

**IGF 11 - XI Convegno Nazionale
Gruppo Italiano Frattura
Brescia, 4-6 luglio 1995**

**CONFRONTO TRA CALCOLO E RISULTATI SPERIMENTALI
IN ALCUNI CASI DI VALUTAZIONE DI VITA CONSUMATA**

G. Canale, M. Lanza, C. Lanzone, A. Lauro
Istituto Italiano della Saldatura

1. Introduzione

Nel presente documento vengono illustrati due esempi, relativi a due casi di valutazione della frazione di vita consumata di componenti eserciti a livelli di pressione e di temperatura sufficientemente elevati per determinare possibili fenomeni di scorrimento viscoso. Tali casi consentono di operare un interessante confronto fra i risultati ottenibili con tecniche sperimentali, mediante esami metallografici in campo, e la valutazione indiretta del danneggiamento per via teorica mediante calcolo matematico (1° caso) e prove tecnologiche (2° caso).

I due esempi sono tratti dalle esperienze dell'Istituto Italiano della Saldatura che, attraverso le proprie strutture, è in grado di affrontare compiutamente tutti i diversi approcci al problema della "life-extension" assumendo nella figura del Progettista Abilitato anche il ruolo di coordinamento fra i diversi settori coinvolti nella valutazione.

Il primo caso è relativo ad un intervento per la valutazione della frazione di vita consumata dei componenti di un forno di un impianto di Platforming, operante presso una raffineria italiana.

Nella descrizione di questo caso si è cercato di mettere in evidenza i limiti delle diverse metodologie di stima del danneggiamento da creep, laddove adottate singolarmente, e l'importanza di una corretta sequenza nelle diverse fasi di valutazione; in particolare si è voluto sottolineare che in questo genere di interventi, lo scambio continuo di informazioni e dati, durante le attività di campo, fra le diverse figure coinvolte, è importantissimo per trarre il massimo profitto dalle indicazioni ricavabili dalle attività di campo. Ciò soprattutto alla luce delle tempistiche di intervento spesso condizionate dalle esigenze di produzione.

Nel secondo caso viene operato un confronto fra le valutazioni qualitative ottenute attraverso esami metallografici e i dati sperimentali ricavati attraverso prove di creep accelerato su materiale esercito, prelevato da una curva appartenente alla linea di ingresso di un reattore di un impianto Powerforming.

In questo caso si è voluto dare risalto al problema della definizione dell'ulteriore periodo di esercibilità, in condizioni di sicurezza, allorquando le risultanze sperimentali degli esami metallografici di campo mostrino la presenza di strutture anche fortemente degradate a livello microstrutturale ma non venga rilevato danneggiamento da creep.

2. Collettore forno - impianto di Platforming

2.1 Considerazioni generali

In fig. 1 è rappresentato uno schema del forno con indicati la temperatura effettiva di uscita prodotto ed i materiali costituenti i diversi componenti.

In fig. 2 è rappresentata una vista laterale dove è possibile notare la presenza dei due collettori di ingresso e di uscita, di cui quello di uscita risultava operare in regime di scorrimento viscoso. Il collegamento collettore-tubi era realizzato tramite estrusioni praticate sulle aperture del collettore che consentivano la saldatura testa a testa con i tronchetti (fig. 3a). Una rappresentazione schematica del collettore è riportata in fig. 3b.

Il collettore all'atto dell'intervento risultava in esercizio da circa 130.000 ore.

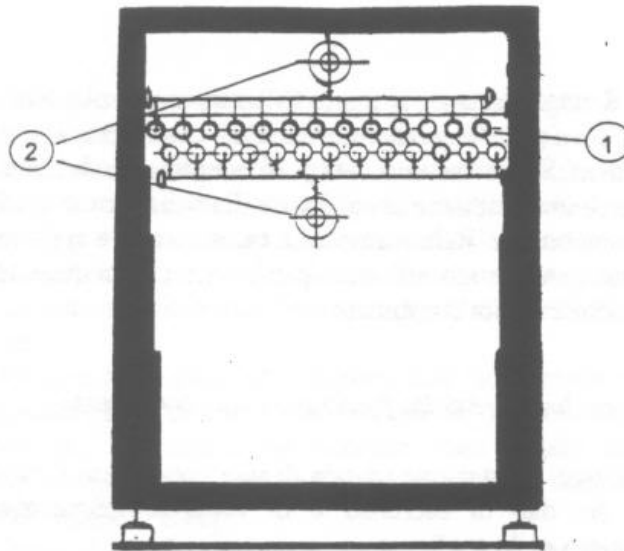


Figura 1 vista frontale

① tubi serpentino radiante in acciaio ASTM A 200 T22

② collettori ingresso/uscita in acciaio ASTM A 335 P11

T uscita (0) = 514°C

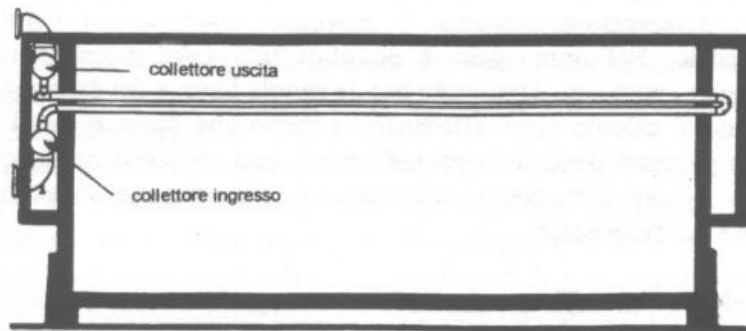


Figura 2 vista laterale

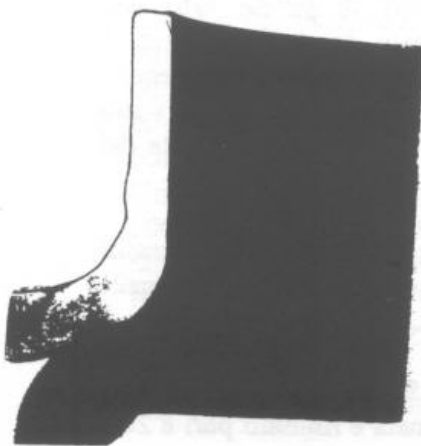


Figura 3A

Particolare del collegamento tronchetto-collettore

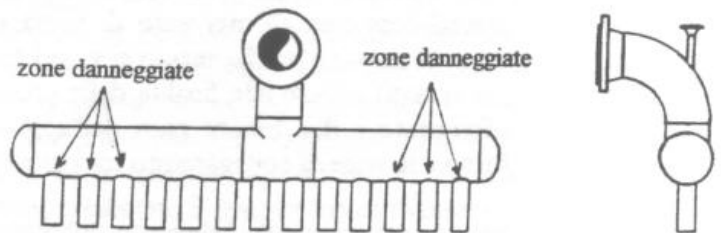


Figura 3B

Schema collettore e zone danneggiate

Come descritto dettagliatamente al punto 2.2 seguente, sulla base dell'esame della documentazione fornita dall'esercente e dei dati costruttivi è stata realizzata una prima verifica teorica che ha consentito di identificare le zone di attacco dei tronchetti del serpentino radiante al collettore di uscita, come quelle maggiormente sollecitate del componente. Relativamente a queste zone è stato messo a punto un modello strutturale, che è stato utilizzato per le valutazioni quantitative (preliminari e finali) della frazione di vita consumata.

2.2 Valutazione preliminare della frazione di vita consumata

La prima fase di ogni valutazione teorica di vita consumata è relativa, come noto, all'acquisizione dei dati di esercizio e di tutte le informazioni pertinenti al componente oggetto dello studio.

La conoscenza approfondita di tali informazioni è infatti importante per due motivi: da un lato fornisce i valori di INPUT numerici essenziali per l'analisi ma dall'altra condiziona le modalità stesse con le quali l'analisi viene condotta.

Tipica è infatti la differenza tra casi in cui vi è un'approfondita conoscenza nel tempo dei parametri di servizio, pressione e temperatura a cui è soggetta una struttura ed i casi in cui invece, non essendo presenti sufficienti rilevazioni di tali parametri nel tempo, siano disponibili come unici dati sicuri e cautelativi le pressioni e temperature massime di esercizio riportate sul libretto ISPESL dell'apparecchio. Nel primo caso è possibile una valutazione approfondita del danno cumulato mediante il computo con la regola lineare del danneggiamento; nel secondo caso il calcolo viene effettuato, a meno che siano evidenti significative riduzioni di spessore degli elementi nel tempo, con un unico passo, ottenendo un risultato in genere fortemente cautelativo e pertanto spesso economicamente penalizzante per l'esercente.

Nel caso del forno dell'impianto di Platforming esaminato risultavano note: la temperatura del fluido riscaldato in uscita dal forno sostanzialmente costante nel tempo pari a 514°C, la temperatura massima rilevata sulla superficie dei tubi della sezione radiante pari a 586°C e la pressione massima di esercizio del circuito dichiarata dall'esercente pari a 35 Kg/cm².

Non essendo disponibili inoltre misure degli spessori di parete effettuate precedentemente all'intervento di stima di vita consumata, l'analisi strutturale è stata effettuata con riferimento ai valori nominali per i diversi elementi considerati. Per quanto attiene alle finalità della presente memoria si ritiene significativo fare riferimento a due tipiche parti dell'apparecchio: i tubi della sezione radiante del forno e le zone di collegamento tra i tubi della radiante e il collettore di uscita.

Per quanto riguarda l'elemento tubolare soggetto a pressione interna, l'analisi strutturale è, come noto, estremamente semplice e al contempo precisa; le formule fornite dalle diverse normative, tra cui la Raccolta VSR, costituiscono pertanto il comune strumento di calcolo.

Nel caso oggetto di studio trattandosi di tubi da 6" sch. 80, il valore della tensione di riferimento per il calcolo della frazione di vita consumata è risultato pari a 28,7 MPa.

Relativamente al collettore di uscita ed in particolare alle zone di collegamento con i tronchetti, è possibile fare ancora riferimento a semplici formule di calcolo strutturale a pressione interna, come quelle fornite dalla Raccolta VSG per corpi cilindrici con aperture multiple allineate. Secondo tali formule il valore di tensione è ottenibile, dopo opportuna inversione, disponendo del modulo di efficienza delle forature Z; tale modulo può essere facilmente valutato conoscendo la tipologia del collegamento collettore-tronchetto, l'interasse tra i tronchetti ed il loro diametro e spessore di parete.

A differenza del caso di un elemento tubolare, tale valutazione non risulta però in molti casi adeguata per il calcolo della frazione di vita consumata in regime di scorrimento viscoso, in quanto tali formule sono basate su un modello di comportamento elasto-plastico del materiale e non sul modello visco-elastico caratteristico del regime di creep.

In corrispondenza del collegamento tronchetto-collettore sono presenti infatti zone molto ristrette sollecitate a valori di tensione locali di membrana e secondarie (la cui entità è fortemente influenzata dalla forma geometrica della connessione) superiori a quelli valutati mediante formula.

In tali situazioni è opportuno effettuare analisi strutturali più approfondite in quanto il danno da scorrimento viscoso si verifica nei punti interessati da concentrazioni di tensione, nonostante la struttura risulti nel complesso poco impegnata.

Nel caso della connessione collettore-tronchetto oggetto di studio, è stata effettuata un'analisi strutturale visco-elastica mediante modellazione del particolare con elementi finiti di tipo guscio a 4 nodi; il modello strutturale è stato caricato dalla sola pressione interna.

La descrizione dello stato tensione/deformazione è stata effettuata utilizzando la nota legge di Norton $\epsilon = B\sigma^n$ che modella con sufficiente precisione il comportamento visco-elastico degli acciai bassolegati al Cr-Mo [1].

E' opportuno osservare che i valori dei coefficienti B e n reperiti in letteratura, sono relativi al comportamento del materiale base (acciaio 1¼ Cr - 0.5 Mo), e non adeguatamente rappresentativi del comportamento dei giunti saldati. Ciò è dovuto alla notevole lacuna di dati sperimentali relativi al comportamento in regime di scorrimento viscoso dei giunti saldati, circostanza particolarmente evidente nella fase di determinazione della tensione di rottura per creep.

L'analisi viscoelastica è stata limitata alle prime 2000 ore di esercizio in quanto essa non era finalizzata al calcolo della deformazione da creep accumulata localmente, bensì all'ottenimento di un valore di tensione di riferimento sulla base del quale effettuare il calcolo della frazione di vita consumata in regime stazionario di creep (cioè una volta esaurito per la maggior parte il fenomeno di rilassamento iniziale).

Una rappresentazione della distribuzione della tensione equivalente di Tresca a 2000 ore è illustrata in fig. 4; in fig. 5 è rappresentato il diagramma di rilassamento nel tempo della tensione nella zona di interesse.

Il valore di tensione di riferimento considerato per il calcolo della frazione di vita consumata è pari a 78,2 MPa.

[1] Stevick G.R. , Failure of welds at elevated temperatures, WRC Bulletin 390

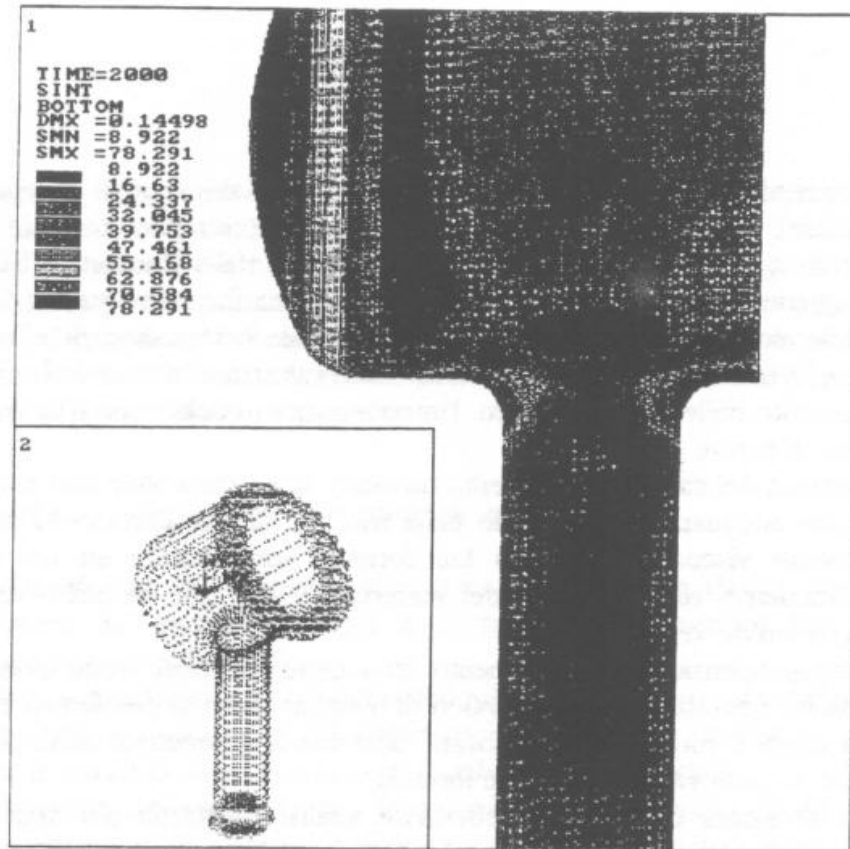


Figura 4 Distribuzione della tensione equivalente di Tresca a 2000 ore (verifica preliminare)

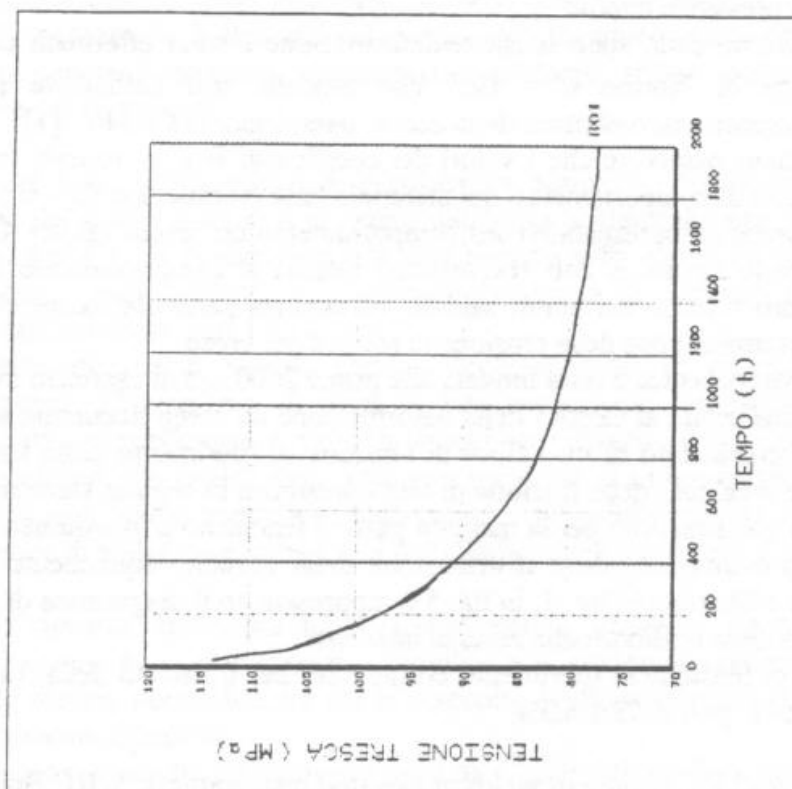


Figura 5 Diagramma di rilassamento nel tempo della tensione equivalente di Tresca nella zona di collegamento collettore-tronchetto

Completata l'analisi strutturale si è proceduto alla valutazione della frazione di vita consumata.

I diagrammi tensione di rottura-parametro di Larson-Miller relativi ai materiali di interesse per questo studio sono riportati in fig. 6. Tali diagrammi sono stati ottenuti sulla base dei dati di rottura a 100.000 ore forniti dalla Raccolta M₁ in accordo alla metodologia di estrapolazione descritta nella circolare ISPESL 15/92. I calcoli effettuati hanno fornito i seguenti valori della percentuale di vita consumata:

P (tubo) = 29 %

P (tronchetto) = 71 %

Questi risultati ottenuti preliminarmente all'intervento indicavano che il forno aveva consumato una frazione di vita teorica sufficientemente contenuta e tale pertanto da permettere al Progettista Abilitato di proporre un ulteriore periodo di esercibilità, una volta verificata la congruenza di tali risultati con l'ispezione di campo.

A questo punto della esposizione, si ritiene opportuno sottolineare, come considerazione di carattere generale, che talvolta nell'analisi di particolari strutturali di modellazione ancora più complessa rispetto al caso trattato nel presente studio, il Progettista Abilitato è chiamato a valutare se sia conveniente dal punto di vista tecnico ed economico, esasperare l'affinamento dei modelli numerici oppure dare maggiore spazio alle verifiche sperimentali dirette in termini di estensione ed approfondimento dei controlli in campo.

2.3 Piano di controllo

I controlli non distruttivi eseguiti in campo sono stati condotti secondo il "piano di controllo" seguente:

- esame visivo generale dei componenti
- esame magnetoscopico al 30% delle saldature tubo-curva e tubo-tubo del serpentino radiante
- esame spessimetrico sul 30% dei tubi
- prove di durezza in materiale base sul 30% dei tubi
- esame ultrasonoro ed esame magnetoscopico delle saldature di composizione dei collettori
- esame magnetoscopico delle saldature tronchetto-collettore
- esame metallografico a campione sui tubi della zona radiante e sui collettori.

Il risultato più significativo emerso dai controlli non distruttivi effettuati è stato l'individuazione di difetti macroscopici tipo cricca in corrispondenza delle saldature

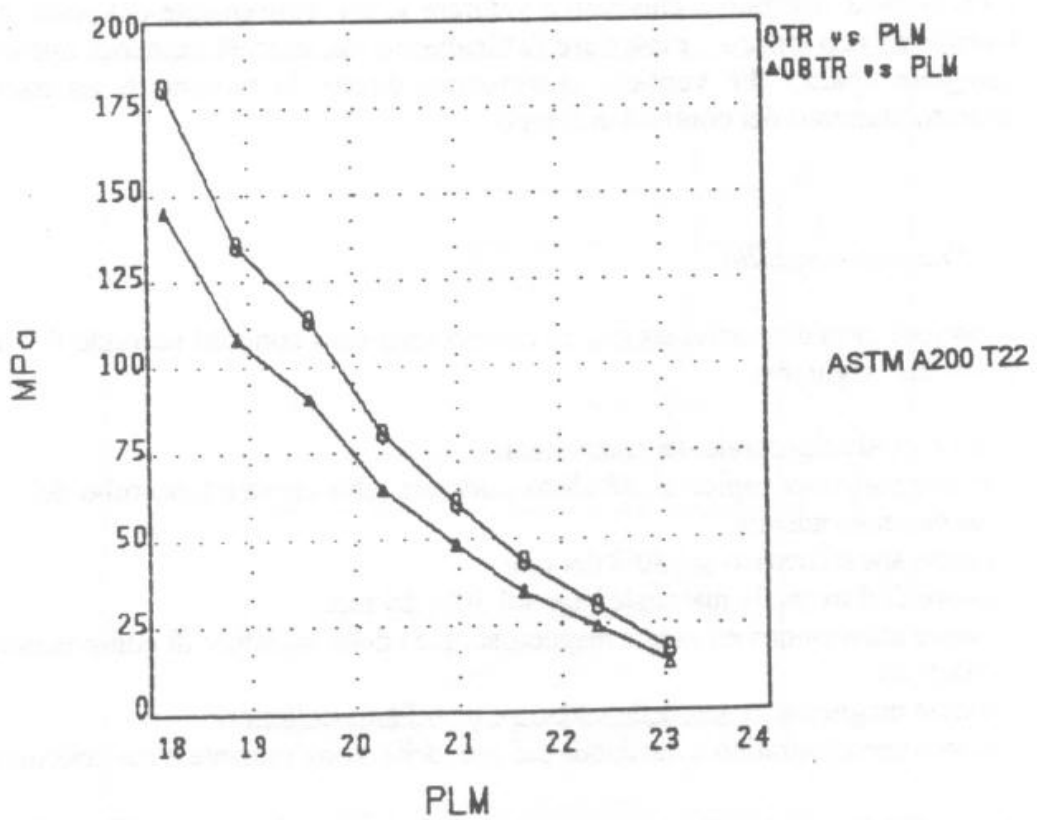
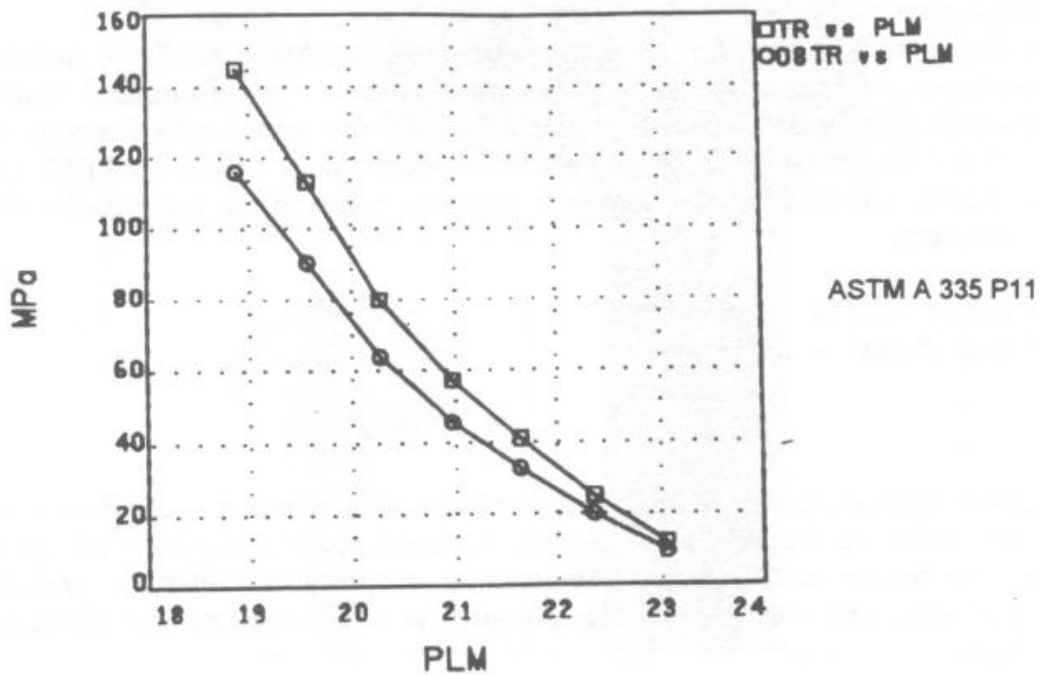


Figura 6 Diagrammi tensione di rottura/parametro di Larson-Miller

dei tronchetti di estremità del collettore; in particolare le cricche erano localizzate nella zona termicamente alterata e nel materiale base adiacente lato collettore (fig.7). Tali difetti si riscontravano anche sugli altri tronchetti, in misura via via decrescente dalle estremità verso il centro del collettore. Gli attacchi dei tronchetti centrali risultavano esenti da difetti.

Gli esami metallografici supplementari, indirizzati a scopo interpretativo nelle zone interessate dalle cricche, mostravano la presenza di microcricche e cavità allineate a bordo grano riconducibili a fenomeni di scorrimento viscoso, che si estendevano dalla zona termicamente alterata, lato collettore, al materiale base adiacente (v. fig. 8 e 9).

2.4 Confronto fra la valutazione teorica preliminare e i risultati di campo

I rilievi sperimentali, nettamente in contrasto con le risultanze del calcolo teorico preliminarmente effettuato, hanno comportato la necessità di un rapido confronto tra gli ispettori di campo e lo strutturista, al fine di giustificare l'incongruenza evidenziatasi. Da tale confronto è emersa l'esigenza di effettuare una più accurata ispezione visiva dei componenti per individuare eventuali anomalie costruttive. L'ispezione preliminare del componente aveva infatti evidenziato che, oltre ad uno stato generale soddisfacente delle tubazioni in camera radiante, i vincoli previsti a progetto per i collettori, soprattutto quelli relativi ai sostegni, risultavano correttamente disposti e non mostravano anomalie di esercizio, consentendo libere dilatazioni durante i transitori termici.

L'approfondimento dell'ispezione metteva in evidenza invece la presenza di un'anomalia costruttiva: le aperture per il passaggio dei tubi dal collettore alla camera radiante praticate sulla parete laterale del forno non presentavano, in senso orizzontale, una luce sufficiente a consentire lo spostamento laterale dei tubi, a seguito delle dilatazioni longitudinali del collettore. Avendo individuato quale punto fisso il sostegno presente nella zona centrale del collettore, le zone interessate maggiormente dalle dilatazioni impedito e quindi più sollecitate, risultavano quelle di attacco dei tronchetti di estremità, con riduzione progressiva di sollecitazione verso il centro del collettore.

L'introduzione di questa nuova ed imprevista condizione al contorno nell'analisi teorica ha consentito di mettere a punto un nuovo modello strutturale descritto al punto 2.5.

2.5 Valutazione finale della frazione di vita consumata

A seguito dell'individuazione, durante l'ispezione visiva del forno, del vincolo alla dilatazione termica, non previsto a progetto, è stato messo a punto un nuovo modello strutturale agli elementi finiti che simulasse tale effetto di coazione termica, modificandolo rispetto al modello precedente (v. punto 2.2) mediante l'introduzione di adeguate condizioni al contorno.

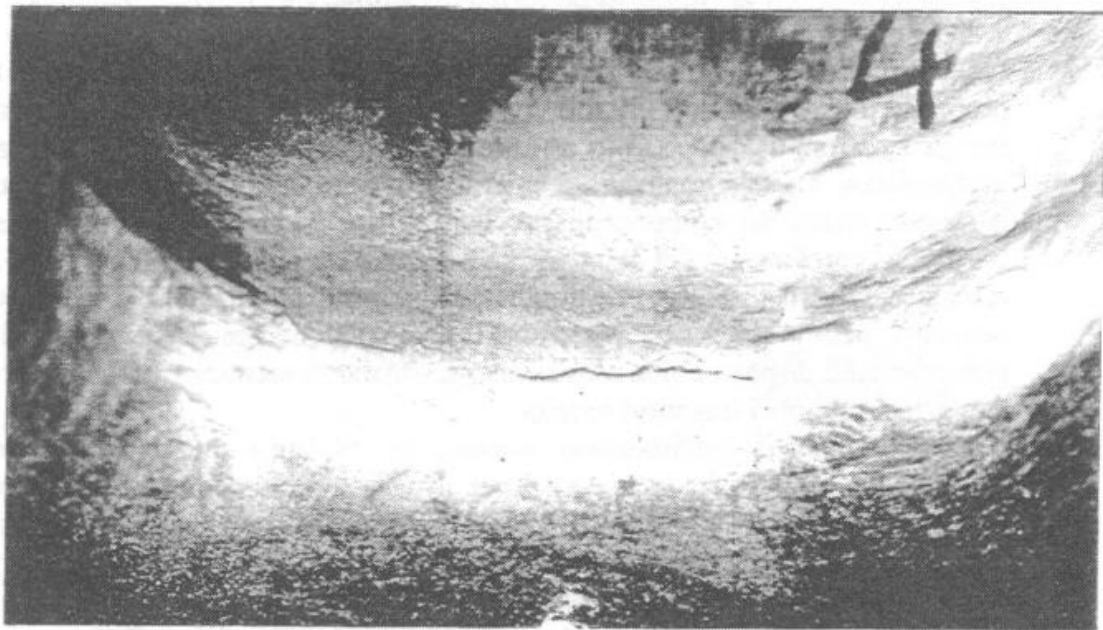


Figura 7 Difetti rilevati all'esame magnetoscopico

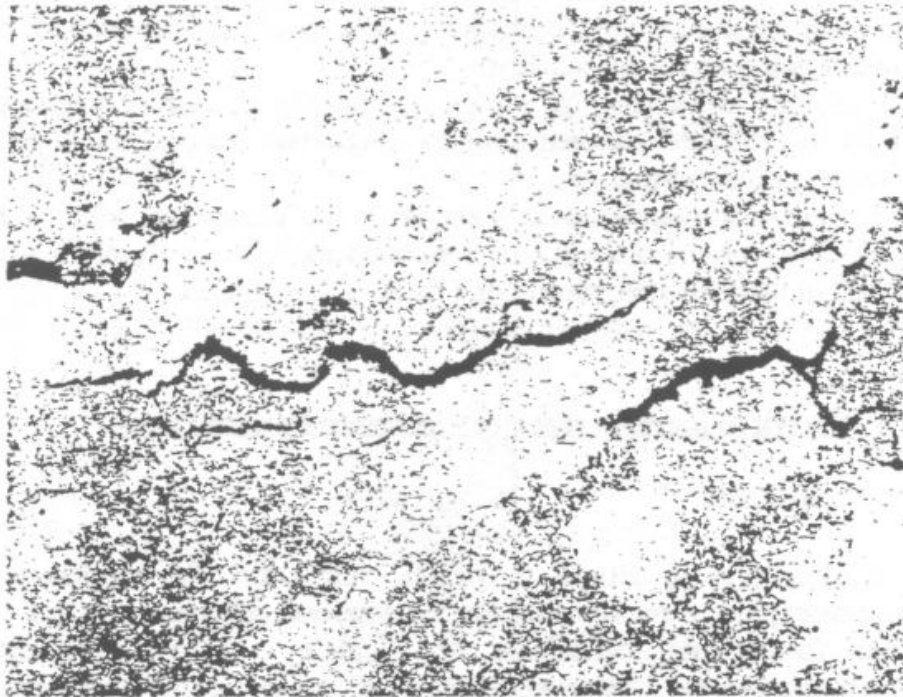


Figura 8 Immagine del danno da creep su replica (100x)

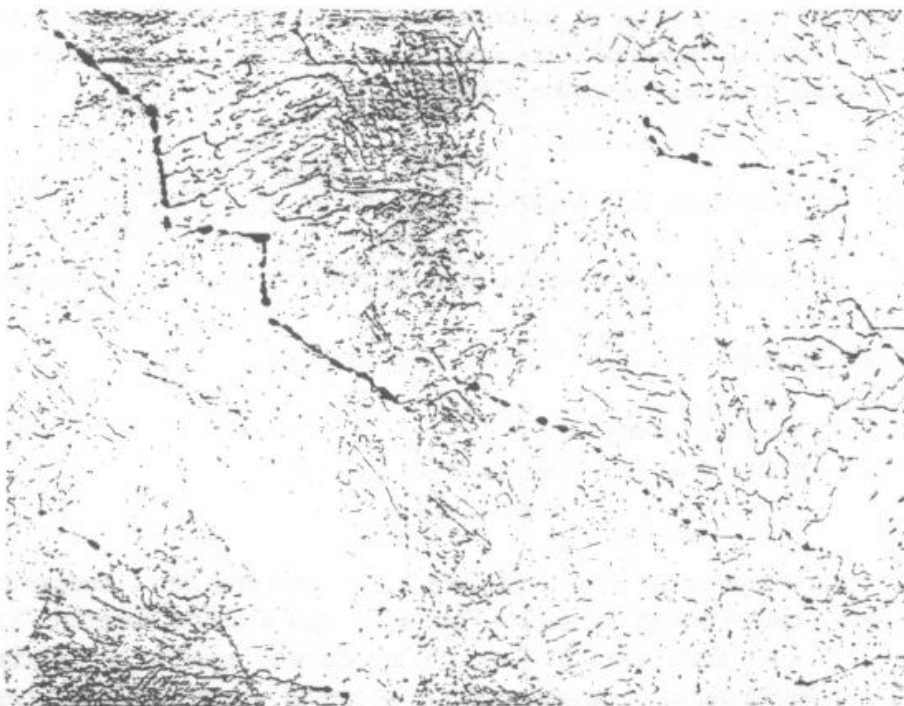


Figura 9 Immagine del danno da creep su replica (500x)

Anche il nuovo modello è stato di tipo semplificato in quanto ha analizzato la condizione più gravosa corrispondente a quella del tronchetto più distante dal piano di simmetria del collettore.

Il risultato dell'analisi, ha evidenziato un elevato stato tensionale nella zona di attacco collettore-tronchetto tale da comportare il superamento della vita teorica a rottura dell'elemento.

La valutazione teorica della frazione di vita consumata, effettuata sulla base dei valori di tensione ottenuti con il secondo modello strutturale, ha portato quindi a risultati numerici congruenti con i risultati sperimentali.

3. Curva di ingresso reattore - impianto Powerforming

3.1 Generalità

Nell'ambito delle attività di ricerca, finalizzate alla definizione del grado di danneggiamento microstrutturale, conseguente all'esposizione per tempi lunghi ad alta temperatura, dell'acciaio tipo 1,25Cr - 0,5Mo costituente le linee di collegamento fra i forni ed i reattori di un impianto Powerforming, sono state estratte numerose repliche metallografiche sulle curve di ingresso e di uscita dei componenti succitati.

Dal confronto fra le strutture osservate è emerso che il materiale costituente la curva di ingresso ad un reattore mostrava strutture metallografiche fortemente degradate (v. rapporti di laboratorio allegati) con dissoluzione dell'eutettoide perlitico, sferoidizzazione della cementite e precipitazione intergranulare di carburi. Tuttavia erano assenti danni irreversibili da creep (microvuoti e microcricche).

La disponibilità di tale materiale esercito, dovuta a una sostituzione già programmata della curva, ha consentito l'effettuazione di prove distruttive di creep accelerato sul materiale costituente la stessa. Sono state condotte quindi una serie di prove "isostress" descritte al punto 3.2.

3.2 Prove di creep accelerato "isostress"

Le caratteristiche del campione di curva prelevato sono di seguito descritte:

- materiale ASTM A 234 WB 11 (1,25 Cr-0,5 Mo);
- Ø 24" ;
- spessore 20÷24 mm;
- condizioni di esercizio : pressione 20 Kg/cm²
temperatura 510°C.

Sul campione sono state prelevate n. 15 provette per l'esecuzione di prove di scorrimento viscoso accelerato (prove di tipo a carico costante "isostress"). Tali prove sono state effettuate da un laboratorio esterno di fiducia (Laboratorio Centrale Dalmine) ed hanno avuto lo scopo di valutare il tempo residuo a rottura del materiale nelle condizioni di esercizio della linea.



ISTITUTO
ITALIANO
SALDATURA

RESOCONTO DI PROVA
ESAME METALLOGRAFICO

Commissa
Job 2305

Rapporto
Report 35390

Pagina
Page 6 di 7

SINAL
n° 0029

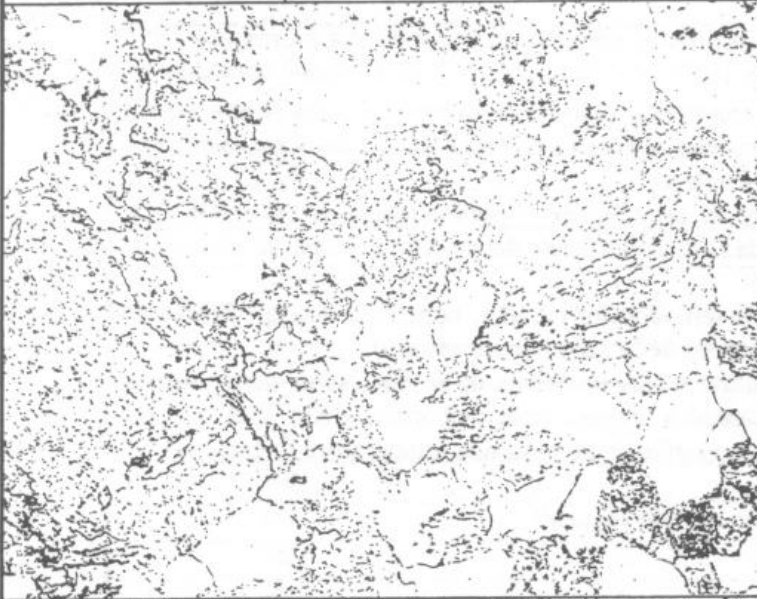


Foto
Photo: 4.721 x 400

Identificazione
Identification: Reattore R 101
replica R9

Posizione
Location: Materiale base su estradosso curva
esercita della linea d'ingresso del reattore

Attacco metallografico
Etching: Nital 2%

Esito
Results: Struttura ferritica con carburi ancora
raggruppati nel loro grano originario



Foto
Photo: 4.722 x 400

Identificazione
Identification: Reattore R 101
replica R10

Posizione
Location: Materiale base su intradosso curva
esercita della linea d'ingresso del reattore

Attacco metallografico
Etching: Nital 2%

Esito
Results: Scarsa separazione fra i grani delle
diverse fasi; struttura ferritica con carburi
distribuiti uniformemente

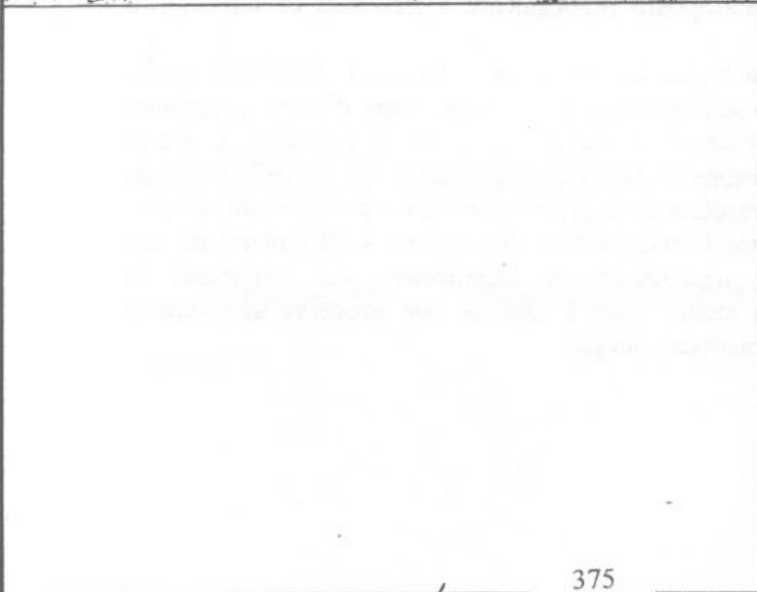


Foto
Photo: _____ x _____

Identificazione
Identification: _____

Posizione
Location: _____

Attacco metallografico
Etching: _____

Esito
Results: _____

Date
Date 16-06-1994

Esecutore
Examiner

Sig ANI
[Signature]

375

Responsabile Servizio
Department Responsible

[Signature]
DR. PATRIZIA MONTANONI

Le prove sono state eseguite su provini preparati in accordo alla Normativa UNI 5111, del tipo raffigurato in fig. 10.

Le prove sono state eseguite con carico unitario costante pari a 28 N/mm^2 . Tale carico corrisponde alla sollecitazione agente in esercizio sulla tubazione, derivante dalla sola azione della pressione interna.

Le prove sono state condotte in aria poichè è generalmente riconosciuta una influenza trascurabile dell'ossidazione superficiale dei provini nel caso di utilizzo di provini standard.

Le prove sono state effettuate a temperature più alte, rispetto a quella effettiva di esercizio, per accelerare il fenomeno dello scorrimento viscoso.

Le temperature di prova, applicate a ciascuna terna di provini, sono state scelte a priori allo scopo di ottenere tempi a rottura medi dell'ordine delle 3000 ore ed effettuare una estrapolazione accettabile degli stessi alla temperatura di esercizio.

Le temperature selezionate sono state le seguenti :

- 1^a terna = 690°C
- 2^a terna = 680°C
- 3^a terna = 670°C
- 4^a terna = 660°C
- 5^a terna = 650°C

3.3 Risultati ottenuti

Nella tabella 1 vengono riassunti i risultati delle prove effettuate. Essi sono stati inseriti in un programma per la costruzione, mediante regressione lineare, della retta approssimazione. Tale retta rappresenta l'andamento tempo/temperatura su un diagramma semi-logaritmico del tipo mostrato in fig. 11.

L'extrapolazione dei tempi a rottura del materiale alla temperatura di esercizio (510°C) ha portato a stimare una vita residua del componente molto elevata (dell'ordine di 10^7 ore).

Ciò consente di concludere che le condizioni di esercizio della tubazione, limitatamente alle sollecitazioni derivanti dalla pressione interna, sono tali da poter considerare il materiale non sottoposto praticamente a fenomeni di scorrimento viscoso.

Questo approccio teorico/tecnologico ha, come noto, dei limiti fra i quali quello più importante è relativo al possibile instaurarsi di meccanismi di danneggiamento del materiale diversi, a temperature più elevate di quella di esercizio (a questo proposito è utile riferirsi alle mappe di Ashby del materiale) e quello della stima del grado di attendibilità delle estrapolazioni di prove accelerate a tempi molto lunghi.

Nel caso specifico, pur essendo la temperatura di esercizio sufficientemente alta per determinare evoluzioni microstrutturali significative nel materiale, la sollecitazione imposta risulta molto bassa e tale da non produrre scorrimento viscoso se non per tempi estremamente lunghi.

Tabella 1

temperatura di prova (°C)	n° provino (1)	tempo a rottura (h)
650	4	5348
650	5	5149
650	6	4453
660	10	3929
660	11	2904
660	14	4143
670	9	2255
670	16	2129
670	17	2164
680	7	912
680	13	1440
680	15	1461
690	8	671
690	12	660
690	18	643

- (1) La numerazione dei provini non risulta congruente con la sequenza dei tempi e delle temperature in quanto alcune prove sono state ripetute o considerate nulle per errori di lettura o di condizioni di prova

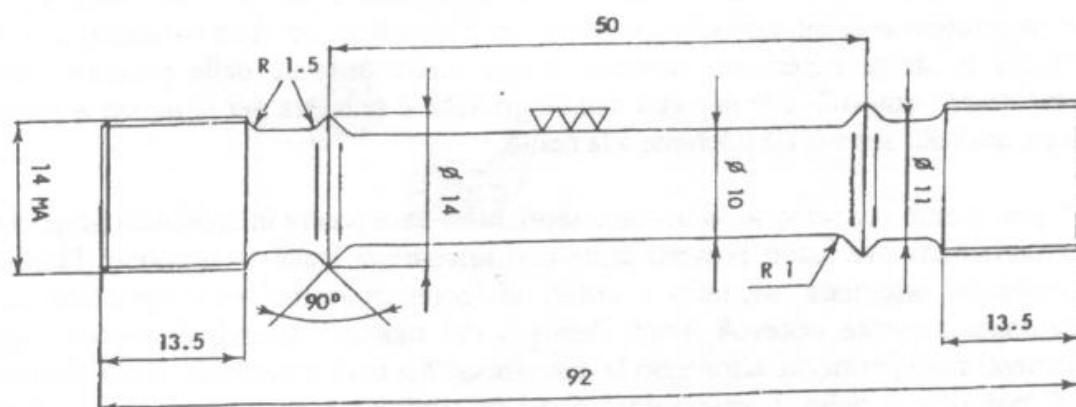


Figura 10 Provino per prove di creep accelerato (UNI 5111)

I risultati ottenuti evidenziano un modesto grado di correlazione fra il danneggiamento microstrutturale (classificabile attraverso parametri del tipo riportato in fig. 12) che si è potuto osservare mediante repliche e la vita residua valutata attraverso prove di creep accelerato. Si può ritenere tuttavia confermato che il solo parametro temperatura, pur essendo considerato ad oggi determinante ai fini della individuazione del campo di scorrimento viscoso di un materiale, nel caso di bassi livelli di sollecitazione provochi soprattutto un decadimento delle caratteristiche meccaniche convenzionali del materiale (carico di rottura e snervamento a temperatura ambiente e durezza) mantenendo tuttavia tempi a rottura in regime di scorrimento viscoso molto lunghi.

4. Conclusione

I casi descritti consentono di trarre alcune considerazioni sulla interazione tra le diverse metodologie comunemente adottate per la valutazione della frazione di vita consumata da componenti eserciti in regime di scorrimento viscoso:

- a) è necessario ottenere il massimo delle informazioni possibili dalle attività di campo, nei tempi di intervento normalmente molto contenuti; a tale scopo è indispensabile un efficace e tempestivo confronto tra gli esperti responsabili delle diverse attività; la gestione unitaria delle attività garantisce le necessarie sinergie;
- b) l'esperienza nella messa a punto di un modello strutturale e la confidenza con gli strumenti numerici più raffinati, integra ma non sostituisce la necessità di una valutazione ingegneristica del comportamento dei componenti; ciò è realizzabile attraverso il rilievo accurato delle effettive condizioni di servizio dei componenti stessi, comprese le interazioni geometriche con altri elementi della struttura; in altri termini la stessa esperienza richiesta per la scelta ottimale delle posizioni ove indirizzare i controlli e le indagini metallografiche è richiesta per la messa a punto di un modello strutturale aderente alla realtà;
- c) per quanto concerne le valutazioni teoriche si deve tenere in considerazione che su particolari ove siano presenti zone con incrementi locali di tensione, l'analisi strutturale effettuata secondo i criteri di comportamento elasto-plastico del materiale presenta notevoli limiti; l'utilizzo dei moderni metodi di calcolo agli elementi finiti permette, attraverso la descrizione del comportamento visco-elastico del materiale e delle diverse azioni a cui la struttura è sottoposta, di simulare adeguatamente il reale comportamento strutturale;
- d) la presenza di strutture significativamente degradate non può essere considerata necessariamente come fattore di limitazione dell'ulteriore esercibilità, poiché quando il livello di sollecitazione risulti contenuto, il materiale può conservare ampi margini di sicurezza in esercizio.

CURVA DI APPROSSIMAZIONE DI DATI
DI ROTTURA PER CREEP

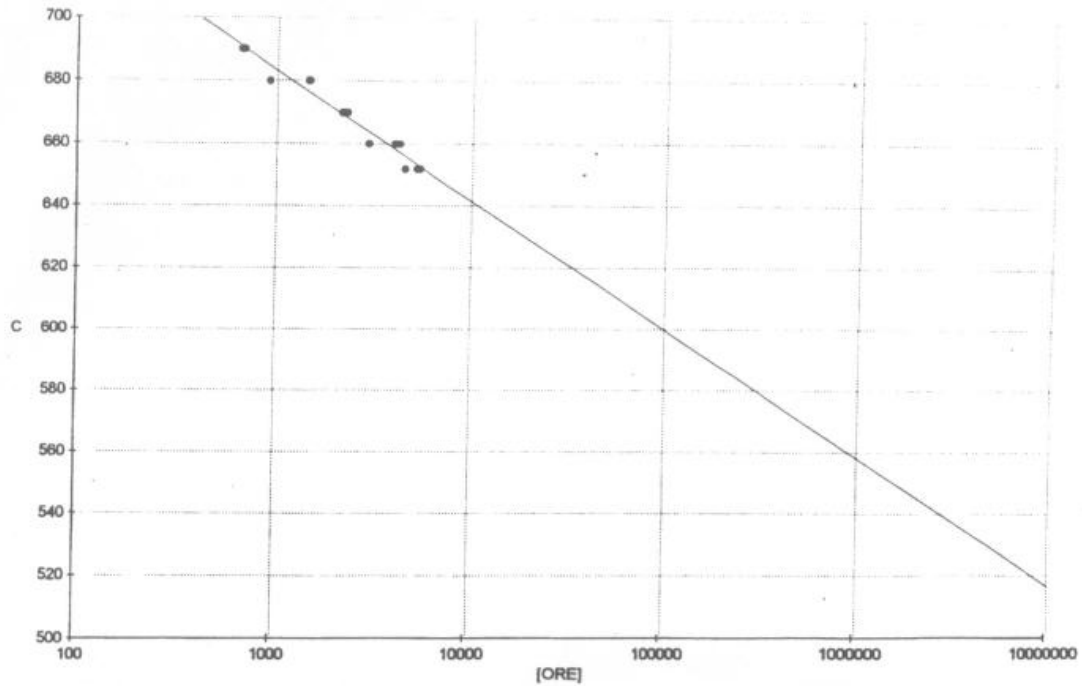


Figura 11 Distribuzione dei risultati sperimentali ottenuti dalle prove di creep accelerato e retta di approssimazione

MICROSTRUCTURAL CONDITION CLASSIFICATION

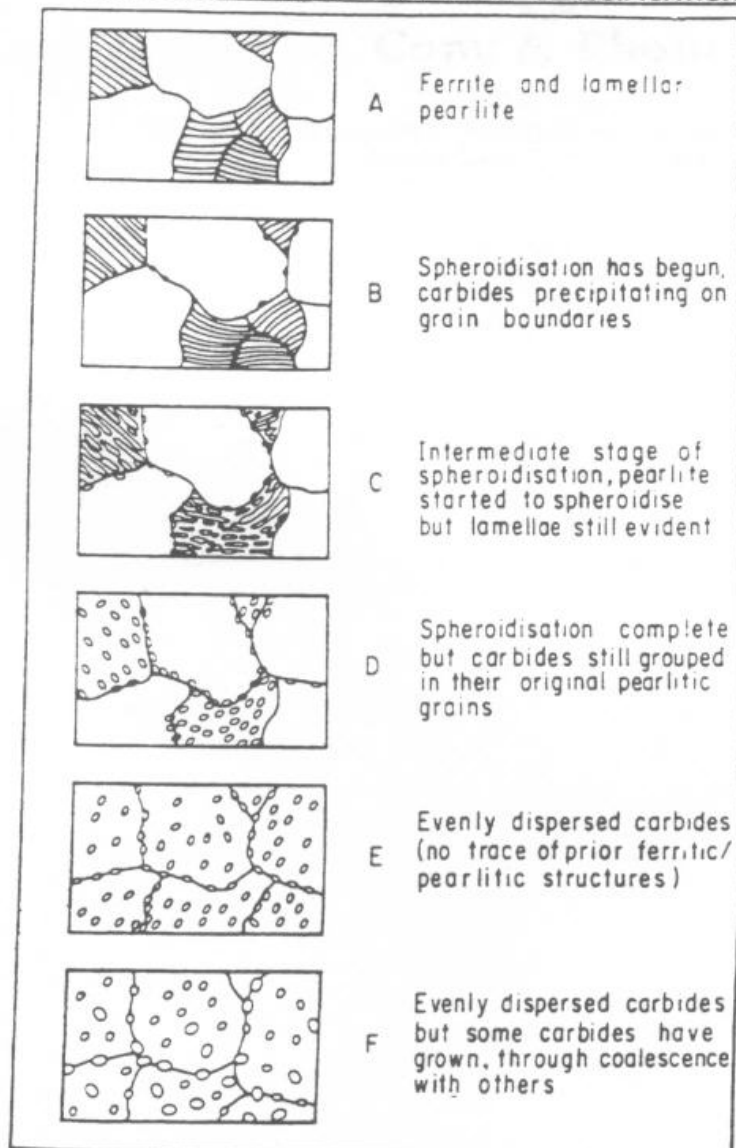


Figura 12 Parametri di danneggiamento microstrutturale