

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI ROMA
"LA SAPIENZA"

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CHIMICA, DEI MATERIALI,
DELLE MATERIE PRIME E METALLURGIA

**CONVENZIONE DI RICERCA TRA LA SOC. ALENIA
E L'UNIVERSITA' DI ROMA "LA SAPIENZA"**

APPLICAZIONE DELL'EMISSIONE ACUSTICA
SU GIUNTI SALDATI IN MATERIALE TERMOPLASTICO

C.Caneva, C. Santulli

Relazione sulla seconda fase conclusiva del programma (1991)

Attività svolte

Secondo il piano di attività proposto sono state compiute indagini non distruttive e prove meccaniche sui pannelli siglati S1, S2, S3, R1, R2, R3, T1, T2, T3 utilizzando come riferimento i dati acquisiti nel corso della prima fase.

Sono state pertanto eseguite le seguenti prove;

- 1) Prove di acquisizione acusto-ultrasonica (AU) sui provini non danneggiati
 - 2) Prove meccaniche di trazione a rottura (provini #.4)
 - 3) Prove meccaniche di trazione al 70% del carico di rottura (provini #.3)
 - 4) Prove meccaniche di trazione al 50% del carico di rottura (provini #.2)
 - 5) Prove meccaniche di trazione al 30% del carico di rottura (provini #.1)
 - 6) Prove di acquisizione acusto-ultrasonica sui provini danneggiati (#.1, #.2 e #.3)
 - 7) Prove meccaniche di flessione a 3 punti
 - 8) Prove meccaniche di flessione a 4 punti
- 1.1 Monitoraggio di tutte le prove meccaniche (ad esclusione delle prove di flessione a 3 punti) con la tecnica dell'emissione acustica (EA)

1. PROVE MECCANICHE

1.1 Prove di trazione

Al fine di allineare il piano di saldatura dei provini con la giacitura della linea del carico applicato dalla macchina di trazione, sull'estremità dei provini sono stati applicati dei talloncini, ricavati dal materiale avanzato dalle prove relative alla fase preliminare; in quella sede erano stati utilizzati dei talloncini di alluminio, il cui spessore era evidentemente leggermente diverso da quello dei laminati, pertanto il carico non era perfettamente assiale. Di fatto i risultati ottenuti per il carico di rottura dei giunti sono in questo caso minori che nel caso precedente, ma con un rapporto costante $R=0,8$.

I provini della serie S #.4, R #.4 e T #.4 sono stati sottoposti a trazione fino al carico ultimo. Si riportano nella tabella 1 i carichi di rottura medi ottenuti

TABELLA 1
CARICHI ULTIMI DI TRAZIONE

Serie provini	F max (kN)	σ max (MPa)
S	15,7	282
R	15,7	282
T	12,0	216

1.2 . Prove di flessione

Sono stati eseguite delle prove di flessione sia a tre che a quattro punti, queste ultime con monitoraggio mediante emissione acustica sui provini avanzati dai pannelli forniti. Nelle fig.1 e 2 vengono riportati gli schemi di applicazione del carico per i due tipi di flessione. Sono anche indicate le distanze tra gli appoggi adottate per allineare l'asse del giunto, sul piano degli appoggi, in modo che risulti esattamente normale alla direzione del carico, sono stati inseriti dei supporti tra il provino e gli appoggi stessi. Per la modalità di esecuzione delle prove, si è fatto riferimento alla normativa in vigore. Nella tabella 2 sono riportate le σ a rottura calcolate per i due tipi di prova, considerando lo spessore del provino coincidente con quello nella zona del giunto.

TABELLA 2
CARICHI ULTIMI DI FLESSIONE

Serie provini	σ max (MPa)	σ max (MPa)
	3 punti	4 punti
S	219	240
R	210	240
T	150	150

1.3 Conclusioni

I risultati relativi al carico ultimo confermano qualitativamente quelli determinati nella prima fase del programma di prove. Le saldature tipo S (Standard) e tipo R (Quench) hanno proprietà meccaniche simili e comunque superiori a quelle di tipo T (Overheated) sostanzialmente più deboli. Le diverse proprietà meccaniche si distinguono anche per le modalità e le superfici di frattura osservabili al microscopio ottico.

Infatti per le saldature T in nessun caso è visibile la superficie originaria del laminato: il piano di deformazione è interno al lo strato di fibre di rinforzo del giunto. La superficie del laminato appare invece nel caso dei giunti R ed S; in quattro casi addirittura sono emersi i piani interni al laminato: la delaminazione avviene su piani diversi, anche esterni a quelli contenenti le fibre di rinforzo del giunto. Questo implica l'esistenza di un maggior volume di fibre partecipanti alla resistenza del giunto ed una maggiore distribuzione del carico sui piani interessati alla saldatura.

Per quanto riguarda le linee di avanzamento della delaminazione in direzione normale alle fibre, particolarmente evidenti nel caso dei provini rotti per trazione, e meno nel caso della flessione, si vede come la delaminazione si innesta ad un'estremità del giunto e quindi avanza con velocità crescente all'aumentare del carico applicato.

2. RILIEVI ACUSTO-ULTRASONICI

Ciascun provino destinato a subire la prova di trazione a carichi inferiori al carico ultimo è stato sottoposto prima e dopo la prova meccanica ad un test AU. Rispetto alle prove AU effettuate nella prima fase del programma sono state compiute alcune modifiche relative alla strumentazione: invece di utilizzare due trasduttori a 150 kHz di picco di risonanza, sia in trasmissione che in ricezione, un trasduttore piezoelettrico con risonanza 1 MHz è stato utilizzato in trasmissione, come pulser, ed un trasduttore piezoelettrico a larga banda passante (100 kHz- 1.2 MHz) è stato utilizzato in ricezione. Il filtro del

preamplificatore del segnale ricevuto é stato cambiato con un filtro a larga banda; tuttavia non é stato possibile sostituire un secondo filtro interno alla macchina LOCAN - AT con banda passante compresa tra 100 e 300 kHz.

Basandosi sull'esperienza acquisita durante la prima fase del programma, in cui si é verificato che il dato piú affidabile é quello relativo all'ampiezza dell'evento acusto-ultrasonico, per ciascun provino sono stati stampati i diagrammi **Ampiezza del segnale vs. Frequenza**, ottenuti prima e dopo il danneggiamento. E' bene far notare che i diagrammi non rappresentano la distribuzione reale degli eventi nel piano di Bode, ma una distribuzione media ottenuta mediando l'ampiezza degli eventi lungo intervalli di frequenza di 10 kHz ciascuno; questo permette una visualizzazione piú immediata dell'andamento della risposta del materiale. La finestra riportata ha orizzontalmente gli stessi limiti imposti dal filtro montato dalla macchina; verticalmente il limite inferiore coincide con il livello di soglia scelto per l'acquisizione al fine di eliminare il rumore.

I diagrammi, osservati globalmente, indicano come il danneggiamento del giunto dovuto all'applicazione di un carico di un certo livello, induca comunque una diminuzione dell'area delimitata dalla curva, dovuta in parte ad una diminuzione di ampiezza del segnale, ma soprattutto alla diminuzione della frequenza di taglio, che dopo il danneggiamento risulta non di molto superiore ai 140 kHz solo per alcuni dei provini R e T, e non mai per i provini S, dove si mantiene sempre al di sotto di tale valore. Questo induce a credere che i provini S, a differenza degli altri, mostrino qualche problema di difettosità solo dopo essere stati sollecitati: infatti risulta in letteratura l'esistenza di un rapporto tra l'entità della diminuzione della frequenza di taglio e l'incremento del danno rilevato sul materiale.

Tuttavia nel nostro caso non é chiara la correlazione tra la variazione della risposta ed il carico applicato, anche perché non é definito il tipo e l'entità del danno arrecato nei vari casi, né é definito, per i tre tipi di provini, il modello di difettosità di partenza.

In tale situazione il metodo acusto-ultrasonico non sembra in grado da solo di dare risposte univoche per definire la qualità dei giunti.

3. EMISSIONE ACUSTICA

3.1 Esecuzione della prova di trazione e sistema di emissione acustica

Le prove di trazione erano effettuate con una macchina universale per prove meccaniche SCHENK, in controllo di spostamento, come previsto dalle norme, benché con una velocità di spostamento della traversa di soli 0.5 mm/min., atta questa allo sviluppo completo dei fenomeni di emissione acustica dovuti al danneggiamento, il che richiede un'applicazione del carico non troppo veloce.

Il rilievo di emissione acustica effettuato durante le prove di trazione é stato effettuato con il sistema LOCAN-AT a 4 canali, equipaggiato con due sensori risonanti a 150 kHz in acquisizione, posti sulle estremità del giunto, ed altri due sensori dello stesso tipo di guardia, posti sulle ganasce della macchina di trazione allo scopo di eliminare tutti i rumori connessi con il funzionamento della macchina stessa.

Infine la soglia é stata impostata su un valore molto alto (45 dB) allo scopo di escludere gli eventi non eccessivamente rilevanti dal punto di vista del danneggiamento.

3.2 Diagrammi di emissione acustica considerati

Prova di flessione

Distribuzione degli eventi secondo l'ampiezza
Distribuzione degli eventi secondo l'energia
Andamento delle ampiezze secondo il carico
Andamento delle energie secondo il carico

Prova di trazione

Localizzazione degli eventi sul provino
Distribuzione degli eventi secondo l'ampiezza
Distribuzione degli eventi secondo l'energia

3.3 Prove di trazione con emissione acustica

Gli eventi di emissione acustica risultano localizzati lungo il giunto con preferenza per l'ascissa 15, collocata su una delle estremità della superficie incollata, che sembra particolarmente attiva durante la trazione, anche se la differenza rispetto all'altra superficie, collocata intorno all'ascissa 36, dovrebbe ascrivere semplicemente alla differenza di sensibilità tra le due sonde. In ogni modo, l'estremità della superficie incollata mostra i maggiori problemi in emissione acustica, cosa peraltro facilmente sospettabile.

Osservando il numero totale degli eventi rilevato durante la prova di trazione, si può notare (v. tab. 4) come il numero degli eventi non si presenti come un fattore estremamente affidabile, potendo variare di un intero ordine di grandezza da un provino all'altro. Questo, benché la maggior parte dei risultati (25/33) si collochi fra i 300 e i 900 eventi, con una maggiore dispersione nel caso dei provini S.

A qualche considerazione si prestano invece questi dati nel confronto tra le diverse severità delle prove effettuate.

Nel passaggio infatti dalle prove al 30% a quelle al 50% del carico di rottura si osserva che, mentre il numero totale degli eventi EA rimane in media pressoché costante per i provini R ed S, invece per i provini T si nota un incremento medio degli stessi molto notevole (nell'ordine del 50%).

Passando poi dalle prove al 50% a quelle al 70% del carico di rottura si ha un incremento del numero degli eventi pari a non più del 60% per i provini S, un po' superiore a questo valore per i provini R, e vicino al 100% per i provini T, che partivano da un numero di eventi già molto superiore a quello degli altri due tipi.

Da notare invece il fatto che oltre la metà degli eventi EA avviene, per i provini S, tra il 70% ed il carico di rottura.

Per quanto riguarda invece l'**Ampiezza** degli eventi osservati, i provini R mostrano, nelle prove al 30% del carico di rottura (v. tabelle 6a, 7a e 8a) una maggior predominanza di

eventi di piccola ampiezza (ai limiti della soglia stabilita) rispetto ai provini S e T; tale tendenza si mantiene anche nelle successive prove al 50 ed al 70%, ed è confermata anche dai diagrammi dell'energia (v. tabelle 6b, 7b e 8b).

Inoltre, nelle curve **Ampiezza vs. Carico** per i provini S il massimo valore dell'ampiezza non è mai stato raggiunto.

La distribuzione delle **Energie** infine, mostrata in tab.10, rende evidente il fatto che dei provini portati a rottura, il giunto di tipo S ha messo in evidenza la minor percentuale (solo il 36%) di eventi con energie superiori a 100, il che dimostra che la rottura avviene in modo più graduale per l'assenza di problemi di partenza sul provino.

3.4 Prove di flessione

Sono state monitorate con emissione acustica le sole prove di flessione a quattro punti (il cui posizionamento dei cunei è mostrato in fig.1), per un totale di sei provini (uno di tipo S, tre di tipo T e due di tipo R), stampando i diagrammi di cui si è detto al punto 3.2.

Il provino di tipo S ha mostrato un numero totale di eventi EA nettamente superiore agli altri tipi. Tuttavia, suddividendo gli eventi in base ai loro valori di ampiezza e di energia, si è potuto notare (v. tabella 9 a e b) che gli eventi sul provino S risultano in molto maggior misura di piccola ampiezza (oltre il 70 % è inferiore ai 60 dB) ed in particolare a bassa energia (oltre l'80 % è minore di 100 unità). Ed anche se si considera l'andamento della prova, si vede nel provino S un comparire più tardivo di eventi ad alta ampiezza; inoltre il valore del picco della curva **eventi - ampiezza** è di circa 5 dB inferiore a quello all'incirca uguale per i provini R e T (51 contro 56).

La curva **ampiezza - carico**, molto piatta per il provino di tipo S, mostra invece nella prima fase importanti riassetamenti delle tensioni (ampiezze non più raggiunte in seguito) per i provini di tipo R ed al solito un andamento crescente in misura piuttosto costante col carico per i provini T.

TABELLA 3
LOCALIZZAZIONE DURANTE LE PROVE DI TRAZIONE

Posizione sul provino in cui si sono rilevati gli eventi di emissione acustica della massima ampiezza
N.B. le ascisse del provino vanno da -3 a 53

PROVINO	PROVATO A	ASCISSA
R1,1	30% carico di rottura	32

R2,1	30% carico di rottura	25
R3,1	30% carico di rottura	36
R1,2	50% carico di rottura	22
R2,2	50% carico di rottura	4
R3,2	50% carico di rottura	15
R1,3	70% carico di rottura	1
R2,3	70% carico di rottura	7
R3,3	70% carico di rottura	15
R1,4	rottura	15
R2,4	rottura	28
R3,4	rottura	21
PROVINO	PROVATO A	ASCISSA
S1,1	30% carico di rottura	46
S2,1	30% carico di rottura	39
S3,1	30% carico di rottura	36
S1,2	50% carico di rottura	11
S2,2	50% carico di rottura	15
S3,2	50% carico di rottura	4
S1,3	70% carico di rottura	25
S2,3	70% carico di rottura	7
S3,3	70% carico di rottura	15
S2,4	rottura	7
PROVINO	PROVATO A	ASCISSA
T1,1	30% carico di rottura	36
T2,1	30% carico di rottura	15
T3,1	30% carico di rottura	39
T1,2	50% carico di rottura	18
T2,2	50% carico di rottura	7
T3,2	50% carico di rottura	25
T1,3	70% carico di rottura	15
T2,3	70%	15
T3,3	70% carico di rottura	18
T1,4	rottura	-3
T2,4	rottura	15

TABELLA 4
SOLLECITAZIONE A TRAZIONE
Eventi di Emissione Acustica

PROVINO	PROVATO A	NUM.EVENTI TOTALI	VALORE MEDIO
S1,1	30% carico di rottura	33	
S2,1	30% carico di rottura	520	356

S3,1	30% carico di rottura	514	
S1,2	50% carico di rottura	124	
S2,2	50% carico di rottura	463	344
S3,2	50% carico di rottura	446	
S1,3	70% carico di rottura	592	
S2,3	70% carico di rottura	380	567
S3,3	70% carico di rottura	729	
S2,4	rottura	1533	1533

PROVINO	PROVATO A	NUM.EVENTI TOTALI	VALORE MEDIO
R1,1	30% carico di rottura	497	
R2,1	30% carico di rottura	352	362
R3,1	30% carico di rottura	239	
R1,2	50% carico di rottura	22	
R2,2	50% carico di rottura	493	386
R3,2	50% carico di rottura	655	
R1,3	70% carico di rottura	857	
R2,3	70% carico di rottura	251	662
R3,3	70% carico di rottura	878	
R1,4	rottura	358	
R2,4	rottura	854	524
R3,4	rottura	361	

PROVINO	PROVATO A	NUM.EVENTI TOTALI	VALORE MEDIO
T1,1	30% carico di rottura	631	
T2,1	30% carico di rottura	380	440
T3,1	30% carico di rottura	311	
T1,2	50% carico di rottura	589	
T2,2	50% carico di rottura	552	554
T3,2	50% carico di rottura	521	
T1,3	70% carico di rottura	1474	
T2,3	70% carico di rottura	868	1021
T3,3	70% carico di rottura	721	
T1,4	rottura	751	887
T2,4	rottura	1023	

TABELLA 5
SOLLECITAZIONE A FLESSIONE (4 PUNTI) FINO A ROTTURA
Eventi di emissione acustica

PROVINO	EVENTI TOTALI (no.)
S1,5	2147

R1,5 813
R2,5 1659
R3,5 1830

T1,5 1082
T2,5 1259

TABELLA 6

a) % degli eventi di emissione acustica ai diversi livelli di ampiezza (dB)

PROVINI	45-51	51-56	56-61	61-67	67-72	oltre 72
30% rottura						
S1,1	12	15	18	30	10	15
S2,1	22	40	22	10	4	2
S3,1	37	34	18	7	3	1
MEDIA 30%	24	29	20	16	5	6
50% rottura						
S1,2	7	16	41	19	13	4
S2,2	13	34	25	15	2	1
S3,2	22	51	24	2	1	-
MEDIA 50%	14	34	31	13	6	2
70% rottura						
S1,3	21	38	27	8	3	3
S2,3	21	37	21	13	4	2
S3,3	22	34	27	10	4	3
MEDIA 70%	21	36	25	11	4	3

b) % degli eventi di emissione acustica ai diversi livelli di energia

PROVINI	0-50	51-100	101-150	151-200	201-250	oltre 250
30% rottura						
S 1,1	27	22	27	3	15	6
S 2,1	36	30	15	6	3	10
S 3,1	46	29	9	4	3	9
MEDIA 30%	36	27	17	4	7	9
50% rottura						
S 1,2						
S 2,2	28	39	16	7	4	6
S 3,2	29	42	14	6	4	5
MEDIA 50%	22	37	16	8	6	11
70% rottura						
S1,3	35	43	12	4	3	3
S2,3	35	33	13	6	5	8
S3,3	34	38	14	7	3	4
MEDIA 70%	35	38	13	5	4	5

TABELLA 7

a) % degli eventi di emissione acustica ai diversi livelli di ampiezza (dB)

PROVINI	45-51	51-56	56-61	61-67	67-72	oltre 72
30% rottura						
R 1,1	18	38	26	9	6	3
R 2,1	38	34	14	8	3	3

R 3,1	35	38	17	7	3	-
MEDIA 30%	31	36	19	8	4	2
50% rottura						
R 1,2	40	28	18	10	2	2
R 2,2	25	38	25	7	3	2
R 3,2	20	45	26	5	3	1
MEDIA 50%	28	37	23	7	3	2
70% rottura						
R 1,3	17	30	27	17	7	2
R 2,3	13	42	36	5	1	2
R 3,3	27	39	25	6	2	1
MEDIA 70%	22	34	29	10	3	2

b) % degli eventi di emissione acustica ai diversi livelli di energia

PROVINI	0-50	51-100	101-150	151-200	201-250	oltre 250
30% rottura						
R 1,1	34	37	14	7	3	5
R 2,1	54	29	8	5	2	2
R 3,1	54	34	8	2	1	1
MEDIA	48	33	10	5	2	2
50% rottura						
R 1,2	40	33	15	4	-	8
R 2,2	33	38	17	6	2	4
R 3,2	34	44	15	4	2	1
MEDIA	36	38	16	5	1	4
70% rottura						
R 1,3	24	39	17	8	5	7
R 2,3	18	45	12	10	4	11
R 3,3	37	42	12	5	3	1
MEDIA	26	42	14	8	4	6

TABELLA 8

a) % degli eventi di emissione acustica ai diversi livelli di ampiezza (dB)

PROVINI	45-51	51-56	56-61	61-67	67-72	oltre 72
30% rottura						
T1,1	23	36	28	6	3	3
T2,1	13	26	42	12	3	4

T3,1	25	31	29	11	3	1
MEDIA 30%	20	31	33	10	3	3
50% rottura						
T1,2	24	39	22	6	5	4
T2,2	16	32	26	13	8	5
T3,2	15	41	29	9	5	1
MEDIA 50%	18	37	26	10	6	3
70% rottura						
T1,3	22	38	23	9	5	3
T2,3	27	40	22	6	4	1
T3,3	19	37	25	11	5	3
MEDIA 70%	23	39	23	8	5	2

b) % degli eventi di emissione acustica ai diversi livelli di energia

PROVINI	0-50	51-100	101-150	151-200	201-250	oltre 250
30% rottura						
T1,1	38	33	12	6	5	6
T2,1	23	36	14	10	5	12
T3,1	38	33	13	5	5	6
MEDIA 30%	33	34	13	7	5	8
50% rottura						
T1,2	46	34	10	5	3	2
T2,2	28	41	17	7	3	4
T3,2	30	44	13	6	3	4
MEDIA 50%	35	40	13	6	3	3
70% rottura						
T1,3	34	40	15	6	2	3
T2,3	31	39	13	6	4	7
T3,3	28	39	17	8	4	4
MEDIA 70%	31	39	15	7	3	5

TABELLA 9
 SOLLECITAZIONE A FLESSIONE (4 PUNTI) FINO A ROTTURA
 a) % degli eventi di emissione acustica ai diversi livelli di ampiezza (dB)

PROVINI	45-51	51-56	56-61	61-67	67-72	oltre 72
S 1,5	24	28	22	13	10	3

R 1,5	10	21	28	18	14	9
R 2,5	17	27	28	15	9	4
R 3,5	19	26	24	13	11	7
MEDIA R	15	25	27	15	11	7
T 1,5	4	19	27	21	16	13
T 2,5	8	22	30	19	15	6
MEDIA T	6	21	28	20	15	10

b) % degli eventi di emissione acustica ai diversi livelli di energia

PROVINI	0-50	51-100	101-150	151-200	201-250	oltre 250
S 1,5	53	26	11	5	1	4
R 1,5	11	22	28	18	13	8
R 2,5	42	30	11	6	4	7
R 3,5	19	26	24	13	11	7
MEDIA R	24	26	21	12	9	8
T 1,5	19	26	14	9	7	25
T 2,5	30	27	15	9	5	14
MEDIA T	24	26	15	9	6	20

TABELLA 10

SOLLECITAZIONE A TRAZIONE FINO A ROTTURA

a) % degli eventi di emissione acustica ai diversi livelli di ampiezza (dB)

PROVINI	45-51	51-56	56-61	61-67	67-72	oltre 72
S 2,4	23	42	22	7	4	2
R 1,4	11	17	29	21	16	6
R 2,4	10	24	35	19	10	2
R 3,4	7	25	38	19	9	2
MEDIA R	9	22	34	20	12	3
T 1,4	14	30	26	15	9	6
T 2,4	14	29	30	15	9	3
MEDIA T	14	29	28	15	9	5