

RESISTENZA STATICA E DINAMICA DI PUNTI DI SALDATURA IN DIFFERENTI CONDIZIONI DI SOLLECITAZIONE

M. Avalle, G. Belingardi

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Torino, Corso Duca degli Abruzzi 24 – 10129
Torino (TO), e-mail: massimiliano.avalle@polito.it*

SOMMARIO

Le saldature a punti sono il principale metodo di giunzione delle lamiere nelle scocche dei veicoli terrestri. Esiste un'ampia letteratura sulla resistenza statica ed a fatica dei punti e sulla loro modellazione statica. Per simulare fedelmente le strutture puntate occorre conoscere le proprietà dei punti in condizioni di sollecitazione dinamica. Su questo problema non esistono molti risultati per cui in questo lavoro si propone un metodo di prova che permette di studiare la resistenza a differenti velocità di impatto ed in diverse condizioni di sollecitazione. I risultati permettono di definire un criterio di rottura del punto in funzione del tipo di carico.

ABSTRACT

Spot-welds are the main joining technology for car body construction. A wide literature on static and fatigue strength is available, as well as models of the static behavior. However, very little is known about the impact strength that is a necessary information to improve finite element models for crash simulations. In this work a testing method for spot-weld characterization is shown. This experimental method allows for loading at different speeds and loading conditions. A failure criterion for the spot-weld strength is then derived from the experimental data.

1. INTRODUZIONE

Le saldature a punti rappresentano il principale metodo di giunzione delle lamiere nella realizzazione delle scocche delle strutture veicolistiche. I punti di saldatura sono sollecitati in esercizio in diverso modo: staticamente, a fatica e ad impatto in caso di incidente. La conoscenza dei valori di resistenza dei punti è necessaria nel progetto delle strutture veicolistiche. In particolare nelle simulazioni del comportamento a crash, in caso di incidente è necessario disporre di criteri di rottura e di modelli di cedimento del componente punto di saldatura.

La letteratura riguardante la resistenza statica ed a fatica dei punti di saldatura è piuttosto vasta [1-16]. Molto meno lo è quella relativa alla resistenza ad impatto [17-20]. Nel caso della

caratterizzazione dinamica ad impatto si presentano una serie di problemi tecnici non indifferenti rappresentati dalla dinamica del fenomeno, dalle modalità di carico dei provini e dalla presenza di grandi deformazioni plastiche.

Nel lavoro che si intende presentare verranno mostrati alcuni risultati relativi alla caratterizzazione sperimentale ad impatto di provini saldati a punti. I provini sono stati utilizzati per ottenere valori di resistenza del singolo punto, a diverse velocità di applicazione del carico ed in diverse condizioni di sollecitazione. Infatti, come per gli adesivi, esistono diverse modalità di cedimento a seconda del tipo di sollecitazione (di taglio, di peeling...) e di conseguenza delle diverse componenti di forza applicata (normale, di taglio, di momento...).

Dopo una serie di indagini preliminari su vari tipi di provino (per i quali un esame piuttosto completo è fornito da Zhang in [20]) si è adottato il provino cosiddetto KS2 (o KS-II o Double-U, DU, figura 1) costituito da due semigusci a U uniti da un punto al centro. Con tale provino si possono svolgere prove in tutte le combinazioni di forza applicata possibili semplicemente ruotando il provino come mostrato in figura 2.

Oltre alle prove ad impatto, di tipo dinamico, sono state svolte delle prove a bassa velocità per poter esaminare l'influenza della velocità di applicazione del carico e verificare se vi siano dei differenti meccanismi di collasso innescati dalla diversa modalità di sollecitazione.

I risultati forniscono un criterio di cedimento rappresentato da una curva limite di resistenza che permette di combinare gli effetti delle diverse componenti di sollecitazione.

ATTREZZATURA SPERIMENTALE DI PROVA

Il provino impiegato è costituito da due semigusci a U (figura 1) ottenuti per piegatura da lamiera in acciaio di spessore 1 mm. I due semigusci sono giuntati per mezzo di un punto di saldatura al centro dei due fondi.

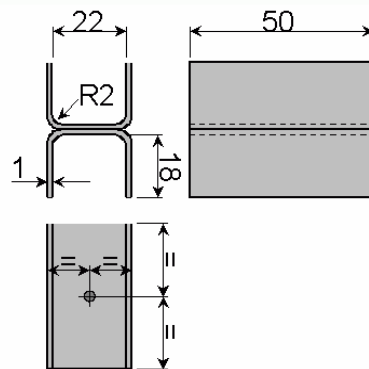


Figura 1 – Provino tipo KS2

Sui lati dei due semigusci sono stati eseguiti successivamente coppie di fori per serrare i provini nei blocchetti di carico dell'attrezzatura di prova. Tali blocchetti, schematizzati in figura 2, permettono di caricare il provino in differenti condizioni di sollecitazione. Le differenti condizioni di sollecitazione si ottengono ruotando il provino attorno ad un asse passante per il centro del punto e perpendicolare ai lati dei semigusci ad U. Nelle prove eseguite si sono fissati quattro valori dell'angolo di carico da 0° a 90° ma si possono teoricamente esaminare tutti gli angoli compresi tra questi due estremi. Variando l'angolo di carico cambia il rapporto tra la forza che sollecita a taglio il punto e quella che lo sollecita a trazione. In particolare l'angolo di 0° gradi corrisponde al taglio puro, mentre l'angolo di 90° corrisponde a pura trazione, come si può facilmente capire dall'esame della figura 2.

I blocchetti di carico sono montati con un collegamento filettato all'attrezzatura di carico

mostrata nelle figure 3 e 4. L'attrezzatura di carico [21] è composta da due telai costituiti ciascuno da due piastre unite da quattro colonne. Le colonne di uno dei telai (quello mobile) scorrono all'interno di una guida rettilinea realizzata dai quattro fori cilindrici in una delle due piastre dell'altro telaio (quello fisso). Il movimento relativo delle piastre esterne converte la forza di compressione in una forza di trazione fra gli elementi connessi alle piastre interne. In particolare la forza di trazione è applicata ai blocchetti di carico e quindi al provino. Per essere precisi, tra una delle piastre interne e uno dei blocchetti è interposta una cella di carico di tipo piezoelettrico per misurare la forza direttamente applicata al provino. La cella di carico piezoelettrica è impiegata nelle prove di tipo dinamico.

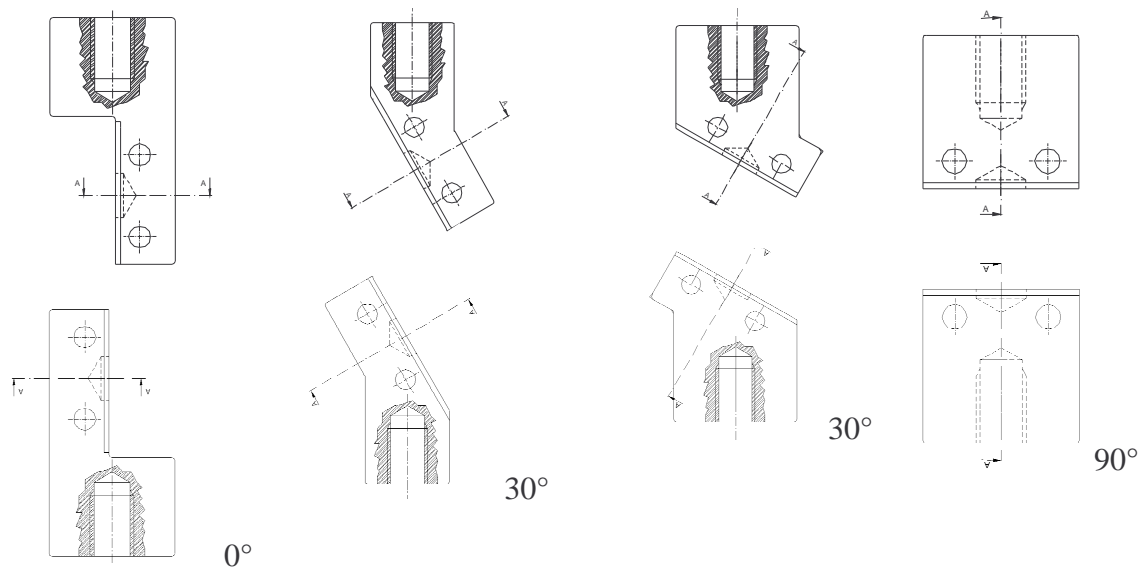


Fig. 2 – Schema delle configurazioni di carico esaminate

La medesima attrezzatura è stata impiegata per effettuare prove a bassa e media velocità, rispettivamente a 0.01 mm/s e 80 mm/s, utilizzando una macchina prova materiali idraulica DARTEC HA100 da 100 kN e prove dinamiche di impatto sotto una torre di prova avente una massa battente di circa 40 kg in caduta libera da un'altezza massima di circa 10 m. Per queste prove non si è sfruttata l'altezza massima disponibile limitando la velocità a circa 5.5 m/s. Tale limite è stato scelto per limitare la rumorosità dei segnali di forza misurati. Entrambe le attrezzature di prova sono presso i laboratori della II Facoltà di Ingegneria del Politecnico di Torino nella sede di Vercelli

Per le prove a bassa e media velocità si è impiegata la centralina elettronica della macchina di prova che permette di acquisire internamente tutte le grandezze di interesse, trasferendo successivamente i dati ad un PC tramite interfaccia seriale. La forza è stata misurata con una cella di carico da 100 kN e la corsa con un trasduttore tipo LVDT. Per le prove di impatto si è impiegato un sistema di acquisizione ad alta velocità con frequenza di campionamento fino a 200 kHz. Nelle prove dinamiche si è misurata la forza per mezzo di una cella di carico piezoelettrica da 30 kN applicata direttamente in serie al provino e per la corsa si è adottato un sistema ad encoder di tipo optoelettronico ad infrarossi. È necessario misurare la forza direttamente sul provino per eliminare gli effetti dell'inerzia degli elementi intermedi di collegamento.

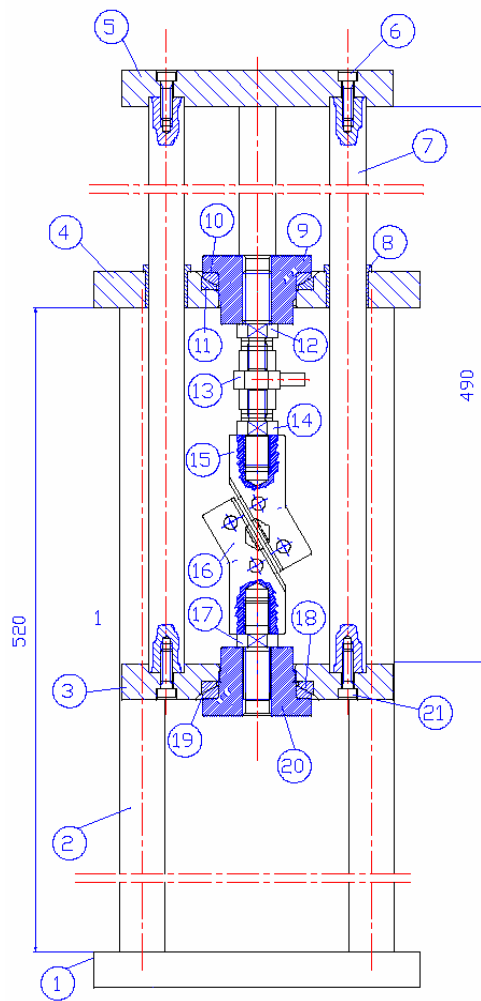


Fig. 3 - Schema dell'attrezzatura di carico (con provino caricato a 30°)



Fig. 4 - Provino montato sull'attrezzatura di carico

RISULTATI DELLE PROVE

I grafici di figura 5 e 6 riportano le singole curve forza-corsa rilevate durante le prove a bassa velocità (0.01 mm/s), a media velocità (80 mm/s) e di impatto ad alta velocità (5.5×10^3 mm/s) rispettivamente. Per ciascuna velocità sono state esaminate quattro configurazioni di carico corrispondenti a quattro angoli di rotazione del provino e per ciascuna singola configurazione sono state effettuate almeno tre ripetizioni.

La ripetibilità è molto buona nelle prove a bassa e media velocità, mentre nelle prove ad alta velocità si è avuta una certa dispersione dovuta all'innesco di fenomeni vibratorii che si estinguono rapidamente ma possono influenzare la valutazione della forza massima. Per questo motivo non si è potuto esaminare prove a velocità superiori a quelle di cui sono riportati i risultati.

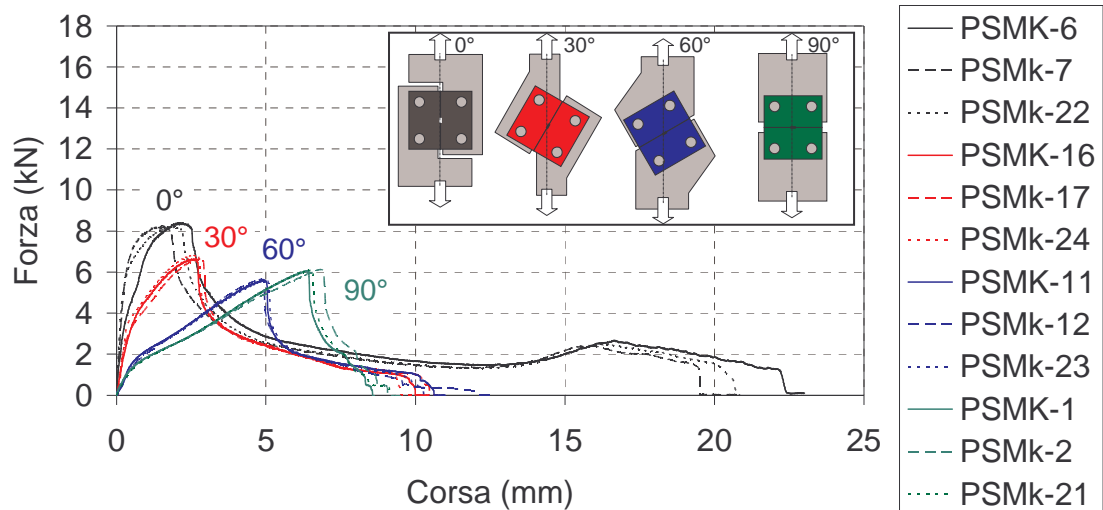


Fig. 5 – Confronto caratteristiche forza-corsa dei punti durante le prove a bassa velocità di applicazione del carico (velocità 0.01 mm/s)

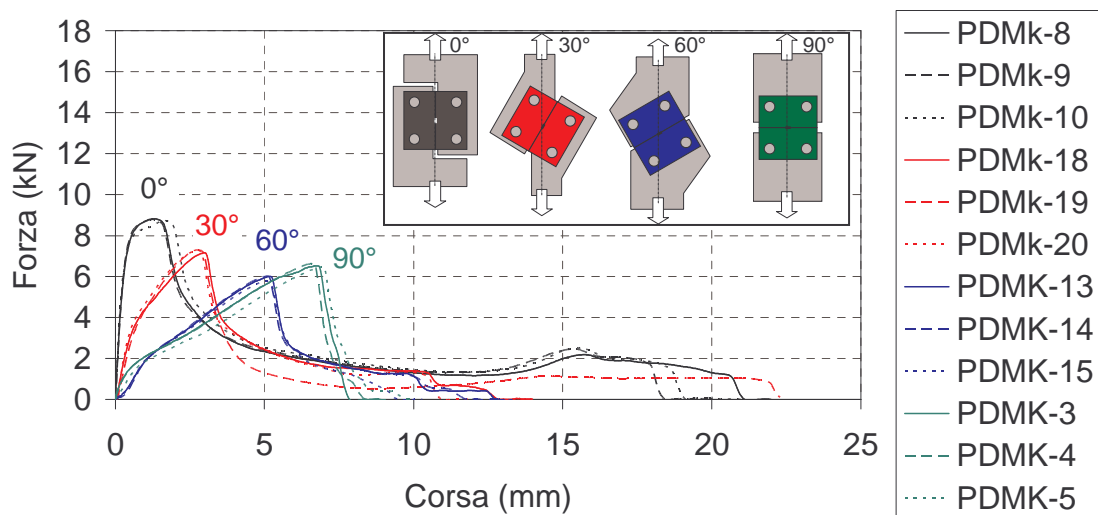


Fig. 6 – Confronto caratteristiche forza-corsa dei punti durante le prove a media velocità di applicazione del carico (velocità 80 mm/s)

Si osserva innanzi tutto come il punto abbia una resistenza molto superiore quando sollecitato a taglio puro, mentre la resistenza diminuisce con l'aumentare dell'angolo di carico restando pressoché invariata da 60° a 90° (pura trazione).

Nel caso di sollecitazione a 0° si ha inoltre una dissipazione di energia molto maggiore. Questo è legato al fatto che il cedimento del punto avviene solamente dopo che una parte importante della lamiera di entrambi i semigusci viene lacerata (figura 8). In tutti gli altri casi la quota di materiale che partecipa alla rottura del giunto lacerandosi è molto minore e la zona di rottura rimane circoscritta al punto stesso.

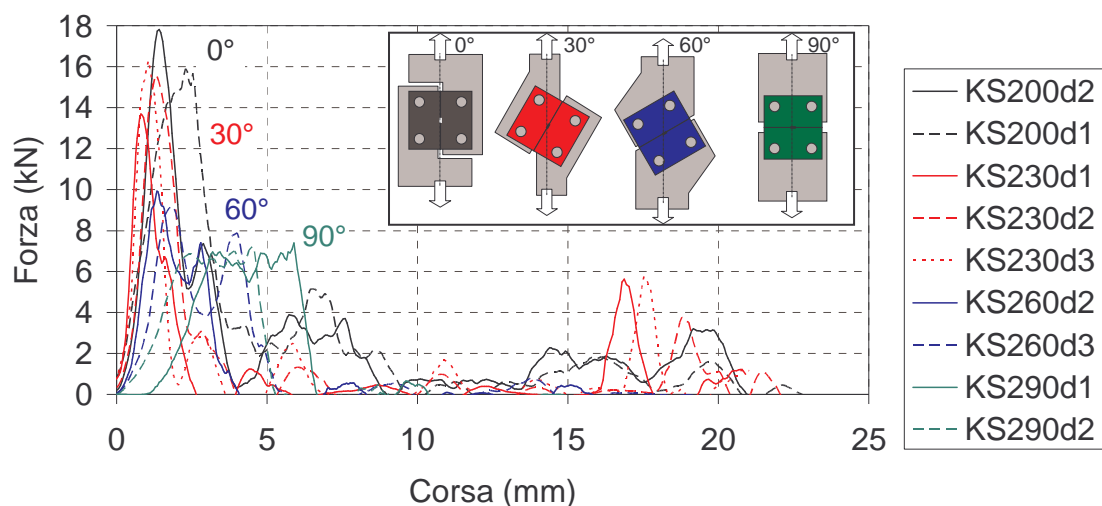


Fig. 7 – Confronto caratteristiche forza-corsa dei punti durante le prove di impatto (velocità 5.5×10^3 mm/s)

In figura 8 sono riportate le fotografie relative ad un campione per ciascuna configurazione di carico. Sono mostrate per ciascun caso due viste dei due semigusci dopo rottura. Il riferimento della carta millimetrata permette di valutare le dimensioni delle zone di rottura e della deformazione plastica ottenuta. Le foto sono relative a prove a bassa velocità. Non sono state osservate differenze macroscopiche tra i provini rotti a diversa velocità.

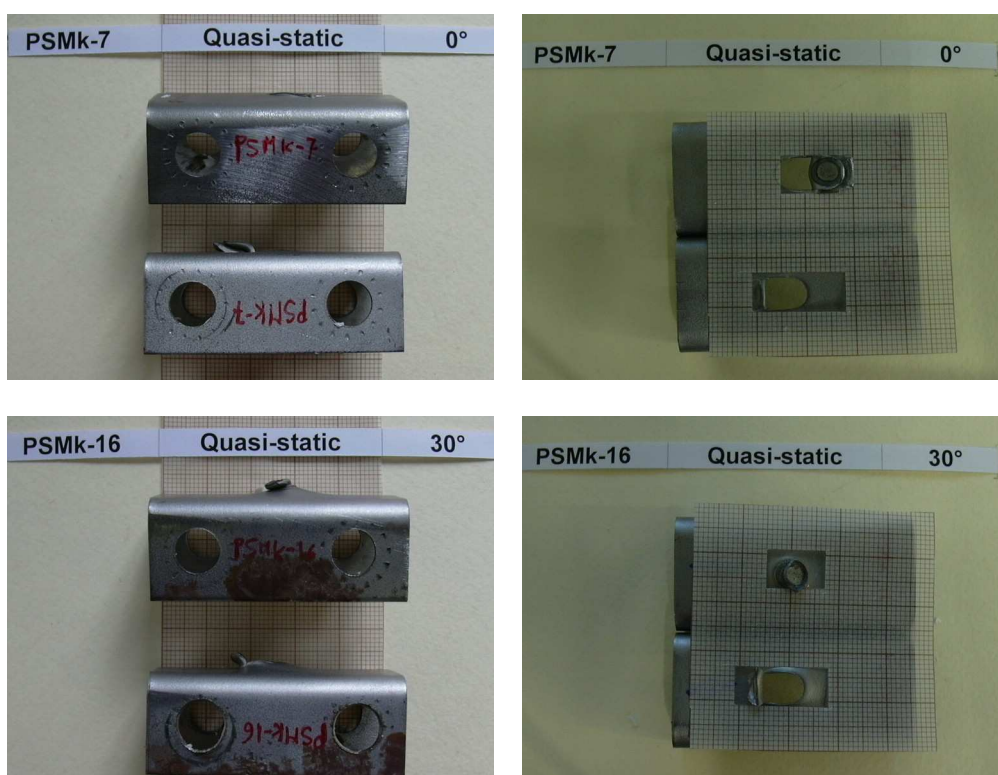


Fig. 8(a) – Provini sottoposti a rottura nelle varie condizioni di sollecitazione (bassa velocità di carico, 0.01 mm/s)

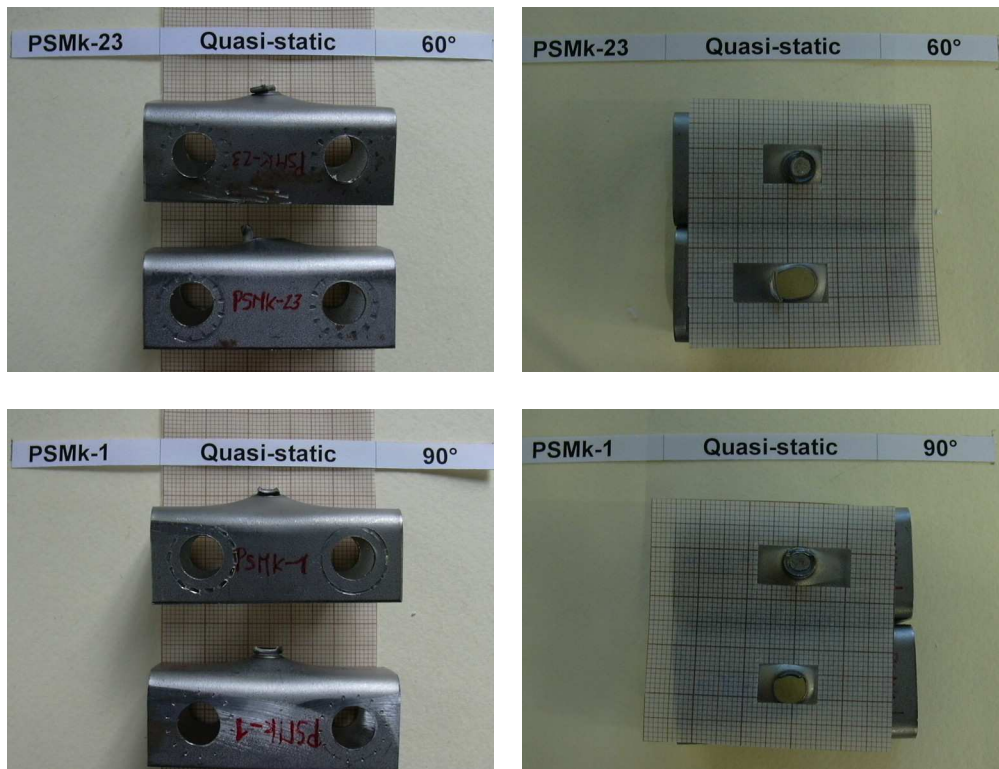


Fig. 8(b) – Provini sottoposti a rottura nelle varie condizioni di sollecitazione (bassa velocità di carico, 0.01 mm/s)

Tranne per il caso a 0° in cui il provino era sollecitato a taglio la deformazione plastica rimane sostanzialmente confinata alla zona attorno al punto.

In nessun caso la rottura è avvenuta per cedimento del punto ma si ha sempre lacerazione del materiale della lamiera attorno al punto. Nel caso di sollecitazione di trazione pura la lacerazione avviene su una circonferenza molto prossima a quella del punto. Con l'aumentare della componente di taglio la slabbratura aumenta ed è molto importante nel caso di carico di taglio puro.

L'analisi delle superfici di rottura, confortata dall'esame al microscopio elettronico a scansione di alcuni provini, mostra che la rottura avviene in modo duttile con una notevole quota di strizione localizzata.

ANALISI DEI RISULTATI

Dal confronto dei risultati sperimentali mostrati nel precedente paragrafo, si osserva una notevole influenza della direzione di carico ed una sensibilità molto elevata alla velocità di deformazione. La resistenza del punto è molto maggiore nella configurazione di sollecitazione prevalente di taglio e in generale decade rapidamente oltre i 30°. Tra 60° e 90° le differenze sono modeste.

La velocità di deformazione sembra avere un'influenza modesta alle velocità più basse (da 0.01 mm/s a 80 mm/s si ha una differenza di quasi cinque ordini di grandezza nell'entità della velocità di prova) mentre è molto importante nel secondo intervallo di velocità (da 80 mm/s a 5.5×10^3 mm/s si ha una differenza di quasi 2 ordini di grandezza). Questa osservazione, insieme all'osservazione che la variazione di resistenza con l'angolo sembra differente nel caso dinamico, ha fatto pensare ad una differente modalità di collasso innescata dalla velocità.

Osservazioni al microscopio elettronico a scansione portano però a scartare questa ipotesi, in quanto non vi sono differenze apparenti tra le superfici di rottura di provini sollecitati a bassa velocità piuttosto che dinamicamente. Le differenze sono quindi da imputarsi ad effetti di tipo dinamico.

La variazione di resistenza con l'angolo di carico è rappresentata in figura 9 dove sono posti a confronto i valori di resistenza (medi) alle tre velocità di prova. In figura 10 i valori di resistenza sono riportati in termini delle componenti normale (di trazione) e di taglio, per le tre velocità. Su entrambe le figure sono riportate le curve limite di resistenza ottenute interpolando i risultati sperimentali. Si è ipotizzato di poter definire un criterio di rottura tramite una curva limite di tipo ellittico nel piano forza di taglio-forza normale (figura 10). Il criterio adottato è descritto dalla seguente equazione di collasso:

$$\left(\frac{T}{T_{\max}}\right)^2 + \left(\frac{N}{N_{\max}}\right)^2 = 1 \quad (1)$$

Un criterio di rottura di questo tipo è proposto per esempio da Lin *et al.* in [19] per valutare la resistenza di punti di saldatura in condizioni sia statiche che dinamiche.

Nella rappresentazione di figura 9 in cui il modulo della forza risultante F è riportato in funzione dell'angolo di carico la curva limite è rappresentata dalla seguente equazione:

$$F = \frac{T_{\max}}{\cos \alpha} \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \alpha (T_{\max} / N_{\max})^2}} \quad (2)$$

La concordanza della legge rappresentata da (1) con i valori rilevati sperimentalmente è molto buona per i risultati ottenuti a bassa e media velocità e un po' meno per i risultati delle prove di impatto ad alta velocità. Tuttavia in queste prove la rumorosità delle misure è alquanto superiore e la dispersione dei risultati non è del tutto trascurabile.

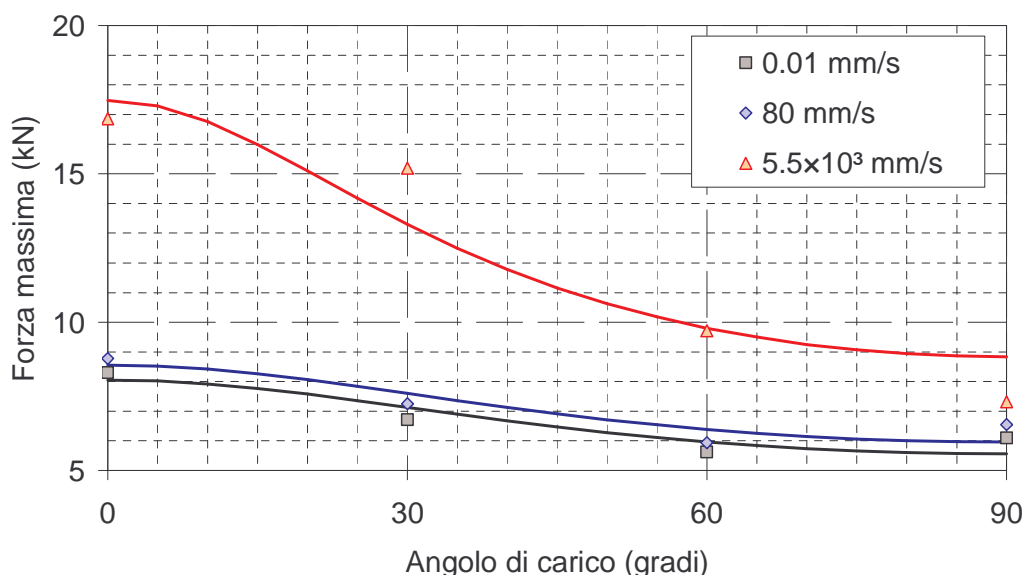


Fig. 9 – Forza massima sul punto in funzione dell'angolo di applicazione del carico

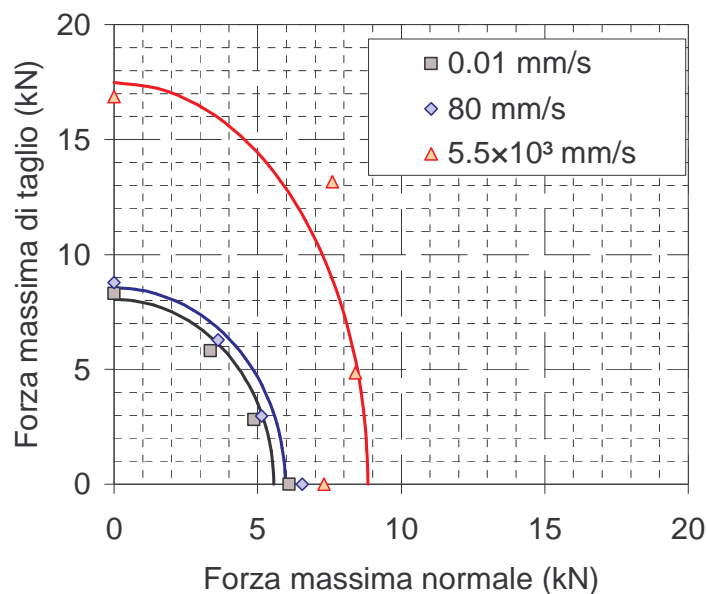


Fig. 10 – Resistenza dei punti di saldatura in termini delle componenti di taglio-trazione

CONCLUSIONI

Sono stati riportati i primi risultati relativi ad una tecnica di prova per la caratterizzazione della resistenza dei punti di saldatura. La conoscenza del comportamento meccanico dei punti di saldatura è molto importante per la progettazione dei veicoli in cui rappresenta il principale metodo di giunzione dei lamierati. Il vantaggio principale della tecnica utilizzata è quello di poter esaminare differenti configurazioni di carico con un unico provino caricato in modo differente. In particolare ruotando il singolo campione tra zero e novanta gradi si possono studiare taglio puro, pura trazione e tutte le combinazioni intermedie delle due componenti di carico. Il metodo è inoltre adatto ad effettuare prove di impatto ad alta velocità in quanto le piccole dimensioni consentono di costruire un'attrezzatura di prova compatta per misurare la resistenza dinamica del giunto saldato. È importante infatti diminuire l'entità delle masse in movimento nell'attrezzatura di carico per evitare di introdurre forze d'inerzia che introducono vibrazioni ed errori di misura che deve essere misurata direttamente sul provino.

È stato evidenziato un chiaro andamento della resistenza del punto di saldatura al variare della velocità di carico e del rapporto tra le forze normale e di taglio, con valori di resistenza massima per sollecitazione di taglio puro e minima resistenza in un ampio intervallo di angoli di carico attorno ai novanta gradi, corrispondenti a pura trazione sul punto.

Si è osservata una notevole influenza della velocità di applicazione del carico che è molto rilevante soprattutto a valori superiori il metro al secondo. A valori così elevati della velocità di carico si è riscontrata una certa rumorosità nei segnali di forza ma si è riuscito comunque a determinare la curva limite che definisce il criterio di rottura.

Le velocità di prova raggiunte sono comunque rilevanti e costituiscono il limite per questa metodologia di prova e i risultati suggeriscono che per avere risultati a velocità superiori si dovranno impiegare altri metodi di prova quali la barra di Hopkinson.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia il Dr. S. Zhang di Daimler-Chrysler per la collaborazione nella preparazione dei provini e l'Ing. P. Nevone per l'aiuto fornito nella messa a punto dell'attrezzatura di prova.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M.E.M. El-Sayed, T. Stawiarski, R. Frutiger, "Fatigue analysis of spot-welded joints under variable amplitude load history", *Eng. Fracture Mech.*, Vol. 55, 3, 1996, pp. 363–369
- [2] H. Kang, M.E. Barkey, Y. Lee, "Evaluation of multiaxial spot weld fatigue parameters for proportional loading", *Int. J. of Fatigue*, Vol. 22, 2000, pp. 691–702
- [3] M.E. Barkey, J. Han, "Fatigue analysis of spot welds subjected to a variable amplitude loading history", 2001, SAE paper 2001-01-0435
- [4] D. Radaj, S. Zhang, "Geometrically nonlinear behaviour of spot welded joints in tensile and compressive shear loading", *Eng. Fracture Mech.*, Vol. 51, 2, 1995, pp. 281–294
- [5] S. Zhang, "Stress intensity at spot-welds", *Int. J. of Fracture*, Vol. 88, 1997, pag. 167-185
- [6] P. Salvini, E. Scardecchia, V. Vullo, "Resistenza a fatica dei giunti saldati a punti per applicazioni autoveicolistiche: stato dell'arte della ricerca di settore – I parte", *ATA Ingegneria Automotoristica*, Vol 50, 3, 1997, pag. 107-116
- [7] P. Salvini, E. Scardecchia, V. Vullo, "Resistenza a fatica dei giunti saldati a punti per applicazioni autoveicolistiche: stato dell'arte della ricerca di settore – II parte", *ATA Ingegneria Automotoristica*, Vol 50, 4, 1997, pag. 194-210
- [8] P. Salvini, E. Scardecchia, V. Vullo, "Resistenza a fatica dei giunti saldati a punti per applicazioni autoveicolistiche: stato dell'arte della ricerca di settore – III parte", *ATA Ingegneria Automotoristica*, Vol 50, 5, 1997, pag. 263-277
- [9] G. Ferrari, P. Salvini, F. Vivio, V. Vullo, "Realizzazione di un elemento finito per la modellazione dei punti di saldatura in strutture sollecitate a fatica", *Atti XXVIII Convegno Nazionale AIAS, Vicenza*, 1999, pp. 347–358
- [10] P. Salvini, F. Vivio, V. Vullo, "A spot weld finite element for structural modelling", *Int. J. of Fatigue*, Vol. 22, 2000, pp. 645–656
- [11] P. Salvini, F. Vivio, V. Vullo, "Use of an appropriate spot weld element for fatigue life prevision of complex joints", *EAEC Conference, Barcelona*, 1999, paper STA 99C136
- [12] B. Chang, Y. Shi, S. Dong, "Comparative studies on stresses in weld-bonded, spot-welded and adhesive-bonded joints", *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 87, 1999, pp. 230-236
- [13] B. Chang, Y. Shi, L. Lu, "Studies on the stress distribution and fatigue behaviour of weld-bonded lap shear joints", *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 108, 2001, pp. 307-313
- [14] D. Radaj, S. Zhang, "Weld spot force evaluation with dented sheet material", *Eng. Fracture Mech.*, Vol. 61, 1998, pp. 673–678
- [15] E. Rossetto, F. Rossi, L. Vaschetto, B. Atzori, "The fatigue limit of spot welded lap joints", 1987, SAE paper 870640
- [16] A. Blarasin, B. Atzori, P. Filippa, G. Gastaldi, "Design fatigue data for joining steel sheets in the automotive industry", 1990, SAE paper 900742
- [17] S.H. Lin, J. Pan, T. Tyan, P. Prasad, "Failure modeling of spot welds under complex combined loading conditions for crash applications", 2002, SAE paper 2002-01-2032
- [18] P. Wung, "A method for spot welded structure analysis", 2001, SAE paper 2001-01-0427
- [19] S.-H. Lin, J. Pan, S. Wu, T. Tyan, P. Wung, "Spot weld failure loads under combined mode loading condition", 2001, SAE paper 2001-01-0428
- [20] S. Zhang, "Recent development in analysis and testing of spot welds", 2001, SAE paper 2001-01-0432
- [21] L. Peroni, R. Vadori, M. Avalle, "Sviluppo di un sistema optoelettronico per il rilievo di grandi deformazioni in prove di trazione dinamiche" *Atti XXIX Convegno Nazionale AIAS, Lucca*, 2000, pp. 1073-1082