

NUCLEAZIONE E PROPAGAZIONE DI DIFETTI DI FATICA IN GIUNTI INCOLLATI

A. Pironi, G. Nicoletto

Dipartimento di Ingegneria Industriale - Università di Parma, Parco Area delle Scienze 181/A - 43100 Parma

ABSTRACT

Si sono svolte prove di fatica su giunzioni a semplice sovrapposizione incollate rivolgendo particolare attenzione alla durata ed alla modalità fasi di innesco e propagazione dei difetti che portano a rottura.

1. INTRODUZIONE

Il dimensionamento e/o la verifica di resistenza di giunti incollati sottoposti a carichi variabili ciclicamente (affaticanti) sono comunemente eseguiti mediante l'approccio tradizionalmente utilizzato nella progettazione di strutture e cioè in base alla tensione agente nella giunzione. Tale tensione viene quindi posta a confronto con una resistenza a fatica, desunta eventualmente dalla resistenza statica attraverso una serie di coefficienti dipendenti dal sistema adesivo/aderendo e dalle condizioni ambientali [1].

Nella letteratura tecnica sull'argomento tale approccio è messo in discussione, nel caso specifico delle giunzioni incollate, per due motivi fondamentali: i) la differenza tra le condizioni di tensione nella giunzione da verificare e nel provino utilizzato per determinare la resistenza a fatica; ii) la mancanza di analisi del meccanismo che porta eventualmente al cedimento del giunto, i.e. la

distinzione tra durata della fase di innesco di un difetto e durata della fase di propagazione. I risultati delle prove di fatica effettuate in [2] su diverse tipologie di giunzioni, elaborati seguendo un approccio basato sulla tensione, hanno mostrato consistenti differenze nell'andamento della resistenza a fatica a seconda della giunzione considerata, mentre i risultati di prove a fatica su giunti a doppia sovrapposizione mostrati in [3] indicano un aumento della resistenza con la lunghezza di sovrapposizione che fa supporre una incidenza non trascurabile della fase di propagazione sulla durata del giunto. Sia in [2] che in [3] sono state effettuate misure volte alla determinazione dell'incidenza della fase di innesco rispetto alla propagazione, dalle quali è emersa una dipendenza dal livello di tensione applicato e dalla geometria del sistema adesivo-aderendo.

Dall'analisi di questi risultati emergono la necessità di definire un approccio unificato (indipendente dalla geometria e dal livello di carico) per la determinazione della durata dei giunti incollati sottoposti a carichi affaticanti.

Nel seguito verranno quindi illustrati la procedura ed i risultati di una campagna sperimentale il cui scopo è di studiare il meccanismo di rottura a fatica di giunzioni

incollate, distinguendo le fasi di nucleazione e di propagazione del difetto che porta a rottura e valutando la cinetica (i.e. legge evolutiva) di quest'ultimo all'aumentare del numero di cicli di applicazione del carico.

2. PROVE SPERIMENTALI

2.1 Giunto e apparato sperimentale

Le prove sono state condotte utilizzando un giunto del tipo a semplice sovrapposizione. Questa geometria è stata scelta per i seguenti motivi:

- semplicità di realizzazione del giunto;
- conoscenza dello stato tensionale nello strato adesivo;
- tipologia dello stato tensionale rappresentativa di quello che si sviluppa in genere nelle giunzioni incollate (taglio + pelatura);
- similitudine con la geometria utilizzata per determinare la resistenza a fatica secondo lo standard ASTM 3166.

La forma e le dimensioni sono riportate in Fig. 1. In particolare, la lunghezza del giunto è superiore a quella consigliata in standard di prova a fatica di giunti incollati, in modo da poter distinguere meglio tra fase d'innescò e propagazione del difetto.

Gli aderenti sono di lega d'alluminio, mentre l'adesivo utilizzato è il Loctite 330, un estere metacrilato fornito sotto forma di liquido viscoso più attivatore da applicarsi separatamente sulle superfici da unire, già oggetto di precedenti studi da parte dell'autore e collaboratori [4-6].

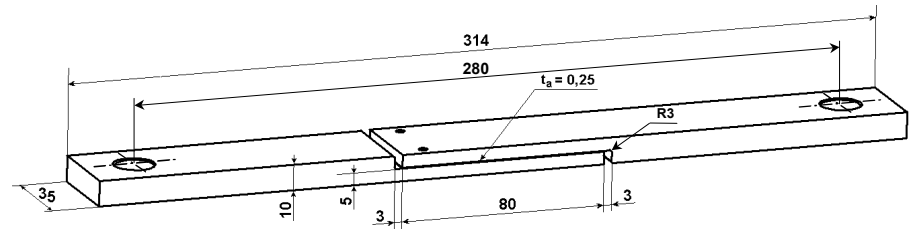


Fig. 1: schizzo quotato del giunto utilizzato nelle prove.

Esso è classificato come adesivo strutturale particolarmente indicato per l'unione di metalli, legno, ceramici e plastiche. Il vantaggio rispetto ad altri adesivi strutturali bicomponente è che non richiede preparazione particolare delle superfici (è sufficiente lo sgrassaggio) e dà maneggevolezza nell'arco di cinque minuti, permettendo ritmi di produzione più elevati. Il massimo spessore consigliato per permettere una buona polimerizzazione è di 0.5mm. La completa polimerizzazione avviene nell'arco di 24h a temperatura ambiente. La temperatura di servizio ammissibile è compresa tra -54 e 150°C. La resistenza a taglio ed a trazione misurata con prove standard si colloca mediamente sui 20MPa [1].

La cedevolezza del giunto è stata rilevata ad intervalli regolari di 500 cicli e correlata analiticamente alla lunghezza a di un difetto passante. Ad una cedevolezza crescente corrisponde una lunghezza di difetto crescente. In alcune delle prove l'evoluzione della frattura è stata seguita per via ottica mediante una telecamera CCD allo scopo di validare le misure effettuate per via indiretta. L'attrezzatura è rappresentata nel suo complesso in Fig. 2.

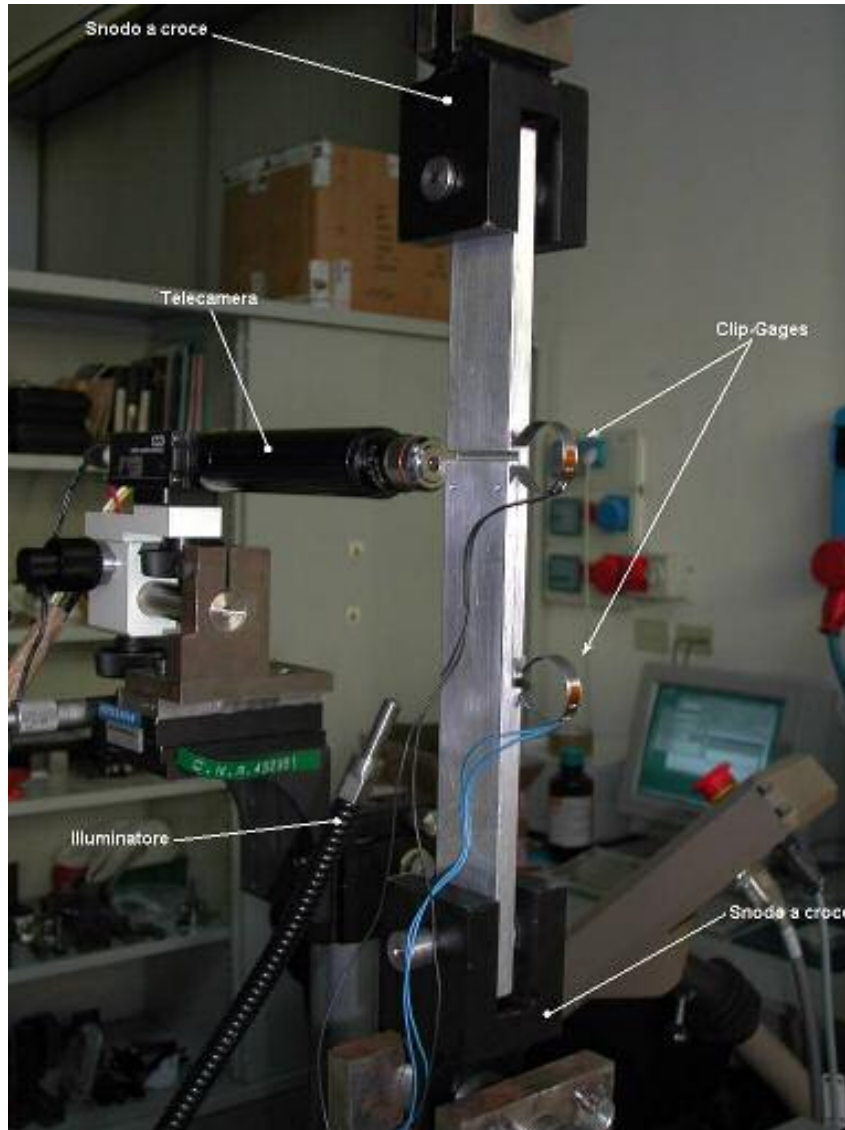


Fig. 2: giunto ed attrezzatura di prova.

2.2 Tipologie di prove

Le prove sono state effettuate in controllo di forza mantenendo un valore di $\Delta P = P_{max} - P_{min}$ costante per tutta la durata della prova. Sono stati indagati tre diversi spessori dello strato di adesivo, $t_a = 0.1, 0.25$ e 0.5mm , rispettivamente, mentre ci si è limitati ad un valore del rapporto di carico $R = P_{min}/P_{max} = 0,1$ e ad una frequenza $f = 10$ Hz.

2.3 Calibrazione della geometria

L'innesco e la propagazione del difetto sono stati monitorati indirettamente attraverso la variazione della cedevolezza elastica, C . Essa è valutata dalla misura dello scorrimento δ tra i due aderendi effettuata tramite due clip-gages posti sul fianco del giunto come mostrato in Fig. 2. Siccome le prove effettuate non richiedevano la variazione dell'ampiezza di carico in funzione di a , il calcolo di C , e quindi di a , è stato effettuato a posteriori mediante un'apposita routine in ambiente VBA. La relazione tra la cedevolezza C , calcolata come rapporto tra lo scorrimento δ ed il carico complessivo applicato P ($C = \delta/P$), ed a è stata sviluppata come in [7] modellando il giunto come una trave su suolo elastico rispondente a taglio:

$$C = \frac{\delta}{P} = \frac{1}{2} \frac{l}{Ebh} + 2a \frac{4}{Ebh} + \frac{t}{G_a} \frac{\lambda_r}{2b} \coth\left(\frac{\lambda_r l}{2}\right) + \frac{t}{E_a} \frac{h^2 \lambda_\sigma^3}{2b} \frac{\cosh(\lambda_\sigma l) - \cos(\lambda_\sigma l)}{\sinh(\lambda_\sigma l) + \sin(\lambda_\sigma l)}$$

$$\lambda_t = \left(\frac{8G_a}{t_a h E} \right)^{1/2}; \lambda_\sigma = \left(\frac{6E'_a}{t_a h^3 E} \right)^{1/2}; l = L - 2a \quad (1)$$

dove G_a è il modulo di elasticità tangenziale dell'adesivo, b ed h rispettivamente larghezza e spessore dell'aderendo ed L è la lunghezza della giunzione.

L'Eq. (1) è stata confrontata con le misure effettuate per via ottica sul lato del giunto. I risultati sono mostrati in Fig. 3. I dati mostrati sono l'insieme di più prove e di entrambi i clip-gages. La dispersione dei dati sperimentali è sicuramente originata dal fatto che la rilevazione è effettuata sulla superficie e che l'apice del difetto non è di semplice individuazione, ciò nonostante la tendenza è chiaramente individuabile ed in buon accordo con i valori forniti dall'Eq. (1).

L'espressione del tasso di rilascio si deriva dalla (1) attraverso la relazione generale:

$$G = \frac{P^2}{2b} \frac{dC}{d(2a)} \quad (2)$$

Per lunghezze del legamento residuo l tali che $\lambda_t l$ e $\lambda_\sigma l > \text{ca. } 4$, il tasso di rilascio di energia risulta indipendente sia da t_a che da a [7]:

$$G = 1.75 \frac{h}{E} \sigma_0^2 \quad (3)$$

dove $\sigma_0 = P/(bh)$ è la tensione nominale di trazione negli aderendi.

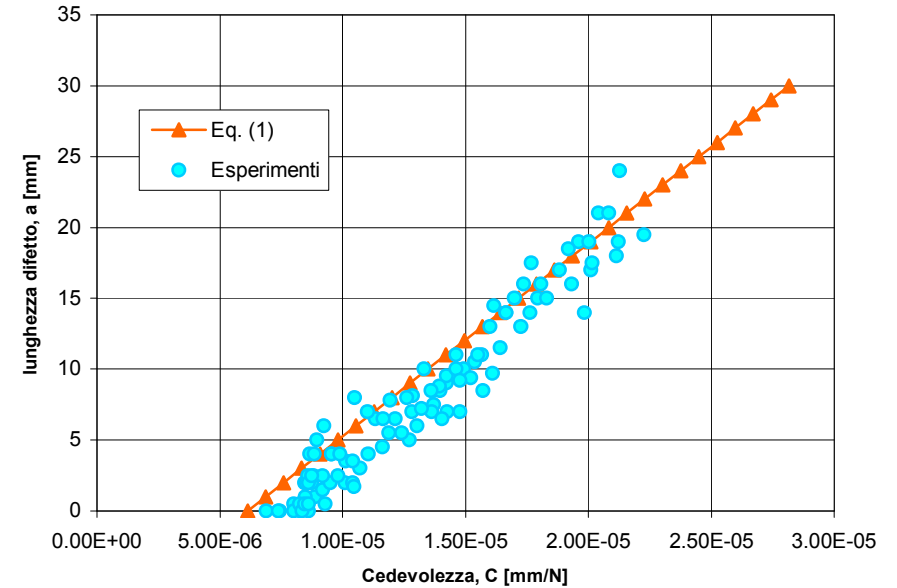


Fig. 3: confronto tra la relazione a - C calcolata mediante l'Eq. (1) e sperimentalmente.

3. RISULTATI E DISCUSSIONE

3.1 Meccanismo di rottura per fatica

L'analisi delle immagini acquisite durante la sperimentazione ha permesso una dettagliata ricostruzione dell'evoluzione dei difetti nel giunto fino a rottura. Nell'immagine di Fig. 4a è mostrata la superficie laterale del provino ancora integro. Si può notare dall'immagine, che l'adesivo appare come una striscia di colore molto scuro di spessore costante (in questo caso 0,25mm) mentre i due aderendi di alluminio hanno un colore più chiaro. La Fig. 4b mostra invece lo stato della superficie in corrispondenza del termine della giunzione dopo un limitato numero di cicli. Si nota come l'adesivo ora abbia

assunto un colore molto più chiaro ("whitening") rispetto a quello evidenziato in Fig. 4a. Il cambiamento di colore dell'adesivo è correlabile in questo caso ad forma di danneggiamento diffuso che prelude alla formazione di un difetto macroscopico. Il difetto compare successivamente alla radice del raccordo che l'adesivo forma al termine della giunzione (Fig. 4c).

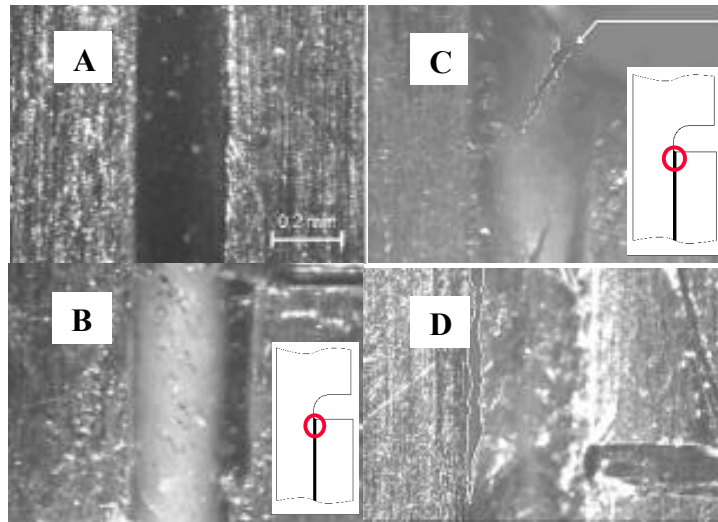


Fig. 4: a) superficie laterale del giunto integro; b) danneggiamento diffuso all'estremità della giunzione; c) comparsa del difetto all'estremità della giunzione; d) propagazione del difetto.

L'inclinazione iniziale del difetto è legata alla locale combinazione di tensioni di taglio e di pelatura. Il difetto procede poi all'interno dello strato di adesivo (propagazione coesiva) o, più raramente, all'interfaccia (propagazione adesiva, Fig. 4d). La propagazione adesiva è

stata riscontrata maggiormente in quei giunti che presentavano difetti di polimerizzazione. Il difetto si innesca in modo fondamentale uguale ad entrambe le estremità, seppure in istanti generalmente differenti a seconda delle condizioni locali della giunzione.

3.2 Analisi dell'evoluzione del difetto

In Fig. 5 è rappresentato un andamento tipico della lunghezza del difetto a rilevata al variare del numero di cicli di fatica N .

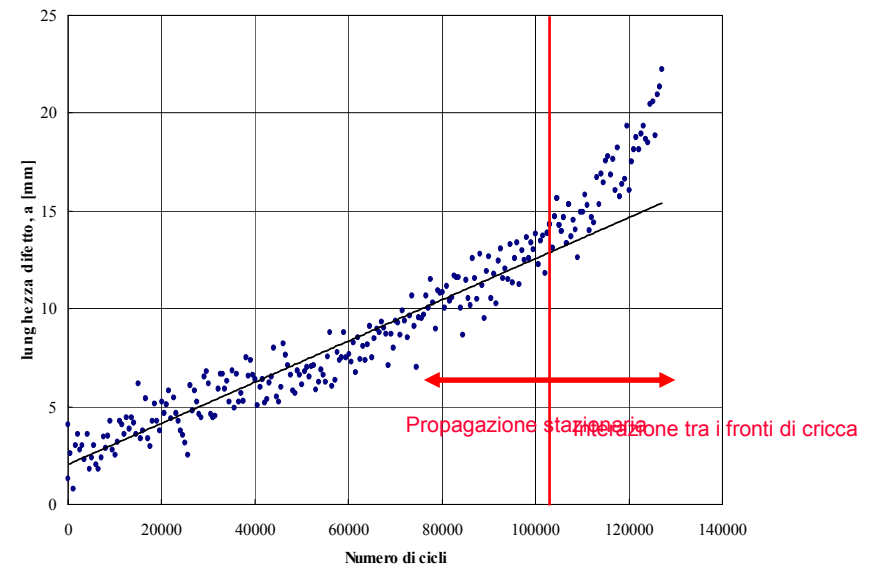


Fig. 5: andamento tipico dell'evoluzione di un difetto di fatica durante la prova ($P_{max} = 7$ kN).

Il primo risultato importante è che la fase di nucleazione è praticamente inesistente, per cui la vita del giunto è determinata dalla resistenza alla propagazione del difetto.

L'andamento rettilineo del primo tratto dei punti sperimentali indica una velocità di propagazione da/dN costante, mentre oltre una certa lunghezza del difetto si ha un aumento più che proporzionale, con ogni probabilità dovuto ad una progressiva interazione dei fronti di cricca.

L'analisi dei dati sperimentali relativi a diverse prove condotte a livelli di carico differenti ha mostrato che il tratto rettilineo rappresenta in media una porzione consistente della vita totale (circa l'80%, Fig. 6). Lo stesso andamento mostrato in Fig. 6 si riscontra analizzando l'evoluzione del difetto al variare dello spessore dello strato adesivo.

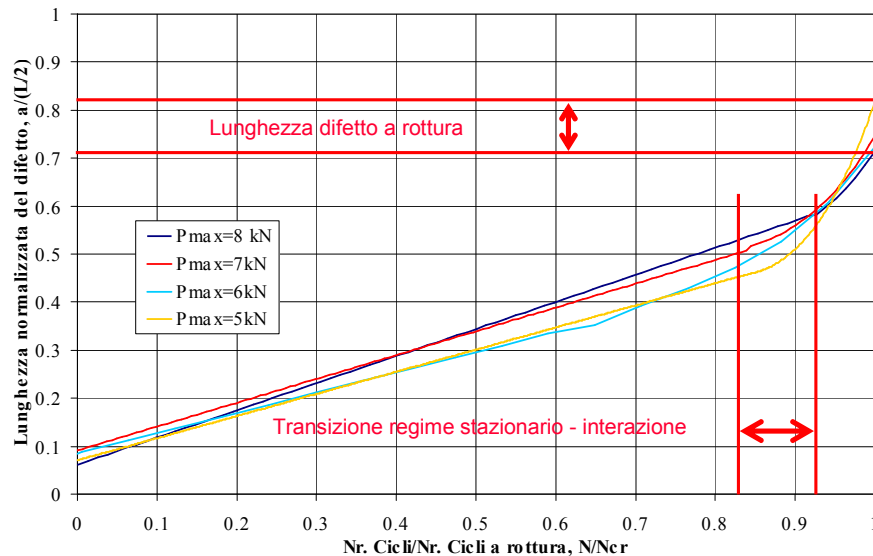


Fig. 6: evoluzione del difetto per diversi valori del carico massimo applicato

Le velocità di propagazione in regime stazionario rilevate in prove condotte con

diverse ampiezze di carico e diversi spessori dello strato di adesivo è stata diagrammata in funzione del corrispondente ΔG in Fig. 7. Le linee continue rappresentano la migliore approssimazione dei dati con l'equazione:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta G)^m \quad (4)$$

Si vede come l'esponente della (4) sia il medesimo al variare dello spessore di adesivo, a testimonianza del fatto che il meccanismo di propagazione non è sostanzialmente differente, mentre la costante C risulta differente solamente nel caso dello spessore più basso.

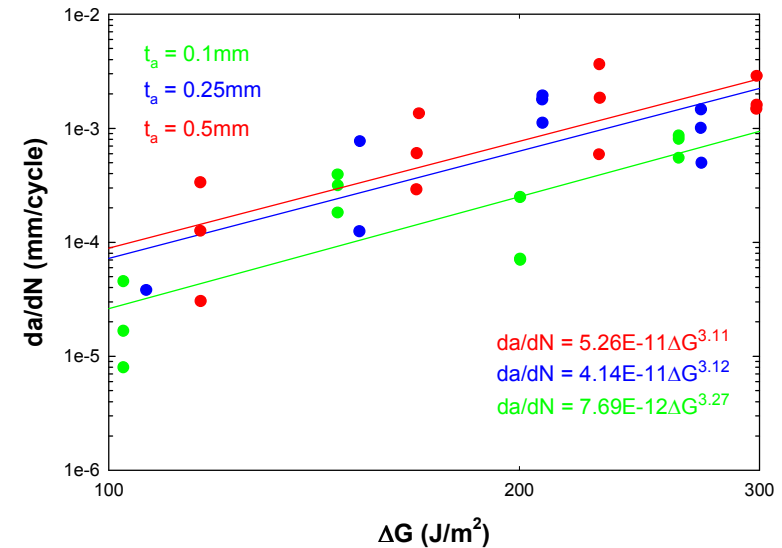


Fig. 7: velocità di propagazione del difetto a diversi livelli di carico e spessore dell'adesivo t_a .

A tutti i livelli di carico applicato, il cedimento del giunto è avvenuto per valori di lunghezza del difetto tali da assicurare la validità della (3). Quindi il valore di G_{max} all'istante della rottura non è differente da quello applicato durante tutta la prova e ciò implica che un criterio di cedimento basato sulla tenacità a frattura, i.e. $G_{max} = G_c$ non predirebbe il collasso del giunto. In Fig. 8 sono diagrammati i valori del legamento residuo a rottura l in funzione del carico massimo di prova.

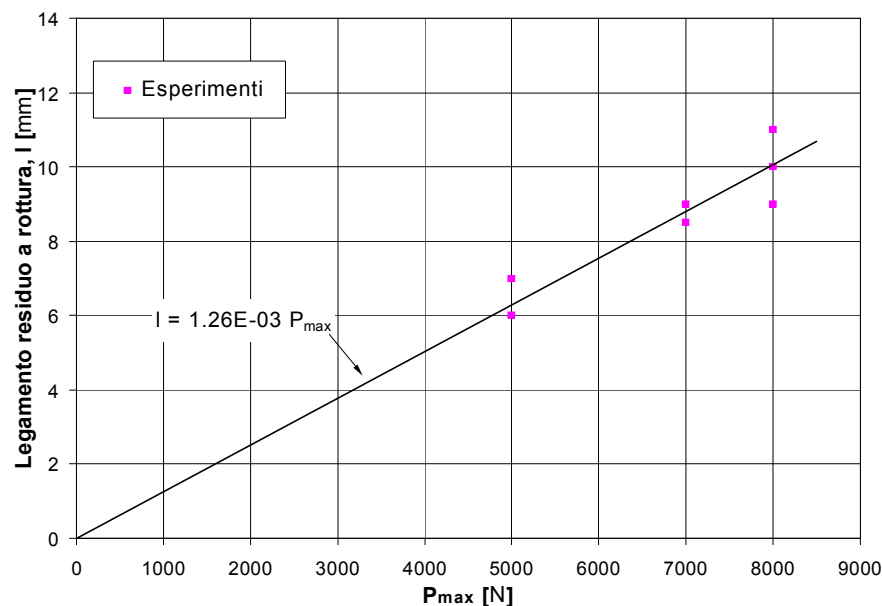


Fig. 8: legamento residuo a rottura in funzione del carico massimo della prova.

Ipotizzando che il collasso del giunto avvenga per il superamento della resistenza a taglio τ_R

dell'adesivo, si ha una relazione di proporzionalità tra l e P_{max} :

$$l = \frac{P_{max}}{b\tau_R} \quad (5)$$

Effettuando una regressione lineare dei dati come mostrato in Fig. 8, dal valore coefficiente angolare si deduce una resistenza a taglio $\tau_R = 22.6\text{MPa}$ che è assolutamente compatibile con i valori ricavati mediante prove standard dal produttore dell'adesivo.

4. CONCLUSIONI

La rottura sotto carichi variabili ciclicamente di un giunto a sovrapposizione incollato è stata studiata seguendo l'evoluzione del difetto che causa il cedimento. E' emerso che difetti passanti si generano alle estremità del giunto alle prime applicazioni del carico. La velocità di propagazione rilevata è correlabile al carico applicato attraverso un modello classico di Meccanica della Frattura, mentre il collasso finale appare dovuto al superamento della resistenza a taglio dell'adesivo. La durata del giunto è comunque determinata dalla resistenza dell'adesivo alla propagazione di difetti. Per questo motivo si ritiene che l'approccio di MF può essere efficacemente utilizzato nella progettazione a fatica di giunti incollati.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia il Dr. P. Mauri di Loctite H.L.A., Brugherio (MI) e gli Ingg. A. Bonini e S. Magistrali per la preziosa collaborazione.

BIBLIOGRAFIA

1. A.A.V.V., *Worldwide Design Handbook*, Loctite, 1999.
2. A.D. Crocombe, G. Richardson, "Assessing stress state and mean load effects on the fatigue response of adhesively bonded joints", *Int. J. Adhesion and Adhesives*, 19, 1999, pp. 19-27.
3. M. Quaresimin, P. Lazzarin, A. Grendele, "Resistenza a fatica di giunzioni incollate", *Atti AIAS 2000*, Lucca, Italia, pp. 1029-1040.
4. G. Nicoletto, A. Pirondi, "Comportamento a frattura di un adesivo strutturale", *Atti IGF XV*, 3-5Maggio 2000, Bari, Italia, pp. 459-466.
5. A. Pirondi, G. Nicoletto, "Fatigue crack growth in bonded DCB specimens", in stampa su *Eng. Fract. Mech.*, Vol. 71, 4-6, 2004, pp. 859-871.
6. A. Pirondi, G. Nicoletto, "Mixed-mode fracture toughness of bonded joints", *Int J Adhesion and Adhesives*, Vol. 22, 2, 2002, pp. 109-117.
7. S. Krenk, "Energy Release Rate Of Symmetric Adhesive Joints", *Eng. Fract. Mech.*, Vol. 43. No. 4, 1992, pp. 549-559.