

APPLICAZIONE DI MODELLI PREVISIONALI A PROVE DI CREEP ISOSTRESS

S. Tettamanti¹, R. Crudeli²

¹ CISE Tecnologie Innovative, Segrate (Milano)

² ENEL-DPT, Pisa

SOMMARIO. Le attività del laboratorio di creep del CISE sono principalmente rivolte allo sviluppo e validazione di metodi avanzati di prova ed allo sviluppo di metodi di analisi per valutazione del danno da creep e della vita residua di componenti in servizio. Particolare interesse riveste la metodica di prova Isostress, sia per la sua applicabilità su provini miniaturizzati che per il limitato impegno temporale delle prove stesse. L'affidabilità dell'estrapolazione alle condizioni di esercizio, a partire da prove di breve durata, della vita residua rappresenta il problema cruciale della metodica.

A partire da una serie di prove isostress viene effettuato il confronto tra due metodi di estrapolazione di vita residua che prendono spunto da note correlazioni parametriche. In un caso si estende l'attività alla completa ricostruzione della curva di creep, che unitamente a consolidate tecniche metallografiche può fornire utili indicazioni sullo stato del componente e sul livello di deformazione accumulata.

1 INTRODUZIONE

E' ormai diffusamente riconosciuta l'importanza dello sviluppo di metodi di valutazione del degrado dei materiali di componenti di impianti per generazione di potenza che in molti casi sono prossimi alla vita di progetto, a causa delle crescenti difficoltà che sorgono per la ubicazione e realizzazione di nuovi. La vita in servizio di impianti operanti in alta temperatura in regime di creep è spesso controllata dalla crescita di cavità a bordo grano in regioni critiche. Decisioni sulla vita rimanente possono essere prese sulla base del danno accumulato nel materiale in servizio. Una delle strade più promettenti per la valutazione della frazione di vita consumata, è rivolta all'indagine metallografica mediante analisi al microscopio, durezza, repliche estrattive e metodi quantitativi di valutazione del danno cavitativo da creep /1/. D'altro canto, per valutazioni di vita residua rivestono particolare importanza metodi di prova distruttivi che vadano

direttamente a saggiare la capacità di resistenza del materiale. Tra questi, per il comportamento a creep, il più importante è il "Metodo Isostress", soprattutto quando si utilizzano campioni di creep miniaturizzati che attenuano gli inconvenienti legati all'esecuzione di prove che richiedono prelievi di materiale direttamente dal componente in impianto. (I metodi di miniaturizzazione sono in fase avanzata; si sta sperimentando l'uso di tecniche "Small Punch", messe a punto da EPRI e collaudate anche dal CISE in prove di tenacità. Attualmente sono in corso attività teorico sperimentali per trasferire la tecnica Small Punch anche nel campo delle prove isostress di creep per valutazioni di vita residua). Il Metodo Isostress per la previsione della vita residua a creep di un componente consiste nell'effettuare prove di creep accelerate in temperatura su campioni prelevati dal componente (solitamente 4-5 prove), per ricavare una curva "temperatura-vita" la cui estrapolazione alla temperatura di esercizio fornisce la stima della vita residua a creep del componente. Tale estrapolazione viene effettuata mediante metodi di analisi statistica, in particolare usando la retta di regressione lineare: il valore estrapolato ed il suo grado di incertezza sono ovviamente dipendenti dal numero delle prove effettuate e dalla dispersione intrinseca dei dati delle prove stesse. Quest'ultima dipende da molteplici fattori, riconducibili comunque a due classi:

- metodologici, cioè legati al metodo di esecuzione delle prove
- intrinsecamente legati al materiale, omogeneità e trattamenti termici.

Le bande di confidenza costruite intorno ai valori sperimentali, sono a loro volta influenzate dallo scostamento dei punti stessi dalla retta di regressione.

Dall'abbinamento di queste due tecniche (Metodo Isostress ed analisi metallografiche, in particolare repliche cavitative, (metodo di Neubauer) si possono ottenere stime che consentano un maggiore grado di affidabilità delle valutazioni di vita dei componenti critici d'impianto.

2 METODI DI ANALISI DI PROVE ISOSTRESS

2.1 Metodo Isostress (Laborelec)

Il metodo, messo originariamente a punto da LABORELEC (Belgio) /2/, consiste nell'esecuzione di un certo numero di prove di creep (4 o 5) con sollecitazione imposta uguale a quella che il materiale del componente subisce in esercizio ed a diversi valori di temperatura sempre superiori al valore d'esercizio. La vita alla temperatura d'esercizio è quindi ottenuta per estrapolazione dai dati di durata delle prove alle temperature superiori. L'estrapolazione obbedisce ad una relazione funzionale di tipo Manson-Haford (dipendenza lineare tra le variabile T e $\log(tr)$, T =temperatura in °C e tr =tempo a rottura, /3/. Può essere invece opportuno ricordare che la scelta dei valori di temperatura a cui eseguire le prove accelerate risulta da un compromesso tra esigenze contrapposte:

1. l'esigenza di ridurre al minimo il tempo richiesto complessivamente dalla sperimentazione,
2. il grado di significatività statistica dell'estrapolazione, (che richiede prove in un ampio intervallo di temperatura),

3. l'esistenza per ogni materiale di limiti per la massima temperatura alla quale eseguire le prove, oltre i quali cambiano i meccanismi fisici del degrado

L'ultimo punto (sul quale si veda ad esempio quanto riportato da Cane in /4/) è legato alla perdita di significato della correlazione isostress σ , equivalentemente, del metodo parametrico di Manson-Haferd allorchè cambiano i meccanismi che governano lo scorrimento a creep. Nonostante quindi l'esistenza di precise controindicazioni all'impiego di temperature molto elevate, nella pratica corrente del metodo di valutazione della vita tramite prove iso-stress è consuetudine non tenerne conto. Le prove sono comunemente eseguite a temperature adatte ad ottenere valori di durata compresi fra poche ore ed alcune migliaia.

2.2 Metodo Isostress (KEMA)

Oltre al metodo che è stato descritto nel precedente paragrafo e che resta il più diffuso per previsioni di vita residua a creep da prove accelerate, anche un altro metodo, consistente in una diversa elaborazione di dati delle prove, sta trovando una certa diffusione.

Il metodo utilizzato da KEMA /5/, fa riferimento a prove di creep rottura ad elevata temperatura e al carico di esercizio, tramite le quali estrapolare la vita rimanente alla temperatura di esercizio. Si ritengono necessarie 4 o 5 prove di creep con intervalli di tempo a rottura da 100 a 1000 ore. L'estrapolazione, in questo caso, obbedisce ad una relazione di tipo Larson-Miller (dipendenza tra le variabile T e $\log(tr)$, T =temperatura in °C e tr =tempo a rottura).

Il metodo KEMA, non si limita a dare una stima della vita residua immediatamente comparabile con quella fornita dal metodo isostress Laborelec, ma attraverso i parametri ricavabili dalle singole prove consente di risalire alla forma delle curve deformazione-tempo.

Per fare questo, KEMA usa una combinazione delle seguenti 4 formule:

Evan/Harrison

$$\dot{\epsilon}_s = \text{costante} \cdot \sigma^n \cdot e^{-\frac{Q}{RT}} \quad (1)$$

Monkman/Grant

$$\dot{\epsilon}_s \cdot t_r = \text{costante} \quad (2)$$

Milicka/Dobes

$$\dot{\epsilon}_s \cdot t_r = \text{costante} \cdot \epsilon_r \quad (3)$$

Cane/Barraclough

$$\epsilon = \epsilon_r \left\{ 1 - \left(1 - \frac{t}{t_r} \right)^{\dot{\epsilon}_s \frac{t_r}{\epsilon_r}} \right\} \quad (4)$$

dove $\dot{\epsilon}_s$ = velocità di creep durante il secondario
 ϵ_r = deformazione a rottura
 t_r = tempo a rottura

L'applicazione del metodo è rappresentata nei suoi passaggi attraverso le Figure 1 e 2 che costituiscono la rappresentazione grafica delle relazioni fondamentali linearizzate viste in precedenza. Oltre alle informazioni temporali fornite dal grafico (c) della Fig. 1, è possibile avere indicazioni sull'andamento delle deformazioni, come indicato nel grafico (b) di Fig. 2 e quindi disporre di un ausilio nello stabilire intervalli di ispezione e nel programmare interventi ed investimenti.

Applicando infine la relazione Cane/Barraclough nelle condizioni di esercizio del componente, si perviene alla curva di creep del materiale in esame.

3 CONSIDERAZIONI SU ESTRAPOLAZIONI E LIMITI FIDUCIARI

3.1 Il concetto di "Bande di confidenza"

Il concetto di "bande di confidenza" o "limiti fiduciari" è della massima importanza quando, come nel caso dell'applicazione del metodo Isostress per la previsione della vita residua a creep dei componenti, si devono effettuare estrapolazioni, su un intervallo temporale rilevante partendo da dati sperimentali affetti da grande variabilità. Quando l'incertezza dei singoli dati sperimentali è particolarmente rilevante, risulta

importante avere chiaro il significato delle estrapolazioni che si compiono, per evitare errori interpretativi, che in situazioni di grande incertezza possono portare a fraintendimenti seri. E' opportuno riportare le due dizioni che esprimono il concetto di "limiti fiduciari", la prima corretta e la seconda meno precisa (ma di uso piu' frequente perchè molto intuitiva)./6/

dizione corretta:

data una statistica campionaria, è possibile determinare un intervallo [A,B], tale che, se la statistica teorica della popolazione è compresa in tale intervallo, la statistica campionaria possa considerarsi estratta da questa popolazione, con un prefissato livello di probabilità o fiducia;

dizione approssimata (meno corretta):

data una statistica campionaria, (nel nostro caso il valore di vita estrapolata), vi è una certa probabilità che la statistica che si voleva stimare (la durata effettiva alla temperatura di esercizio) sia compresa tra quei due valori che delimitano la banda di confidenza.

Con linguaggio intuitivo, la seconda delle due dizioni sopra riportate sta a significare che tali bande rappresentano la probabilità che la vita cada (ad esempio al 90% di probabilità) entro di esse.

In altre parole, se si dovesse ripetere 100 volte la sperimentazione (consistente in 5 prove di creep), si otterrebbe che i 100 valori di vita estrapolata cadrebbero probabilmente 90 volte entro le bande, 5 volte al di sotto della banda minima e 5 volte al di sopra della banda massima.

Ma se invece di effettuare stime estrapolate col metodo Isostress, si decidesse di fare vere prove di creep alla temperatura di esercizio (dunque prove lunghissime), il risultato sarebbe sicuramente molto diverso: cioè i valori reali non cadrebbero al 90% entro quelle bande, ma si troverebbe che essi sono molto piu' raccolti in un intervallo ristretto,

Da quanto detto, le bande di confidenza risultano piu' o meno ampie in relazione al numero delle prove effettuate ed alla loro dispersione intrinseca; esse vanno intese come curve delimitatrici del campo in cui possono cadere le stime di vita estrapolate Non vanno invece intese come probabilità che l'evento reale, cioè la rottura del componente, giaccia entro di esse.

3.2 Interpretazione del grafico:

"Probabilità di sopravvivenza vs. tempo"

Per agevolare la comprensione del grafico "Probabilità di sopravvivenza verso tempo", facciamo un esempio: durata 1000 ore per probabilità pari a 0.05. 5% è la probabilità che il metodo (basato su 5 prove di creep accelerate) produca una stima estrapolata inferiore a 1000 ore. La probabilità riguarda la stima prodotta dal metodo e non la probabilità di vita del componente. Non si sta discutendo della probabilità che si

verifichi l'evento "rottura del componente", ma soltanto della probabilità che il metodo produca valori estrapolati inferiori a 1000 ore: se il metodo usa poche prove, con risultati dispersi, allora l'estrapolazione è soggetta ad ampia incertezza il che significa che ho consistente probabilità di ottenere stime estrapolate di vita anche con valori di durate molto basse. Se faccio più prove, l'incertezza diminuisce, la banda si restringe e le stime di bassi valori di vita diventano molto meno probabili. Tutto ciò come detto riguarda la stima: il componente invece ha una sua logica che non può certo accorgersi di ciò che decide di fare lo sperimentatore: il componente si romperà in modo probabilistico o anche quasi senza dispersione probabilistica. Si può quindi affermare che l'evento "vita residua" ha una probabilità che non dipende dal laboratorio; dal laboratorio dipende solo effettuare delle stime più o meno corrette e più o meno incerte di quell'evento.

Dunque in particolare se le prove di creep per il metodo Isostress sono in numero molto limitato (per scarsità di materiale per i campioni) e/o i risultati delle prove sono dispersi, cresce la probabilità di avere stime di vita residua con bassi valori di durata, ma questo non significa che il componente ha un elevato rischio di rompersi in breve tempo: significa solo che l'analisi Isostress è poco conclusiva.

Visto che è facile incorrere in questo equivoco in un esame veloce dei diagrammi che riportano le elaborazioni dei dati delle prove Isostress, si ritiene opportuno riportare la seguente avvertenza, a commento di quei diagrammi, in particolare quello che mostra le probabilità di sopravvivenza: "le probabilità indicate si riferiscono alla possibilità che le stime di vita prodotte dal metodo isostress (non la durata del componente) possano risultare maggiori dei valori di durata riportati in ascissa".

4 APPLICAZIONE DELLE METODICHE AD UN CASO CONCRETO

4.1 Aspetti sperimentali

I campioni sono stati ricavati da un rotore di alta pressione di un gruppo turbina. I dati salienti del semianello dal quale sono stati ricavati i provini sono i seguenti:

- Materiale: St 460TS (acciaio 1CrMo $\frac{1}{4}$ V, tipo ASTM A470)
- Ore di esercizio: 181000
- Anno di costr: 1957
- Taglia: 125 MW

E' stata eseguita una serie di 5 prove di creep accelerate in temperatura su campioni con orientazione tangenziale e minima sezione, aventi diametro di 2.5 mm. Le prove sono avvenute tutte con lo stesso valore di sollecitazione (130 MPa) ed a diverse temperature scelte in modo da investigare un intervallo di vita tra 10 e 2000 ore circa.

La procedura di prova è in accordo con la norma ASTM E139-83.

I provini sono stati realizzati secondo le indicazioni riportate in Fig.1, prestando particolare attenzione allo stato di finitura superficiale del tratto utile e delle zone di raccordo fra tratto utile e parti cilindriche filettate di attacco alla catena di carico.

In questo caso, disponendo di poco materiale, sono stati realizzati dei miniprovini con tratto utile ridotto ($L_0=25$ mm). In ogni caso si tratta di campioni aventi rapporto L/D

(L=lunghezza del tratto cilindrico, D=diametro in tale tratto) pari a 10, valore che comunque ricade tra quelli consigliati dalla norma ASTM E 139.

Le prove sono state eseguite su di una apposita macchina per miniprovini a peso morto diretto. L'impostazione ed il controllo della temperatura è avvenuto utilizzando tre termocoppie; la prima, di tipo R per la regolazione del forno mentre le altre due, di tipo K, sono state montate sul campione. Durante le prove, che sono avvenute tutte in argon, è stato utilizzato un comparatore disposto esternamente alla camera ambientale per il rilievo della deformazione.

Le condizioni sperimentali sono state ricavate basandoci sui risultati di una analoga precedente sperimentazione su di un anello di rotore di alta pressione. Sono state adottate le medesime condizioni di prova ai fini di una immediata comparazione dei risultati, alla luce anche del fatto che i due gruppi operano nelle medesime condizioni di esercizio ($\sigma = 130 \text{ MPa}$, $T = 500 \text{ }^\circ\text{C}$).

Le condizioni generali della curva isostress possono essere così riassunte:

- temperatura delle prove da 600 a 685 $^\circ\text{C}$.
- ambiente di prova - argon -
- sforzo sui provini costante pari a 130 MPa.

Temperature, durate e corrispondenti valori del parametro di Larson-Miller delle prove in oggetto sono riportate in Tab.1. Le curve di creep, "Deformazione - tempo a rottura" e "Velocità di deformazione - tempo a rottura" (calcolata come derivata con il metodo dell'incremental polynomial), sono state calcolate su di un tratto utile di 25 mm.

4.2 RISULTATI

4.2.1 Metodo Laborelec

I dati sperimentali sono rappresentati in Fig.3 che riporta il grafico "Temperatura-Tempo a rottura". Essi vengono interpolati con una retta di regressione e per estrapolazione a 500 $^\circ\text{C}$ si ottiene il valore stimato della vita rimanente. Sul grafico vengono inoltre riportate le bande di confidenza con limiti fiduciari al 95% . E' però necessario fare una precisazione. E' stato scartato il dato relativo alla prova SB2C9 (685 $^\circ\text{C}$, 3.93 ore), in quanto, una così breve durata (a causa di temperatura eccessivamente alta) è indice di un diverso meccanismo di danno che per questo materiale è fuorviante del generale andamento dei dati e soprattutto in grado, spostando la retta di regressione di dare previsioni di vita non conservative alla temperatura di esercizio. La Tabella 2, riporta oltre ai parametri di prova, i parametri significativi della retta di regressione interpolante ed i valori statistici della correlazione.

Il grafico di Fig.4 riporta (unitamente ai dati di Tabella 3) l'andamento della curva "Probabilità di sopravvivenza-tempo". Da tale grafico è possibile stimare la probabilità che il materiale in questione ha di sopravvivere per un dato periodo di tempo nelle condizioni dell'esercizio:

$$\sigma = 130 \text{ MPa}; \quad T = 500 \text{ }^\circ\text{C}$$

Ad esempio, la probabilità di durare almeno 10000 ore è pari al 95%

4.2.2 Metodo KEMA

Anche in questo caso sono stati ottenuti 2 grafici:

- 1) Reciproco della temperatura assoluta verso tempo a rottura (riportato in Fig.5; si osservi che la relazione KEMA fra le variabili T e σ è la stessa implicita nel parametro di Larson-Miller, mentre nell'elaborazione Laborelec la relazione parametrica era del tipo Manson-Haferd). I dati relativi alla curva di regressione e alle bande di confidenza sono riportati in Tabella 4.
- 2) Probabilità di sopravvivenza in funzione del tempo, riportata in Fig.6 e Tabella 5.

Nel caso in esame si è fatto un tentativo di applicazione completa del metodo KEMA in quanto, a differenza delle classiche prove stress rupture, è stata monitorata la deformazione durante lo svolgimento delle stesse. Dapprima sono stati calcolati i parametri necessari alla ricostruzione della curva completa e sono stati verificati ricostruendo le curve di creep della sperimentazione Isostress svolta (Fig.7); in seguito si è passati alla ricostruzione della curva completa nelle condizioni di esercizio,(Fig.8). Sul grafico "deformazione-tempo" così ricostruito è possibile individuare il livello di deformazione a creep finora accumulata e stabilire in quale fase si trovi attualmente il componente (primario, secondario o terziario della curva di creep). Come accennato sopra, il dato può essere avvalorato da una opportuna indagine metallografica, in particolare mediante repliche cavitative. A tal riguardo sul grafico deformazione tempo è stata riportata la scala di Neubauer che indica per ciascuna fase della curva di creep il livello di danno cavitativo raggiunto.

4.3 DISCUSSIONE

I metodi sopra esposti sono stati applicati ad un caso concreto di valutazione di vita residua. E' stato considerato un rotore di centrale esercizio; le previsioni Isostress con metodo Laborelec stimano in circa 109000 ore la vita residua a 500°C. L'applicazione del metodo KEMA fornisce in questo caso stime di vita non conservative rispetto al metodo Laborelec, cioè circa 289000 ore di vita rimanente a 500°C. Il metodo KEMA completo è stato sperimentato per la ricostruzione della curva di creep del materiale nelle condizioni dell'esercizio. Il calcolo, che viene fatto considerando il valore di vita residua fornito dall'intercetta della retta di regressione alla temperatura di esercizio, è stato fatto in condizioni conservative, cioè applicando la vita residua risultata minore (quella fornita dal metodo Laborelec). E' necessario precisare che le valutazioni di vita residua di componenti di centrale ENEL viene effettuata sulla base delle previsioni fornite dalla retta di regressione dei dati. L'analisi statistica che ne segue, costituisce un valido supporto

alla stima della bontà del dato estrapolato. L'analisi in oggetto, viene quindi a seconda dei casi avvalorata da indagini di tipo non distruttivo; metallografiche, A-parameter mediante repliche cavitative, durezza, dispersione dei carburi ecc.), oppure con tecniche fisiche di più recente introduzione (3° generazione) quali misure di permeabilità magnetica, oppure di resistività elettrica. L'uso combinato di questi strumenti può fornire utili indicazioni sullo stato attuale del componente, sul livello di deformazione accumulata ed infine fornire un supporto alla gestione economica dell'impianto consentendo di programmare interventi di manutenzione o di sostituzione dei componenti operanti in alta temperatura.

5 CONCLUSIONI

In questo lavoro sono presentate le attività di creep, applicate principalmente a provini miniaturizzati, rivolte allo sviluppo e verifica di metodi avanzati, sia di prova che di analisi, per valutazione del danno da creep e della vita residua di componenti in servizio. Scopo dell'attività qui descritta è quello di effettuare un confronto tra due metodi di estrapolazione della vita alle condizioni di servizio a partire da prove di laboratorio in ambiente inerte (argon), accelerate in temperatura (prove Isostress). Dei due metodi proposti, il primo, che è il più diffuso, formulato originariamente da Laborelec (Belgio), fa riferimento ad una correlazione tra la temperatura ed il tempo a rottura del tipo Manson Haferd, mentre il secondo, di più recente introduzione, da parte di KEMA (Olanda), si riferisce alla relazione di Larson Miller. Questo secondo metodo, oltre a fornire una stima della vita residua immediatamente comparabile con quella fornita dal primo metodo, consente anche, tramite l'utilizzo di opportune relazioni di validità generale, di ricostruire completamente la curva di creep sperimentata dal materiale nelle condizioni di servizio.

Ringraziamenti

Gli autori desiderano esprimere viva gratitudine ai Sigg. A. Foggi e S. Silini per la collaborazione nello svolgimento delle attività sperimentali. L'attività descritta è stata svolta nell'ambito di commesse dell'ENEL/DPT di Pisa che si ringrazia per avere acconsentito alla pubblicazione dei dati presentati.

BIBLIOGRAFIA

- [1] G. Eggeler, *Creep Damage Quantification and Damage Localization*, Proc. of Conf. "Rupture Ductility of Creep Resistant Steels" York, UK 1990
- [2] Stubbe, J. Van Melsen, *Proc. of Symp. on Residual Life of Costructions Operating at Elevated Temperatures*, Den Haag, The Nederlands Inst. of Welding
- [3] S. S. Manson, A.M. Haferd, NASA Tech. Mem. TN 2890, 1953
- [4] B. J. Cane, J.a. Williams, *Remaining Life Prediction of Temperature Materials*, International Materials Reviews, Vol. 32, N°5, 1987, 241-262.
- [5] J. L. Brinkman, L.B. Dufur, J. Van Liere, N.V. KEMA, *Dutch Approach to Life Extention of Fossil-fired Plants*, Life Assesment of Fossil Power Plants,

- [3] S. S. Manson, A.M. Haferd, NASA Tech. Mem. TN 2890, 1953
- [4] B. J. Cane, J.a. Williams, *Remaining Life Prediction of Temperature Materials*, International Materials Reviews, Vol. 32, N°5, 1987, 241-262.
- [5] J. L. Brinkman, L.B. Dufur, J. Van Liere, N.V. KEMA, *Dutch Approach to Life Extension of Fossil-fired Plants*, Life Assessment of Fossil Power Plants, Washington DC, June 2-4 1986.
- [6] G. Togliatti, *Fondamenti di statistica*, CLUP-1976
- [7] R. Blum, *The Danish Experience in Materials Aspects in Power Plant Life Assessment and in Life Extension*, Int. J. Pres. Ves. & Piping 39 (1989) 29-40.
- [8] D. D'Angelo, C. Guardamagna, L. Ranzani, *Creep-Rupture Testing on Welded Miniature Specimen: a Method for the Remaint Life Assessment of Power Plant Components*, Int. Inst. of Welding, Commission IX-Working Group Creep, Technical University of Denmark, Copenhagen, 27-28 May 1993.
- [9] S. Tettamanti, *Provini Miniaturizzati Senza Teste Filettate per Prove di Creep*, Rapporto Topico CISE SMS-93-33, 25-10-93.
- [10] A. Benvenuti, A. Lazzati, E. Lucon, N. Taylor, S. Tettamanti, *Valutazione delle condizioni di degrado microstrutturale e meccanico di due componenti del gruppo turbina della centrale di S. Barbara*, Rapporto Finale CISE 7368 , 15-2-93

N°	Nome	tr (h)	T (°C)	ep_min (/h)	Δl (%)	PLM
1	SB2C7	187.7	630	6.90E-5	10.19	20113
2	SB2C8	66	655	1.44E-4	11.13	20248
3	SB2C9	3.93	685	-	-	19729
4	SB2C10	830.8	600	1.37E-5	9.13	20008
5	SB2C11	474	620	4.08E-5	14.82	20249

Macchine : MAYES TC 10
 Materiale : St 460TS (1CrMo $\frac{1}{4}$ V ASTM A470)
 Sforzo : 130 MPa

TAB.1 Prove di creep Isostress. Matrice di prova e risultati

VITA PREVISTA (ore)	109500
Coeff.di correlazione	0.9836
Dev. Standard	0.2451
Scarto Totale	0.4490
Scarto minimo	-0.1631
Scarto massimo	0.2858
Scarto medio	0.1429
Scarto quad. medio	0.030

Costanti dell'equazione: $\ln(tr) = H + m \cdot (T(^{\circ}C))$: $H = 3.55E+01$, $m = -4.77E-2$

TAB.2 Parametri della retta di regressione lineare e valori statistici della correlazione. (Metodo Isostress Laborelec)

Tempo (ore)	Probabilità
1.1E+5	0.500
9.7E+4	0.550
8.6E+4	0.600
6.6E+4	0.700
5.6E+4	0.750
4.6E+4	0.800
2.3E+4	0.900
9.8E+3	0.950
3.1E+3	0.975
3.4E+2	0.990
3.0E+1	0.995
2.4E-1	0.998
1.0E-3	0.999
1.0E-3	1.000

TAB.3 Dati della curva "Probabilità di sopravvivenza-tempo" (Metodo Isostress Laborelec).

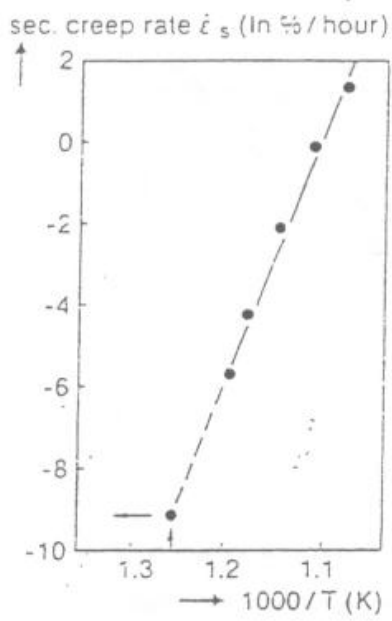
VITA PREVISTA (ore)	289823
Coeff.di correlazione	0.9822
Dev. Standard	0.2550
Scarto Totale	0.4470
Scarto minimo	-0.1428
Scarto massimo	0.3041
Scarto medio	0.1520
Scarto quad. medio	0.032

Costanti dell'equazione: $\ln(tr) = H + m \cdot (1/T(K))$: $H = -3.74E + 01$, $m = 3.87E + 4$

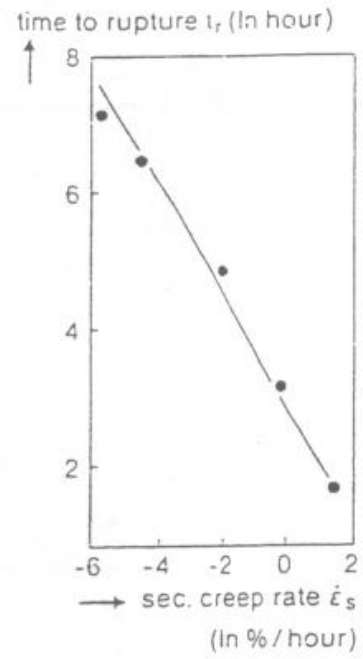
TAB.4 Parametri della retta di regressione lineare e valori statistici della correlazione. (Metodo Isostress KEMA)

Tempo (ore)	Probabilità
2.9E+5	0.500
2.5E+5	0.550
2.2E+5	0.600
1.6E+5	0.700
1.3E+5	0.750
1.0E+5	0.800
4.5E+4	0.900
1.6E+4	0.950
4.1E+3	0.975
3.0E+2	0.990
1.6E+1	0.995
5.0E-2	0.998
7.7E-5	0.999
1.0E-7	1.000

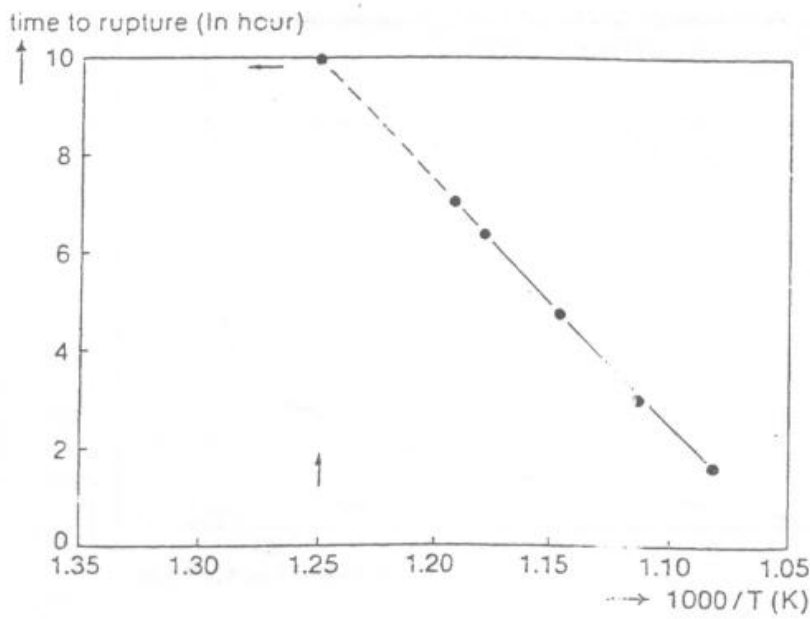
TAB.5 Dati della curva "Probabilità di sopravvivenza-tempo" (Metodo Isostress KEMA).



Equation 1

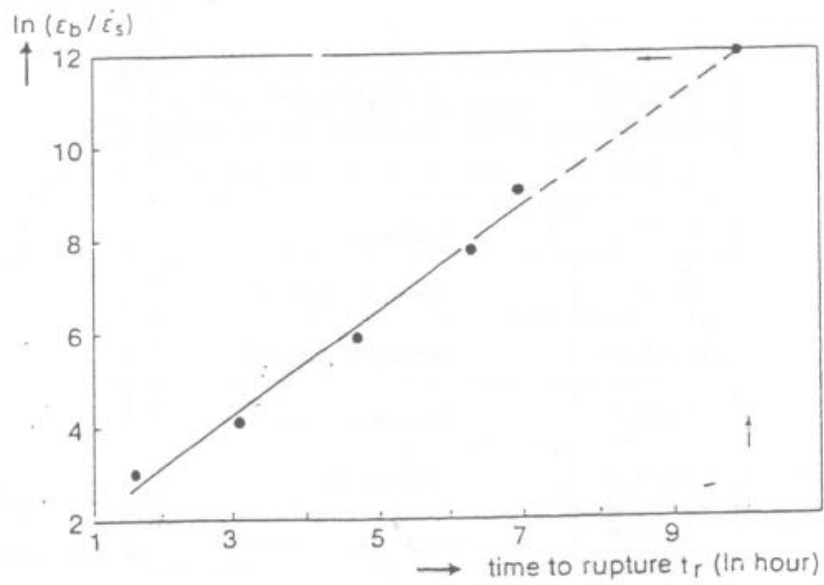


Equation 2

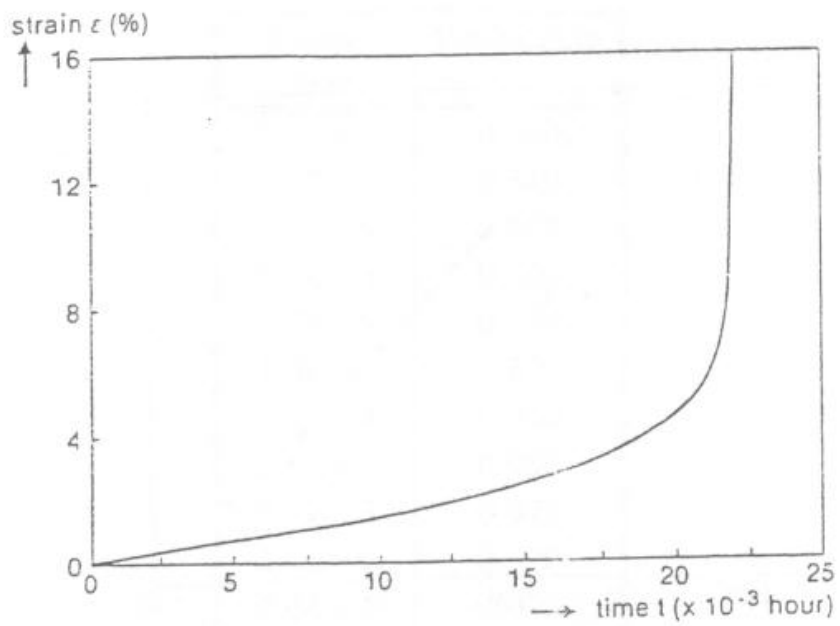


Combination of equations 1 and 2

Fig. 1 Rappresentazione grafica del Metodo KEMA completo.



Equation 3



Equation 4

Fig. 2 Rappresentazione grafica del Metodo KEMA (continuazione)

METODO ISOSTRESS - LABORELEC -
grafico T (°C) vs. tempo a rottura

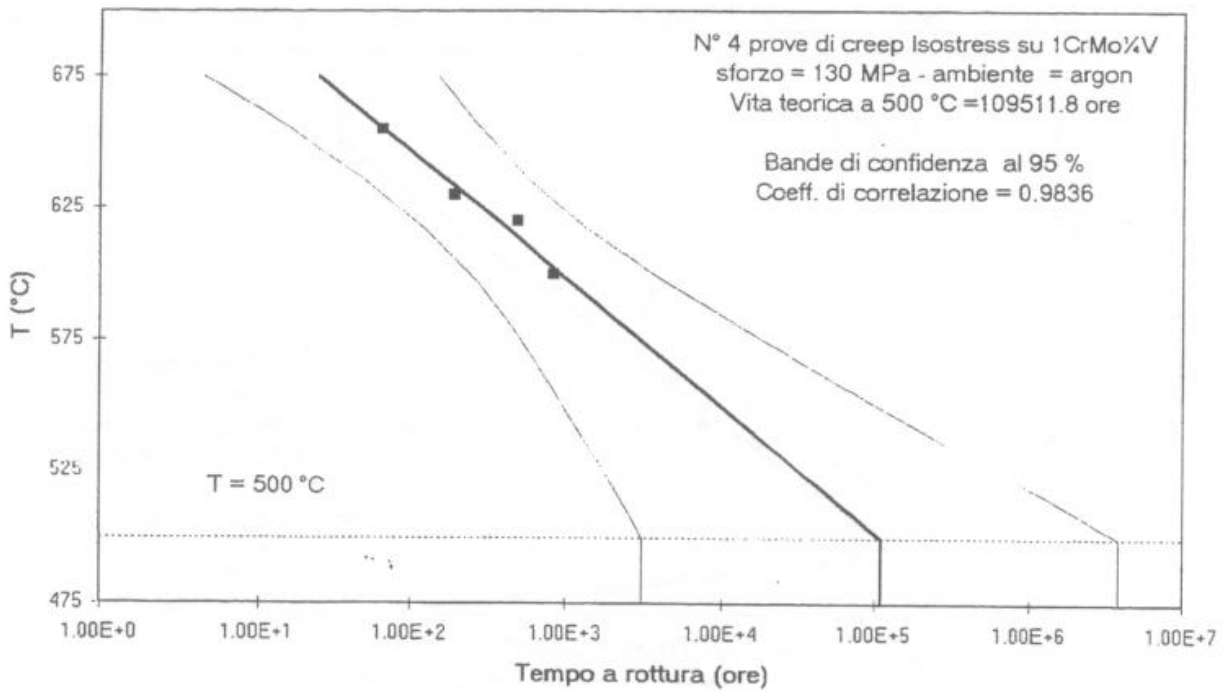


Fig.3 Grafico "Temperatura vs. tempo a rottura" del Metodo Isostress - Laborelec
Previsione di vita a 500 °C.

PROBABILITA' DI SOPRAVVIVENZA IN FUNZIONE DEL TEMPO
METODO ISOSTRESS - LABORELEC -

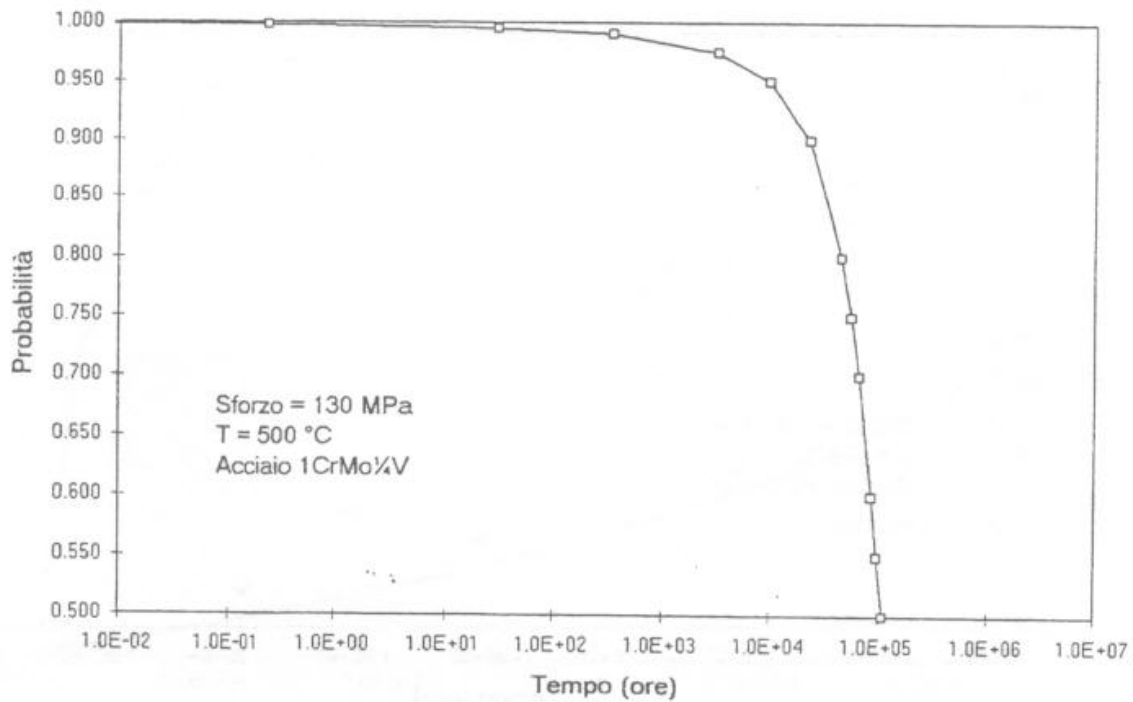


Fig.4 Grafico "Probabilità di sopravvivenza vs. tempo" a 500 °C.
(Metodo Isostress-Laborelec)

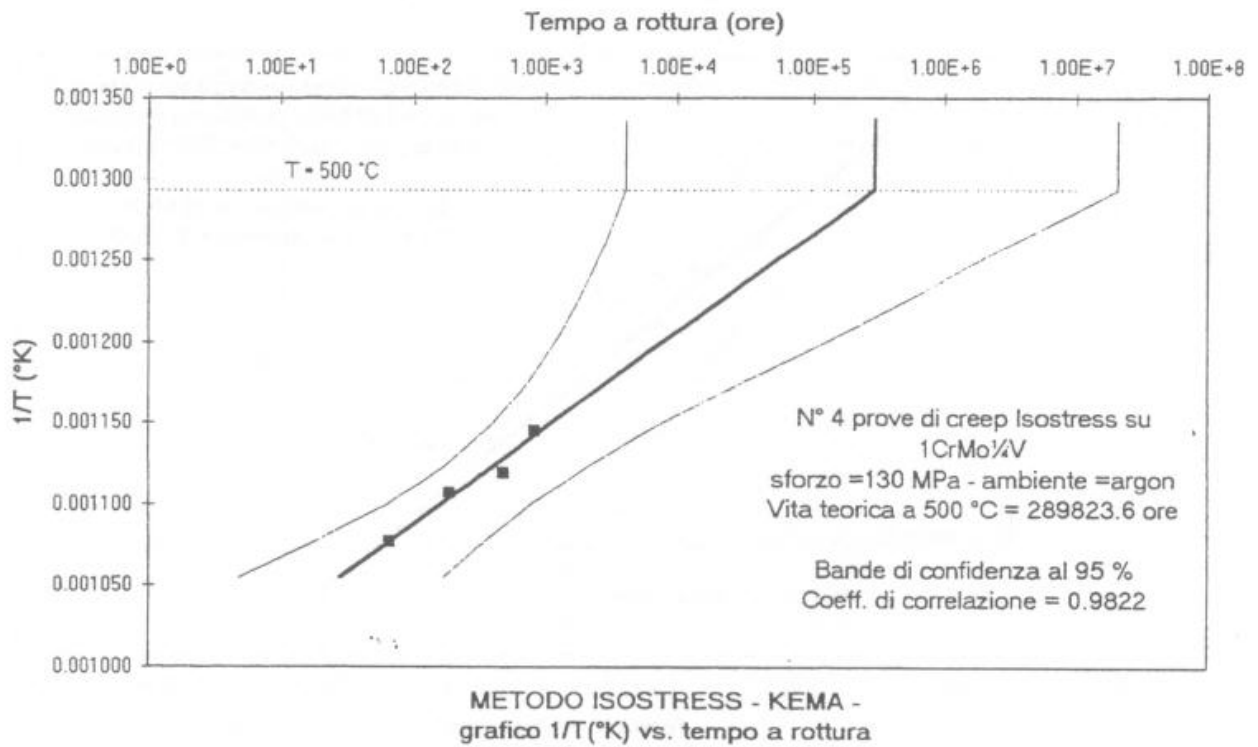


Fig.5 Grafico "Temperatura vs. tempo a rottura" del metodo Isostress-KEMA
Previsione di vita a 500 °C.

PROBABILITA' DI SOPRAVVIVENZA IN FUNZIONE DEL TEMPO
METODO ISOSTRESS - KEMA -

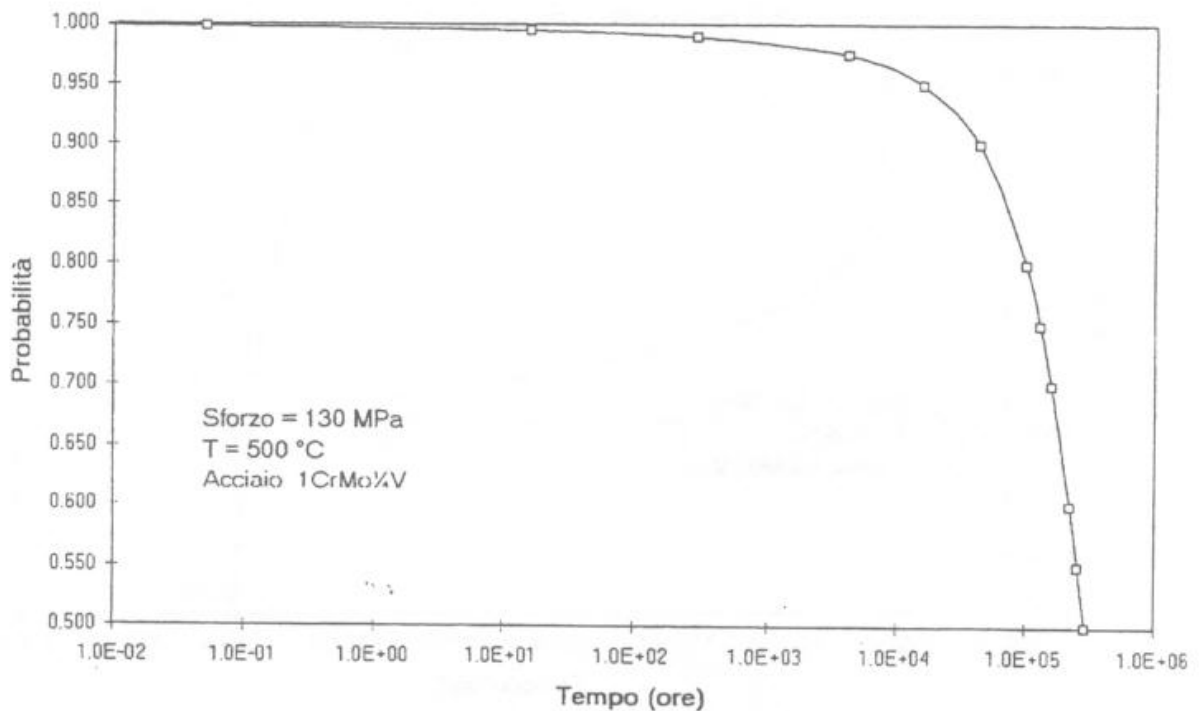


Fig.6 Grafico "Probabilità di sopravvivenza vs. tempo" a 500 °C.
(Metodo Isostress-KEMA)

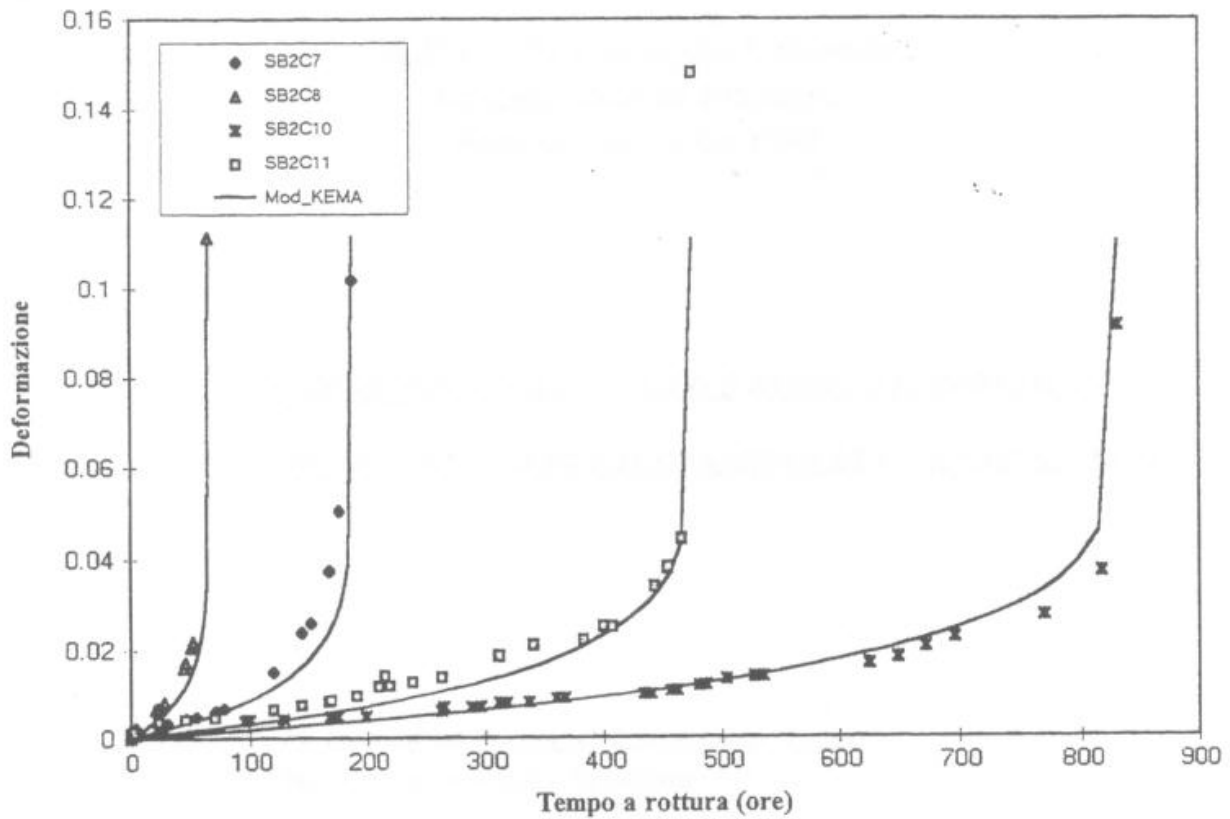


Fig.7 Ricostruzione delle curve usate per il calcolo dei parametri.

modello KEMA
Comportamento ipotetico del componente

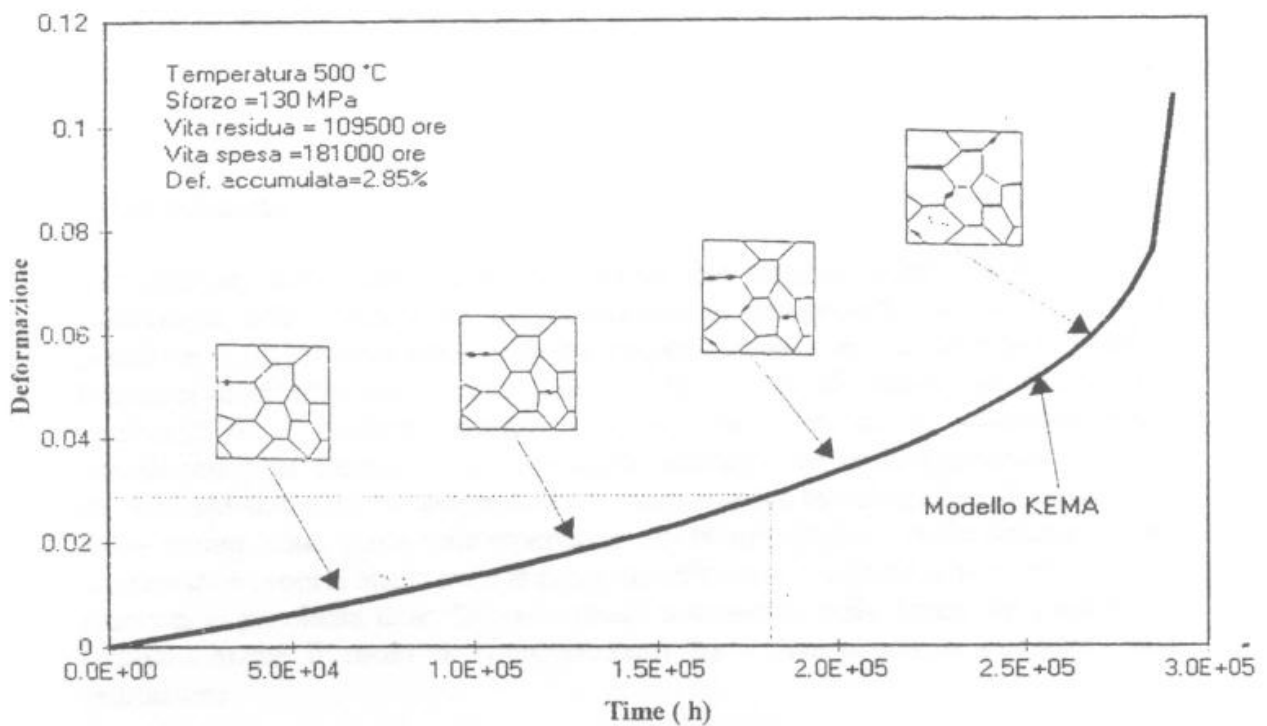


Fig.8 Curva di creep ipotetica del materiale nelle condizioni di esercizio.