema RT3 sono presenti moduli per il condizionamento dei trasduttori, l'alimentazione delle servovalvole e la gestione dei dispositivi idraulici.

FORNO ELETTRICO

Questo è lo strumento meno sofisticato tra quelli utilizzati nelle prove, tuttavia è sufficiente a garantire l'esecuzione in maniera egregia delle prove. È sostanzialmente una scatola metallica con dell'isolante nella quale sono posizionate due resistenze elettriche che riscaldano l'ambiente interno. La temperatura è regolata attraverso un apposito manettino situato all'esterno, tuttavia la scala è piuttosto grossolana perciò per ottenere il controllo della giusta temperatura all'interno del forno si utilizza una termocoppia con display digitale.



Figura 4. 27 Forno elettrico

DISPOSITIVO DI PIANTAGGIO E SPIANTAGGIO

Come visto nel paragrafo precedente si sono utilizzati dei dispositivi di supporto e guida, sia nel caso di spiantaggio che nel caso di piantaggio. Questo apparato si inserisce negli afferraggi della macchina di prova ed è costituito da un supporto nel quale si inserisce il provino e da una guida in teflon che è diversa nel caso del piantaggio o dello spiantaggio. Realizzare una guida relativa tra perno e provino, nel caso di spiantaggio, ma soprattutto tra collar e pin nel caso di piantaggio, previene eventuali impuntamenti e carica i componenti in maniera uniforme. Per quanto riguarda il dispositivo di piantaggio, le misure sono riportate in figura 4.28, mentre per il dispositivo di spiantaggio si fa riferimento alla figura 4.29. Gli elementi del dispositivo sono stati progettati e realizzati attraverso l'utilizzo di un tornio in laboratorio hangar a Forlì.

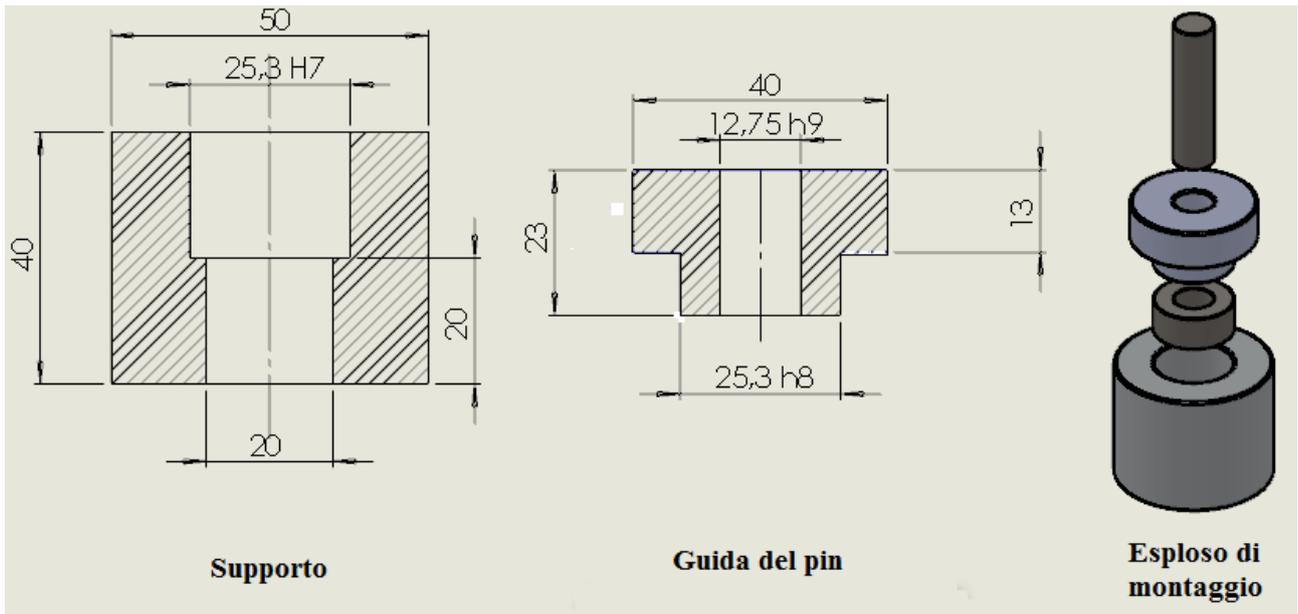


Figura 4.7 Disegno costruttivo del dispositivo di piantaggio

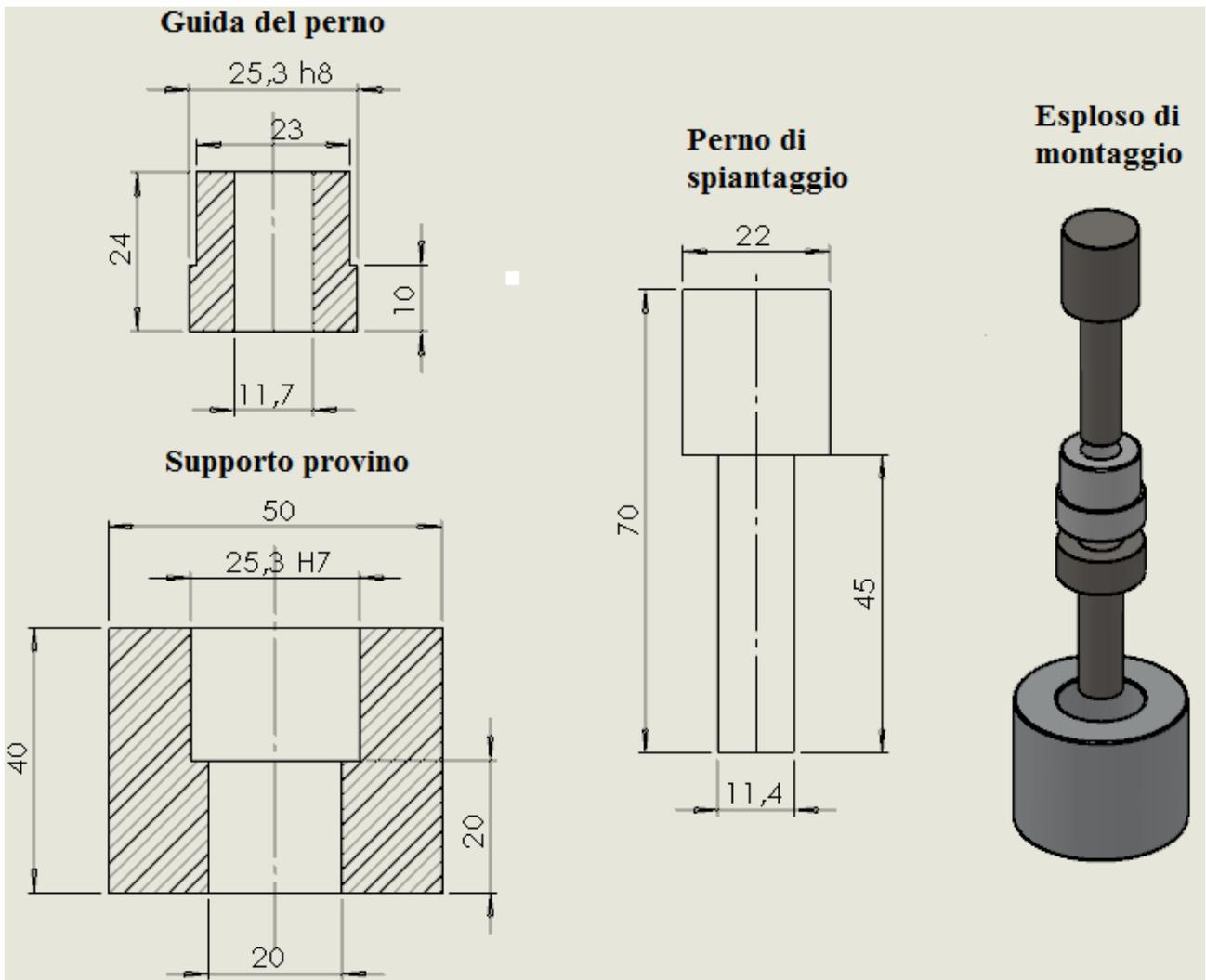


Figura 4.8 Disegno costruttivo del dispositivo di spiantaggio

Siccome il dispositivo di supporto è in alluminio, e i carichi generati nelle fasi di piantaggio e spiantaggio si scaricano su un piccolo anello di materiale, è stata necessaria la verifica a pressione del componente. L'area sulla quale si distribuisce la forza è pari a:

$$A = \frac{\pi (De^2 - Di^2)}{4} = \frac{\pi (25,3^2 - 20^2)}{4} = 188,5 \text{ mm}^2$$

Considero una forza massima di 25000 N la quale genera una pressione sulla superficie di:

$$P = \frac{F}{A} = \frac{25000}{188,5} = 132,6 \text{ MPa}$$

Per l'alluminio si assume una pressione ammissibile di 230 MPa che risulta inferiore alla pressione sulla superficie d'appoggio del supporto di conseguenza l'elemento è verificato.

Capitolo 5

Dati e analisi dei risultati

5.1 Raccolta dati delle prove

In questo capitolo sono riportati tutti i dati raccolti nel corso delle prove. Per una maggiore chiarezza i dati sono divisi in base alla tipologia di provino e riportano per prima cosa i dati geometrici dei campioni e, successivamente, i dati relativi alle prove di spiantaggio.

PIN-COLLAR CON GIOCO

Le giunzioni pin-collar con gioco sono state testate in tre tipologie di condizioni: a temperatura ambiente, a caldo e a freddo. Di seguito è riportata la tabella che racchiude le grandezze geometriche medie dei campioni con relativa quantità di gioco.

N° coppia	DATI PIN			DATI COLLAR					
		diametro esterno medio (mm)	dev-standard		diametro interno medio (mm)	dev-standard	diametro esterno medio (mm)	dev-standard	LF (mm)
b-1	pin_g_1	12,67	0,001155	coll_g_1	12,717	0,002517	25,25	0,005774	10,6
b-2	pin_g_11	12,66	0,003786	coll_g_2	12,720	0,004041	25,43	0,005774	11,1
b-3	pin_g_4	12,68	0,002887	coll_g_3	12,729	0,001528	25,37	0,000000	11,1
b-4	pin_g_3	12,66	0,001000	coll_g_4	12,714	0,001000	25,37	0,000000	11,1
b-5	pin_g_14	12,66	0,001528	coll_g_5	12,719	0,003215	25,37	0,005774	11,2
b-6	pin_g_6	12,67	0,002517	coll_g_6	12,726	0,000577	25,37	0,005774	11,1
b-7	pin_g_7	12,66	0,004726	coll_g_7	12,724	0,002082	25,35	0,000000	11,1
b-8	pin_g_8	12,67	0,003055	coll_g_8	12,720	0,004000	25,33	0,000000	11,1
b-9	pin_g_9	12,67	0,000577	coll_g_9	12,733	0,002646	25,38	0,005774	11,1
b-10	pin_g_10	12,66	0,001732	coll_g_10	12,719	0,001732	25,35	0,010000	11,1
b-11	pin_g_2	12,68	0,000577	coll_g_11	12,730	0,003606	25,35	0,000000	11,1
b-12	pin_g_12	12,67	0,004619	coll_g_12	12,723	0,004041	25,39	0,005774	11,1
b-13	pin_g_13	12,66	0,001155	coll_g_13	12,722	0,001000	25,37	0,005774	11,1
b-14	pin_g_5	12,69	0,002646	coll_g_14	12,732	0,002887	25,37	0,005774	11,1

N° coppia	GIOCO	
	Gioco Dim. (mm)	Gioco Rad. (mm)
b-1	0,05	0,025
b-2	0,06	0,03
b-3	0,045	0,023
b-4	0,05	0,025
b-5	0,06	0,03
b-6	0,06	0,03
b-7	0,06	0,03
b-8	0,05	0,025
b-9	0,06	0,03
b-10	0,06	0,030
b-11	0,05	0,025
b-12	0,050	0,025
b-13	0,06	0,03
b-14	0,040	0,020

Tabella 5. 1 Riepilogo dati geometrici di accoppiamenti pin collar con gioco

Mediamente le coppie di pin collar hanno un gioco diametrico medio di 0,054 mm. Dopo le varie operazioni di pulitura e incollaggio segue la fase di spiantaggio nella quale si sono registrate le forze massime sopportabili dalle giunzioni.

PROVINI PIN-COLLAR CON GIOCO A TEMPERATURA AMBIENTE SENZA PULITURA SUPERFICIALE

I primi provini sono stati assemblati in queste condizioni:

- Nessuna pulitura superficiale.
- Temperatura ambiente.
- Gioco medio di 0,05 mm.

Dalla prova di sfilamento ricaviamo la forza massima sopportata dai campioni, da tale forza ricaviamo, seguendo le direttive della normativa sui pin collar ISO 10123, la tensione si rottura statica a taglio secondo questa espressione:

$$\tau = \frac{F_S}{A}$$

Dove A è l'area di accoppiamento in mm^2 e F_s la forza di spiantaggio registrata in N. di seguito sono riportati i dati raccolti in questa prima prova.

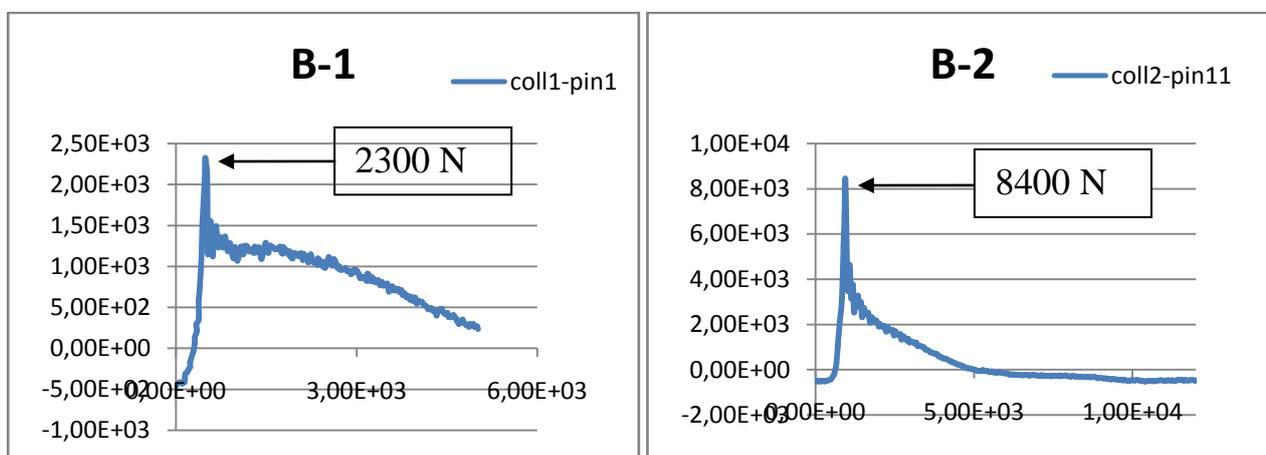
RISULTATI PROVA 1

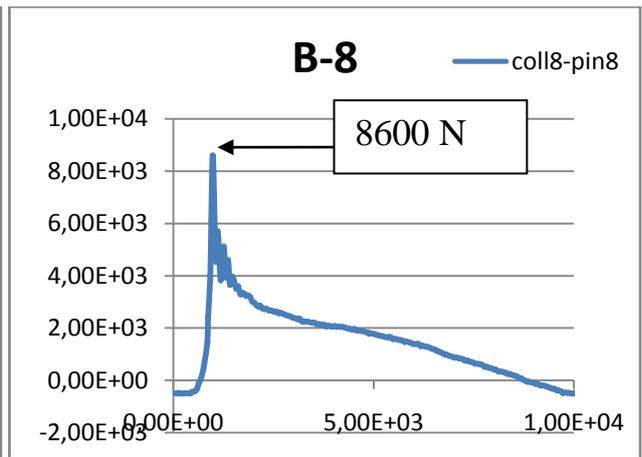
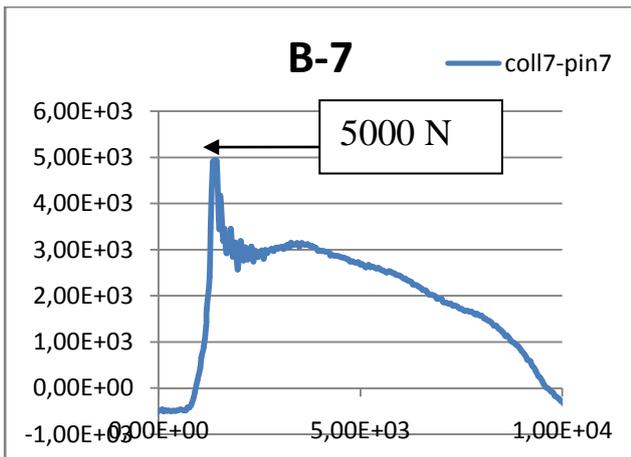
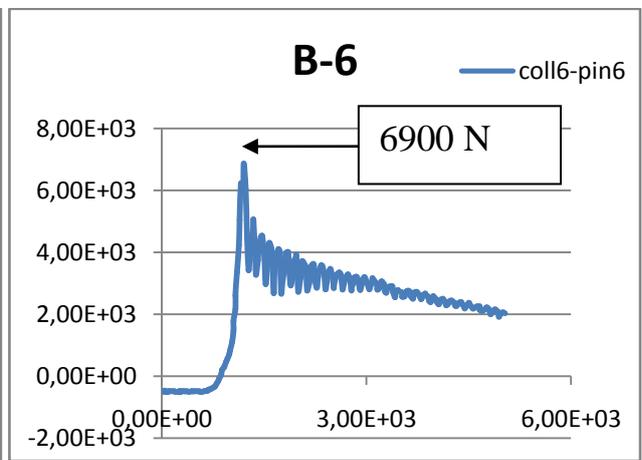
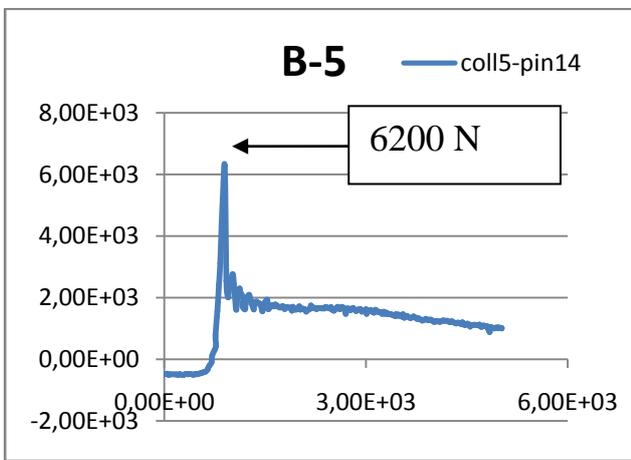
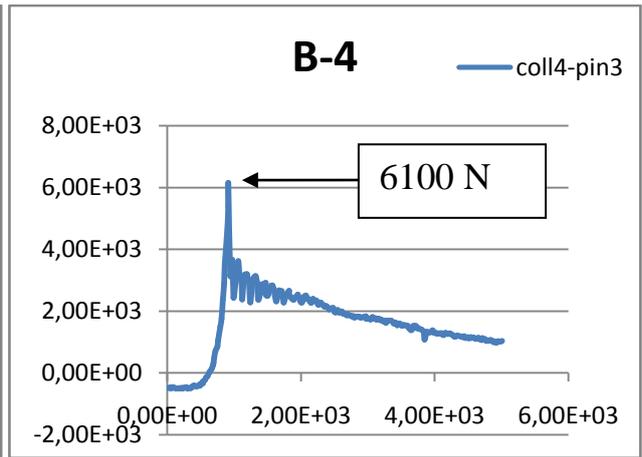
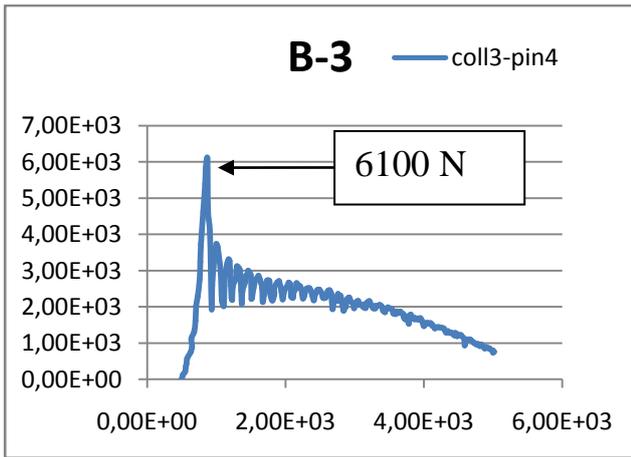
N° coppia	F spiant.	Area	Tau ad.	
b-1	2.300	423,4967	5,430974	N/mm2
b-2	8.400	442,5913	18,97913	N/mm2
b-3	6.100	442,692	13,77933	N/mm2
b-4	6.100	442,833	13,77494	N/mm2
b-5	6.200	442,0939	14,02417	N/mm2
b-6	6.900	445,1473	15,50049	N/mm2
b-7	5.000	442,6611	11,29532	N/mm2
b-8	8.600	442,725	19,42515	N/mm2
b-9	2.900	442,9342	6,547247	N/mm2
b-10	6.700	442,1055	15,15475	N/mm2
b-11	4.200	443,4554	9,471075	N/mm2
b-12	3.000	443,1879	6,769139	N/mm2
b-13	5.400	442,9668	12,19053	N/mm2
b-14	3.700	443,2946	8,346594	N/mm2

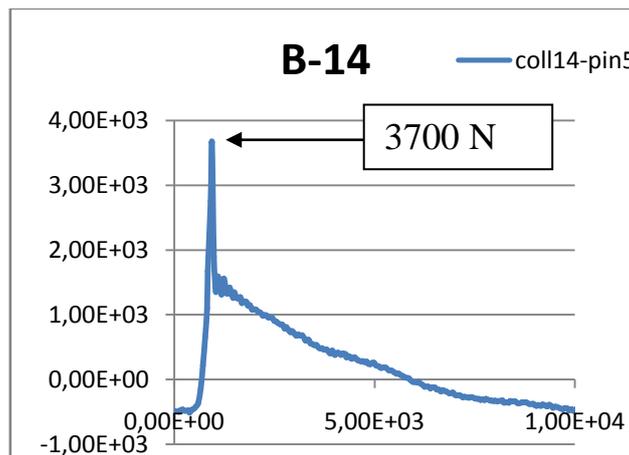
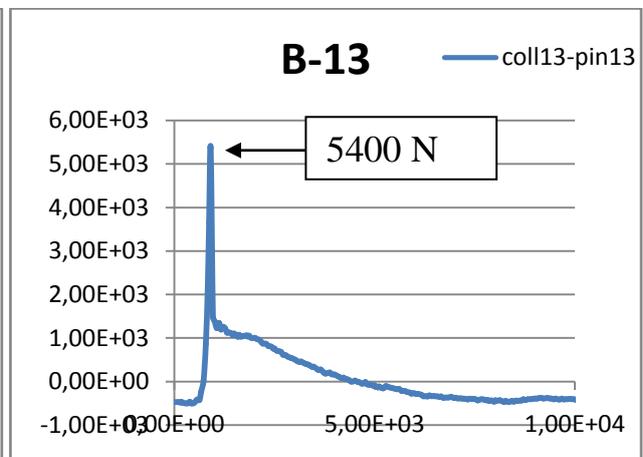
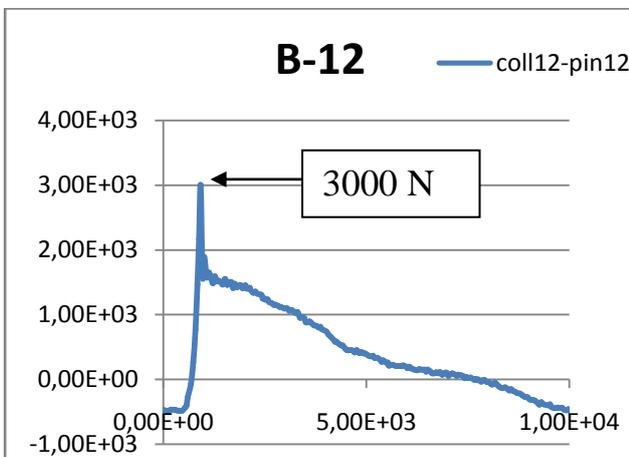
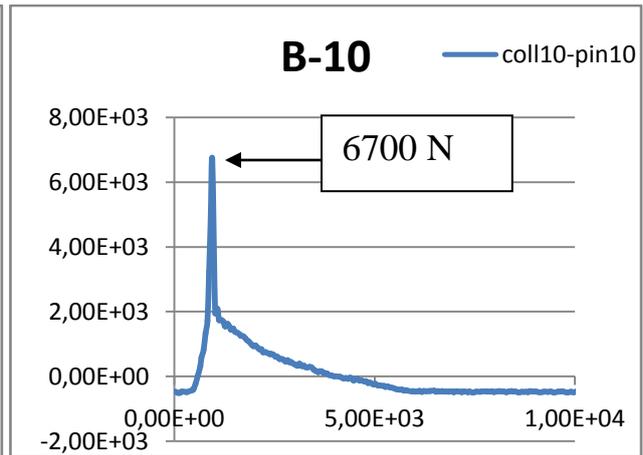
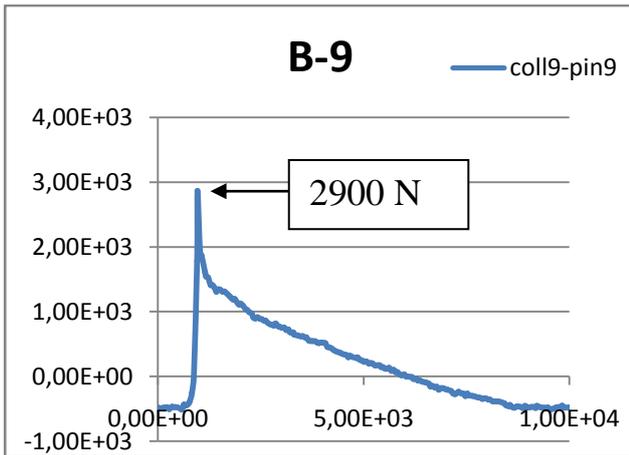
Tabella 5. 2 Risultati prima prova

Dai risultati della prima prova con superfici non pulite si ottiene un valore medio della forza di spiantaggio di 5,4 kN e una tensione media di rottura statica a taglio pari a 12,2 N/mm² (MPa) con una deviazione standard di 4,4.

Interessante è anche l'andamento del diagramma forza per spostamento di tutte le coppie di provini del campione in esame:







Gli andamenti della forza presentano tutti un picco iniziale in corrispondenza di un piccolissimo spostamento, dopodiché c'è un crollo repentino e una serie di oscillazioni che accompagnano un andamento lineare decrescente della forza di spiantaggio.

PROVINI PIN-COLLAR CON GIOCO A TEMPERATURA AMBIENTE CON TRATTAMENTO DI PULITURA SUPERFICIALE

Questa tipologia di provini sono stati assemblati in queste condizioni:

- Temperatura ambiente
- Sgrassaggio delle superfici con LOCTITE 7063
- Gioco medio del campione 0,54 mm

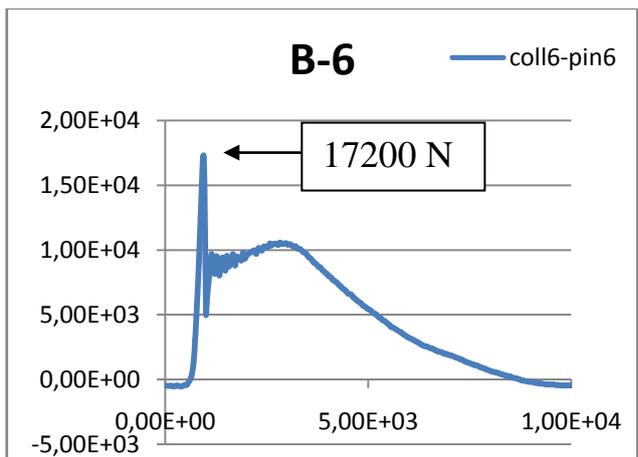
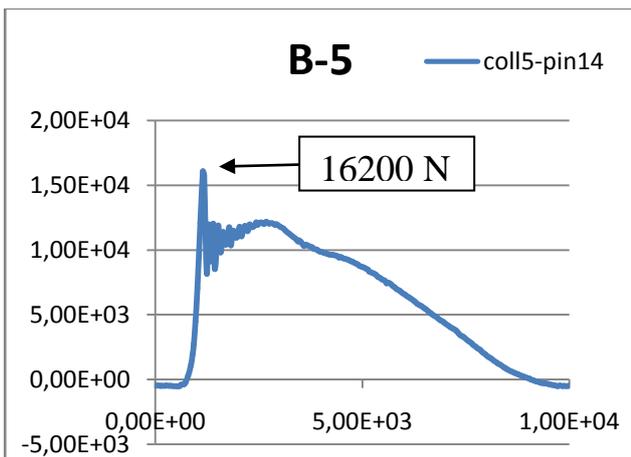
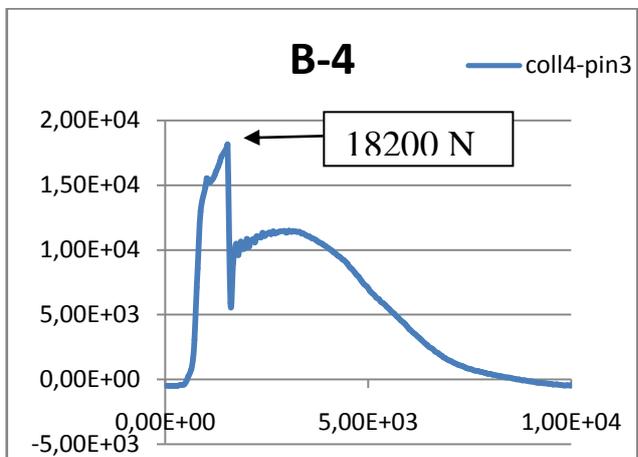
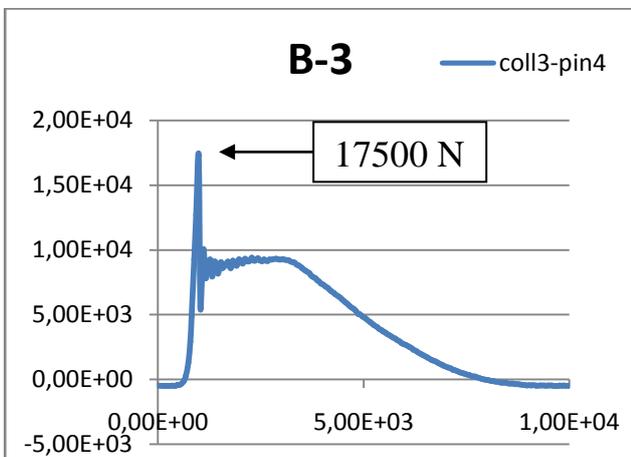
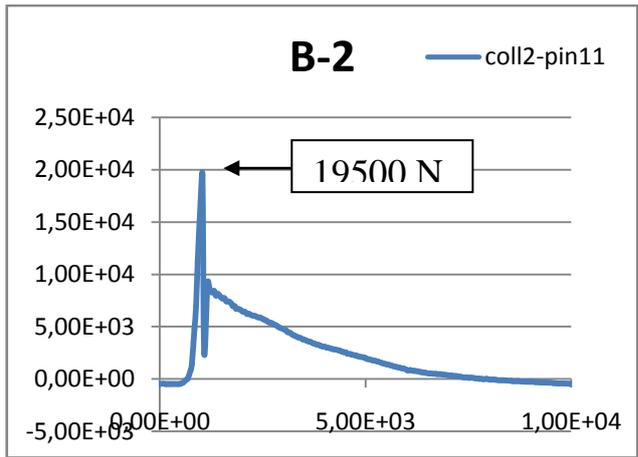
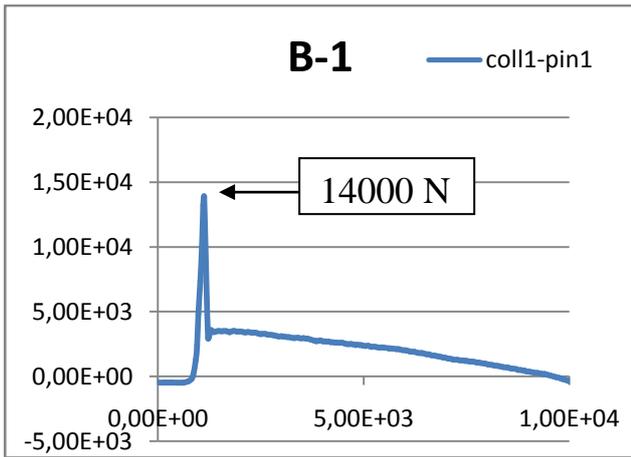
In questa prova si sono eliminati i residui oleosi delle lavorazioni meccaniche di tornitura attraverso un processo di pulitura con solventi appositi. Le prove di spiantaggio hanno prodotto i seguenti risultati:

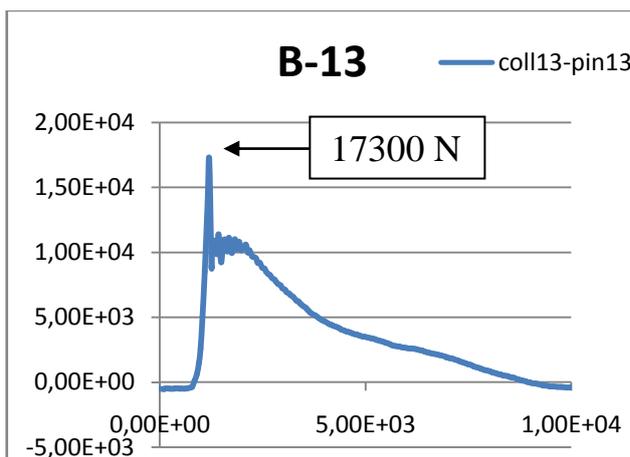
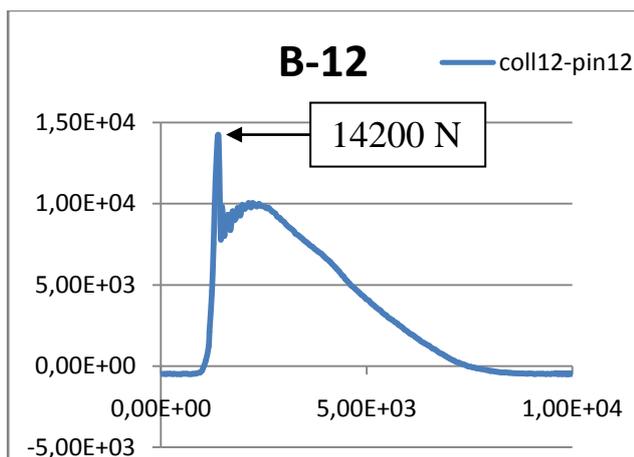
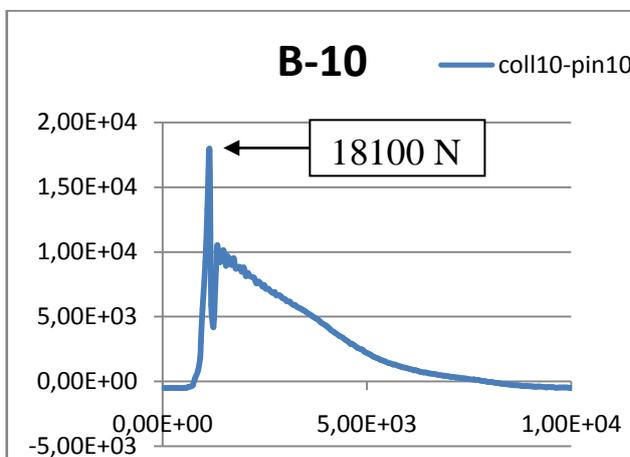
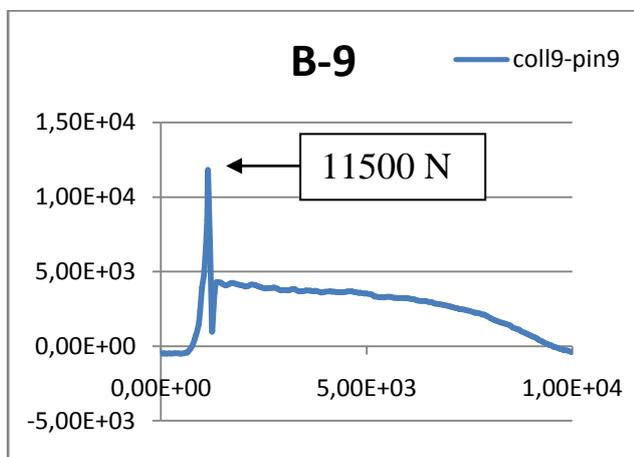
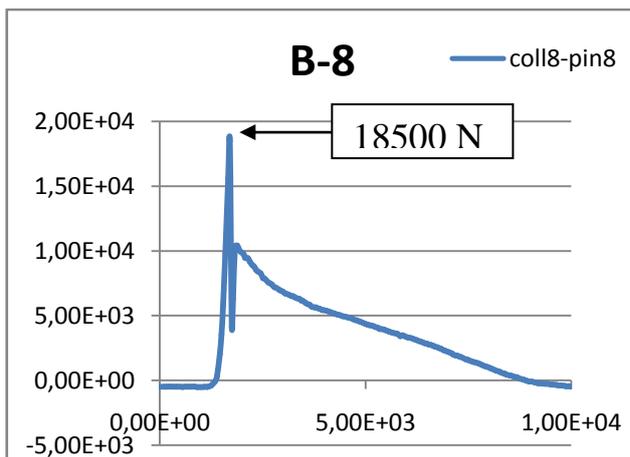
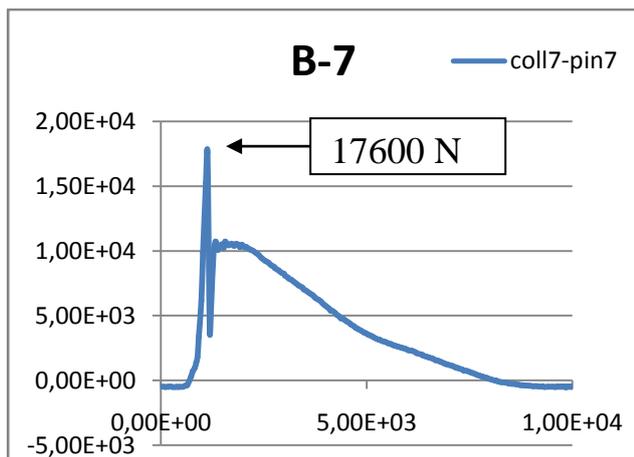
RISULTATI PROVA 2				
N° coppie	F spiant.	Area	Tau ad.	
b-1	14.000	423,4967	33,05811	N/mm2
b-2	19.500	442,5913	44,0587	N/mm2
b-3	17.500	442,692	39,53087	N/mm2
b-4	18.200	442,833	41,09901	N/mm2
b-5	16.100	442,0939	36,4176	N/mm2
b-6	17.200	445,1473	38,63889	N/mm2
b-7	17.600	442,6611	39,75954	N/mm2
b-8	18.500	442,725	41,78666	N/mm2
b-9	11.500	442,9342	25,96322	N/mm2
b-10	18.100	442,1055	40,94045	N/mm2
b-11	15.900	443,4554	35,85479	N/mm2
b-12	14.200	443,1879	32,04059	N/mm2
b-13	17.300	442,9668	39,05485	N/mm2
b-14	16.800	443,2946	37,89805	N/mm2

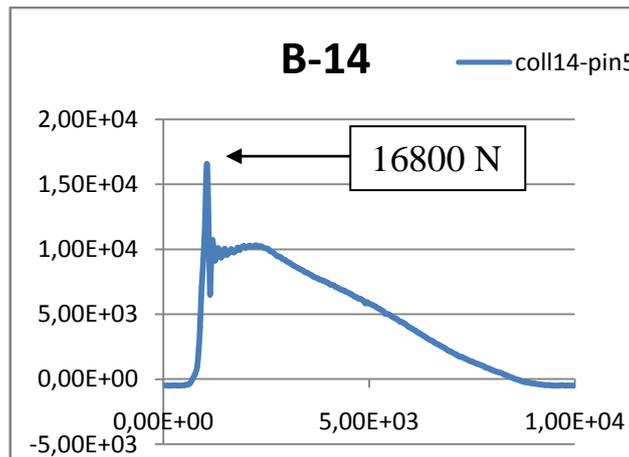
Tabella 5. 3 Risultati prove di spiantaggio pin-collar con gioco e pulitura

Dai risultati della seconda prova con superfici pulite si ottiene un valore medio della forza di spiantaggio di 16,6 kN e una tensione media di rottura statica a taglio pari a 37,6 N/mm² (MPa) con una deviazione standard di 4,7.

Di seguito sono riportati i diagrammi forza per spostamento registrati dalla macchina di prova:







Gli andamenti della forza presentano tutti un picco iniziale in corrispondenza di un piccolissimo spostamento, dopodiché c'è un crollo repentino e una serie di oscillazioni che accompagnano un andamento che, da prima cresce e successivamente decresce in maniera lineare.

PROVINI PIN-COLLAR CON GIOCO A TEMPERATURA AMBIENTE ADESIVO APPLICATO SOLO SU UN COMPONENTE

Questa tipologia di provini sono stati assemblati in queste condizioni:

- Temperatura ambiente
- Sgrassaggio delle superfici con LOCTITE 7063
- Gioco medio del campione 0,54 mm
- Adesivo applicato solo su un componente

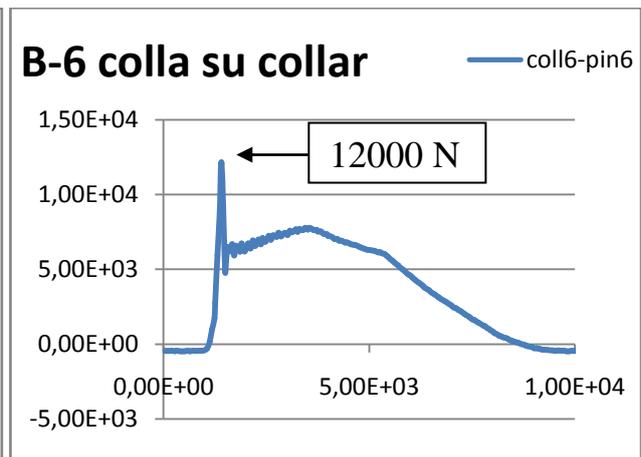
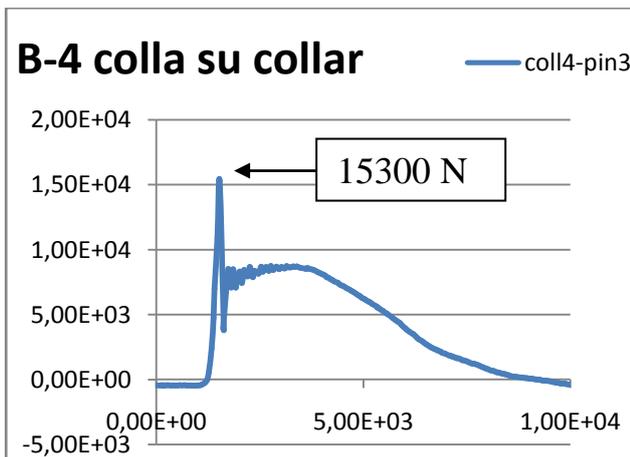
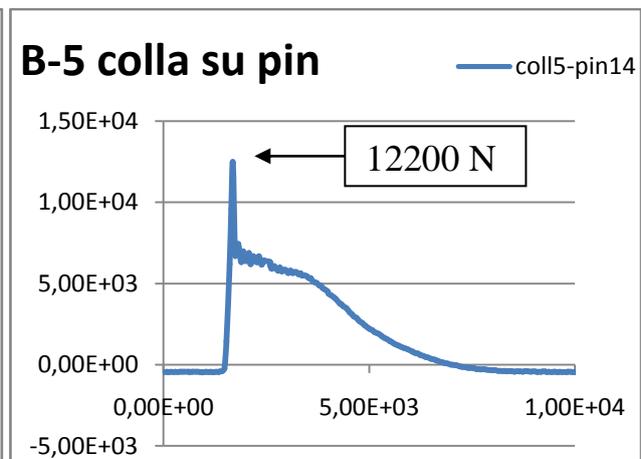
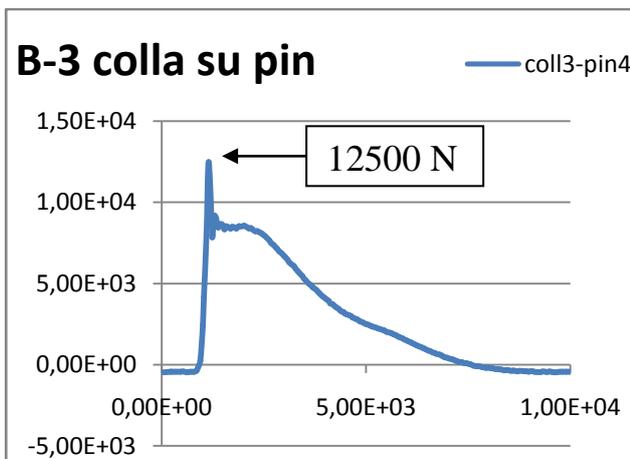
In questa prova l'incollaggio è stato effettuato applicando l'adesivo solo su un componente. Due campioni sono stati assemblati con l'adesivo solo sul pin mentre altri due campioni sono stati assemblati con la colla solo su collar. Le prove di spiantaggio hanno prodotto i seguenti risultati:

COLLA SOLO SU PIN					COLLA SOLO SU COLLAR				
N° coppia	F spiant.	Area	Tau ad.		N° coppia	F spiant.	Area	Tau ad.	
b-3	12.500	442,69	28,236	N/mm2	b-4	15.300	442,83	34,55	N/mm2
b-5	12.200	442,09	27,596	N/mm2	b-6	12.000	445,15	26,957	N/mm2

Tabella 5. 4 Risultati pin-collar con adesivo solo su un componente

Dai risultati della prova si ottiene, nel caso di adesivo applicato solo su pin, un valore medio della forza di spiantaggio di 12,35 kN e una tensione media di rottura statica a taglio pari a 27,9 N/mm² (MPa) con una deviazione standard di 0,45. Nel caso di adesivo applicato solo su collar si ottiene un valore medio di forza di spiantaggio pari a 13,65 kN e una tensione media di rottura statica a taglio di 30,7 N/mm² (MPa) con una deviazione standard di 5,3.

Di seguito sono riportati i diagrammi forza per spostamento registrati dalla macchina di prova:



Gli andamenti della forza presentati sono molto simili a quelli della prova precedente infatti, presentano tutti un picco iniziale in corrispondenza di un piccolissimo spostamento dopodiché c'è un crollo repentino e una serie di oscillazioni che accompagnano un andamento che, da prima cresce e successivamente decresce in maniera lineare.

PROVINI PIN-COLLAR CON GIOCO ASSEMBLATI A CALDO

Questa tipologia di provini sono stati assemblati con le seguenti condizioni:

- Collar riscaldato in forno a 150°C
- Sgrassaggio delle superfici con LOCTITE 7063
- Gioco medio del campione 0,54 mm
- Adesivo applicato solo sul componente pin

In questa prova i collar sono stati scaldati mediante un forno ad una temperatura di 150°C. L'adesivo è stato applicato solo al pin e successivamente inserito in maniera rapida nel collar realizzando l'assemblaggio delle parti. Le prove di spiantaggio effettuate su questi campioni hanno prodotto i seguenti risultati:

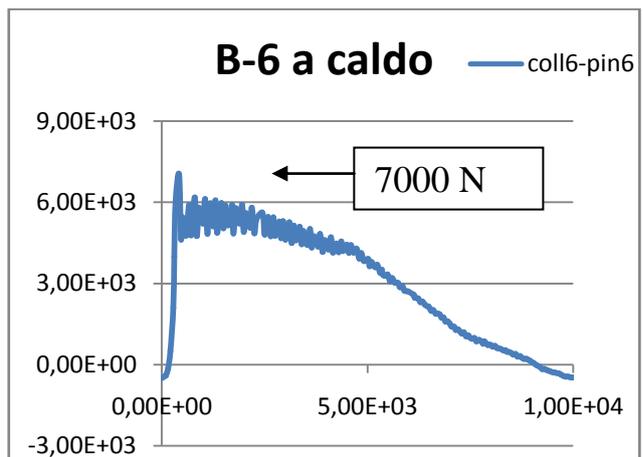
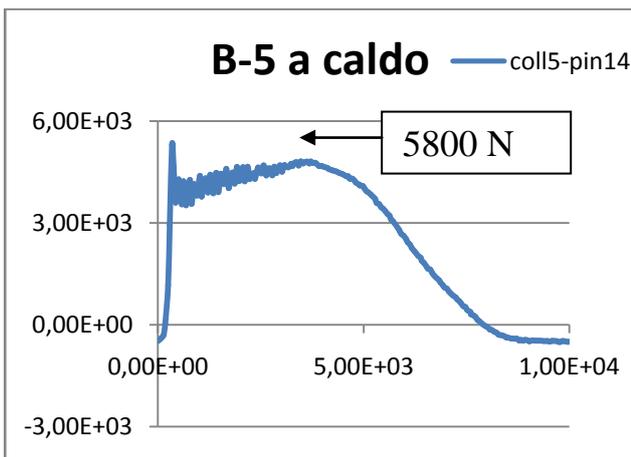
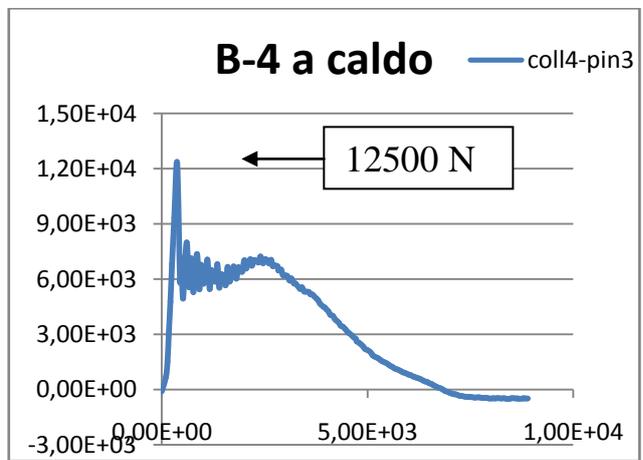
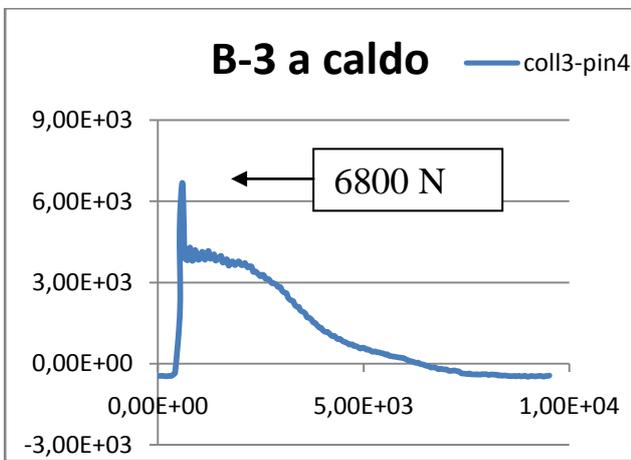
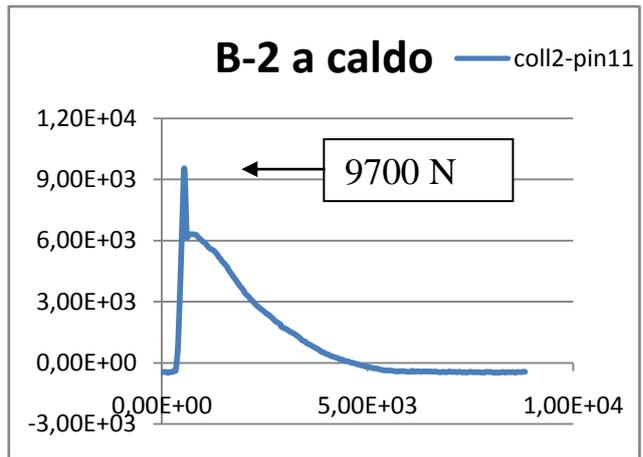
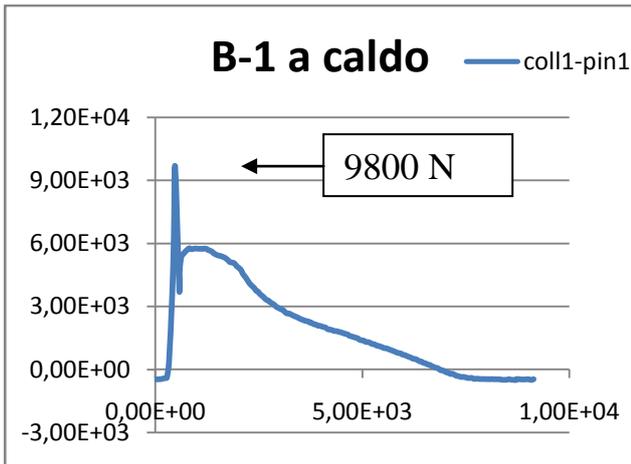
RISULTATI PROVA A CALDO

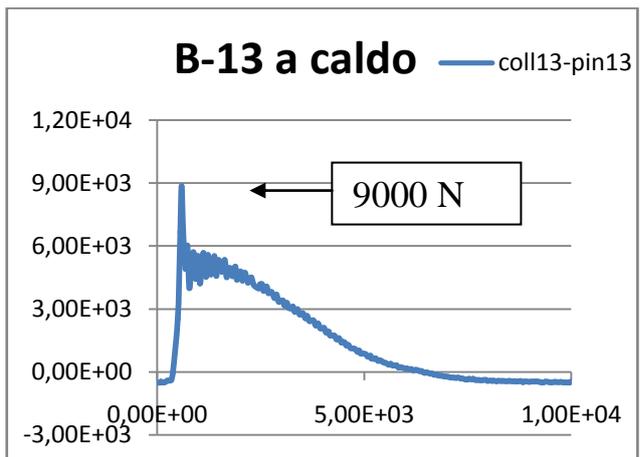
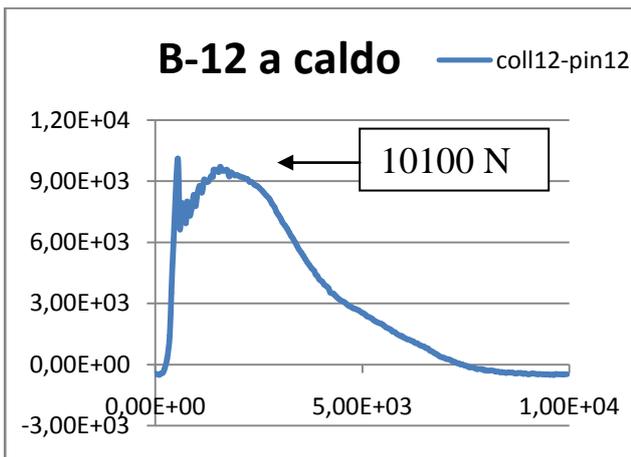
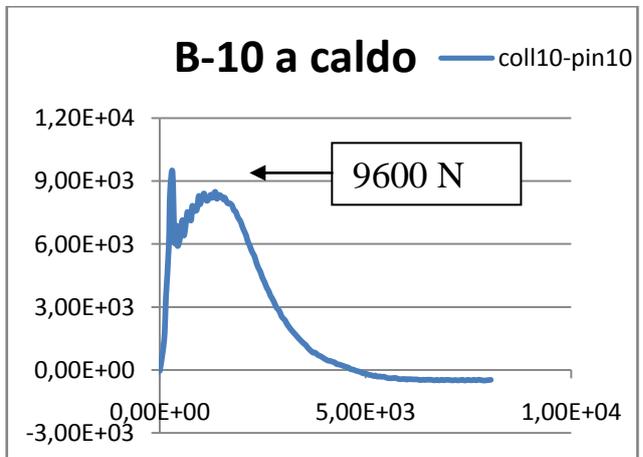
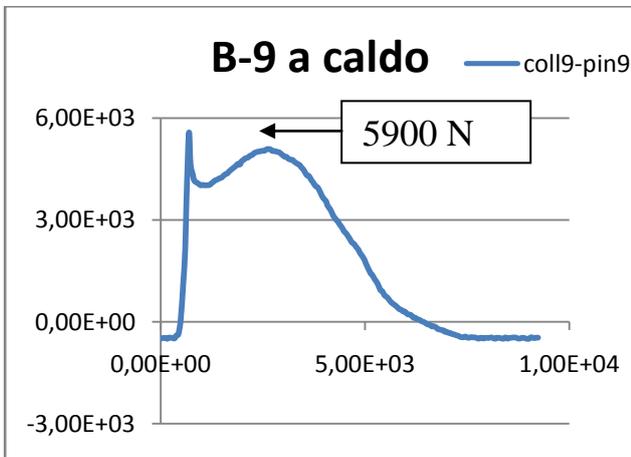
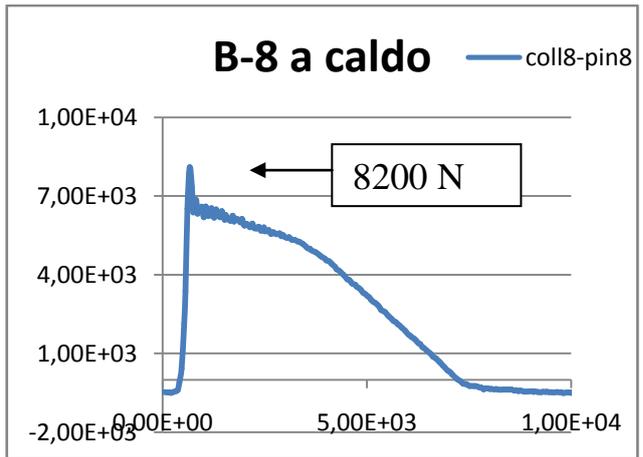
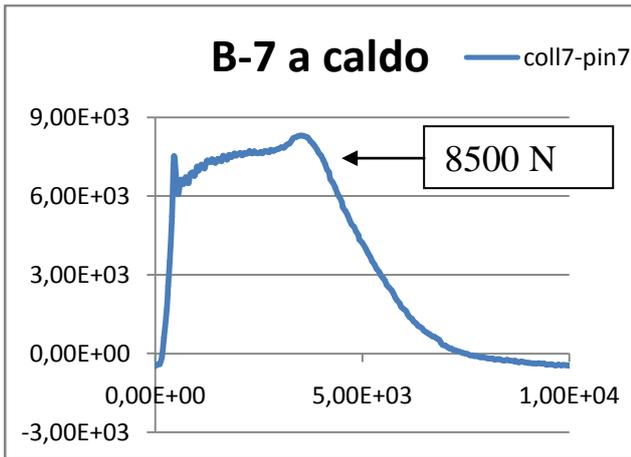
N° coppie	F spiant.	Area	Tau ad.	
b-1	9.800	423,4967	23,14067	N/mm2
b-2	9.700	442,5913	21,91638	N/mm2
b-3	6.800	442,692	15,36057	N/mm2
b-4	12.500	442,833	28,22734	N/mm2
b-5	5.800	442,0939	13,11938	N/mm2
b-6	7.000	445,1473	15,72513	N/mm2
b-7	8.500	442,6611	19,20205	N/mm2
b-8	8.200	442,725	18,52165	N/mm2
b-9	5.800	442,9342	13,09449	N/mm2
b-10	9.600	442,1055	21,71427	N/mm2
b-11	8.577	443,4554	19,34129	N/mm2
b-12	10.100	443,1879	22,78943	N/mm2
b-13	9.000	442,9668	20,31755	N/mm2
b-14	8.700	443,2946	19,62578	N/mm2

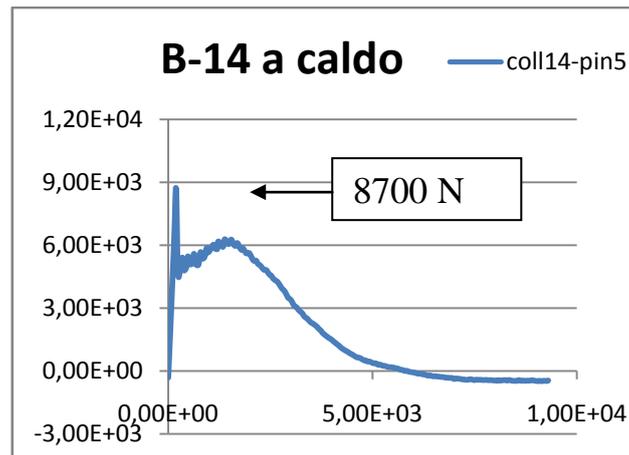
Tabella 5. 5 Risultati pin-collar con gioco assemblati a caldo

Dai risultati della prova si ottiene un valore medio della forza di spiantaggio di 8,6 kN e una tensione media di rottura statica a taglio pari a 18,1 N/mm² (MPa) con una deviazione standard di 4,2.

Di seguito sono riportati i diagrammi forza per spostamento registrati dalla macchina di prova:







Ancora una volta gli andamenti della forza sono molto simili a quelli delle prove precedenti infatti, presentano un picco iniziale in corrispondenza di un piccolissimo spostamento dopodiché c'è un crollo repentino e una serie di oscillazioni che accompagnano un andamento che, da prima risulta crescente e successivamente decresce in maniera lineare.

PROVINI PIN-COLLAR CON GIOCO ASSEMBLATI A FREDDO

Questa tipologia di provini sono stati assemblati con le seguenti condizioni:

- Pin raffreddato a - 30°C
- Sgrassaggio delle superfici con LOCTITE 7063
- Gioco medio del campione 0,54 mm
- Adesivo applicato solo sul componente collar

In questa prova i pin sono stati raffreddati mediante l'utilizzo di un congelatore ad una temperatura di - 30°C. L'adesivo è stato applicato solo al collar, successivamente si preleva il pin e molto rapidamente lo si inserisce nel collar realizzando l'assemblaggio delle parti. Le prove di spiantaggio effettuate su questi campioni hanno prodotto i seguenti risultati:

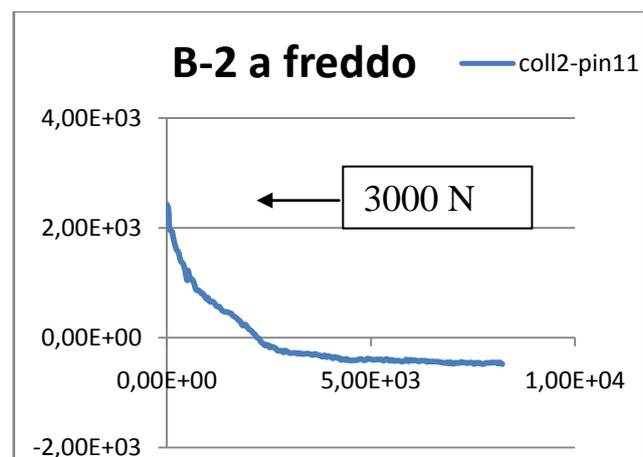
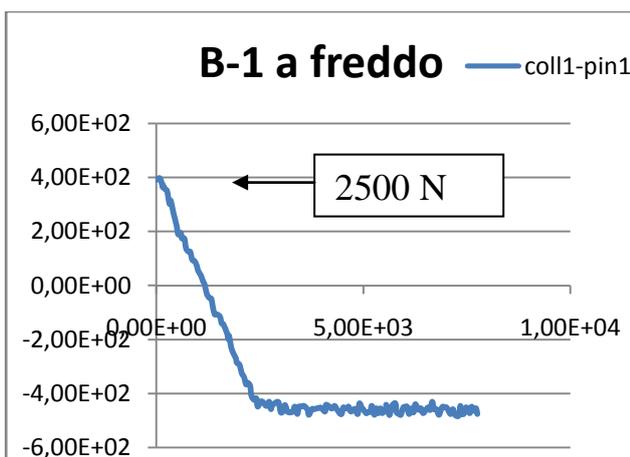
RISULTATI PROVA

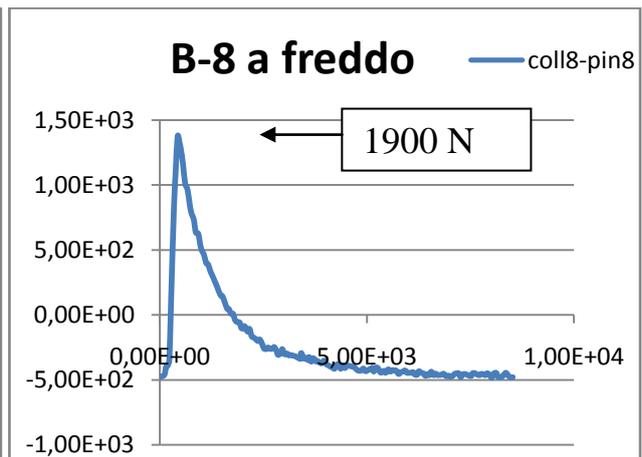
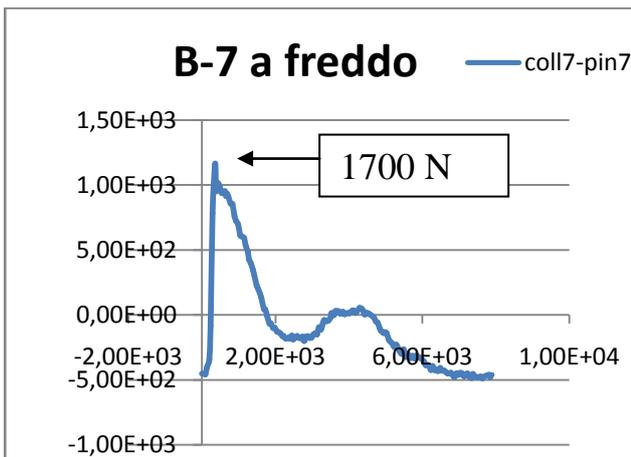
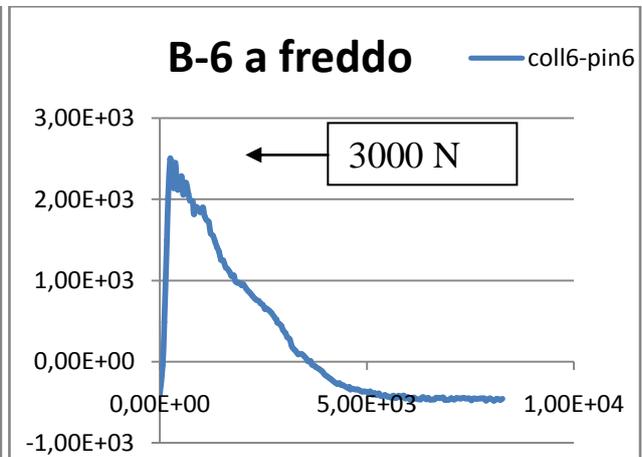
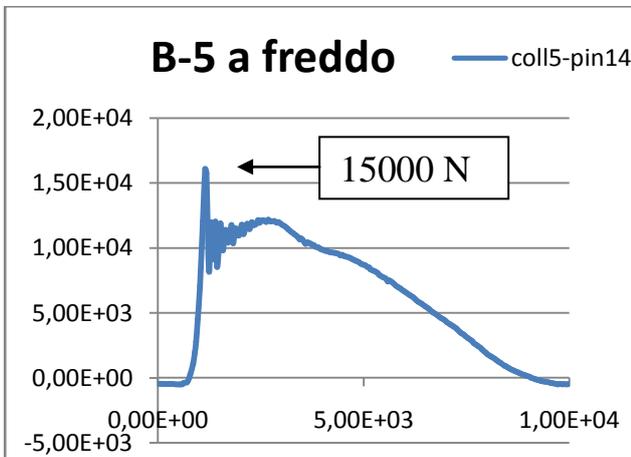
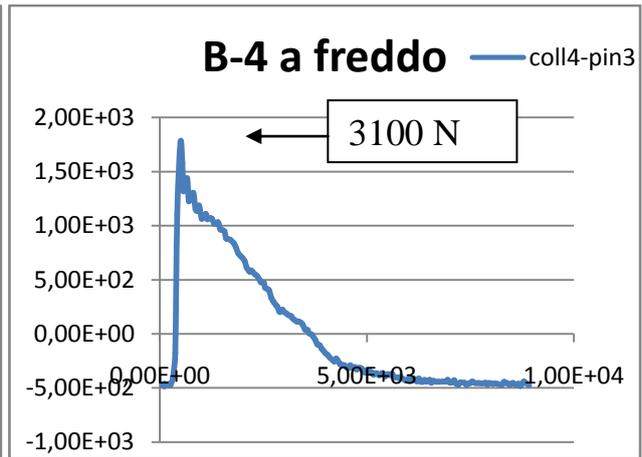
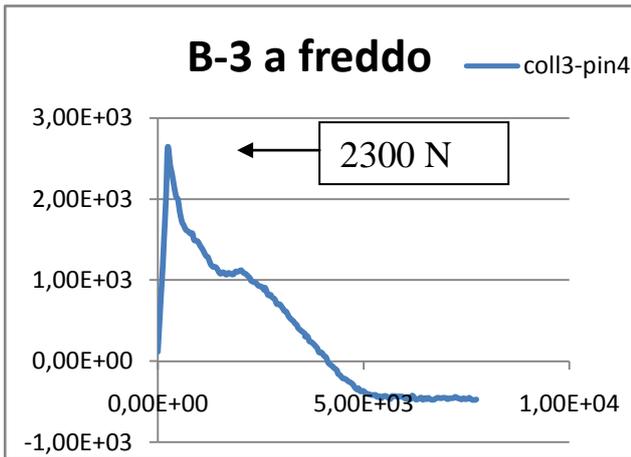
N° coppie	F spiant.	Area	Tau ad.	
b-1	2.500	423,4967	5,903233	N/mm2
b-2	3.000	442,5913	6,778262	N/mm2
b-3	2.300	442,692	5,195486	N/mm2
b-4	3.100	442,833	7,000381	N/mm2
b-5	15.000	442,0939	33,166748	N/mm2
b-6	3.000	445,1473	6,739342	N/mm2
b-7	1.700	442,6611	3,84041	N/mm2
b-8	1.900	442,725	4,291603	N/mm2
b-9	1.500	442,9342	3,386507	N/mm2
b-10	3.800	442,1055	8,595233	N/mm2
b-11	2.408	443,4554	5,430083	N/mm2
b-12	3.400	443,1879	7,67169	N/mm2
b-13	3.300	442,9668	7,449768	N/mm2
b-14	2.000	443,2946	4,511672	N/mm2

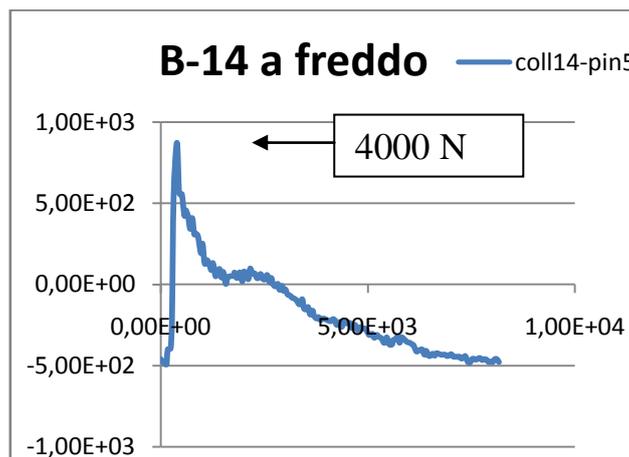
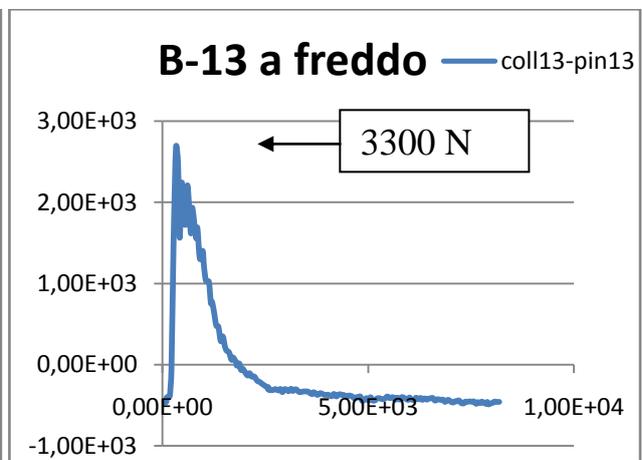
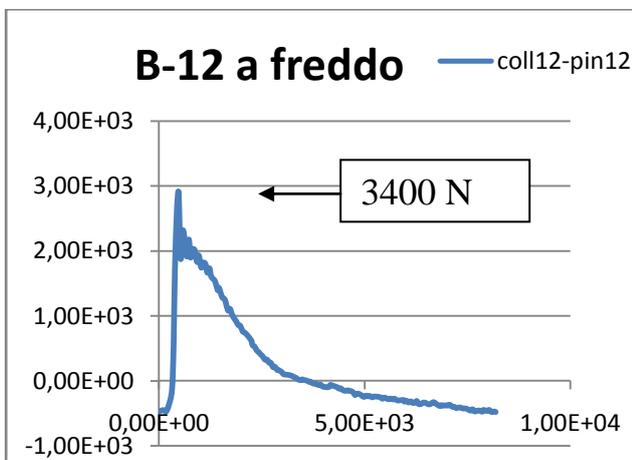
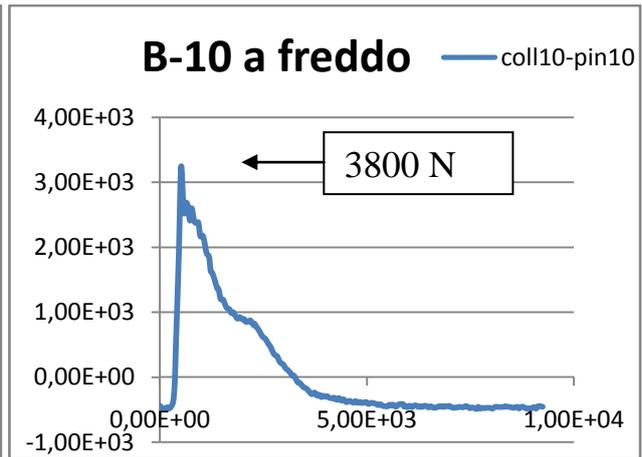
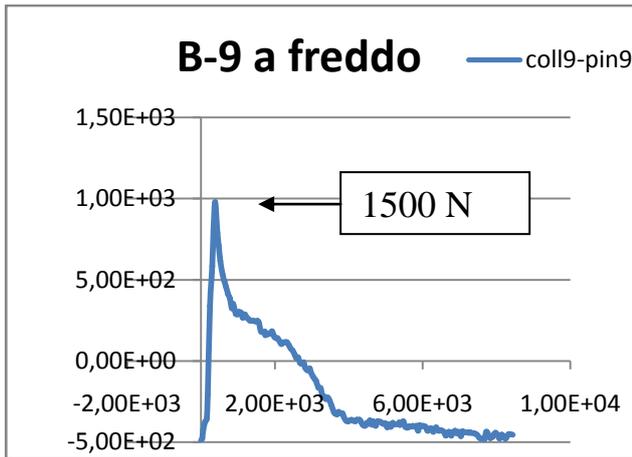
Tabella 5. 6 Risultati pin-collar con gioco assemblati a freddo

Dai risultati della prova si ottiene un valore medio della forza di spiantaggio di 2,5 kN e una tensione media di rottura statica a taglio pari a 6,1 N/mm² (MPa) con una deviazione standard di 1,5.

Di seguito sono riportati i diagrammi forza per spostamento registrati dalla macchina di prova:







Gli andamenti presentano tutti un picco do forza in corrispondenza di un piccolo spostamenti iniziale, dopodiché la forza decresce in maniera più o meno lineare con qualche piccola oscillazione subito dopo del picco.

PIN-COLLAR AD INTERFERENZA

Le giunzioni pin-collar ad interferenza dovevano essere testate in tre condizioni di assemblaggio differenti: assemblaggio alla pressa, assemblaggio a caldo e assemblaggio a freddo. Per problemi legati alle dimensioni dei componenti e alle temperature massime sopportabili dalla colla, gli assemblaggi a caldo e a freddo non sono stati testati. Di seguito è riportata la tabella che racchiude le grandezze geometriche medie dei campioni con relativa quantità d’interferenza.

Pin-collar assemblati a secco								
N° coppia	Dati pin		Dati collar				Interferenza	
		D_la medio (mm)		D_Ai medio (mm)	Lf medio (mm)	D_Aa medio (mm)	int. Diam (mm)	Int. Rad (mm)
A-13	pin_i_13	12,748	coll_i_13	12,747	11,12	25,3	0,001	0,0005
A-20	pin_i_20	12,75	coll_i_20	12,747	11,17	25,3	0,003	0,0015
A-39	pin_i_39	12,755	coll_i_39	12,742	11,14	25,3	0,013	0,0065
C-5	pin_inc_5	12,752	coll_inc_5	12,742	11,16	25,3	0,01	0,005
A-40	pin_i_40	12,753	coll_i_40	12,743	11,13	25,3	0,01	0,005
A-41	pin_i_41	12,748	coll_i_41	12,745	11,15	25,3	0,003	0,0015
C-7	pin_inc_7	12,752	coll_inc_7	12,742	11,10	25,3	0,01	0,005

Tabella 5. 7 Dati geometrici medi di pin-collar ad interferenza assemblati senza adesivo

Pin-collar assemblati con adesivo								
N° coppia	Dati pin		Dati collar				Interferenza	
		D_la medio (mm)		D_Ai medio (mm)	Lf medio (mm)	D_Aa medio (mm)	int. Diam (mm)	Int. Rad (mm)
A-5	pin_i_5	12,748	coll_i_5	12,745	11,16	25,3	0,003	0,0015
A-11	pin_i_11	12,752	coll_i_11	12,748	11,13	25,3	0,004	0,002
A-18	pin_i_18	12,748	coll_i_18	12,747	11,14	25,3	0,001	0,0005
A-21	pin_i_21	12,75	coll_i_21	12,747	11,15	25,3	0,003	0,0015
A-26	pin_i_26	12,748	coll_i_26	12,745	11,16	25,3	0,003	0,0015
A-29	pin_i_29	12,748	coll_i_29	12,745	11,15	25,3	0,003	0,0015
A-30	pin_i_30	12,748	coll_i_30	12,745	11,15	25,3	0,003	0,0015
A-32	pin_i_32	12,748	coll_i_32	12,747	11,12	25,3	0,001	0,0005
A-33	pin_i_33	12,745	coll_i_33	12,743	11,15	25,3	0,002	0,001
A-34	pin_i_34	12,745	coll_i_34	12,735	11,15	25,3	0,01	0,005

Tabella 5. 8 Dati geometrici di pin-collar ad interferenza assemblati con adesivo

PIN-COLLAR AD INTEFERENZA ASSEMBLATI A SECCO

Il gruppo di provini pin-collar che costituiscono il campione sono stati assemblati con queste condizioni:

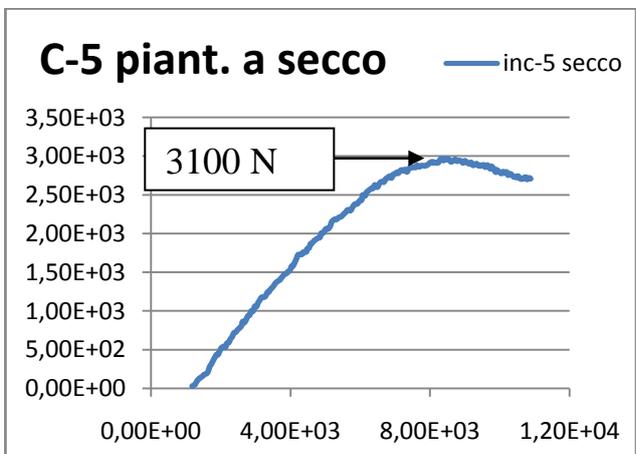
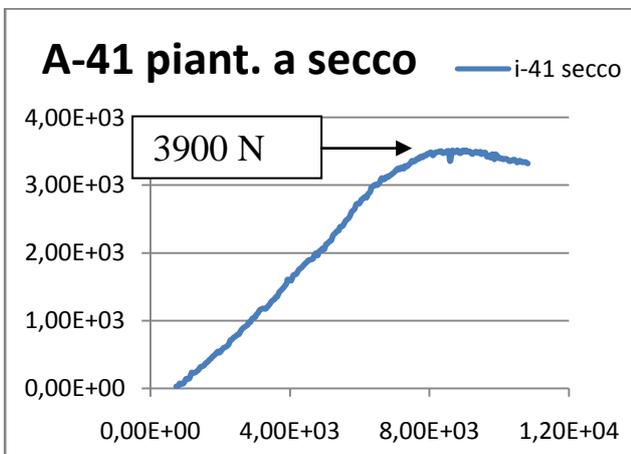
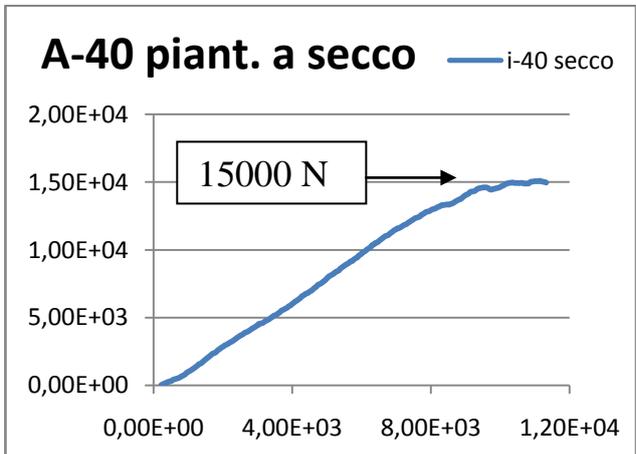
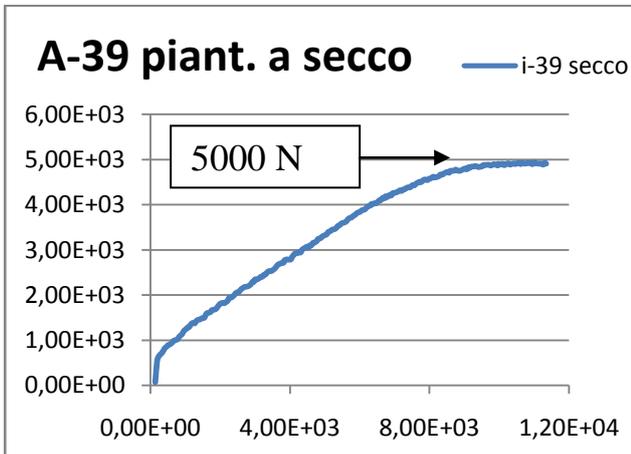
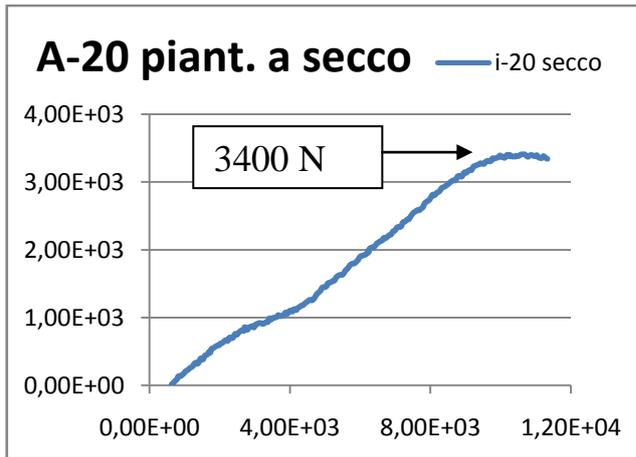
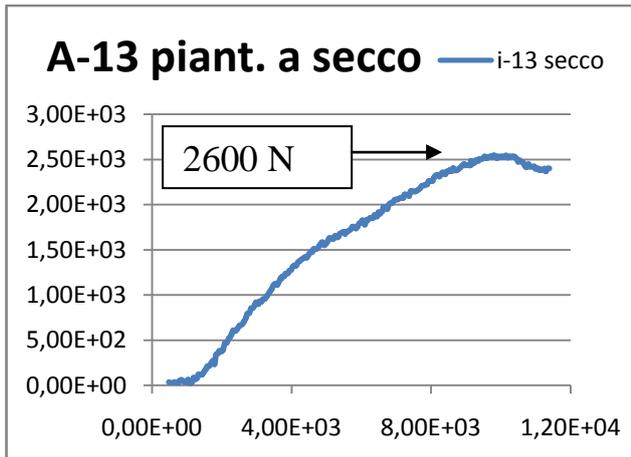
- Temperatura ambiente
- Pulitura superficiale
- Assemblaggio alla pressa
- Assemblaggio senza adesivo (a secco)

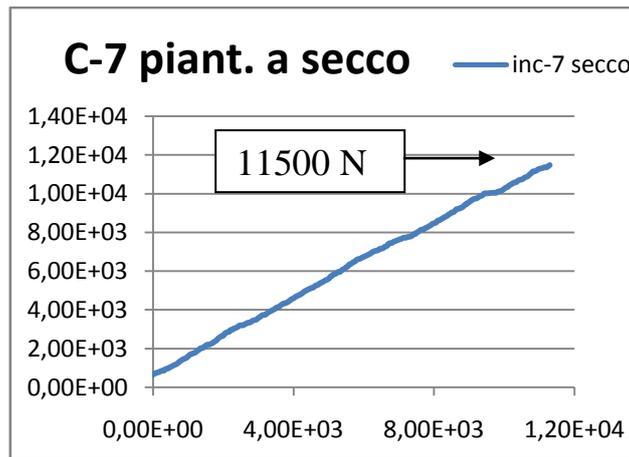
Questo campione serve per poter valutare la differenza nel caso si accoppiamento tradizionale ad interferenza e accoppiamento ibrido interferenza più adesivo, di seguito sono riportati i dati delle prove con riferimento a forze di assemblaggio e forze di spiantaggio rilevate dalla pressa:

N° coppia	Area di accoppiamento (mm ²)	Qa	interferenza specifica	Pressione d'accoppiamento teorica(MPa)	Forza di piantaggio (N)	Forza di spiantaggio (N)	tau interferenza (N/mm ²)	coeff att.
A-13	445,33	0,50	0,0001	6,00	2600,00	3000,00	6,74	1,122835
A-20	447,37	0,50	0,0002	18,00	3400,00	3700,00	8,27	0,459544
A-39	446,16	0,50	0,0010	78,01	5000,00	5150,00	11,54	0,147966
C-5	446,91	0,50	0,0008	60,01	3100,00	3200,00	7,16	0,119308
A-40	445,75	0,50	0,0008	60,01	15000,00	11150,00	25,01	0,416856
A-41	446,49	0,50	0,0002	18,00	3400,00	3900,00	8,73	0,485201
C-7	444,51	0,50	0,0008	60,01	11500,00	8300,00	18,67	0,311128

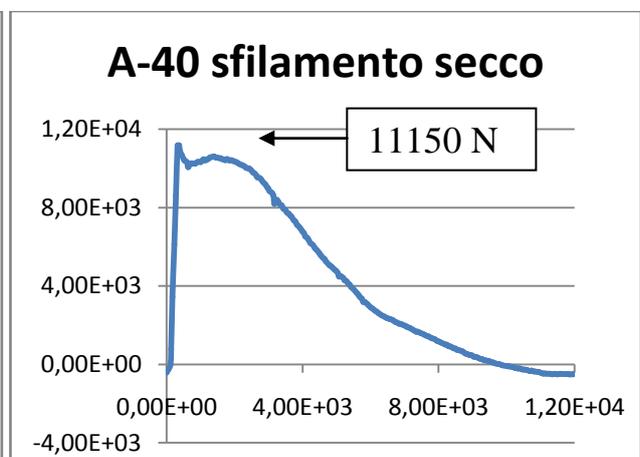
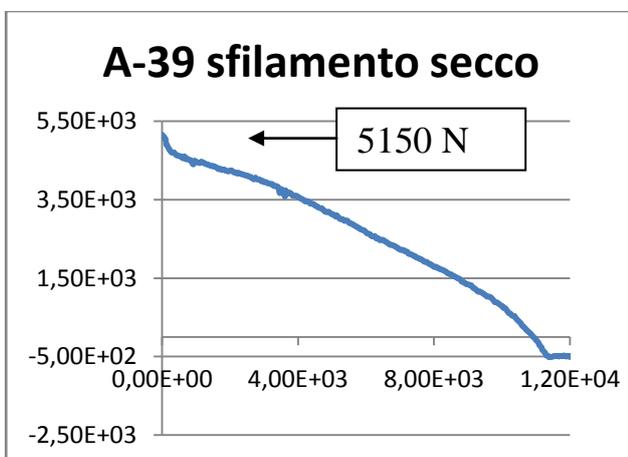
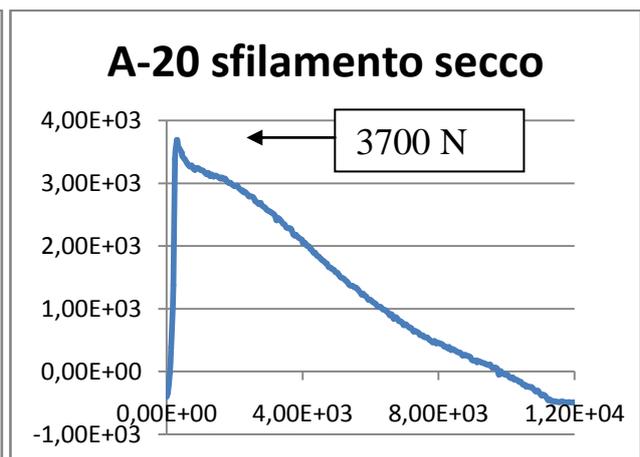
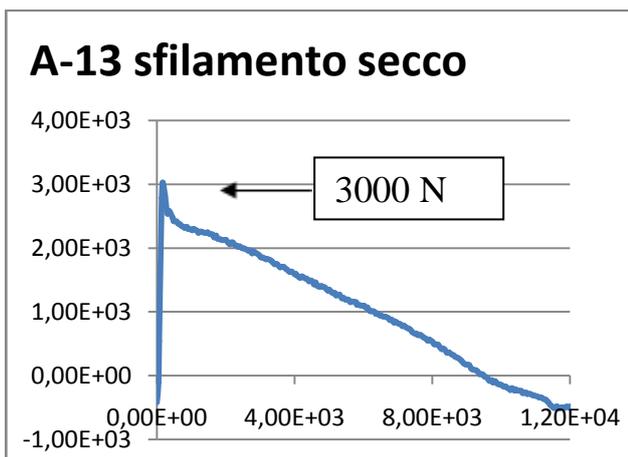
Tabella 5. 9 Risultadi prove di piantaggio e spiantaggio pin-collar a secco

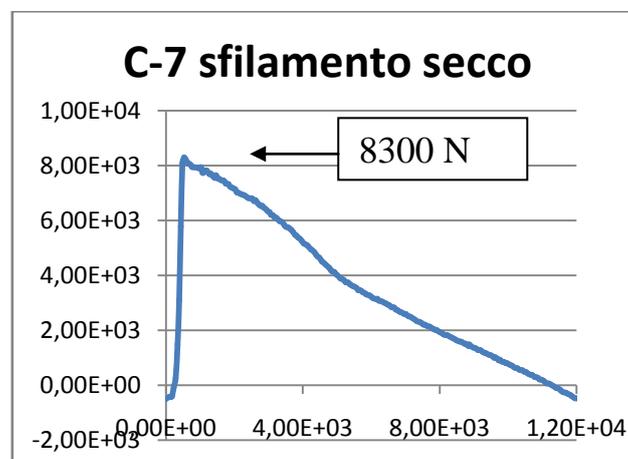
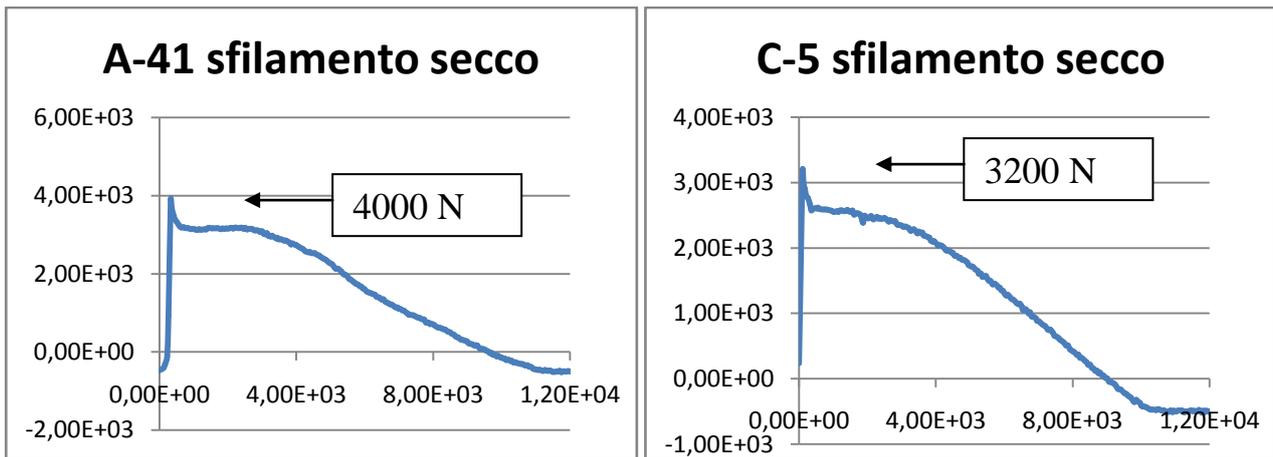
Dalle prove si ottengono valori della forza di piantaggio abbastanza simili a quelli di spiantaggio, tuttavia in due casi si registrano forti differenze tra le due forze, in particolare la forza di piantaggio necessaria a realizzare l'accoppiamento risulta essere maggiore della forza di spiantaggio. Si evidenzia, inoltre, un valore medio del coefficiente d'attrito pari a 0,364 (calcolato escludendo il valore minimo e massimo) utile nell'analisi del set di campioni pin-collar ibridi. Di seguito sono riportati gli andamenti delle forze di piantaggio registrate dalla macchina di prova:





La forza di piantaggio cresce in maniera lineare all'aumentare della lunghezza di accoppiamento finché non raggiunge una gobba in corrispondenza della fine lunghezza d'accoppiamento. Analogamente la macchina di prova fornisce per gli spiantggi i seguenti andamenti delle forze in funzione dello spostamento:





I diagrammi degli spiantaggi mostrano un picco di forza per un piccolo valore di spostamento con un successivo crollo repentino della forza che poi tende a decrescere in maniera più o meno lineare con qualche piccola oscillazione.

PIN-COLLAR AD INTEFRERENZA ASSEMBLATI A SECCO

Il gruppo di provini pin-collar che costituiscono questo campione sono stati assemblati con queste condizioni:

- Temperatura ambiente
- Pulitura superficiale
- Assemblaggio alla pressa
- Assemblaggio con adesivo anaerobico (colla)

Da questo campione di provini possiamo capire se una giunzione ibrida può garantire migliori prestazioni rispetto una giunzione ad interferenza tradizionale. Per far ciò,

sono necessari i dati riportati dalle prove di spiantaggio, riassunti nella seguente tabella:

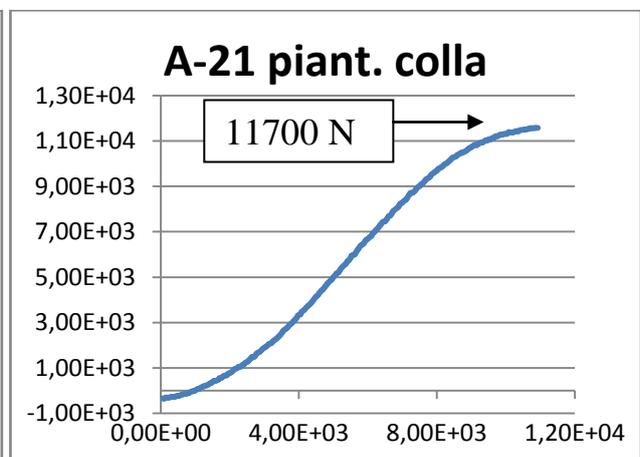
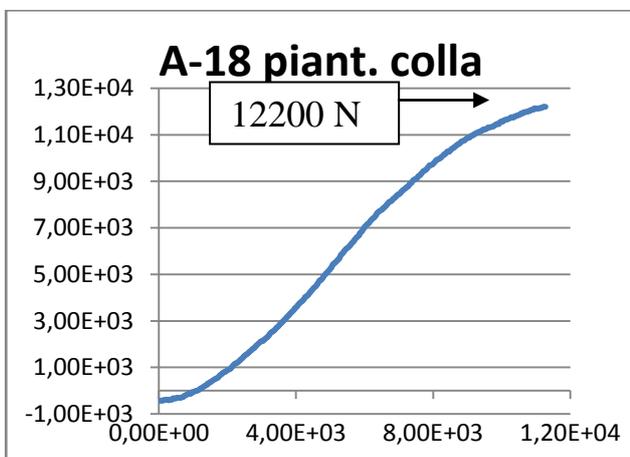
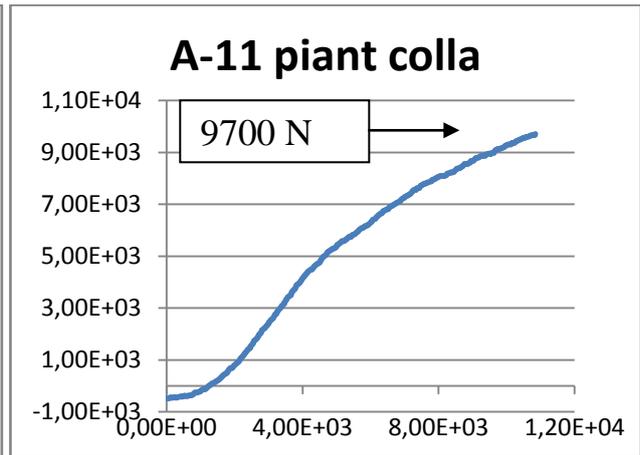
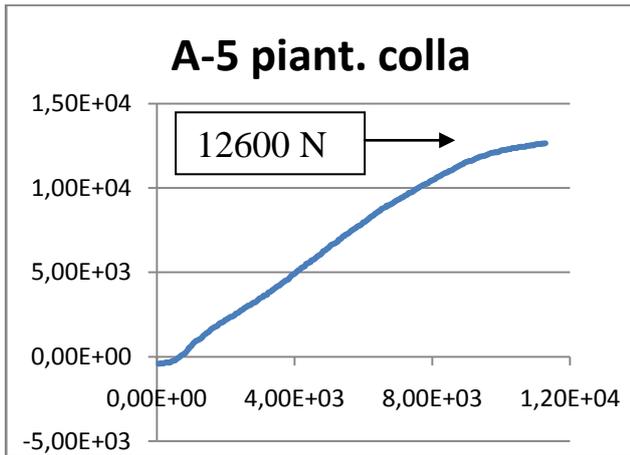
N° coppia	Area di accoppiamento (mm ²)	Qa	interferenza specifica	Pressione d'accoppiamento teorica (MPa)	Forza di piantaggio (N)	Forza di spiantaggio (N)	tau totale (N/mm ²)
A-5	446,89	0,50	0,0002	18,00	12600,00	15050,00	33,68
A-11	445,82	0,50	0,0003	23,99	9700,00	14300,00	32,08
A-18	446,13	0,50	0,0001	6,00	12200,00	15900,00	35,64
A-21	446,56	0,50	0,0002	18,00	11700,00	14800,00	33,14
A-26	446,89	0,50	0,0002	18,00	11400,00	12850,00	28,75
A-29	446,49	0,50	0,0002	18,00	13000,00	16800,00	37,63
A-30	446,49	0,50	0,0002	18,00	14400,00	15900,00	35,61
A-32	445,33	0,50	0,0001	6,00	15200,00	17500,00	39,30
A-33	446,41	0,50	0,0002	12,01	16900,00	18800,00	42,11
A-34	446,27	0,50	0,0008	60,07	15100,00	18400,00	41,23

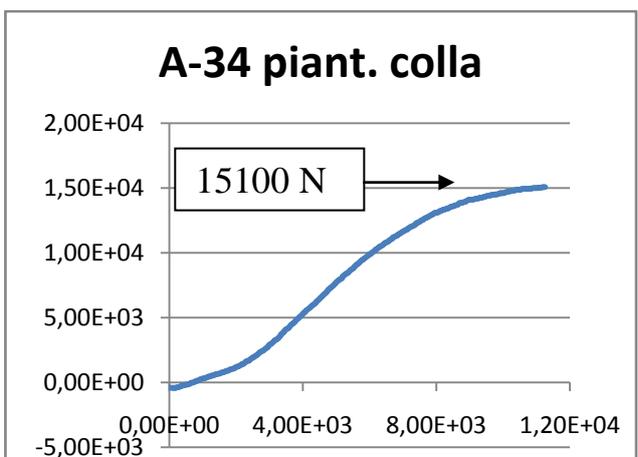
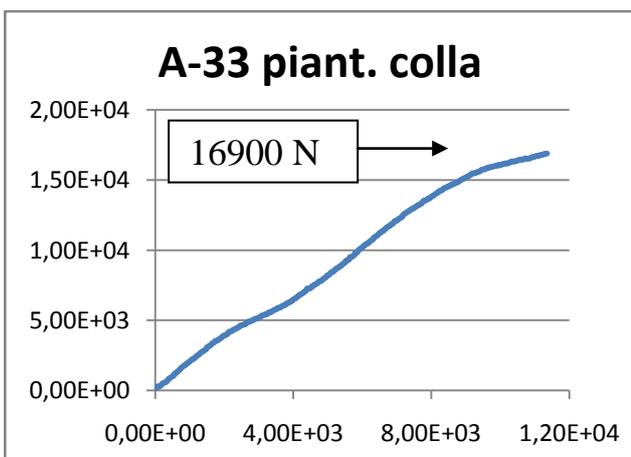
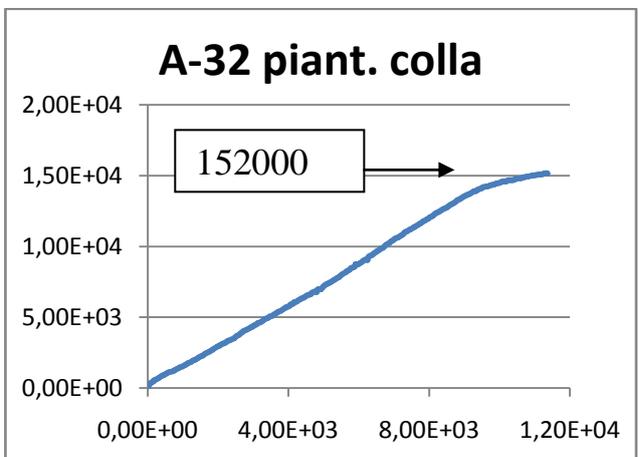
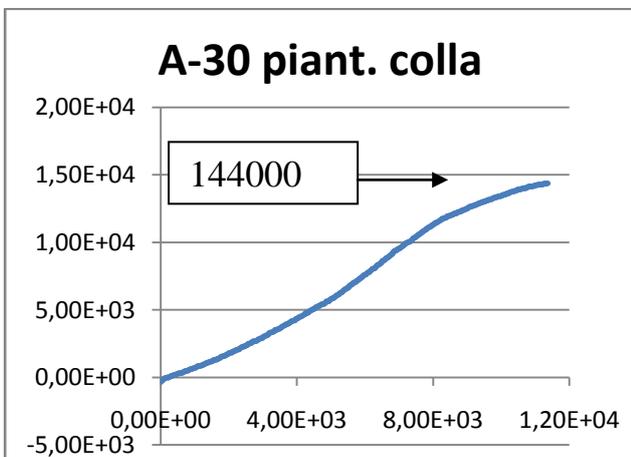
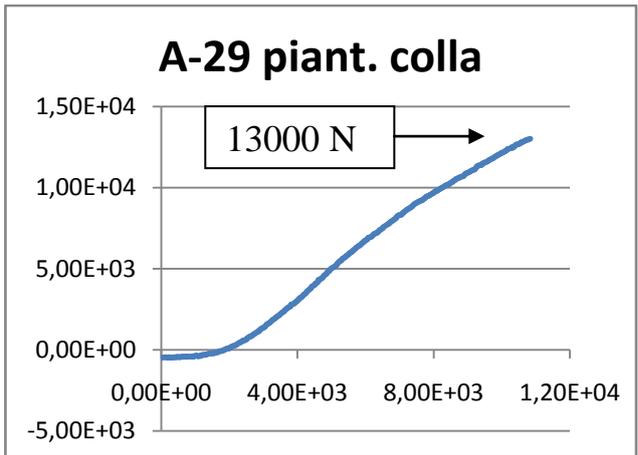
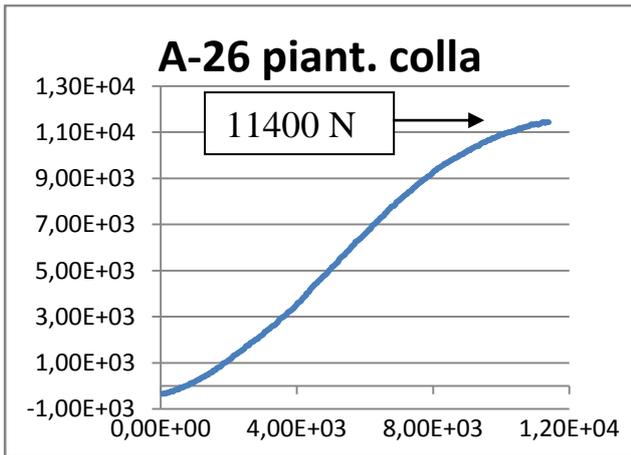
Tabella 5. 10 Dati su piantaggio e spiantaggio di pin-colla ad interferenza con adesivo

Dalla tensione totale registrata nelle prove è possibile determinare lo sforzo imputabile al solo adesivo se è nota la quota parte di tensione dovuta all'interferenza. La tensione data dall'interferenza si può trovare poiché conosciamo la geometria dei provini e quindi la pressione torica di contatto. Dalle prove sui pin-collari a secco possiamo stimare un coefficiente d'attrito assiale pari a 0,364 da poter utilizzare per ricondurre la pressione teorica d'accoppiamento alla forza assiale di spiantaggio e quindi, alla tensione a taglio dovuta all'interferenza (vedi capitolo 1 paragrafo 1.1 "Accoppiamenti albero mozzo" pag.7). Con queste considerazioni si ottengono i seguenti valori di tensione a taglio dell'adesivo nei componenti ibridi:

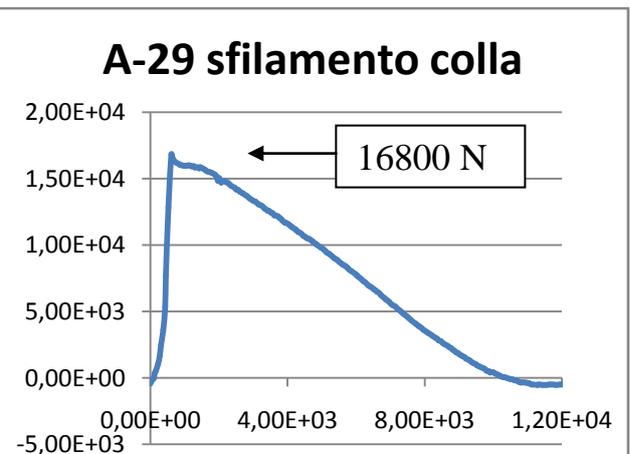
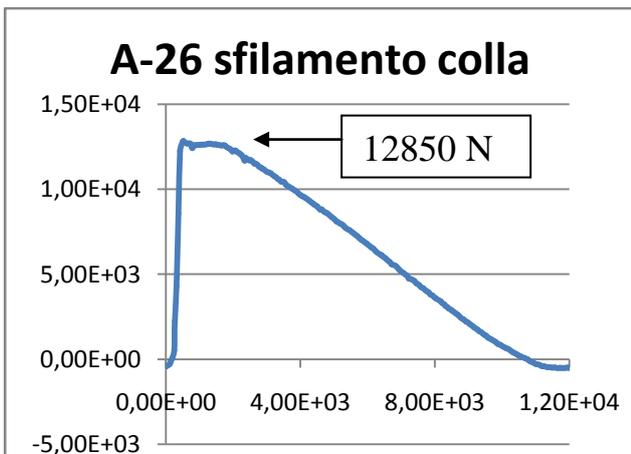
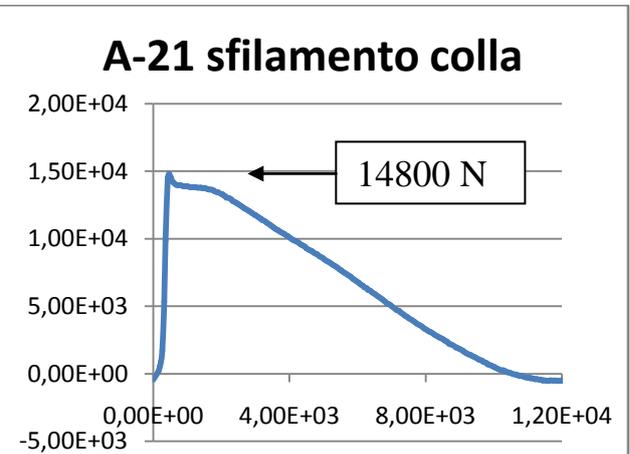
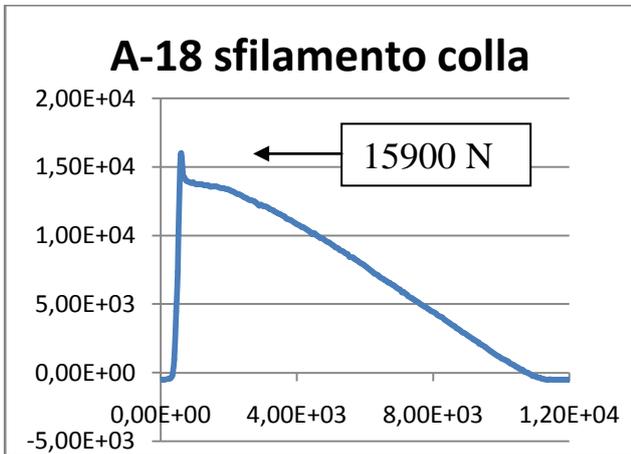
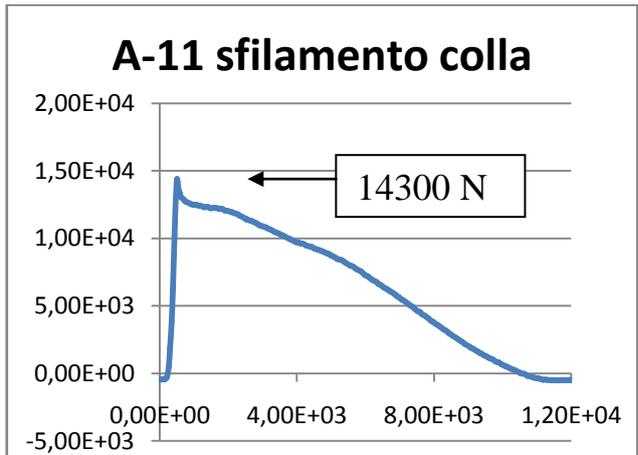
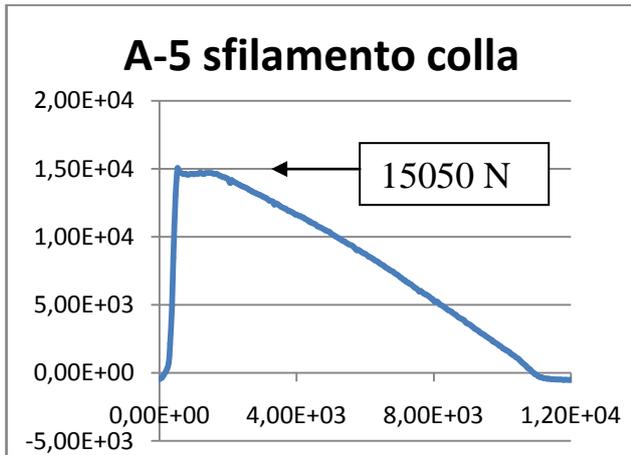
N° coppia	tau totale (N/mm ²)	tau interferenza (N/mm ²)	tau adesivo (N/mm ²)
A-5	33,68	6,552828723	27,12
A-11	32,08	8,733307999	23,34
A-18	35,64	2,183871764	33,46
A-21	33,14	6,551101381	26,59
A-26	28,75	6,552828723	22,20
A-29	37,63	6,552828723	31,07
A-30	35,61	6,552828723	29,06
A-32	39,30	2,183871764	37,11
A-33	42,11	4,369875774	37,74
A-34	41,23	21,86556441	19,37

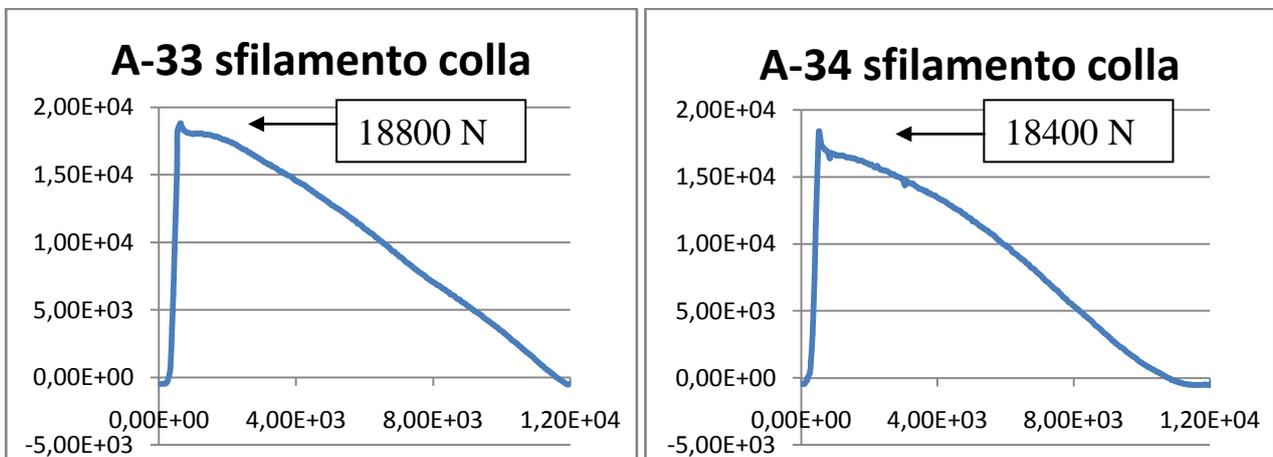
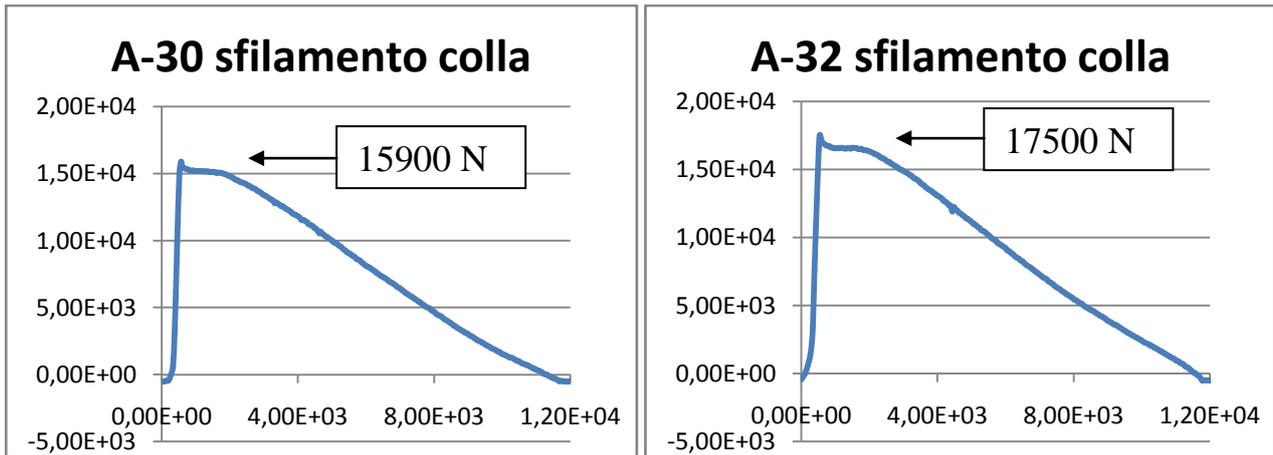
In questo caso non ha senso stabilire una media sul valore di tensione a rottura statica a taglio totale perché dipende dalla quantità di interferenza del provino. Ha senso fare la media sulla tensione attribuibile al solo adesivo perché si rileva un valore di 28,7 N/mm² con una deviazione standard pari a 5, di conseguenza si può dire che il valore medio è piuttosto stabile su un valore costante anche per diversi valori di interferenza. Oltre ai valori di tensione si riportano di seguito i diagrammi ottenuti nelle operazioni di piantaggio e spiantaggio dei provini ibridi:





Per quanto riguarda lo spiantaggio, i diagrammi sono i seguenti:





Gli andamenti sono tutti molto simili come aspetto e sono caratterizzati da un picco di forza corrispondente alla rottura dell'adesivo, successivamente si assiste ad un crollo repentino della forza seguito da un breve tratto circa costante, poi la forza decresce in maniera lineare con il decrescere della lunghezza d'accoppiamento.

5.2 Analisi dei risultati

Come si è visto nel paragrafo precedente i risultati ottenuti sono divisi in due parti che riguardano rispettivamente i provini con gioco e i provini ad interferenza. Essi saranno prima di tutto analizzati in maniera separata per poi fare qualche considerazione fondendo i risultati dei due gruppi.

PIN-COLLAR CON GIOCO

Per prima cosa analizziamo i grafici forza-spostamento ottenuti dalle prove sui campioni con gioco. Tutti i grafici presentano un andamento pressoché simile che possiamo identificare con il seguente grafico:

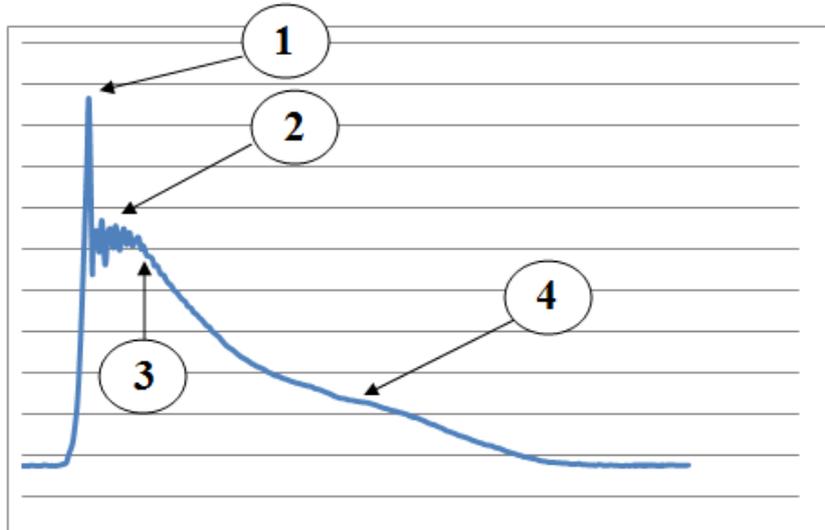


Figura 5. 1 Andamento tipico della forza di spiantaggio pin-collr con gioco

Si possono distinguere 4 zone che si possono ritrovare in tutti i diagrammi dei provini con gioco. Per ogni parte de grafico c’è una spiegazione plausibile sul perché la curva assuma quella forma. Possiamo spiegare le quattro zone nella maniera seguente:

1. Picco: dopo un breve spostamento si assiste al picco di forza assiale che corrisponde alla forza necessaria per spezzare i legami dell’adesivo. Si genera dopo un breve spostamento perché l’adesivo anaerobico, come la maggior parte degli adesivi, è molto rigido perciò si ha rottura con deformazioni contenute.
2. Oscillazioni: il provino in acciaio è dotato di elasticità perciò è da considerarsi una molla a tutti gli effetti, il cedimento di schianto dell’adesivo scarica in maniera improvvisa la molla (che fino a quel punto era fortemente compressa tra gli afferraggi della macchina di prova) e si mette ad oscillare per qualche istante fino al completo smorzamento.
3. Picco secondario: in questo tratto la forza tende a risalire come se l’energia sprigionata nella rottura dell’adesivo riesca in qualche modo a ripolimerizzare in qualche zona dell’adesivo ancora non indurito.

4. Tratto lineare: siccome l'adesivo non ha più effetto la forza decresce in maniera lineare con il decrescere della lunghezza d'accoppiamento poiché l'espressione che lega la forza alla lunghezza è la seguente:

$$F_{spiantaggio} = P \text{ di accoppiamento} \times \mu_A \times D_F \pi L_F$$

Siccome la pressione di accoppiamento, il coefficiente d'attrito assiale, sono circa costanti la forza e la lunghezza d'accoppiamento sono direttamente legati.

Per quanto riguarda le tensioni di rottura statiche a taglio prendiamo come prova di riferimento la seconda effettuata cioè quella dei provini pin-collar puliti con solvente e assemblati a temperatura ambiente, i quali hanno esibito i valori di rottura più elevati con $37,5 \text{ N/mm}^2$. I valori di tensione di rottura delle altre prove sono indicati come abbassamento percentuale rispetto alla prova di riferimento. Osservando la frattura dei provini trattati con solvente si nota la rottura coesiva dello strato adesivo che rappresenta la condizione migliore e indica il corretto funzionamento dello strato adesivo. Sulle superfici si forma come una sorta di polvere che ricopre tutta l'area di accoppiamento, questo è indice di un completa polimerizzazione dello strato adesivo.



Figura 5. 2 rottura coesiva nei provini puliti con solvente

I provini pin-collar non puliti e assemblati a temperatura ambiente hanno fatto registrare una tensione media di rottura a taglio di $12,1 \text{ N/mm}^2$ con un peggioramento della prestazione adesiva rispetto ai provini di riferimento pari al 67%. La causa di questo peggioramento è da attribuire allo strato oleoso che, seppur non visibile, è presente sulla superficie dei componenti come residuo della lavorazione. La superficie di frattura si presenta con vaste aree di adesivo non polimerizzato poiché

l'olio impedisce il contatto intimo dell'adesivo col substrato metallico, particolare fondamentale per l'indurimento di adesivi anaerobici.

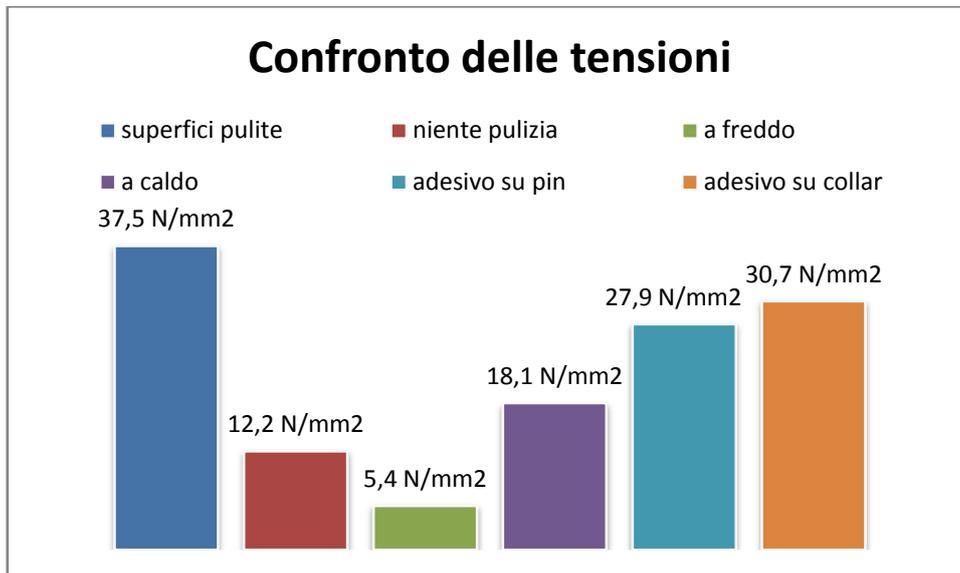


Figura 5. 3 Confronto tra le tensioni di rottura nelle varie prove

La peggiore prestazione adesiva si rileva nelle prove su pin-collar assemblati a freddo i quali, con solo 5,4 N/mm² di tensione di rottura, presentano un abbassamento del 86% rispetto ai provini puliti e assemblati a temperatura ambiente. Un'idea di quale sarebbe stato l'andamento della prestazione adesiva di questi provini fu subito chiara al momento dell'assemblaggio, poiché nell'istante stesso in cui i pin vennero tolti dal congelatore sulla superficie ebbe la formazione di brina che col passare dei minuti si trasformarono in gocce d'acqua e poi in bolle di ruggine.



Figura 5. 4 Condensa sulla superficie di pin assemblato a freddo

Anche in questo caso si verifica una azione schermante rispetto all'adesivo, questa volta da parte del vapor acqueo condensato sulla superficie del pin, questa affermazione è confermata dalle superfici di rottura che risultano dagli spiantaggi poiché è evidente la rottura adesiva dello strato di colla. Si nota che parte dell'adesivo resta attaccato al pin mentre il restante al collar, solo centralmente è presente una piccolissima striscia di polvere bianca che indica un tratto di rottura coesiva.



Figura 5. 5 Frattura nello strato adesivo di pin-collar accoppiati a freddo

Risultati migliori si ottengono nel caso di pin-collar assemblati a caldo, infatti la tensione media di rottura a taglio di questo gruppo di provini è pari a $18,1 \text{ N/mm}^2$ cioè del 52% più bassa rispetto ai provini di riferimento. Il peggioramento si può attribuire allo strato di ossido che si forma nel processo di riscaldamento del collare, esso potrebbe aver limitato l'adesione della colla alla superficie del collar. La zona di frattura nello strato adesivo osservata in questo set di provini sembra confermare questa ipotesi poiché lo strato adesivo resta quasi totalmente attaccato alla superficie del pin. I campioni che più si avvicinano a quelli di riferimento sono le coppie di pin collar in cui l'adesivo è stato applicato a un solo elemento. I pin-collar assemblati con adesivo solo sul pin hanno una tensione di rottura di $27,9 \text{ N/mm}^2$ mentre quelli assemblati con adesivo su collar hanno una tensione di rottura pari a $30,7 \text{ N/mm}^2$. Rispettivamente hanno un abbassamento percentuale della prestazione adesiva rispetto al riferimento di 26% e 18%. Anche la frattura si avvicina come aspetto a quella del riferimento perciò l'unica ipotesi plausibile, per spiegare l'abbassamento, è che la quantità di adesivo minore non ha permesso di bagnare completamente le

superfici a contatto creando un'area d'incollaggio reale inferiore all'area d'accoppiamento.

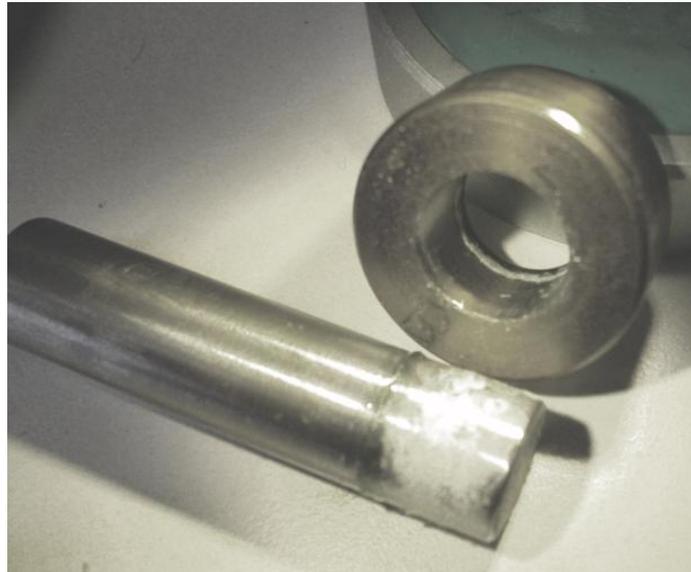
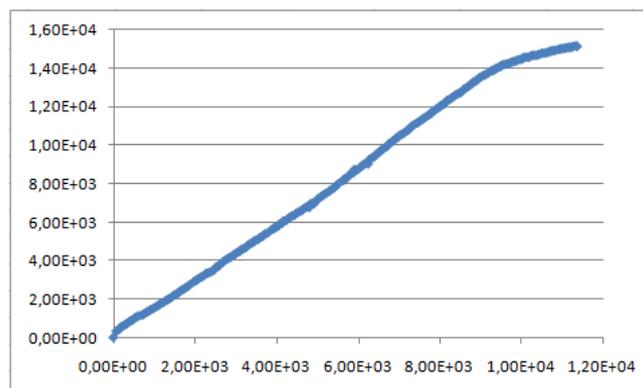


Figura 5. 6 frattura dello strato adesivo di provini pin-collar assemblati a caldo

PIN-COLLAR AD INTERFERENZA

Nel caso di pin-collar ad interferenza otteniamo grafici simili sia nel caso di accoppiamenti a secco che ibridi. Analizziamo per primo un grafico generico che rappresenta il piantaggio dei provini:



Si nota che resta pressoché lineare poiché nel piantaggio la forza di accoppiamento è legata direttamente alla lunghezza d'accoppiamento secondo questa relazione:

$$F_{\text{piantaggio}} = P \text{ di accoppiamento} \times \mu_A \times D_F \pi L_F$$

Le quantità a secondo membro sono tutte costanti tranne L_f lunghezza d'accoppiamento. La differenza tra i pin-collar a secco è quelli con adesivo sta nella pendenza della retta poiché il coefficiente d'attrito assiale è diverso nei due casi. Per pin-collar a secco troviamo un coefficiente d'attrito assiale nel piantaggio pari a 0,39 contro un coefficiente d'attrito assiale per pin-collar ibridi decisamente più alto pari a 2,06. Anche gli andamenti della forza nel caso di spiantaggio sono molto simili e hanno questa forma:

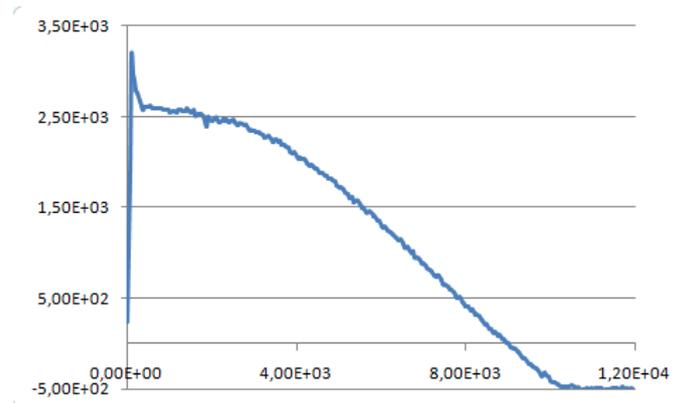


Figura 5. 7 Andamento forza di spiantaggio di pin-collar ad interferenza

Si possono evidenziare tre zone principali che si si ripetono in ogni grafico:

1. Picco: il picco di forza si presenta dopo un breve spostamento dopodiché si assiste ad un crollo che nel caso di accoppiamenti a secco rappresenta il passaggio da attrito statico ad attrito dinamico. Il picco di forza nel caso di accoppiamenti ibridi è causato sia dall'attrito, come nel caso precedente, che dalla forza adesiva.
2. Tratto rettilineo: il tratto rettilineo è causato dal fatto che il pin è stato inserito per più della lunghezza del collar perciò in quel tratto la lunghezza di accoppiamento resta invariata e con essa la forza di spiantaggio.
3. Tratto lineare: in maniera inversa da quanto accadeva per il piantaggio, nello spiantaggio la forza decresce in maniera lineare col decrescere della lunghezza d'accoppiamento.

Dal confronto tra forze di piantaggio e spiantaggio di pin-collar a secco è emersa una lieve differenza in favore della forza di spiantaggio, questo si spiega con il coefficiente d'attrito statico (superiore al dinamici) da vincere nell'effettuare il disassemblaggio . La forza necessaria al piantaggio è risultata più elevata rispetto a

quella di spiantaggio solo nel caso degli accoppiamenti C-7 e A-40, si capisce il motivo osservando la superficie dei componenti spiantati i quali mostrano evidenti segni di grippaggio delle superfici probabilmente causati nella fase di assemblaggio.



Figura 5. 8 Grippaggio superfici di pin e collar a secco

Nell'analisi dei campioni pin-collar ad interferenza è interessante fare un confronto tra le tensioni massime ricavate per accoppiamenti a secco e accoppiamenti ibridi. Questo confronto permette di valutare il guadagno ottenibile se all'accoppiamento viene aggiunto dell'adesivo.

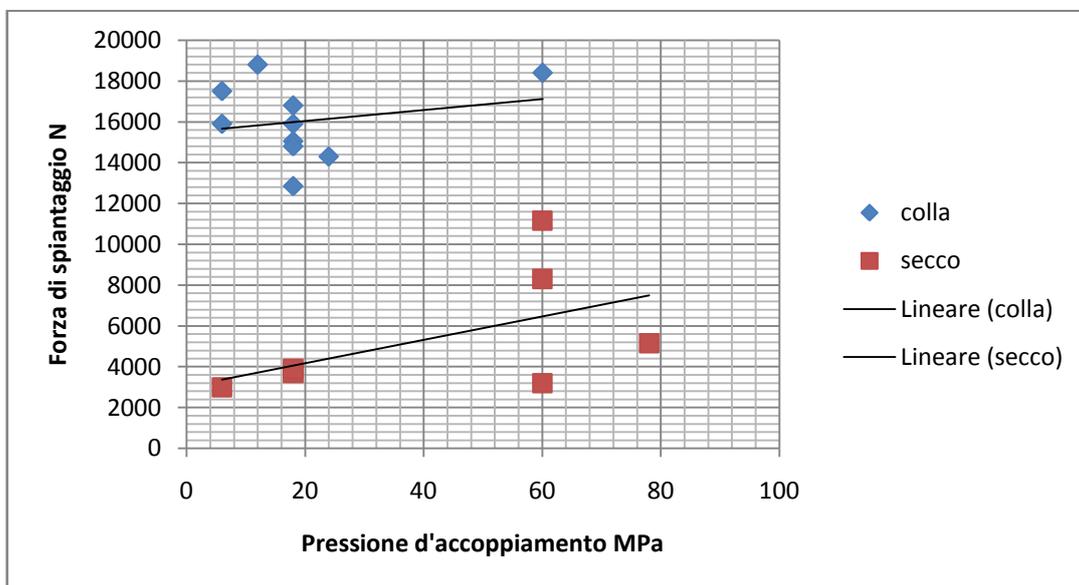


Figura 5. 9 Forza di spiantaggio in funzione della pressione d'accoppiamento per accoppiamenti a secco e con colla

Nel grafico sono riportate le forze di spiantaggio in funzione della pressione di contatto delle due prove, i dati sono stati interpolati linearmente e si può notare che il

guadagno ottenuto tende a diminuire se si aumenta l'interferenza. L'inclinazione delle due rette è data dalla dipendenza della forza di spiantaggio dalla quantità di interferenza dei vari provini. L'incremento di forza di spiantaggio è quasi costante, mediamente vale circa 10900 N ed è attribuibile all'adesivo. Analogamente alla forza è possibile mettere a confronto le tensioni di spiantaggio:

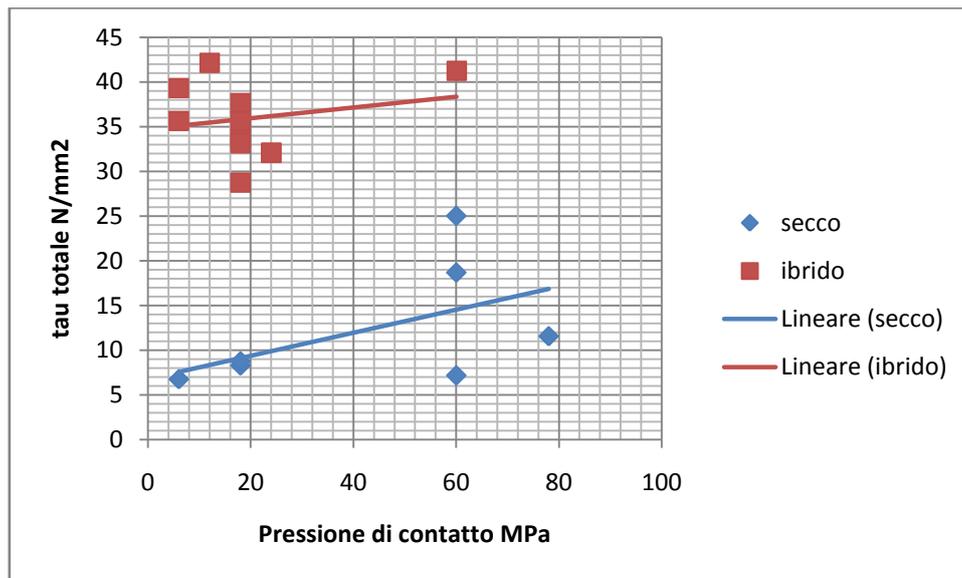


Figura 5. 10 Tensione a taglio in funzione della pressione d'accoppiamento per accoppiamenti con e senza colla

È praticamente simile all'andamento della forza poiché sono legate direttamente attraverso l'area di accoppiamento, perciò valgono anche le considerazioni fatte in precedenza. Anche in questo caso osservando le interpolazioni dei dati si nota che le inclinazioni sono circa simili e, applicando la teoria descritta nei capitoli precedenti possiamo togliere il contributo della tensione data dall'interferenza alla tensione totale ricavando la tensione media attribuibile all'adesivo che vale 28,7 N/mm². Questo valore medio rappresenta l'incremento operato dall'aggiunta dell'adesivo nell'accoppiamento. Si possono riassumere le percentuali dei contributi di interferenza e adesivo nel seguente grafico:

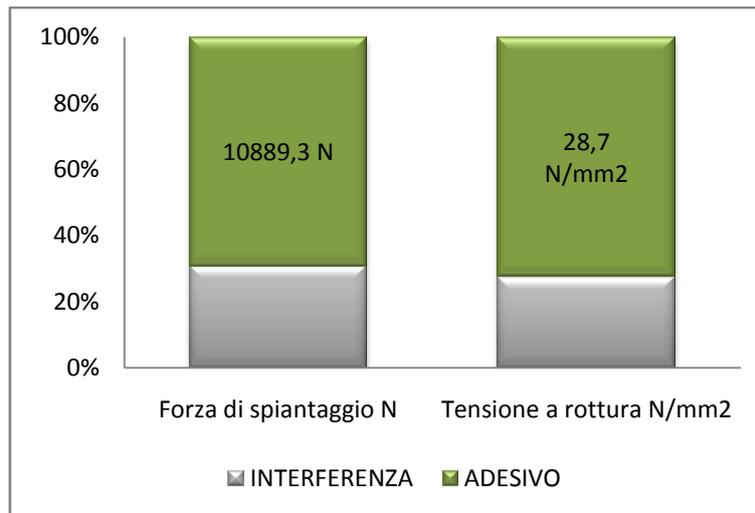


Figura 5. 11 Percentuali di forza e tensione attribuibili all' interferenza e all'adesivo

È possibile determinare due coefficienti che, in base alla forza di piantaggio, mi permettono di fare una previsione più o meno precisa della forza massima che l'incollaggio ibrido può sopportare. I coefficienti sono indicati con K1 e K2, rappresentano rispettivamente il rapporto tra forza massima di spiantaggio e forza di piantaggio e tra la quota parte di forza adesiva e la forza di spiantaggio:

$$K1 = \frac{F_{tot}}{F_{piant.}} = 1,22$$

$$K2 = \frac{F_{ad.}}{F_{piant.}} = 0,8$$

5.3 Problemi incontrati nelle prove

Come si è visto in questo capitolo non sono ancora stati riportati dati su accoppiamenti pin-collar ad interferenza assemblati a caldo e a freddo. Il motivo è da ricercare nell'incompatibilità dell'adesivo anaerobico con le alte temperature. Infatti dalla teoria della dilatazione termica si può ricavare il ΔT di temperatura necessario per recuperare l'interferenza più una certa quantità di gioco necessaria per permettere il montaggio. Consideriamo per esempio un collar da dover dilatare realizzato in acciaio C40 con un diametro di 12,74 mm e un'interferenza diametrale di 0,003 mm, supponiamo una quantità di gioco necessaria al montaggio di 0,02 mm, il ΔT di temperatura necessario vale:

$$\Delta T = \frac{0,003 + 0,02}{0,000011 \times 12,74} = 165^{\circ}\text{C}$$

Considerando poi una temperatura ambiente di 20°C otteniamo una temperatura del collar di 185°C . Questo valore di temperatura sarebbe sopportabile dall'adesivo ma l'elemento collar ha un rapporto superficie/volume tale che non appena viene tolto dal forno dissipa subito calore e si contrae nuovamente impedendo il montaggio corretto. Per avere il tempo necessario al montaggio si devono raggiungere giochi maggiori ma, come si vede dalla teoria della dilatazione, il gioco è direttamente legato alla differenza di temperatura e alle dimensioni del componente. Le dimensioni ridotte del componente portano a temperature superiori a 250°C che brucerebbero l'adesivo invalidando la prova. Analogamente per il montaggio a freddo si incontrano gli stessi problemi di montaggio, anche causati dal coefficiente di contrazione termica leggermente inferiore. Per poter realizzare comunque uno studio di incollaggi ibridi assemblati a caldo e a freddo è stata valutata la possibilità di riprogettare il provino di dimensioni tali da permettere il recupero di giochi con temperature coerenti con l'adesivo in uso. L'inconveniente nella progettazione del provino più grande è rappresentata dalla capacità di carico massimo della macchina per lo spiantaggio. Di conseguenza le dimensioni dovranno essere una soluzione di compromesso tra facilità nel recupero di giochi e forza di spiantaggio limitata.

Cerco un possibile diametro interno della boccia partendo dall'espressione che lega la variazione di dimensioni alla differenza di temperatura, ipotizzo le seguenti dimensioni:

- $\Delta T = 130^{\circ}\text{K}$
- Interferenza = 0,02 mm
- Gioco da raggiungere nel montaggio 0,05mm
- Perno in acciaio $\alpha_h = 0,0000115 \text{ K}^{-1}$

$$D = \frac{I + G}{\alpha h \Delta T} = \frac{0,02 + 0,05}{0,0000115 \times 130} \cong 51 \text{ mm}$$

Mantenedomi in favore di sicurezza rispetto al montaggio, fisso il diametro interno della boccia al valore di 52mm. Attraverso l'espressione che lega la forza di spiantaggio alla pressione, determino quest'ultima ipotizzando le seguenti grandezze:

- Coefficiente d'attrito assiale = 2,5 (determinato considerando le prove su giunzioni ibride)
- Lunghezza d'accoppiamento $L_F = 15$ mm
- Forza massima di spiantaggio della macchina = 60 kN (in favore di sicurezza la considero quasi dimezzata rispetto alla forza reale)

$$P = \frac{F_{Spiantaggio}}{\mu_{assiale} \pi D_F L_F} = \frac{60000}{2,5 \times \pi \times 52 \times 15} = 9,8 \text{ MPa} \approx 10 \text{ MPa}$$

Ora con la pressione di accoppiamento si può determinare il rapporto Q_A tra diametro interno ed esterno della boccia che rappresenta l'ultima incognita geometrica del problema. Per trovare Q_A utilizzo l'espressione (inversa) che risulta dall'analisi dei collegamenti albero mozzo ad interferenza con entrambi dello stesso materiale e albero pieno:

$$Q_A = \sqrt{1 - \frac{2 P D_F}{E I}} = \sqrt{1 - \frac{2 \times 10 \times 52}{205000 \times 0,02}} = 0,86$$

Con quel rapporto si ricava un diametro esterno della boccia di circa 62 mm. Per cui si ottengono le dimensioni riportate nel disegno di figura 5.12.

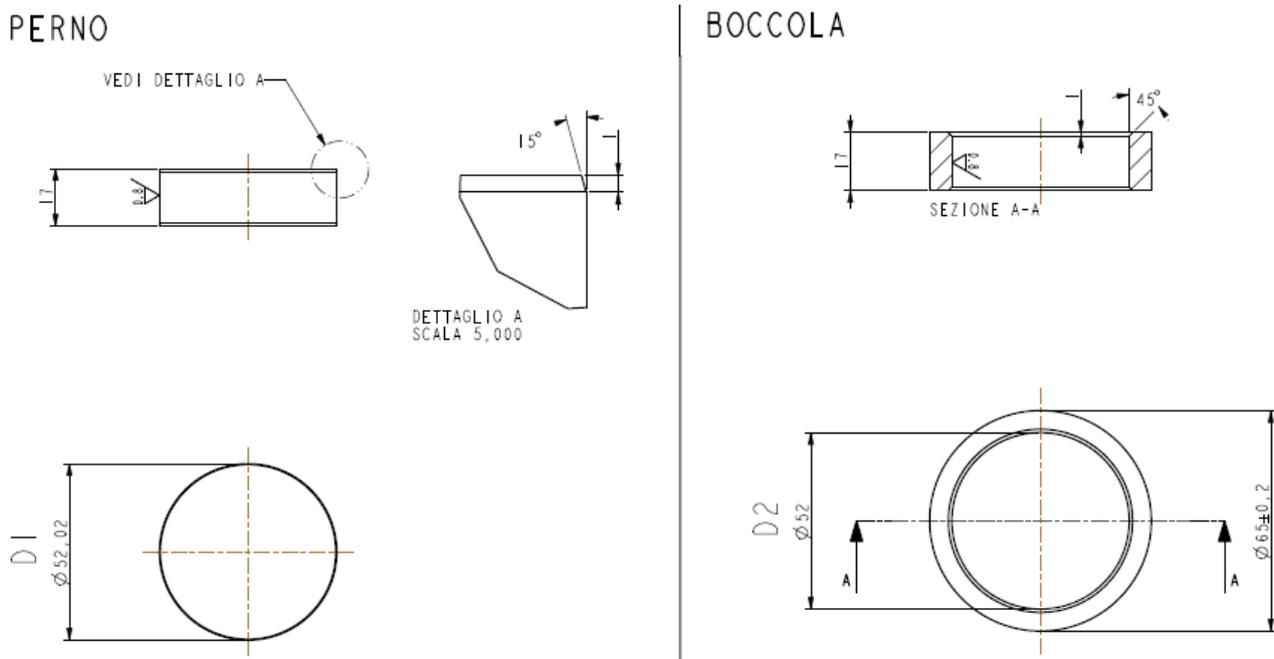


Figura 5. 12 disegno costruttivo del prototipo di provino ad interferenza per assemblaggi a freddo e a caldo

Conclusioni

Conclusioni

Dalle prove statiche su giunzioni pin-collar incollate sono emersi dati interessanti. In tutti i test condotti su giunzioni pin-collar con gioco si evidenzia un peggioramento della prestazione che è sempre riconducibile ad una condizione superficiale non ottimale. Rispetto ai provini trattati con apposito sgrassatore ed assemblati a temperatura ambiente si ha un calo di tensione a taglio del 67% se i provini non vengono sgrassati, la superficie di frattura presenta aree non polimerizzate che dipendono dall'azione schermate che operano i residui oleosi delle lavorazioni. Il peggioramento in termini di tensione statica di rottura a taglio rispetto all'assemblaggio a freddo e a caldo è, rispettivamente, del 86% e del 52%. Per questi provini si osserva, nel caso a freddo, la formazione di brina sul pin mentre a caldo la formazione di ossido sul collar, in entrambe le situazioni si ottiene una limitata formazione di legami adesivi con i substrati. Il peggioramento, nel caso di assemblaggio con adesivo solo su un componente, non è così elevato come nei casi precedenti e si attesta attorno al 22%. Per questi provini non si assiste a fenomeni legati a condizioni superficiali sfavorevoli ma il peggioramento è causato dall'area reale d'incollaggio che risulta essere inferiore all'area di accoppiamento geometrica.

I risultati su provini pin-collar ad interferenza dimostrano come l'utilizzo dell'adesivo in accoppiamenti ad interferenza può notevolmente innalzare la resistenza allo sfilamento rispetto a giunti tradizionali. Il guadagno in termini di forza di spiantaggio attribuibile all'adesivo è circa costante e mediamente vale 10900 N, conseguentemente anche la quota parte di tensione dell'adesivo è circa costante e mediamente vale $28,7 \text{ N/mm}^2$. Un dato piuttosto stupefacente lo si ricava confrontando le forze massime di spiantaggio di provini ad interferenza, che mediamente valgono 16,1 kN, con quelli con gioco da cui mediamente risulta un valore di 16,8 kN, cioè superiore. Considerando lo sforzo nelle lavorazioni per ottenere accoppiamenti ad interferenza, visto le tolleranze ristrette, non sembrerebbe conveniente utilizzare questo tipo di giunzione ma passare ad un accoppiamento con

Conclusioni

tolleranza più grossolane e affidare la giunzione totalmente allo strato adesivo. Tuttavia resta il fatto che queste sono prove su elementi unificati e se si vuole un dato certo per il proprio tipo di giunzione e consigliabile eseguire una campagna sperimentale su un prototipo che replichi la geometria reale della giunzione. Nonostante ciò l'utilizzo di accoppiamenti ibridi di questo genere possono essere impiegati in tutti quei casi in cui si cerca di far convivere dimensioni e pesi ridotti di alberi e mozzi con delle elevate prestazioni meccaniche. Infatti l'adesivo si può vedere come fattore moltiplicativo del coefficiente d'attrito statico e, a parità di forza trasmessa, se lo si incrementa si possono ridurre i valori di pressione di contatto e area d'accoppiamento cioè operare una riduzione di dimensione e quindi di peso. Con lo studio del prototipo di provino ad interferenza sarà possibile, in futuro, approfondire il discorso su assemblaggi a caldo e a freddo cercando di estrapolare informazioni sul peso del contributo di adesione al variare della condizione d'assemblaggio.

Bibliografia

Bibliografia

Giovanazzi, *Costruzioni di macchine Vol. 1*, Pàtron editore (1998).

Giovanazzi, *Costruzioni di macchine Vol. 2*, Pàtron editore (2000).

G. Niemann, H. Winter, B. R. Höhn, *Manuale degli organi delle macchine*, Tecniche nuove (2006).

M. Petrie, *Handbook of adhesives and sealants*, McGraw-Hill (2000).

D. Croccolo, M. De Agostinis, N. Vincenzi, *Experimental analysis of static and fatigue strength properties in press-fitted and adhesively bonded steel-aluminium components*, Journal of adhesion science and technology 25, 2521-2538 (2011).

E. Dragoni, P. Mauri, *Cumulative static strength of tightened joints bonded with anaerobic adhesives*, J. Materials: Design and Applications (2002).

E. Dragoni, P. Mauri, *Instrict static strength of friction interfaces augmented with anaerobic adhesives*, Int Journal of adhesion & adhesives 20, 315-321 (2000).

G. Romanos, *Strength evaluation of axisymmetric bonded joints using anaerobic adhesives*, Int Journal of materials and product technology Vol. 14, Nos. 5/6 (1999).

Bibliografia

ISO 10123, *Adhesives-Determination of shear strength of anaerobic adhesives using pin-and collar specimes.*

Scheda tecnica Loctite 648 da <http://www.henkel.it>

Scheda tecnica Loctite 7063 da <http://www.henkel.it>

Ringraziamenti

Ringraziamenti

È una gioia scrivere le righe che concludono un percorso di formazione durato tanti anni. C'è chi dice che intraprendere il cammino universitario comporta sostenere sacrifici, io ho avuto la fortuna di avere accanto persone che hanno reso il mio percorso una strada sgombra da qualsiasi ostacolo e quattro righe in una tesi non potranno mai bastare per esprimere la mia gratitudine. Di queste persone le più importanti sono i miei genitori, Germano e Barbara, persone fantastiche che mi hanno dato la possibilità di conseguire questo obiettivo senza pressioni, anche se da parte mia non ci sia stato sempre un impegno massimale negli studi. Un doveroso ringraziamento va alla mia ragazza Stella che mi ha supportato e "sopportato" durante le fasi più dure del mio cammino universitario. Non posso non citare il mio amico, nonché collega Marco Tagliaferri con il quale ho condiviso tutte le difficoltà e i momenti migliori in questi cinque anni di vita accademica. Un ringraziamento doveroso va a prof. D. Croccolo e prof. M. De Agostinis per la loro disponibilità e per l'interessante esperienza in laboratorio maturata insieme durante lo sviluppo degli argomenti trattati in questo elaborato. In fine ringrazio tutti gli amici e parenti sempre disponibili a scambiare quattro chiacchiere nei momenti più difficili nel corso di questi anni.