

Scorrimento viscoso: termine di esercibilità di componenti sollecitati a caldo

G. Merckling, M. Jago

La presente relazione descrive il fenomeno del creep e riporta alcuni cenni di base sui materiali applicati tipicamente in attrezzature operanti a temperatura elevata. Si affronta quindi la problematica del dimensionamento di componenti eserciti in regime di scorrimento viscoso, determinata essenzialmente dalla dipendenza della resistenza dalla qualità dei dati e dal metodo con il quale viene determinata. In questo contesto naturalmente sono consigliabili dati da normativa che però, dato che spesso non coprono le condizioni di esercizio del componente reale, devono essere estrapolati. A questo fine si utilizzano tipicamente parametri che uniscono tempo e temperatura, che devono essere però scelti in modo adeguato per ogni popolazione di dati, e che comunque non permettono estrapolazioni lineari, ma richiedono procedure più sofisticate tramite polinomi generalmente di terzo o quarto ordine. Quest'ultimi necessitano comunque di una validazione come proposta dall'European Collaborative Creep Committee ECCC tramite i Post Assessment Tests (PATs). Infine si riportano i metodi di dimensionamento per recipienti a pressione come accettabili alla normativa europea regolata dalla CE/27 PED, che ammette calcoli sofisticati non lineari agli elementi finiti e la meccanica della frattura.

Parole chiave: creep, impieghi in temperatura, norme e statistiche

INTRODUZIONE

Il caricamento di un acciaio, per esempio a trazione omogenea, provoca notoriamente una deformazione, cioè l'allungamento del campione sotto carico. A rimozione del carico, la deformazione scompare. L'effetto della reversibilità della deformazione alla rimozione del carico è denominata elasticità ed è descritta dalla legge di Hooke, che stabilisce la proporzionalità tra sollecitazione $\sigma = F/A$ (rapporto tra carico F e area perpendicolare alla direzione di caricamento A) e deformazione $\varepsilon = \Delta l/l_0$ (allungamento Δl diviso lunghezza iniziale l_0) tramite il modulo elastico E .

E' inoltre noto – e spesso costituisce criterio di dimensionamento – che se la sollecitazione supera un primo valore limite, denominato “snervamento”, la deformazione sarà solo parzialmente reversibile, cioè dopo rimozione del carico il campione risulterà più lungo di prima, deformato in modo plastico. Il progettista infine deve temere che il superamento di un secondo valore limite, chiamato “carico unitario a rottura”, porti all'improvvisa separazione del materiale e quindi alla distruzione del campione.

Mentre la progettazione convenzionale ha imparato intuitivamente a convivere con questa situazione, quando anche la temperatura entra in gioco, deve essere rivisto lo schema di ragionamento ed introdotto un nuovo concetto aggiuntivo. Infatti il progettista deve mettere in conto che

- pur caricando il materiale con una sollecitazione inferiore al limite di “snervamento” alla temperatura di esercizio (dove già lo “snervamento” è generalmente inferiore a quello a temperatura ambiente),
- anche solo lasciando trascorrere del tempo (a carico e temperatura costante)
- si instaurerà una deformazione plastica,

- che aumenterà con la durata dell'esercizio a caldo,
- e porterà a rottura – inevitabilmente – in tempi più o meno lunghi, in funzione della combinazione di carico e temperatura applicata.

Questo fenomeno è chiamato “scorrimento viscoso” o “creep” e influenza in modo essenziale tutti i componenti progettati per essere eserciti a temperature sufficientemente elevate. La progettazione in questo campo richiede quindi

- una normazione molto dettagliata
- un rilevamento dettagliato delle condizioni di servizio
- una progettazione più complessa, perché dipendente dal tempo,
- una conoscenza approfondita della dipendenza del tempo a rottura a creep da sollecitazione e temperatura, che DEVE basarsi o su normative di prodotto o su una vasta sperimentazione comprendente prove di creep anche di lunga durata (almeno di ca. 4 anni per le durate più lunghe in ambito della progettazione usuale).

Gli impianti generalmente più esposti a problematiche di creep sono caldaie (tubazioni e recipienti), recipienti a pressione per applicazioni chimiche, petrolchimiche, farmaceutiche o di processo, macchinari quali turbine, pompe operanti a caldo, motori, valvole.

MATERIALI PER IMPIEGO IN REGIME DI CREEP

I materiali utilizzati per la costruzione di impianti operanti a caldo devono essere adatti per tale applicazione per tutta la durata di vita a creep prevista. Similmente anche i materiali di saldatura e quelli di assemblaggio devono soddisfare i requisiti per l'esposizione a caldo.

In modo particolare devono:

- a) avere caratteristiche adeguate alle condizioni di esercizio in regime di creep possibilmente stabili o almeno ragionevolmente prevedibili,
- b) possedere una resistenza chimica non influenzabile dal fluido contenuto nell'attrezzatura,
- c) essere adatti alle procedure di trattamento termico e/o

G. Merckling, M. Jago
Istituto Scientifico Breda - Milano

giunzione termica, se previsti, e di assemblaggio, e non risentire troppo in termine di ridotta resistenza allo scorrimento della loro applicazione.

Le principali norme europee per i materiali utilizzati per la costruzione delle attrezzature di pressione, incluse quelle in regime di creep, sono:

1. EN 10028: Flat products made of steel for pressure purposes.
2. EN 10213: Technical delivery conditions for steel casting for pressure purposes.
3. EN 10216: Seamless steel tubes for pressure purposes.
4. EN 10217: Welded steel tubes for pressure purposes.
5. EN 10222: Steel forgings for pressure purposes.
6. EN 10253: Butt welding pipe fittings.
7. EN 10269: Steel and nickel alloys for fasteners with specified elevate/low temperature properties.
8. EN 10272: Stainless steel bars for pressure purposes.
9. EN 10273: Hot rolled weldable for pressure purposes with specified elevate temperature properties.
10. EN 10302: Creep resisting steels, nickel and cobalt alloys.

Tipicamente, in componenti di centrali termiche o di impianti chimici, trovano impiego:

- Acciai al carbonio per temperature tra t.a. e ca. 480°C (es. C14).
- Acciai basso legati, tipicamente bainitici o con frazioni di volume elevate di bainite, per temperature fino a ca. 560-570°C (es. 10CrMoV 9 10 o anche 10 CrMoVW 9 10).
- Acciai alto legati martensitici ad alto contenuto di cromo, spesso stabilizzati tramite precipitati intermetallici per temperature fino a ca. 600-650°C (es. X 9 CrMoVNNb 9 1, X20 CrMoV 12 1).
- Acciai alto legati austenitici per temperature fino a ca. 650-800°C (X 10 CrNi18 12 mod., (310))
- Acciai superaustenitici e superleghe indurite per soluzione solida fino a temperature oltre i 1100°C (es. X10 NiCrNb 35 20, NiCr22Co12Mo9)
- Superleghe base nickel o cobalto, indurite per precipitazione, quindi con resistenza particolare allo scorrimento, per particolari esposti a gravi sforzi (es. bulloneria o palette o dischi di turbina) (es. NiCr15Fe7TiAl).
- Superleghe base ferro, nickel o cobalto, indurite per dispersione di ossidi, quindi con resistenza allo scorrimento ulteriormente innalzata, per particolari esposti a temperature molto elevate (es. MA956).
- Turbine, infine, usano per le palette più calde materiali molto speciali, prodotti con grano cristallino orientato direzionalmente (tutti i cristalli del materiale sono orientati nella stessa direzione cristallografica particolarmente inadatta al creep) oppure da un unico grano ("single crystal").

IL FENOMENO DELLO SCORRIMENTO VISCOSO

Definizione

Lo scorrimento viscoso o creep per definizione è una deformazione dipendente dal tempo che avviene a temperatura elevata dopo l'applicazione di un carico (anche e soprattutto se mantenuto costante), e che generalmente termina con la rottura del materiale.

In generale lo scorrimento avviene in qualsiasi metallo ad una temperatura di circa 0.35 di quella di fusione T_m in [K]. Per i materiali più sofisticati questa temperatura d'inizio può essere più elevata almeno per le applicazioni usuali ingegneristiche, ottimizzando gli elementi di lega e la microstruttura.

Nell'ambito della progettazione il creep diventa convenzio-

nalmente determinante da quella temperatura in poi, alla quale la resistenza media a rottura in 100000 h a creep $R_{m/100000T}$ è inferiore al minimo tabellare del limite di snervamento in temperatura $R_{p0.2}(T)$.

La temperatura di inizio creep T_{IC} è ingegneristicamente definita quindi da

$$R_{m/100000/T_{IC}} = R_{p0.2}(T_{IC}) \quad \text{Eq. 1}$$

Le T_{IC} approssimativamente sono:

- | | | |
|---------------------------------------|------------|----------------------|
| a) Leghe di alluminio alto resistenti | 0.54 T_m | equivalente a 205 °C |
| b) Leghe di alluminio normali | 0.35 T_m | equivalente a 95°C |
| c) Leghe di titanio | 0.30 T_m | equivalente a 315 °C |
| d) Acciai al C e basso legati | 0.36 T_m | equivalente a 370 °C |
| e) Acciai ferritici 9-12 Cr | 0.48 T_m | equivalente a 530 °C |
| f) Acciai austenitici | 0.49 T_m | equivalente a 540 °C |
| g) Leghe di nichel | 0.56 T_m | equivalente a 650 °C |

Proprietà a creep

Mentre il fenomeno cristallografico "creep" richiede solo la contemporanea presenza di sollecitazione e temperatura per un tempo sufficiente, quindi può essere facilmente dominata in presenza di carichi oscillanti con frequenza opportuna per la temperatura, la prova di creep, ideata per isolare il fenomeno da altri possibili interazioni, viene eseguita in condizioni che esaltino le proprietà del materiale in condizioni favorevoli al creep. Quindi la prova di creep è eseguita a temperatura e sollecitazione costanti, attendendo la rottura con o senza misurazione della deformazione accumulata nel tempo.

Curva di scorrimento

Il comportamento di un metallo ad alta temperatura a sollecitazione costante, quindi alla prova di creep, è tipico ed è generalmente rappresentato da una curva di scorrimento (andamento della deformazione nel tempo). Molte di queste curve consistono di tre distinti stadi di danneggiamento di seguito rappresentati (v. Fig. 1).

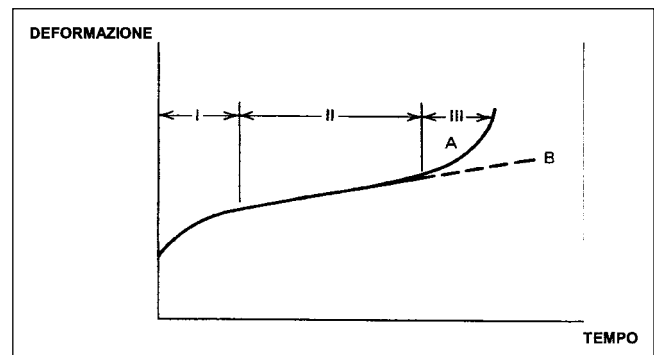


Fig. 1 - Curva schematica con i tre stadi dello scorrimento viscoso.

Fig. 1 - Schematic curve with the three stages of creep.

Stadi di danneggiamento da scorrimento

I tre distinti stadi di danneggiamento da scorrimento, come indicato in Figura 1, sono:

0. *Caricamento.* Durante il caricamento appare una deformazione spontanea elastica, in caso di superamento del limite elastico a caldo anche di tipo elasto-plastico, che rimane costante durante tutta la durata dell'esposizione.

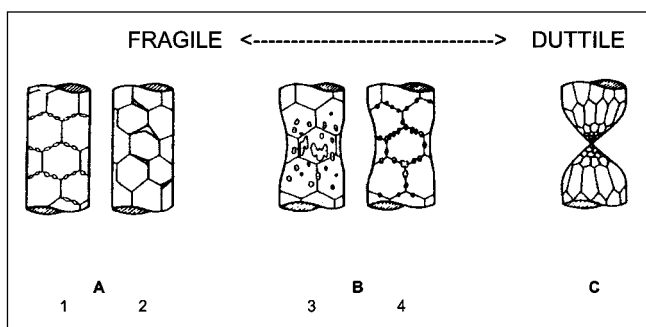


Fig. 2 – Rappresentazione pittorica dei meccanismi di frattura:
 A: Rottura apparentemente fragile (FIF)
 1. cavità (metalli puri e leghe che si comportano come metalli puri)
 2. strappi cuneiformi (wedge cracks). leghe complesse
 B: Rottura apparentemente duttile (FID) a seguito di coalescenza
 3. di vuoti,
 4. e strappi .
 C: Rottura duttile (FDT) con forte strizione .

Fig. 2 – Rendering of fracture mechanisms:
 A: Brittle intergranular fracture
 1. cavities (pure metals and alloys behaving as pure metals)
 2. wedge cracks. Complex alloys
 B: Ductile intergranular fracture due to coalescence
 3. of cavities
 4. and tears .
 C: Ductile transgranular fracture with strong reduction of area.

I. Primo stadio. Dopo il caricamento avviene lo stato transitorio che rappresenta uno stadio di aggiustamento del metallo durante il quale la velocità di deformazione diminuisce al crescere della deformazione.

II. Secondo stadio . La caratteristica di questo stadio è una velocità di scorrimento costante, la più bassa del metallo nelle condizioni di prova applicate. Questa velocità costante è generalmente conosciuta come velocità minima di scorrimento ed è ampiamente usata per la modellizzazione avanzata del comportamento in deformazione in regime di creep.

III. Terzo stadio . Il terzo stadio è quello con un incremento di velocità di deformazione e porta, eventualmente dopo un periodo di propagazione di una cricca, alla rottura.

Frattura a creep

Fondamentalmente la frattura avviene sempre per una sequenza di deterioramento del materiale esposto alla prova di creep, ma può assumere diverse morfologie (v. figura 2).

Frattura intergranulare (FIF), ad aspetto fragile dopo poca deformazione plastica e con poca strizione, ma non assente, perviene alla fine dell'esposizione, se il materiale è stato soggetto a scorrimento:

- di diffusione (meccanismo di Nabarro-Herring),
- da dislocazioni con sviluppo di sottogranuli del tipo "free flight dislocation creep" (Pure Metal Type Creep).

La FIF, considerata "tipica" dello scorrimento, è generalmente caratterizzata dalla enucleazione di notevoli quantità di cavità, prima tondeggianti poi lenticolari sui bordi di grano.

Frattura intergranulare (FID), ad aspetto duttile dopo consistente deformazione plastica ma con relativamente poca strizione. E' tipica, se il creep è stato controllato da meccanismi di scorrimento:

- da diffusione (meccanismi di Coble o Harper-Dorn),
- di slittamento dei grani (grain boundary sliding),
- di creep da dislocazioni "viscoso" (viscous drag dislocation creep).

La frattura nasce spesso dalla coalescenza di strappi cuneiformi ai punti tripli dei bordi di grano (wedge cracks) o di vuoti fino alla formazione di cricche in grado di propagare a creep.

Intuitivamente questa frattura si presenta per durate di esposizione medie, ma in realtà molti acciai, dopo una zona con frattura tipo FIF, quindi per durate elevatissime, tendono a mostrare nuovamente deformazioni a rottura non trascurabili e ad esibire rotture almeno parzialmente duttili, che sono però indotte da pesanti cambiamenti microstrutturali per esempio da ricristallizzazione "nascosta".

Frattura duttile transgranulare (FDT), con una notevole deformazione plastica e con instabilità plastica localizzata (strizione), è caratteristica della rottura di materiale soggetto a scorrimento per tempi di durata ridotta, quindi per carichi elevati o per temperature alte. In queste condizioni il meccanismo che controlla la deformazione nel creep terziario è detto "del power law breakdown", in quanto non ha più le tipiche caratteristiche del creep ma è più simile alla deformazione attiva per produrre l'allungamento istantaneo come in prova di trazione.

RESISTENZA A CREEP DEI MATERIALI

Per valutare la resistenza al creep di un dato componente è necessario paragonare la sollecitazione rilevante del componente con una resistenza del materiale che garantisca per una determinata temperatura una vita sufficiente:

$$\sigma_c \frac{f_a}{f_b} \leq \sigma_{amm} = \frac{R_{m/t/T}}{S} \quad \text{Eq. 2}$$

Dove σ_c è la sollecitazione di confronto, determinata da calcoli ingegneristici, f_a ed f_b sono fattori di attenuazione od intensificazione, σ_{amm} è la sollecitazione ammissibile, S il fattore di sicurezza imposto da norme o esperienza ed $R_{m/t/T}$ la resistenza a creep alla temperatura T per ottenere rottura nel tempo t.

La problematica fondamentale dell'applicazione di questa equazione nasce dall'esigenza di conoscere la resistenza per garantire durate di almeno 100000 h (ca. 12 anni di esercizio o prova continuativi), da estrapolare da dati sperimentali ottenuti in laboratorio, spesso non disponibili per tali durate. Per poter determinare $R_{m/t/T}$ sono necessari i seguenti passi:

- Reperimento di dati relativi alla resistenza a creep di un dato materiale
- Organizzazione di questi dati tramite un'adeguata equazione
- Validazione dell'equazione per garantirne l'attendibilità,
- Determinazione della resistenza alle condizioni di temperatura e durata di esercizio tramite inter- o estrapolazione dell'equazione.

Resistenza al creep

La determinazione della resistenza di un materiale a creep si basa sul reperimento di dati sollecitazione – temperatura – tempo, che può avvenire da diverse fonti, che però non sono del tutto equivalenti per la valutazione della predizione della vita. In ordine di priorità si possono elencare:

1. Dati di resistenza a creep da normativa

Le normative europee EN contengono in un'appendice informativa i valori di resistenza a rottura e al raggiungimento del 1% di deformazione da creep a 10000, 100000 e in qualche caso 200000 ore. Questi valori sono generalmente stati determinati e valutati dall'ECCE (European Collaborative Creep Committee) e possono essere considerati "sicuri", fatto salvo per le seguenti eccezioni:

- a. valori con asterisco sono stati determinati con estesa estrapolazione (oltre fattore 3 rispetto al dato sperimentale)

- le di maggior durata alla medesima temperatura)
 b. valori tra parentesi sono stati determinati con estrapolazione eccessiva (oltre fattore 10 rispetto al dato sperimentale di maggior durata alla medesima temperatura) e sono da considerarsi esclusivamente come STIME.

In ogni caso le normative prevedono solo valori per la media della banda di dispersione dei dati sperimentali. La dispersione attorno a questa linea è per acciai non fusi generalmente del $\pm 20\%$ in sollecitazione.

Lo svantaggio fondamentale dei dati di norma però è dato dalla limitata quantità e dalla predefinizione di tempi e temperature che richiede quindi interpolazione o estrapolazione, nel peggiore dei casi sia in tempo sia in temperatura, per determinare la sollecitazione ammissibile in determinate condizioni di progetto.

Questa problematica è ancora più rilevante, quando il componente da verificare ha già 100.000 ore di servizio, ed è quindi già al limite dei dati contenuti in norma, o quando, seguendo le ultime tendenze commerciali, si richiede la progettazione per 200000 h di esercizio.

2. *Equazioni costitutive validate tramite Post Assessment Tests [1], [2], [5]*

Le equazioni "sicure" di questo tipo quasi azzerano per l'interpolazione e limitano per l'extrapolazione l'incertezza, pertanto che le regole di base, come codificate nella vecchia ISO 6303 [], vengono rispettate:

- a. estrapolazioni in tempo fino a fattore 3 e in sollecitazione non al di sotto dell'80% della minima sollecitazione sperimentale usata σ_{\min_test} sono poco insicure,
- b. estrapolazioni con fattore tra 3 e 10 in tempo e a sollecitazioni non inferiori al 60% σ_{\min_test} sono insicure,
- c. estrapolazioni maggiori sono estremamente insicure e possibilmente da evitare.

3. *Dati da sperimentazione.*

- a. Set di dati creep – rottura (prove sperimentali con informazioni su sollecitazioni, temperatura e tempo a rottura) di grande estensione, contenenti molte colate dello stesso grado d'acciaio, e con prove di lunga durata (v. es. EN 10291) possono facilmente essere elaborati per ottenere valori di resistenza paragonabili a quelli dei punti precedenti seguendo le istruzioni delle ECCC Recommendations [1].
- b. Dataset come sopra, piccoli, perché relativi ad acciai o prodotti d'acciai poco comuni (es. fusi), o contenenti prove di sola durata breve, spesso costruiti ad hoc per una data fornitura di materiale, possono comunque essere utili per ottenere valori significativi applicando le raccomandazioni di ECCC Recommendations.
- c. In alcuni casi sono disponibili informazioni aggiuntive rispetto al dataset tipico di prova creep – rottura. Infatti il data set potrebbe contenere:
 - i informazioni su prove sperimentali ancora in corso.
 - ii dati di creep di deformazione sotto forma di curve deformazione-tempo o di tempi al raggiungimento di determinate deformazioni plastiche.

Metodi di elaborazione dati più evoluti o complessi possono utilizzare queste informazioni per consolidare le previsioni del solo set di dati a creep rottura.

In ogni caso tutte le attività di calcolo, che hanno alla base dati sperimentali, necessitano, oltre ad una attenta verifica dell'attendibilità della fonte sia dal punto di vista sperimentale sia da quello formale, di una procedura di elaborazione dati che produca dai singoli punti sperimentali un'equazione che permetta l'inter- o estrapolazione per la predizione della sollecitazione ammissibile ad una certa durata e temperatura del componente. Dato che il calcolo della vita attesa può ritrovarsi in tutte le situazioni di cui sopra, la scelta del metodo di elaborazione e la sua validazione devono rivestire un ruolo fondamentale.

4. *Dati tecnici* ricavati da opuscoli pubblicitari o con informazioni tecniche di vendita o di componenti o impieghi similari sono generalmente da sconsigliare per l'utilizzo immediato, a meno di non servirsene per estendere informazioni sicuramente applicabili al componente da verificare.

Determinazione del tempo a rottura dalla curva $R_{m/t/T}(t,T)$

a *Interpolazione*

Sia le curve $R_{m/t/T}(t)$ a $T=cost.$, sia le curve $R_{m/t/T}(T)$ a $t=cost.$ non sono rette, e pur avendo per tempi brevi ($t < 10000$ h) spesso nel diagramma bilogarithmico sollecitazione – tempo a rottura un aspetto lineare; più sono lunghi i tempi di esposizione, più in realtà le curve tendono a piegare verso il basso. Le conseguenze sono che:

- i) L'interpolazione lineare tra due punti fissi (per esempio valori di norma) nel diagramma bilogarithmico sollecitazione – tempo a rottura a temperatura costante è la variante più conservativa per la determinazione della vita, ma potrebbe in alcuni casi anche "trascurare" quote di esercibilità non indifferenti.

La Tabella I e la figura 3 riportano alcuni esempi.

E' da notare che in alcuni casi, l'esercibilità disponibile è sottostimata dall'interpolazione lineare fino al 10-12%.

- ii) L'interpolazione tramite una curva, idealmente validata secondo ECCC Recommendations, dà risultati più precisi (v. t reale in Tabella I).

b *Estrapolazione*

Purtroppo quasi in tutti i casi di dimensionamento ingegneristico gli sforzi bassi di esercizio, pur amplificati dal fattore di sicurezza, non permettono interpolazioni all'interno dei dati disponibili, ma richiedono una loro, in alcuni casi anche ampia, estrapolazione in tempo e/o in temperatura.

- i) Estrapolazione lineare. La Fig. 4, mette in evidenza che, per esempio, una retta interpolante dei dati da norma tra 10.000 e 100.000 h a 550°C per un acciaio ferrito-bainitico prevede a 50 MPa un tempo a rottura di 450.000 h mentre in realtà non sono da attendersi più di 270.000 h, poco più della metà.

La grande differenza di risultato, mostrata in figura 4, suggerisce molta cautela per l'utilizzo di estrapolazioni lineari.

| Acciaio ferritico bainitico tipo 2,25 Cr 1 Mo | | | | | | | |
|---|----------------|-------------------|----------------|------------------|----------------|-------------------|-------------|
| T [°C] | σ [MPa] | Interpolazione da | | Interpolazione a | | Punto interpolato | |
| | | t [h] | σ [MPa] | t [h] | σ [MPa] | t [h] | t reale [h] |
| 500 | 98,0 | 100.000 | 90,8 | 200.000 | 94,4 | 140.800 | 141.500 |
| 550 | 89,3 | 10.000 | 62,7 | 100.000 | 80,0 | 20.600 | 22.900 |

| Acciaio martensitico tipo 9 Cr | | | | | | | |
|--------------------------------|----------------|-------------------|----------------|------------------|----------------|-------------------|-------------|
| T [°C] | σ [MPa] | Interpolazione da | | Interpolazione a | | Punto interpolato | |
| | | t [h] | σ [MPa] | t [h] | σ [MPa] | t [h] | t reale [h] |
| 550 | 162,5 | 100.000 | 150,8 | 200.000 | 155,0 | 155.500 | 156.700 |
| 600 | 128,0 | 10.000 | 91,7 | 100.000 | 110,0 | 28.500 | 31.800 |

Tabella I – Paragone tra interpolazione lineare bilogarithmica e curva reale.

Table I – Comparison between linear bilogarithmic interpolation and real curve.

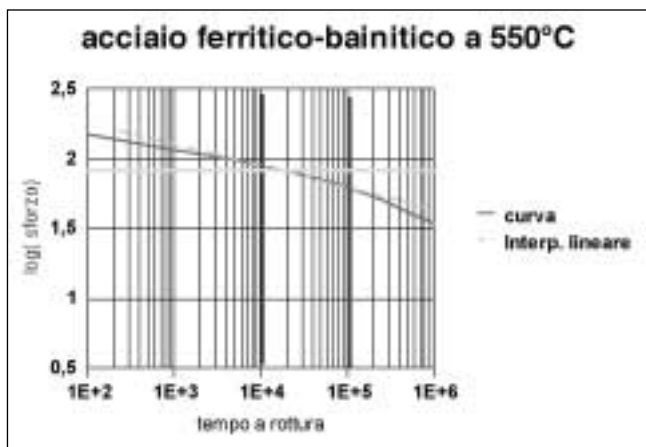


Fig. 3 – Esempio tra curva reale e retta di interpolazione tra 10000 e 100000h.

Fig. 3 – Example of real curve and interpolation straight line between 10000 and 100000h.

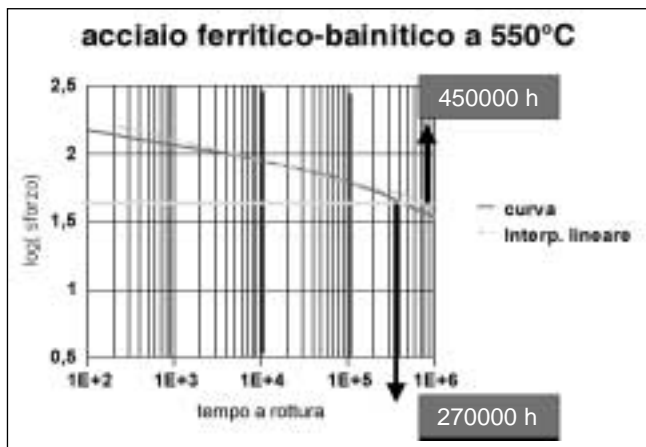


Fig. 4 – Esempio tra curva reale e retta di estrapolazione adattata tra 10000 e 100000h per $\sigma = 50$ MPa.

Fig. 4 – Example of real curve and extrapolation straight line adjusted between 10000 and 100000h for $\sigma = 50$ MPa.

ii) Estrapolazioni non lineari. I metodi più affidabili per estrapolare sono più complessi dell'extrapolazione lineare e si basano sul concetto comune di utilizzare altre informazioni sperimentali per aggiungere conoscenze alla curva $R_{m/T}(t,T)$ disponibile, che non include la zona di tempo-sollecitazione-temperatura rilevante per il calcolo della vita del componente specifico.

In base al tipo di informazioni che utilizzano, esistono diversi metodi di estrapolazione.

Il più conosciuto finora utilizzato è il metodo parametrico. In questo caso un parametro P viene utilizzato per accomunare l'effetto di, generalmente, temperatura e tempo. Il parametro più conosciuto è:

$$PLM = T[K](C + \log[t]) = \sum_{i=0}^n a_i \log^i(\sigma) \sigma^p$$

Eq. 3: Parametro di Larson-Miller [4]

Le grandezze C, p, e $a_i, i=0, \dots, 4$, sono costanti da scegliere in modo da meglio descrivere i dati disponibili. E' ormai generalmente riconosciuto che né il parametro di Larson-Miller né gli altri parametri disponibili in letteratura realmente rappresentino "leggi naturali" o che le loro costanti siano "costanti fisiche" con significato più profondo. Il valore di C per il parametro di Larson-Miller può quindi essere scelto a "discrezione" purché il risultato descriva be-

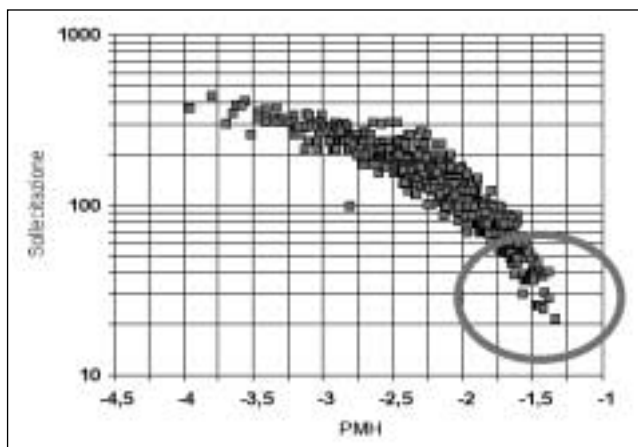


Fig. 5a – Data set P22 parametrizzato con il parametro di Manson Haferd.

Fig. 5a – Data set P22 parametrised with the Manson Haferd parameter.

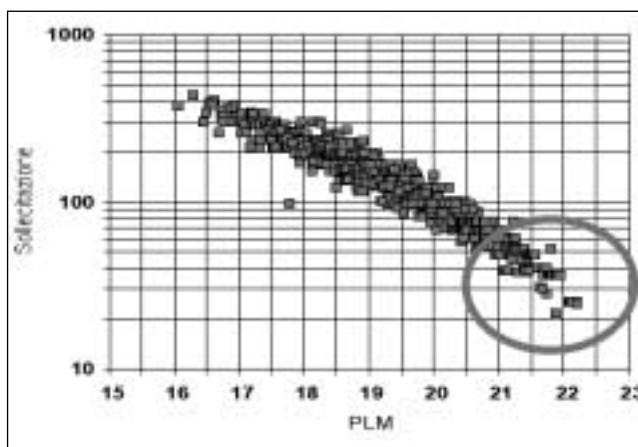


Fig. 5b – Lo stesso data set di figura 5a parametrizzato con Larson-Miller.

Fig. 5b – The same data set of Figure 5a parametrised with the Larson-Miller parameter.

ne i dati. Inoltre saranno le caratteristiche del materiale a consigliare la tipologia del parametro che meglio si adatta. Deve altresì essere ribadito che la scelta del parametro è dettata dalla più adatta formulazione per la descrizione di un dato materiale. La figura 5 mostra in modo evidente che per il data set valutato, relativo al comune e ben conosciuto acciaio ASTM A335 grado P22 (2,25 Cr 1 Mo), il parametro di Larson Miller rispetto a quello di Manson-Haferd [6] risulta meno adatto. Infatti pur facendo balenare una correlazione quasi lineare tra PLM e logs, analizzando meglio la compressione dei dati per i tempi più lunghi (valori di parametro elevati evidenziati dal cerchio rosso in figura 5) diventa altrettanto evidente che il parametro di Manson-Haferd per questo caso permette una descrizione dei dati con dispersione minore. Quest'ultima evidenza è fondamentale dato che ha ripercussioni sulla capacità di estrapolazione dell'equazione che correla il parametro scelto con logs. Infatti i parametri richiesti per prevedere durate prolungate a temperature intermedie rispetto al set di dati utilizzato verranno a cadere in questa zona del grafico.

DIMENSIONAMENTO A CREEP

L'introduzione della direttiva comunitaria CCE/CEEA/CE N. 23 del 29/05/1997 per la regolamentazione di recipienti a pressione "PED" fornisce tre possibilità per verificare il

corretto dimensionamento di un componente, includendo anche quelli previsti per l'esercizio in regime di scorrimento viscoso:

Il metodo tradizionale

In questo caso il dimensionamento si basa su un calcolo con equazioni e formule tratte da codici internazionali riconosciuti (ISPESL, ASME, ANSI, BS, TRD, ecc.) che approntano espressioni matematiche per determinare le sollecitazioni massime ammissibili σ_{amm} di equazione 1 applicando adeguati coefficienti di sicurezza alle caratteristiche meccaniche del materiale alle temperature dichiarate in progetto per l'apparecchiatura.

Un esempio tipico è dato dall'approccio della norma di calcolo dell'ISPESL (Raccolta VSR - Cap. VSR.1.B) che per temperature medie di parete, alle quali vi sono apprezzabili fenomeni di creep, assume come sollecitazione massima ammissibile la minore di quelle ricavate dalle seguenti formule:

$$\sigma_{amm} = \frac{R_{p0.2/T}}{1.5} \quad \text{Eq. 4a}$$

$$\sigma_{amm} = \frac{R_{m/100.000/T}}{1.5} \quad \text{Eq. 4b}$$

Per valori di temperatura intermedi tra i valori della norma di riferimento del materiale di $R_{p0.2}$ e di $R_{m/100.000/T}$, viene determinato il corrispondente valore di resistenza per interpolazione lineare. Per durate maggiori di 100000 h, estrapolazioni adeguate sono spesso da applicare.

Metodi sperimentali

Come secondo metodo di verifica la PED ammette la prova sperimentale sul componente, che però in regime di creep, a causa delle durate lunghe necessarie al manifestarsi del fenomeno, normalmente non sono applicabili.

Metodi avanzati

Calcolo agli elementi finiti

Il calcolo agli elementi finiti lineare elastico fornisce per componenti soggetti a creep la distribuzione iniziale delle sollecitazioni, che può essere utilizzata per l'applicazione di Eq.1 fornendo il calcolo della sollecitazione di confronto σ_c . Ma questo metodo normalmente non è molto più utile del calcolo tradizionale, se non per sopperire alla mancanza di formule da parte di un codice o in presenza di componenti a geometria inusuale.

Per limitare l'incertezza indotta dalla trasposizione di stati di sollecitazione pluriassiale in una σ di confronto e per tenere conto della ridistribuzione di sollecitazioni dovute a concentrazioni di sforzo durante la deformazione da creep, è possibile introdurre modelli matematici che descrivano il comportamento in deformazione del materiale in funzione di tempo, sollecitazione e temperatura, nel calcolo agli elementi finiti. Iterando, cioè eseguendo lo stesso calcolo più volte per passi temporali sequenziali, è quindi possibile accertare con molta accuratezza, l'evolversi del danneggiamento e l'accumulo della deformazione plastica. Questo sistema ha il grande vantaggio di poter generalmente tollerare situazioni che alla semplice verifica tradizionali sembrerebbero inammissibili, semplicemente perché riesce ad includere nella previsione in modo evidente la collaborazione del materiale meno caricato rispetto a quello che sembrava avviato alla repentina frattura secondo il puro calcolo basato sulla sollecitazione elastica.

Modelli di questo tipo sono generalmente composti da un sistema di equazioni differenziali parziali concatenate che devono essere risolte con il metodo delle differenze finite, elemento per elemento, iterativamente, trovando accorgimenti

matematici e procedure numeriche adatte per garantire la convergenza dell'iterazione in tempi ragionevoli, aspetto essenziale sia per la competitività economica del metodo sia per l'applicabilità del modello costitutivo del materiale.

Il sistema di equazioni differenziali parziali è generalmente strutturato in una equazione di stato del tipo:

$$\dot{\epsilon}^* = f(\sigma, T, v1, v2, \dots) \quad \text{Eq. 5}$$

dove per ogni variabile interna $v1, v2$ ecc. esisterà una equazione di evoluzione che modificherà la variabile in funzione del tempo, della deformazione, di altre o della stessa variabile interna.

Pur non potendo sovrastimare la potenzialità dell'approccio deve essere sottolineato che

1. la qualità del risultato dipende dall'ottimizzazione della mesh FEM, sia come tipologia sia come quantità e disposizione degli elementi usati.
2. il modello matematico deve essere idoneo per il materiale, adatto per il calcolo numerico, convergente e dotato di costanti materiali (spesso più di 10 diverse) affidabili e corrette sia per il tipo di materiale sia - in alcuni casi - per la colata realmente utilizzata per la costruzione.
3. la valutazione ingegneristica del risultato, del contour plot, deve essere eseguita da esperti, dato che piccole imprecisioni di programmazione potrebbero aver portato a risultati errati, ma non necessariamente evidentemente inconsistenti.

Meccanica della frattura

Non è oggetto di questa relazione, ma si segnala che la PED accetta il dimensionamento con l'ausilio della meccanica della frattura, utensile potente e raffinato per la verifica di componenti soggetti a criccatura da creep (saldature). In questo caso sono disponibili diversi approcci per costruire opportuni Failure Aspect diagrams e per prevedere in funzione di tempo, temperatura, sollecitazione e geometria, la durata del periodo di incubazione prima che un difetto preesistente generi una cricca in grado di propagare a creep.

CONCLUSIONI

Lo scorrimento viscoso è un complesso fenomeno metallurgico che definisce il termine di esercibilità di componenti metallici sollecitati a temperature sufficientemente elevate. La determinazione e la verifica della resistenza allo scorrimento a caldo è un compito ingegneristicamente complesso che deve bilanciare

- 1) La Direttiva PED - Pressure Equipment Directive, unico regolamento ammissibile in Europa per la progettazione, fabbricazione e valutazione delle attrezzature in pressione, che però :
 - a) permette la progettazione tramite calcolo tradizionale con formule come da codice, ma anche l'utilizzo di sofisticati sistemi di calcolo tramite simulazione numerica agli elementi finiti.
 - b) richiede la valutazione attenta delle proprietà del materiale a creep, se il componente è esercito nel range di temperatura in cui si manifesta questo fenomeno.
- 2) L'affidabilità della determinazione della resistenza del materiale alla rottura $R=R_{m/vT}$ da creep, che dipende essenzialmente dalla fonte dei dati e dal metodo di determinazione. In genere si può sostenere che l'affidabilità diminuisce gradualmente per le possibilità dell'elenco seguente:
 1. Interpolazione tra dati di resistenza a creep da normativa.
 2. Utilizzo di equazioni costitutive validate tramite Post Assessment Tests, come pubblicate in [5]
 3. Utilizzo di dati da sperimentazione affidabile.

4. Estrapolazione di equazioni costitutive validate
5. Estrapolazione validata di dati di norma
6. Informazioni commerciali.

L'utilizzo di metodologie più sofisticate, molto vantaggiose per il produttore, come il calcolo FEM non lineare a creep, ammissibile ai fini PED, richiedono invece un approccio locale molto attento ed esperti di alto profilo per valutare la veridicità dei risultati ottenuti.

RIFERIMENTI

[1] ECCC Recommendations, Volume 5, Issue 2, part 1, 2001, 'Data Generation and Assessment Procedures', Editor Holdsworth S.R., Publ. ERA Technology Ltd., Leatherhead, UK,

[2] Merckling G. Procedure per incrementare significatività ed affidabilità della previsione della vita rimanente da calcolo, Convegno ISPEL di Siracusa, 2001

[3] ISO 6303: 1981 Annex "Pressure Vessel Steels not Included in ISO 2604, Parts 1 to 6 - derivation of Long Time Stress Rupture Properties", 1981 ISO 6303: 1981 Annex "Pressure Vessel Steels not Included in ISO 2604, Parts 1 to 6 - derivation of Long Time Stress Rupture Properties", 1981

[4] Larson F.R., Miller J., "A Time-Temperature Relationship for Rupture and Creep Stresses"; Trans. ASM, 74, 1952

[5] ECCC Data Sheets, Publ. ERA Technology, 1999

[6] Manson S.S., Haferd A.M., "A linear Time-Temperature Relation for Extrapolation of Creep and Stress Rupture Data" NACA TN 2890, 1953.

A B S T R A C T

**CREEP:
SERVICING LIMIT OF COMPONENTS
SUBJECT TO HEAT STRESSING**

**KEYWORDS:
creep, high temperature applications, standards**

The present paper illustrates the creep phenomenon and reports some basics on materials typically applicable to high temperature serviced equipment. Then the problem of dimensioning components serviced in creep regime is discussed which is induced by the dependency of the creep strength on the quality of the data and the reliability of the method through which it is computed. In this sense data

from standards is recommended, but, as they generally do not entirely cover the service condition range of the component, they need to be extrapolated. To do this, time – temperature parameters are commonly used, which need to be chosen adequately for each data population and which do typically not allow linear extrapolation but require more sophisticated methods via 3rd or 4th order polynomials. But these also need validation through procedures as proposed by the European Collaborative Creep Committee ECCC with the Post Assessment Tests (PATs). Finally the design principles are discussed as the Pressure Equipment Directive CE/27 PED, which lonely rules the European design prescriptions, and to which non linear finite element and fracture mechanics computations are acceptable.