

INCIDENTE aeromobile Piper PA-28-161, marche I-APCE

Tipo dell'aeromobile e marche	Piper PA 28-161 Cadet, marche I-APCE.
Data e ora	23 giugno 2007, ore 13.00 UTC (15.00 ora locale).
Località dell'evento	Aeroporto di Brescia Montichiari.
Descrizione dell'evento	<p>Il giorno 23.6.2007, l'aeromobile Piper PA-28-161 marche I-APCE decollava da Brescia Montichiari alle ore 13.00 UTC per un volo di addestramento locale secondo le regole del volo a vista (VFR), nell'ambito del programma previsto per il conseguimento della licenza di pilota privato di velivolo (PPL).</p> <p>A bordo dell'aeromobile, equipaggiato con doppi comandi, istruttore ed allievo erano rispettivamente seduti a destra e sinistra.</p> <p>Nel corso dell'esecuzione di alcune manovre di volo in sorvolo a 5000 piedi sul lago di Garda, l'istruttore rilevava una difficoltà nella gestione degli alettoni e del comando di profondità (equilibratore).</p> <p>Pur verificando la controllabilità del mezzo, l'istruttore decideva quindi di avvisare il controllo del traffico aereo (Garda Avvicinamento) del problema e di rientrare all'aeroporto di partenza.</p> <p>Veniva contattata la Torre di controllo dell'aeroporto di Brescia Montichiari e si procedeva all'atterraggio per pista 32, con i mezzi antincendio allertati.</p> <p>Una volta atterrato, sull'aeromobile si riscontrava un disallineamento dei volantini; la successiva ispezione visiva sotto il cruscotto evidenziava la rottura della barra di comando a "T" (veda si foto in Allegato "A").</p>
Esercente dell'aeromobile	Aero Club Brescia.
Natura del volo	Addestramento.
Persone a bordo	Due (istruttore e allievo).

Danni a persone e cose

Rottura barra di comando a "T". Occupanti incolumi. Nessun danno a terzi.

Informazioni relative al personale di volo

Pilota istruttore: maschio, nazionalità italiana, 67 anni; licenza di pilota commerciale di aeromobile CPL (A) in corso di validità. Abilitazioni: SEP (land) e MEP (land) IR, FI, IRI, CRI e radio-telefonia in lingua inglese.

Certificazione medica in corso di validità.

Ore di volo totali: 24.800h.

Ore di volo sul PA-28-161: 9.000h.

Ore di volo negli ultimi 90 giorni: 205h.

Allievo: maschio, nazionalità italiana, 47 anni.

Certificazione medica in corso di validità.

Ore di volo totali: 95h 33'.

Ore di volo sul PA-28-161: 50h.

Ore di volo negli ultimi 90 giorni: 21h 18'.

Informazioni relative all'aeromobile ed al propulsore

Il PA-28-161 marche I-APCE è un aeromobile monomotore quadriposto di costruzione statunitense ad ala bassa e carrello fisso.

Equipaggiato con motore alternativo 4 cilindri Lycoming O-320-D3G, con potenza di 160 hp ed elica a passo fisso, ha una massa massima al decollo di 1055 kg ed una velocità di crociera di 120 nodi.

Immatricolato nel 1989 con S/N 41045, ha un certificato di navigabilità per voli VFR ed IFR, con classifiche d'impiego scuola e turismo.

Ore di funzionamento totali: 8996h 45'.

Ultima ispezione 100 h effettuata: 2 giugno 2007.

Ore di funzionamento dall'ultima ispezione: 29h .

Ore di funzionamento negli ultimi 30 gg: 29h.

Informazioni sull'aeroporto

Denominazione ICAO: LIPO.

Coordinate geografiche: 45° 25' 44" N, 10° 19' 50" E.

Elevazione: 355 piedi s.m.l.

Denominazione pista: 14/32.

Fondo della pista: asfalto.

Dimensioni della pista: 2990 x 45 m.

Informazioni meteorologiche

Le condizioni meteorologiche non presentavano elementi di criticità che possano aver influito sulla dinamica dell'evento.

Altre informazioni

A seguito dell'evento, l'aeromobile è stato subito ricoverato in un hangar dell'aeroporto per una più accurata valutazione del danneggiamento osservato a carico della barra di collegamento dei volantini. Dall'analisi documentale è emerso che il componente risultava installato *ab origine* sull'aeromobile ed aveva quindi accumulato 8996 ore di volo.

I successivi controlli visivi indicavano una rottura prodottasi in corrispondenza di una zona di saldatura del componente (Allegato "A"). Tale evidenza suggeriva lo sbarco del particolare e l'esecuzione di più approfondite indagini metallurgiche e frattografiche.

Analisi

Le indagini sono state eseguite presso i laboratori del Reparto chimico del Centro sperimentale di volo dell'Aeronautica militare italiana, in coordinamento con il personale investigativo ANSV.

I risultati delle indagini (Allegato "B") hanno evidenziato il carattere intergranulare della rottura osservata e posto in relazione tale caratteristica con l'originaria zona di saldatura. In particolare, gli esami hanno consentito di determinare il meccanismo che ha causato il cedimento del componente, attribuendolo ad un fenomeno di infragilimento da idrogeno. La natura di tale fenomeno, che è causato dall'introduzione di idrogeno atomico all'interno del reticolo cristallino e per ricombinazione molecolare, provoca una riduzione delle proprietà meccaniche intrinse-

che del materiale (ridotta duttilità e diminuzione del carico di rottura); rimanda, perciò, ad una non corretta esecuzione del processo di saldatura.

In particolare, tale condizione è generalmente associata a temperature di processo troppo elevate, che favoriscono la solubilità dell'idrogeno nella lega ferrosa, ed a raffreddamenti post-processo troppo repentini, che inibiscono la fase di diffusione all'esterno dell'idrogeno accumulato.

A sostegno dell'ipotesi di una scarsa qualità della saldatura provocata da un processo di raffreddamento troppo rapido, le indagini hanno inoltre evidenziato la presenza di numerose soffiature e di alcune cricche sub-superficiali, generalmente associate proprio a questa specifica condizione operativa.

In effetti, il materiale impiegato per questa applicazione, un acciaio AISI 4130 alto resistenziale, è notoriamente sensibile a questo tipo di problematiche e sarebbe stato quindi opportuno adottare, in sede di produzione, condizioni di processo efficacemente atte a prevenire tale inconveniente.

Pur non presentando caratteristiche di rottura progressiva, il cedimento osservato si è quindi innescato nella zona della saldatura ove maggiore risultava la concentrazione dei difetti citati, riducendo così in maniera locale le proprietà meccaniche del componente.

Il senso delle deformazioni plastiche osservate rende poi conto di una sollecitazione coerente con l'esecuzione di una manovra a picchiare. Un intervento energico in tal senso può trovare giustificazione nella natura addestrativa del volo, ma diverrà tale da portare a rottura la barra quando, e solo se, si è in presenza delle menzionate difettosità preesistenti.

E' da ritenere pertanto del tutto casuale che la rottura si sia prodotta dopo che il componente avesse già accumulato circa 9000 ore di volo e non prima.

Causa identificata o probabile	La causa dell'evento è stata individuata nel cedimento della zona saldata della barra a "T" dei volantini, generato da un preesistente problema di infragilimento da idrogeno associato ad una non corretta esecuzione dell'originario processo di saldatura.
Raccomandazioni di sicurezza	<p>Considerata la natura e la localizzazione dei difetti riscontrati nel materiale, è da ritenere non idonea una procedura di ispezione visiva su analoghi componenti, richiedendosi piuttosto un accurato controllo non distruttivo con metodo radiografico da eseguire sulla parte disassemblata.</p> <p>Data l'unicità dell'evento fin qui riscontrato, si considera superfluo introdurre un'apposita procedura di controllo di difficile applicabilità e penalizzante per l'impiego della macchina, rimandando ad una tale eventualità nel caso in cui il fenomeno venisse riscontrato su medesimi componenti.</p>
ALLEGATO A:	documentazione fotografica.
ALLEGATO B:	relazione di indagine tecnica sulla barra comandi di volo.

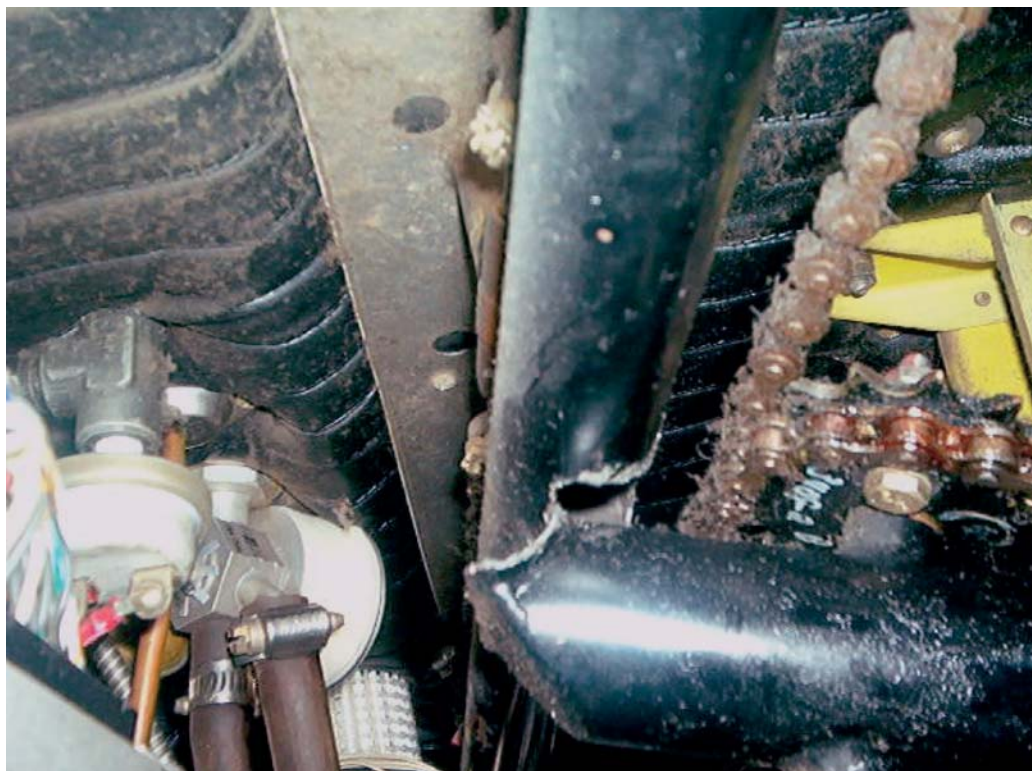
DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA

Foto 1



Dettaglio rottura barra a "T".

Foto 2



Dettaglio rottura barra a "T".

Relazione n° 07/250

**Oggetto: Velivolo Piper PA 28 marche I-APCE
Rottura della barra comandi di volo.**

1. Premessa

In data 17.07.07 l'Agenzia Nazionale per la Sicurezza del Volo (ANSV), ha consegnato al Reparto Scrivente due reperti metallici, costituenti la barra comandi del velivolo in oggetto (Figura 1). I reperti sono stati sottoposti agli esami di seguito riportati al fine di determinare la natura e le cause della rottura rilevata.

La barra comandi di volo, evidenziata in giallo¹ nella Figura 2, governa il piano orizzontale di coda del velivolo e, quindi le rotazioni intorno all'asse di beccheggio. Nel dettaglio la rotazione rigida del corpo della barra, fulcrato all'apice inferiore, si traduce nella rotazione della suddetta superficie mobile mediante organi metallici di rimando.



Figura 1 - Piper PA 28

2. Esami Macrofrattografici

2.1 Osservazione visiva

L'oggetto è pervenuto rotto in due parti (particolari A e B in Figura 3); la frattura è avvenuta in corrispondenza della zona di raccordo saldata (tratteggio bianco in Figura 3).

¹ catalogo parti Piper PA-28-161 CADET.

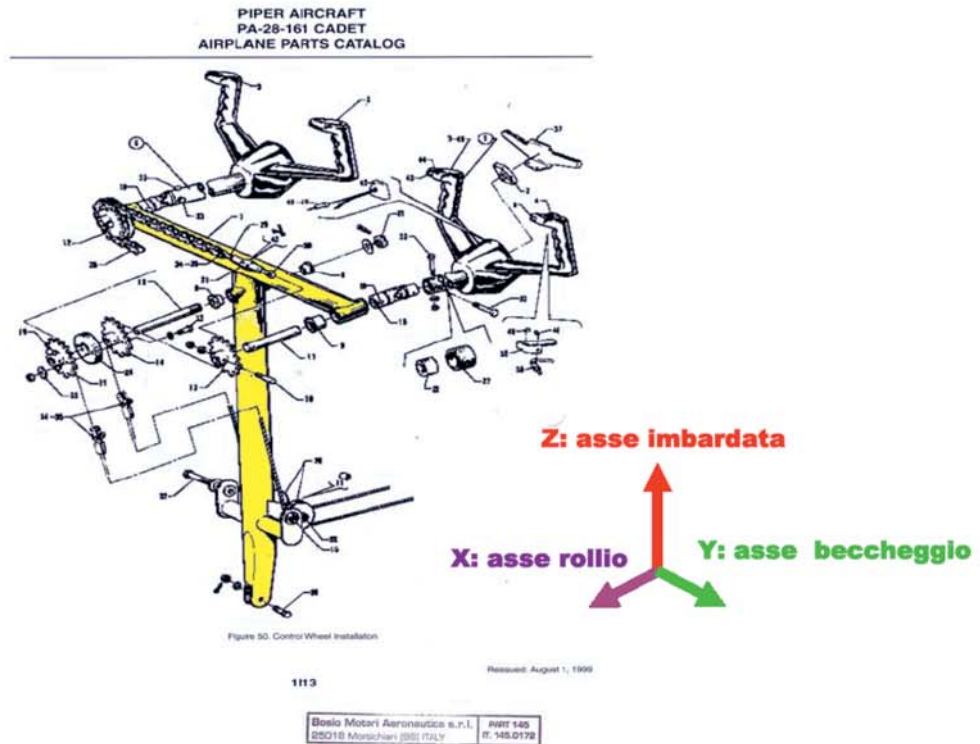


Figura 2 - Assieme barra comandi

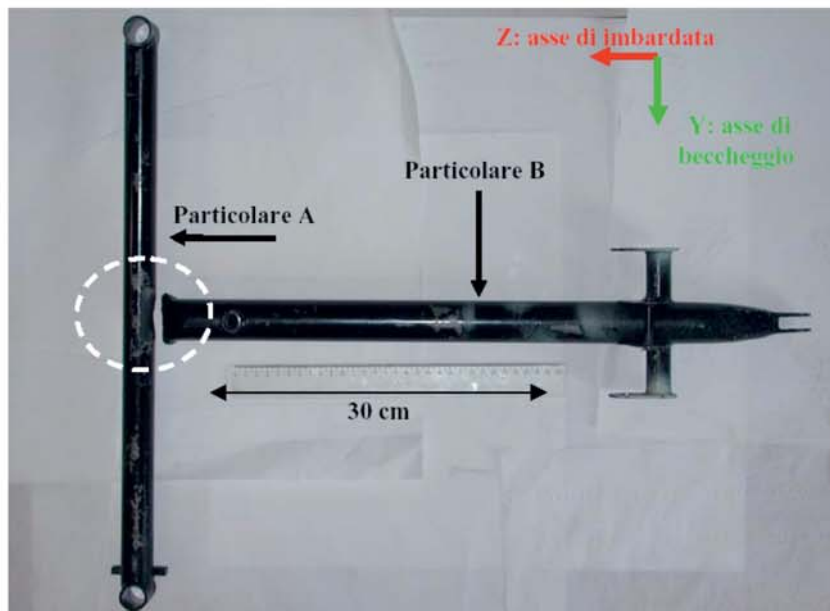


Figura 3 - Frattura tra le parti A e B in corrispondenza della zona di saldatura

Particolare A:

Il particolare A presenta una rottura la cui forma è approssimativamente quella di un'ellisse (Figura 4), con assi maggiore e minore rispettivamente di 4,5 cm e 2,2 cm. La superficie di frattura è lucente ed a grana grossolana. Il reperto presenta una deformazione di tipo plastico coerente con una sollecitazione agente nella direzione che va dalla coda alla prua del velivolo (verso positivo delle X rispetto al sistema di riferimento in Figura 1, frecce in Figura 4).

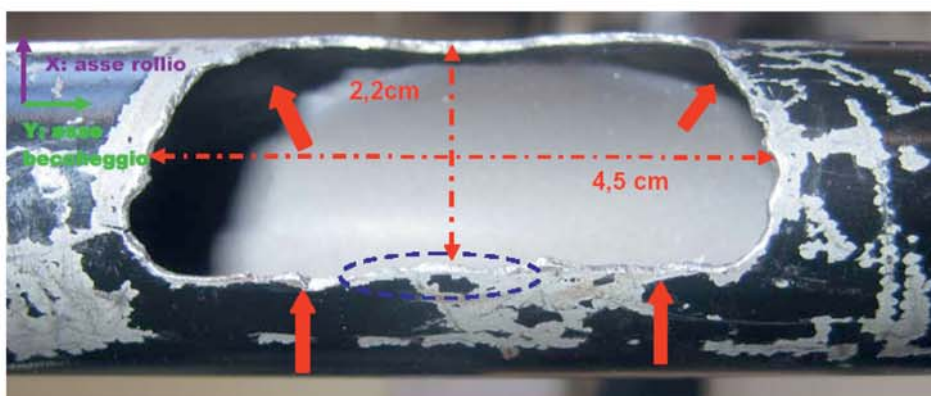


Figura 4 – Particolare A, zona di rottura

Particolare B:

Il particolare B presenta nella zona di frattura l'area approssimativamente ellittica strappata dal particolare A ed evidenzia nella sua parte inferiore la saldatura tra i due giunti. Analogamente al particolare A la superficie di rottura è lucente ed a grana grossolana con deformazioni plastiche concordi ad una sollecitazione agente nella direzione che va dalla coda alla prua del velivolo (verso positivo delle X rispetto al sistema di riferimento in Figura 1). Sono visibili numerose bolle (frecce verdi in Figura 5); il cui diametro max è 6 mm.

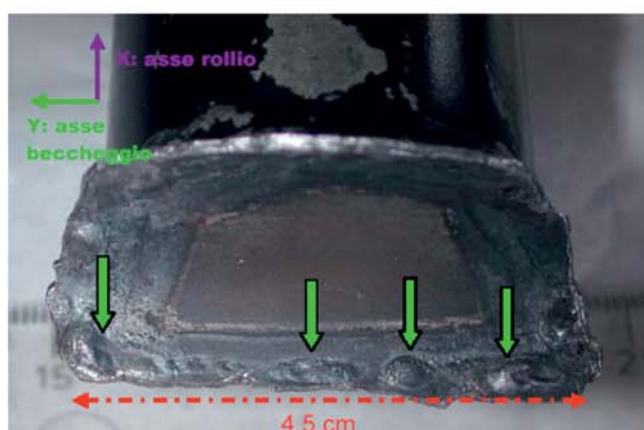


Figura 5 - Bolle sulla zona di saldatura

2.2 Microscopio ottico

Particolare A

L'osservazione ha evidenziato spalmature sulla superficie di rottura (Figura 6) e porosità che raggiungono in taluni casi un diametro max di 0,6 mm (tratteggio in Figura 7).



Figura 6 – Spalmature particolare A



Figura 7 – Porosità particolare A

Particolare B

L'osservazione ha evidenziato spalmature sulla superficie di rottura (Figura 8) e porosità che raggiungono in taluni casi un diametro max di 2 mm (tratteggio in Figura 9).



Figura 8 – Spalmature su particolare B

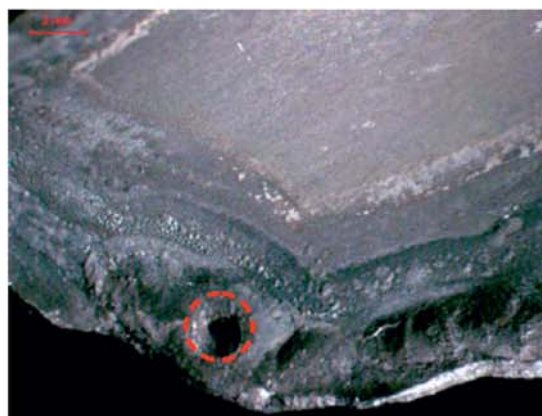


Figura 9 – Porosità su particolare B

3. Esami Microfrattografici mediante microscopio elettronico a scansione

Particolare A

La superficie di rottura presenta le zone di spalmatura (Figura 10) evidenziate già all'esame macrofrattografico.

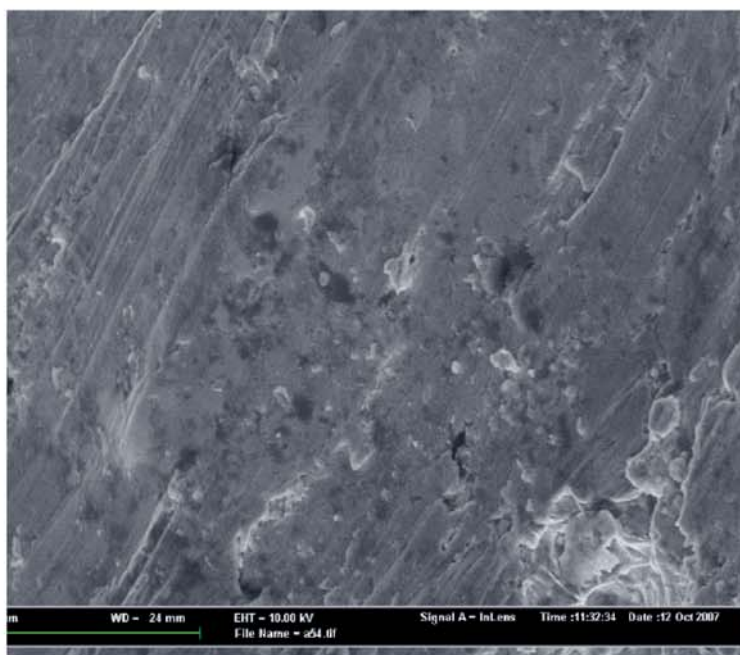


Figura 10 – Spalmatura particolare A (8650 x)

Si rilevano in modo distinto:

- “*dimples*” (Figura 11) nelle aree limitrofe alle deformazioni plastiche, caratteristiche delle zone di rottura per sovraccarico;
- “*Ductile hair-lines*” (freccie in Figura 12), micropori (tratteggio bianco in Figura 12) e punto triplo (tratteggio rosso in Figura 12): queste tre evidenze sono indicative della presenza di un fenomeno di infragilimento da idrogeno nella zona di innesco (tratteggio blu in Fig.4). Quest'ultima è approssimativamente opposta a quella della deformazione plastica più marcata, coerentemente alla direzione delle forze applicate in relazione all'utilizzo della barra comandi. In Figura 13 si riporta per confronto l'immagine di un acciaio caratterizzato anch'esso da infragilimento da idrogeno²;
- Cavità (Figura 14) che diminuiscono in modo significativo la sezione resistente del materiale.

² Lothar Hengel and Hermann Klingele, An Atlas of Metal Damage, 1981, p 125.



Figura 11 – Dimples (4300 x)

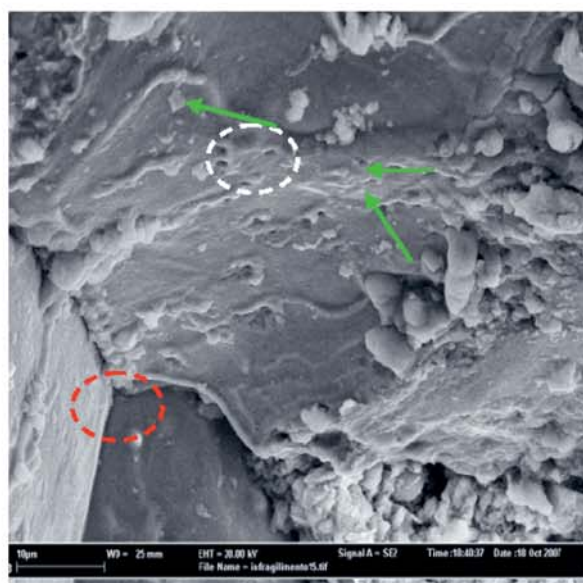


Figura 12 – Infragilimento da idrogeno (4860 x)



Figura 13 – Infragilimento da idrogeno di un acciaio campione (2200 x)

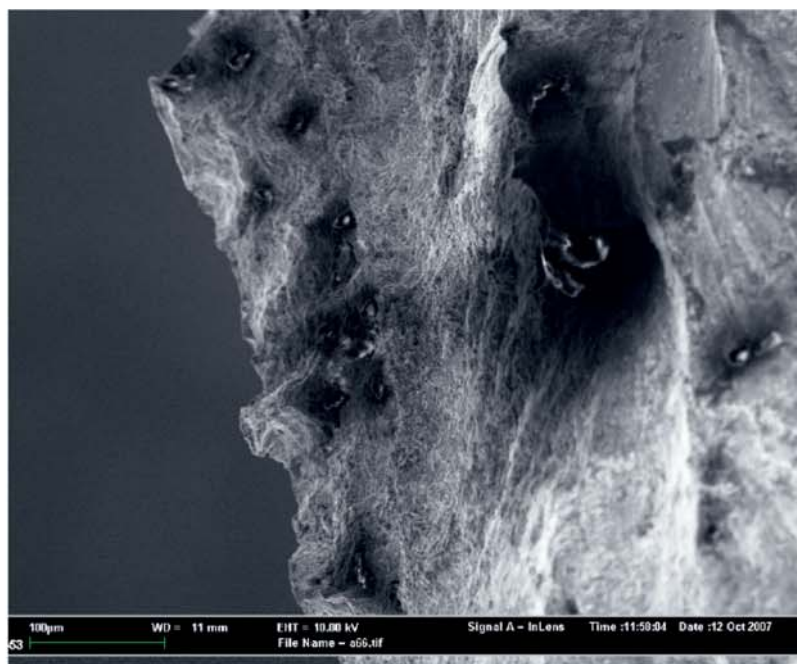


Figura 14 – Ampie cavità (550 x)

Particolare B:

L' esame della superficie di rottura a maggiori ingrandimenti ha confermato le zone di spalmature (Figura 15) evidenziate nell'esame macrofrattografico.

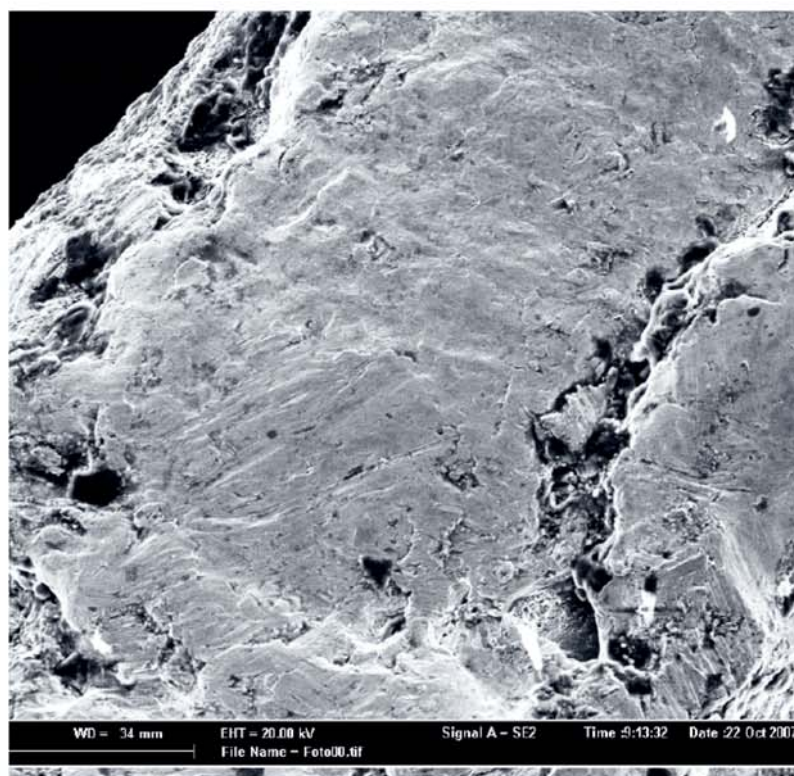


Figura 15 – Spalmature particolare B (457 x)

Si rilevano in modo distinto:

- "dimples" (Figura 16) nella zone limitrofe alle deformazioni plastiche, indice di un collasso della struttura per sovraccarico;
- Cavità (Figura 17); esse diminuiscono la sezione resistente del materiale.

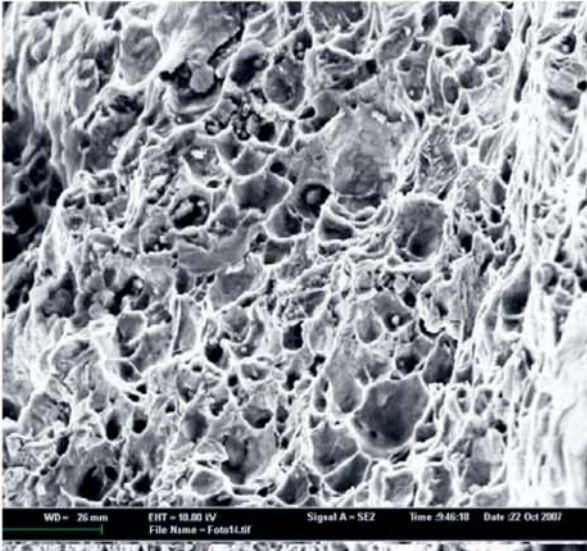


Figura 16 – Dimples particolare B (7760 x)

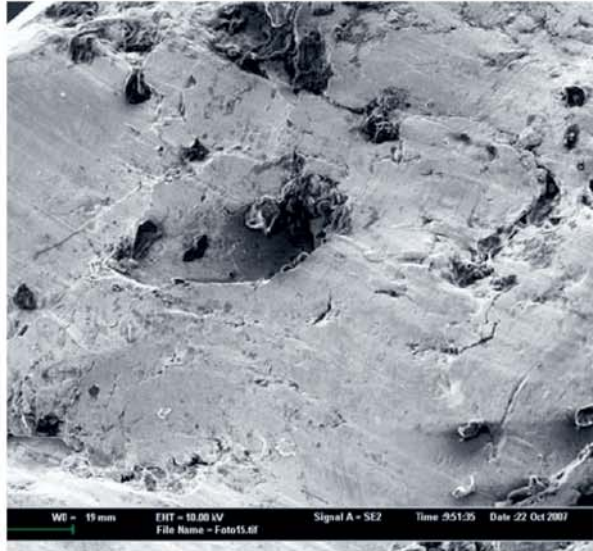


Figura 17 – Cavità particolare B (600x)

4. Caratterizzazione del materiale

Gli esami sono stati condotti al fine di stabilire il tipo e le caratteristiche dei materiali costituenti i particolari A e B ed evidenziare possibili anomalie in prossimità della superficie di rottura.

4.1 Esami metallografici

L'esame metallografico è stato effettuato su una sezione longitudinale del particolare B (Figura 18), esaminandone la sua microstruttura, quella delle saldature presenti (tratteggi in Figura 18), e di parte del reperto A rimasto ad esso saldato dopo la rottura (freccia in Figura 18).

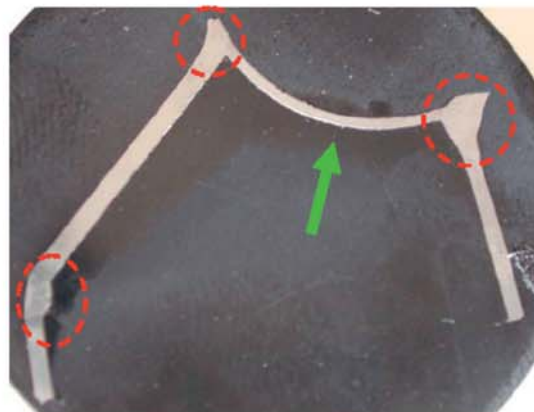


Figura 18 – Provino metallografico

Il cuore presenta una zona bainitica a grani relativamente fini (Figura 19), mentre avvicinandosi nelle zone limitrofe alle saldature si evidenzia un aumento della dimensione dei grani ed un passaggio ad una struttura martensitica (Figura 20). Detta variazione morfologica è caratteristica dei processi di saldatura i quali creano una zona alterata termicamente (*“heat affected zone”, HAZ*). Tuttavia in tale area si rilevano anche i tratti dell'infragilimento da idrogeno; infatti in Figura 21 si presenta per confronto l'immagine di un acciaio campione rappresentativo della difettosità in parola³.

Risultano inoltre visibili porosità il cui diametro arriva fino a 200 μm (Figura 22).

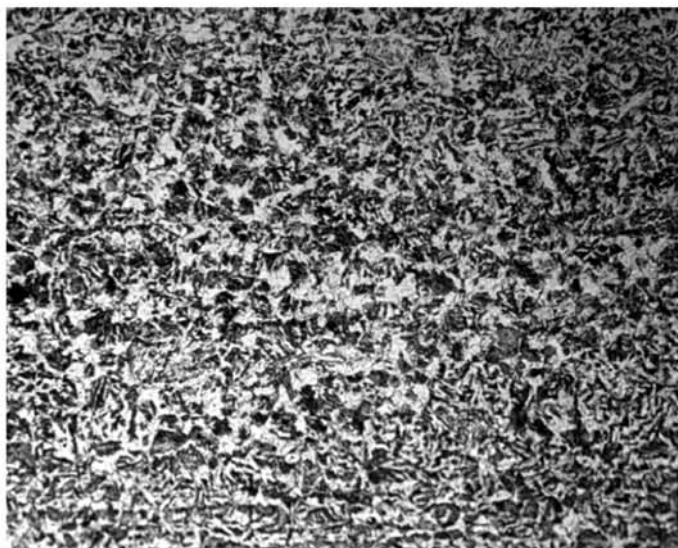


Figura 19 – Metallografia al cuore (320 x)

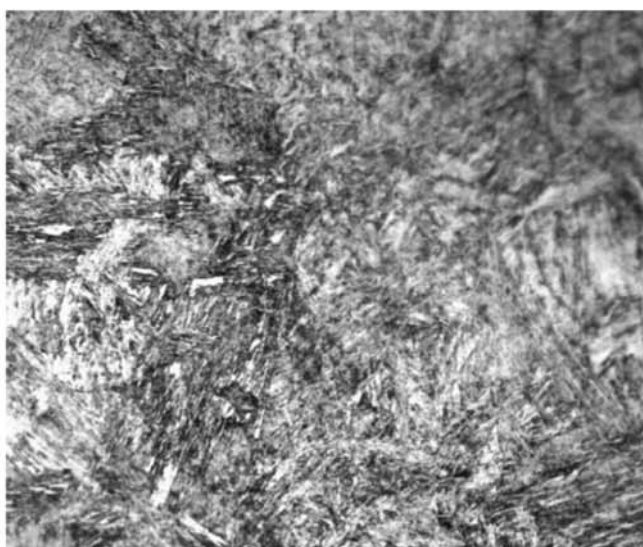


Figura 20 – Zona di saldatura (320 x)



Figura 21 – acciaio campione infragilito da idrogeno (310 x)

³ Hart P.H.M. and Harrison P.L., Compositional Parameters for HAZ Cracking and Hardening, Rivista Italiana della Saldatura n° 2, 1990, p 147.



Figura 22 – Porosità (128x)

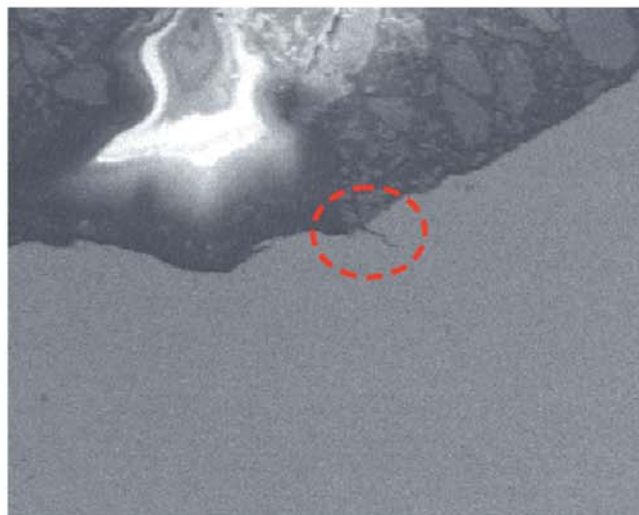


Figura 23 – Cricca sub superficiale (930 x)

Infine nel tratteggio di Figura 23 si osserva una cricca secondaria in uno strato sub-superficiale. Anche questo tipo di difetto è caratteristico delle strutture infragilite da idrogeno⁴.

4.2 Analisi chimica

L'analisi elementare è stata condotta in modo quantitativo mediante spettrometro ICP-OES per la valutazione del materiale costituente i particolari A e B. Tale metodologia ha messo in evidenza per i due giunti la medesima composizione, i quali risultano quindi di acciaio basso-legato AISI 4130(Tabella 1).

Tabella 1 – confronto in base alla composizione chimica elementare espressa in % in peso

	Fe	C	Mo	Cr	Mn	Si
Particolare A	base	0,295	0,21	1,02	0,522	0,239
Particolare B	base	0,290	0,19	1,05	0,565	0,220

Si noti che detto metallo viene considerato ideale per strutture tubolari non saldate⁵. Questa caratteristica è confermata dalla relazione semi-empirica del "carbonio equivalente" la quale rappresenta un indice della suscettibilità all'infraffragilimento da idrogeno⁶:

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Si + \%Ni + \%Cu}{15}$$

⁴ G. Oddone, Guida alla interpretazione delle caratteristiche morfologiche delle superfici di frattura al microscopio a scansione, 1981, p44

⁵ G. Scarpelli, Manuale degli acciai speciali standard, 1981, p IV-11.

⁶ Michael J. Cieslak, Cracking Phaenomena Associated with Welding, ASM handbook, vol. 6, 1997, p 94.

Per l'AISI 4130,

$$C_{eq} \cong (0,63 \pm 0,09)\%$$

Un materiale viene considerato a rischio di infragilimento da idrogeno per $C_{eq} \geq 0,32$; in tali casi il processo di saldatura può essere applicato solo previa adozione di particolari procedure.

4.3 Misure di durezza

Le misure di durezza sono state effettuate lungo una sezione longitudinale del particolare B (Figura 18), in modo da consentire l'analisi del metallo base, della zone di rottura, dell' HAZ ed il confronto con un'altra area interessata da variazioni termiche significative ma non da rottura (saldatura in basso in Figura 18).

I valori di durezza sono stati determinati con metodo microVickers (carico applicato 100g). In Figura 24 vengono mostrati i rilievi di ciascuna zona. Si osserva che nelle aree lontane dalle saldature la durezza media è di 260 HV, tipica di un acciaio AISI

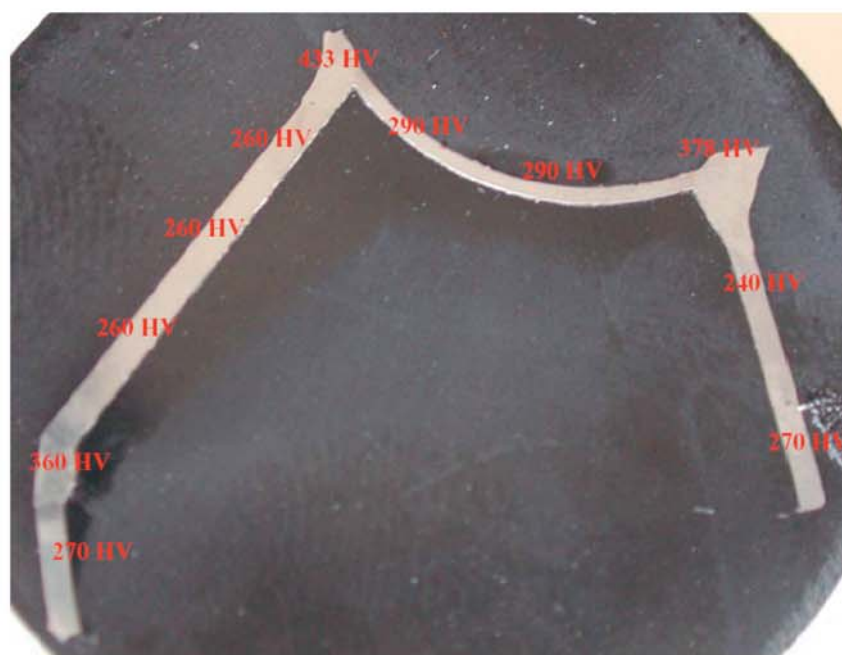


Figura 24 – Misure di durezza Micro-Vickers

4130 temprato a circa⁷ 600°C. È evidente come nelle zone termicamente alterate il suddetto valore medio venga notevolmente oltrepassato: si rilevano picchi di 378 HV per la saldatura destra e 433 HV per la sinistra, indici di un infragilimento rispetto alle caratteristiche meccaniche del materiale al cuore.

⁷ ASM metal reference book, 1985, pag 226

5. Considerazioni

L'osservazione morfologica delle superfici ed il loro esame metallografico rivelano che la rottura è avvenuta sul particolare A in corrispondenza della zona alterata termicamente adiacente alla saldatura. Questa tipologia di difetto è frequente nei giunti saldati a "T" e prende il nome di "*Lamellar tearing*"⁸.

E' stata evidenziata sulla superficie di rottura una morfologia compatibile con gli effetti di un infragilimento da idrogeno nella lega costituente la barra strumenti. Tale lega è soggetta a questo tipo di fenomeno come è stato confermato dal valore del suo carbonio equivalente (0,63%), effettuata a partire dalla determinazione della sua composizione elementare.

L'instaurarsi del fenomeno osservato è derivante dalla introduzione di idrogeno nel reticolo cristallino avvenuta verosimilmente nel corso del processo di saldatura. Ciò avviene sia per effetto di temperature troppo elevate del processo, che aumentano la solubilità dell'idrogeno nella lega, sia a causa di un raffreddamento troppo repentino, tale da non permetterne la diffusione verso l'esterno⁹.

La scarsa qualità del processo di saldatura adottato è confermata dalla presenza di porosità e di bolle sul particolare che hanno costituito, inoltre, una agevolazione al propagarsi della frattura.

La localizzazione dell'area infragilita ha permesso di identificare la zona di innesco, caratterizzata da cricche sub-superficiali intergranulari.

Le "*dimples*" e le deformazioni si sono formate per sovraccarico nelle aree meno fragili quando, in seguito al propagarsi della frattura, la sezione resistente non era più sufficiente a sostenere i carichi applicati.

Le spalmature sulle superfici di rottura sono dovute ad un' azione meccanica successiva alla rottura.

Il fenomeno di "*Lamellar tearing*" osservato può essere evitato impiegando procedure di saldatura con pre/post-riscaldamento e adottando una differente geometria⁸; un esempio è illustrato in Figura 25.

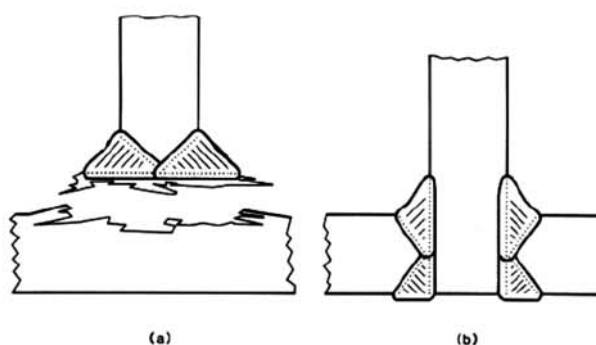


Figura 25 – a) Lamellar Tearing; b) Geometria atta ad impedire il Lamellar Tearing

⁸ Sindo Kou, *Welding Metallurgy*, 1987, p 355-357.

⁹ Lothar Hengel and Hermann Klingele, *An Atlas of Metal Damage*, 1981, p 125.

6. Conclusioni

Il particolare pervenuto presenta una rottura intergranulare prodottasi a causa dell'infragilimento da idrogeno.

Tale fenomeno è stato indotto nel materiale durante un non corretto procedimento metallurgico di saldatura che ha anche generato numerose porosità.

Queste anomalie, diminuendo la sezione resistente, hanno facilitato il propagarsi della frattura.