

Ordine degli Ingegneri della Provincia di Udine e Confindustria Udine

 ORDINE DEGLI INGEGNERI  
PROVINCIA DI UDINE

## **SICUREZZA IMPIANTI INDUSTRIALI A PRESSIONE**

**Aspetti Normativi, Tecnici e Buone prassi**

Udine, 23 Maggio 2018

 CONFINDUSTRIA UDINE

**INAIL**

## **CALCOLO DELLA VITA A CREEP DI ATTREZZATURE IN PRESSIONE**

**Ottaviano Grisolia**

**Inail – DIT – Roma**

**[o.grisolia@inail.it](mailto:o.grisolia@inail.it)**

# QUADRO GENERALE DI ATTIVITÀ 1/2

- **Ricerca applicata** alla certificazione di componenti ad alta temperatura.
- Obiettivi delle analisi perseguiti **annualmente** in base ad esigenze di progettazione con **sviluppo/aggiornamento di tecnologie**.
- In un decennio di attività sviluppati **tre prodotti**, validati attraverso doppia pubblicazione (ASME, standard "peer review" riconosciuto) del progetto e dell'applicazione.
- Attività principale: **analisi strutturale** (metodi classici/tecnologia o by formula, metodi FEM) e a **scorrimento viscoso** o "**creep**" (norma italiana/tecnologia, norma americana/modello numerico del componente critico).
- **Casi studio** riguardanti impianti (centrali elettriche) **attualmente funzionanti** in Italia o estero.

## QUADRO GENERALE DI ATTIVITÀ 2/2

- Reperimento del materiale d'impianto (**disegni costruttivi, dati di esercizio**).
- Selezione (anche in corso d'opera) dei **componenti da analizzare**.
- Stesure previste dal **processo peer review** per la pubblicazione annuale ASME.
- Rilascio dei **risultati delle analisi** agli impianti coinvolti.
- Collaborazioni: **Centrali elettriche** (documentazione di impianto), **Studio Associato Scano** (validazione di due tecnologie mediante confronto con le norme americane, API 579-1 per il creep).

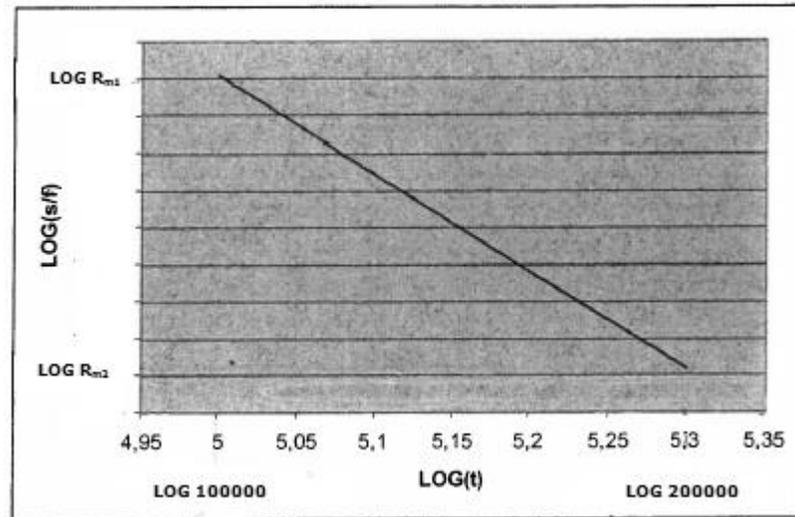
## QUADRO SPECIFICO DI ATTIVITÀ 1/3

- **Gruppo di lavoro in INAIL** certificante l'**estensione della vita dei componenti ad alta temperatura** di attrezzature in pressione **in base ai controlli e calcoli** eseguiti dal progettista abilitato.
- Norme italiane applicabili per il **calcolo della vita** in regime di scorrimento viscoso (creep): **Linea Guida Creep ISPESL 2003**, Sezione DUE (**Circolare 48 2003**), **Specifica Tecnica UNI/TS 11325-4**, Sezione CINQUE.
- Altre norme applicabili: **ECCC Recommendations**, **EN 12952-4** Steam Generators, **API 579-1 Level 1-3**.
- Norme italiane applicabili per l'**analisi strutturale** (generatori di vapore): **VSG**, **Raccolta M**.
- Altre norme applicabili: **EN 13480-3** Metallic Industrial Piping, **ASME Section I** Boiler & Pressure Vessel, **ASME B31.1** Power Piping.

## QUADRO SPECIFICO DI ATTIVITÀ 2/3

- Metodo di calcolo del tempo di rottura basato sull'**estrapolazione (es. a 200000 ore) dei dati di rottura a 100000 ore**. Applicabile manualmente attraverso formula -> frequentemente usato dai progettisti italiani.
- Fonti di **letteratura** disponibili forniscono le sollecitazioni di rottura (resistenze a caldo) a 100000 ore  $R_{m1}$  per temperature di prova  $T$ ; interpolando, per quella effettiva (di esercizio)  $T_{op}$ .
- **Equivalenza del parametro di correlazione** scelto fornisce la temperatura di rottura a  $10^4$  ore cui interpolare per ottenere  $R_{m2}$  alla  $T_{op}$ . Per il parametro di Larson-Miller ad esempio, si scrive:  
$$P_{LM1}(\sigma) = [(\log 100000 + C) (T' + 273)]/10^3 = P_{LM2}(\sigma) = [(\log 200000 + C) (T_{op} + 273)] /10^3 \rightarrow$$
  
$$\rightarrow T' = 1,012 T_{op} + 3,3$$
 (temperatura di rottura a  $10^4$  ore per cui si ha rottura a  $20^4$  ore alla  $T_{op}$ ).
- Interpolando tra  $R_{m1}$  e  $R_{m2}$  (in diagramma bi-logaritmico) si ricava il tempo di rottura  $t_r$  in funzione della sollecitazione applicata  $\sigma$  (diviso i fattori 0.8 0.9, alla temperatura di esercizio  $T_{op}$ ).

## QUADRO SPECIFICO DI ATTIVITÀ 3/3



$$\rightarrow \frac{\log t_r - \log 100000}{\log \sigma - \log R_{m1}} = \frac{\log 200000 - \log 100000}{\log R_{m2} - \log R_{m1}} \rightarrow$$

$$\rightarrow t_r = 100000 * 10^{\left( \log \frac{R_{m1}}{\sigma} \frac{\log \frac{200000}{100000}}{\log \frac{R_{m1}}{R_{m2}}} \right)}$$

- **Frazione di vita spesa** = tempo speso in esercizio / tempo di rottura stimato, **affidabile** se correlazione logaritmica tempo-sollecitazione **lineare** (regioni limitate).
- Le norme raccomandano uso di **modello di correlazione** dei dati di resistenza.
- Metodo di prima scelta norma italiana: calcolo del tempo di rottura attraverso modello per la funzione **parametro di Larson-Miller** ( $P_{LM}$ ) – **sollecitazione applicata** ( $\sigma$ ).

# APPLICAZIONE DEL METODO DI PRIMA SCELTA 1/7

## Caratteristiche operative della procedura automatica 1/3

- **Programma per PC** (scritto dal relatore e denominato "Master") trova i coefficienti di regressione del modello polinomiale che meglio approssima la funzione  $P_{LM}(\sigma)$ .
- **Parametro di Larson-Miller** ( $P_{LM}$ ) utilizzato per correlare le  $n$  resistenze a caldo "osservate" a 100000 ore ( $R_m$ ) e temperature di prova ( $T$ ) disponibili in letteratura.
- **Tempo di rottura previsto**  $t_{r\ op}$  alle condizioni di esercizio ( $\sigma_{op}$ ,  $T_{op}$ ) espresso come

$$\log t_{r\ op} = [P_{LM}(\sigma_{op}) / (T_{op} + 273)] - C$$

dove  $C$  è una costante da assegnare al materiale.

## APPLICAZIONE DEL METODO DI PRIMA SCELTA 2/7

### Caratteristiche operative della procedura automatica 2/3

- **Modello polinomiale log( $\sigma$ )** considerato dal programma per la funzione  $P_{LM}(\sigma)$  espresso come

$$P_{LM}(\sigma) = \sum_{i=1, k} p_i \log^{i-1}(\sigma)$$

dove  $m = k-1$  è il grado e  $p_i$  sono i ( $k$ ) coefficienti di regressione.

- **Costanti**  $m, n, C$ , e **coefficienti di regressione**  $p_i$  di migliore approssimazione trovati applicando il metodo dei minimi quadrati sugli  $n$  punti  $(T_i, R_{m i})$ .

- **Migliore approssimazione -> minima somma** ( $S$ ) dei  $n$  residui ( $r_i$ ) al quadrato definendo:

$$X_i = \log (R_{m i}), \quad Y_i = P_{LM} (R_{m i}), \quad r_i = [Y_i - Y(X_i)], \quad S = \sum_{i=1, n} r_i^2 = \sum_{i=1, n} [Y_i - Y(X_i)]^2$$

# APPLICAZIONE DEL METODO DI PRIMA SCELTA 3/7

## Caratteristiche operative della procedura automatica 3/3

- **Costruzione** della funzione “**master curve**” che meglio approssima la relazione  $P_{LM} - \sigma$ , fornendo direttamente il tempo di rottura teorico per assegnate condizioni di esercizio.
- **Assegnazione per tentativi** delle **costanti** che influenzano il grado di approssimazione: numero  $n$  di punti ( $T, R_m$ ), costante di Larson-Miller  $C$  e grado del polinomio  $m$ .
- Modifica delle costanti accedendo al **database** o per **introduzione diretta**.
- **Input indipendente** dei **dati di resistenza** sui quali il programma applica i minimi quadrati.
- Database aggiornato attraverso le schede materiali ASME e Raccolta M (dati **ASTM**), **ECCC**.
- **Verifica automatica** e **visiva** dell'approssimazione del modello mediante **controllo preliminare** su  $P_{LM}$  calcolato dal modello (“**previsto**”) e per sollecitazione pari a  $R_m$  (“**osservato**”) ed **ex-post** su  $t_r$  previsto e osservato, in tutti i punti ( $\log \sigma, \log t$ ) considerati dalla procedura per le isoterme.

# APPLICAZIONE DEL METODO DI PRIMA SCELTA 4/7

## Verifiche e validazione della procedura automatica 1/1

- **Correttezza dell'algoritmo** verificata per confronto con diverso solutore.
- **Consistenza degli output** valutata su modelli di riferimento ("benchmark") per due acciai fuori Raccolta M (costanti e dati di resistenza da raccomandazioni ECCC, tutti i controlli superati).
- **Progetto della tecnologia** convalidato mediante pubblicazione ASME, 2011.
- **Validazione della tecnologia** perseguita mediante pubblicazione ASME, 2013 su applicazione a caso studio (componente in acciaio basso legato P11).
- **Verifiche della tecnologia** perseguite mediante pubblicazioni ASME, 2015, 16 su applicazione a caso studio (componente in acciaio basso legato P22).

# APPLICAZIONE DEL METODO DI PRIMA SCELTA 5/7

## Organizzazione del programma 1/3

- Struttura del codice in Basic suddivisa in **quattro sezioni**:
- **1) Ingresso:** Mediante opzioni per selezionare come e quali dati vanno inseriti, il programma facilita la ricerca per tentativi del migliore modello polinomiale (delle costanti  $m$ ,  $n$ ,  $C$ ).  
L'utente fa girare il programma con set di **dati di resistenza a caldo** ( $T$ ,  $R_m$ ) e differenti **costanti**  $m$ ,  $n$ ,  $C$  oppure sceglie di utilizzare/modificare valori in database.
- **2) Assegnazione e calcolo:** Assegnati alle variabili i **coefficienti lineari** ( $a_{ij}$ ) calcolati con le formule di Gauss dei **minimi quadrati**, il programma applica il metodo di Gauss di **riduzione della matrice** per risolvere il sistema e fornire  $(m+1)$  **coefficienti di regressione**  $p_j$ .
- **3) Verifiche risultati intermedi:** Mostrati a video i risultati intermedi, il programma esegue la verifica del grado di approssimazione del modello basata sul **realismo delle isoterme** ottenute. Successione di tre "**post assessment tests**" (PAT, raccomandazioni ECCC, primo criterio).

# APPLICAZIONE DEL METODO DI PRIMA SCELTA 6/7

## Organizzazione del programma 2/3

- Verifica preliminare su  $P_{LM}(R_{mj})$ , **avvisando** per quale punto  $j$  del **set di dati** lo **scostamento**  $|P_{LM}(R_{mj}) - P_{LMj}| > 20\%$  e **bloccando** l'esecuzione perché inaccettabile l'approssimazione.
- PAT 1.1 verifica la **credibilità delle isoterme**,  $\log \sigma - \log t_r$  previste sul **set di punti** ( $\log \sigma, \log t$ ):  
Calcola lo **scostamento** tra tempo previsto  $t_{rij}$  e osservato  $t_{ij}$  **avvisando** per quale punto  $j$  ( $\sigma_j, t_{ij}$ ) dell'isoterma  $i$  i risultati:  $|t_{rij} - t_{ij}| > 20\%$ .
- PAT 1.2 verifica la **regolarità delle isoterme**,  $\log \sigma - \log t_r$  previste, che non dovrebbero incrociarsi, unirsi o cambiare direzione sul **set di punti** ( $\log \sigma, \log t$ ):  
Mostra a video i **valori numerici** di  $\sigma_j$  e  $t_{rij}$  per ogni  $T_i$  e graficamente la **posizione dei punti**  $j$  ( $\sigma_j, t_{rij}$ ) di ogni isoterma  $i$ .

# APPLICAZIONE DEL METODO DI PRIMA SCELTA 7/7

## Organizzazione del programma 3/3

- Verifica (a video) sui valori numerici: Sollecitazioni considerate in ogni isoterma = resistenze a caldo a 100000 ore -> approssimazione accettabile se tempo di rottura ( $t_{r_{ii}}$ ) previsto al punto  $i$  ( $\sigma_i, t_{ii}$ ) dell'isoterma  $i$  è prossimo a 100000 ore.

- PAT 1.3 Verifica l'**inclinazione delle isoterme** ai bassi valori di sollecitazione:

Calcola la **derivata parziale** di  $\log t_r$  come funzione di  $\log \sigma$  per ogni  $T$  **avvisando** per quale punto  $j$  ( $\sigma_j, t_{ij}$ ) dell'isoterma  $i$  risulta:  $-(\partial \log t_{rij} / \partial \log \sigma_j)_{i,j=1,n} \geq 1.5$  (inclinazione eccessiva).

- **4) Calcolo e uscita risultati finali:** Dopo l'ingresso delle condizioni di esercizio ( $\sigma_{op}, T_{op}$ ), il programma esegue l'**uscita** dei valori previsti per **parametro** PLM( $\sigma$ ) e **tempo di rottura teorico**  $t_{rop}$ . L'utente può terminare, continuare la sessione di lavoro con differenti condizioni o iniziarne una nuova.

# ESEMPIO DI APPLICAZIONE DEL METODO DI PRIMA SCELTA 1/7

## Modello trovato per il P22 1/2

- **Sistema lineare** (in forma matriciale) risolto dal programma considerando polinomio di 3 grado:

$$\begin{array}{rcccccc}
 p_1 & & n & \sum_{i=1, n} X_i & \sum_{i=1, n} X_{i2} & \sum_{i=1, n} X_{i3} & = & \sum_{i=1, n} Y_i \\
 p_2 & \cdot & \sum_{i=1, n} X_i & \sum_{i=1, n} X_{i2} & \sum_{i=1, n} X_{i3} & \sum_{i=1, n} X_{i4} & = & \sum_{i=1, n} X_i Y_i \\
 p_3 & & \sum_{i=1, n} X_{i2} & \sum_{i=1, n} X_{i3} & \sum_{i=1, n} X_{i4} & \sum_{i=1, n} X_{i5} & = & \sum_{i=1, n} X_{i2} Y_i \\
 p_4 & & \sum_{i=1, n} X_{i3} & \sum_{i=1, n} X_{i4} & \sum_{i=1, n} X_{i5} & \sum_{i=1, n} X_{i6} & = & \sum_{i=1, n} X_{i3} Y_i
 \end{array}$$

dove  $X_i = \log (R_{m i}), Y_i = \text{PLM} (R_{m i})$

- **Coefficienti di regressione** trovati:

$$p_1 = 20130.46; \quad p_2 = 8429.686; \quad p_3 = - 6084.275; \quad p_4 = 815.5421$$

# ESEMPIO DI APPLICAZIONE DEL METODO DI PRIMA SCELTA 2/7

## Modello trovato per il P22 2/2

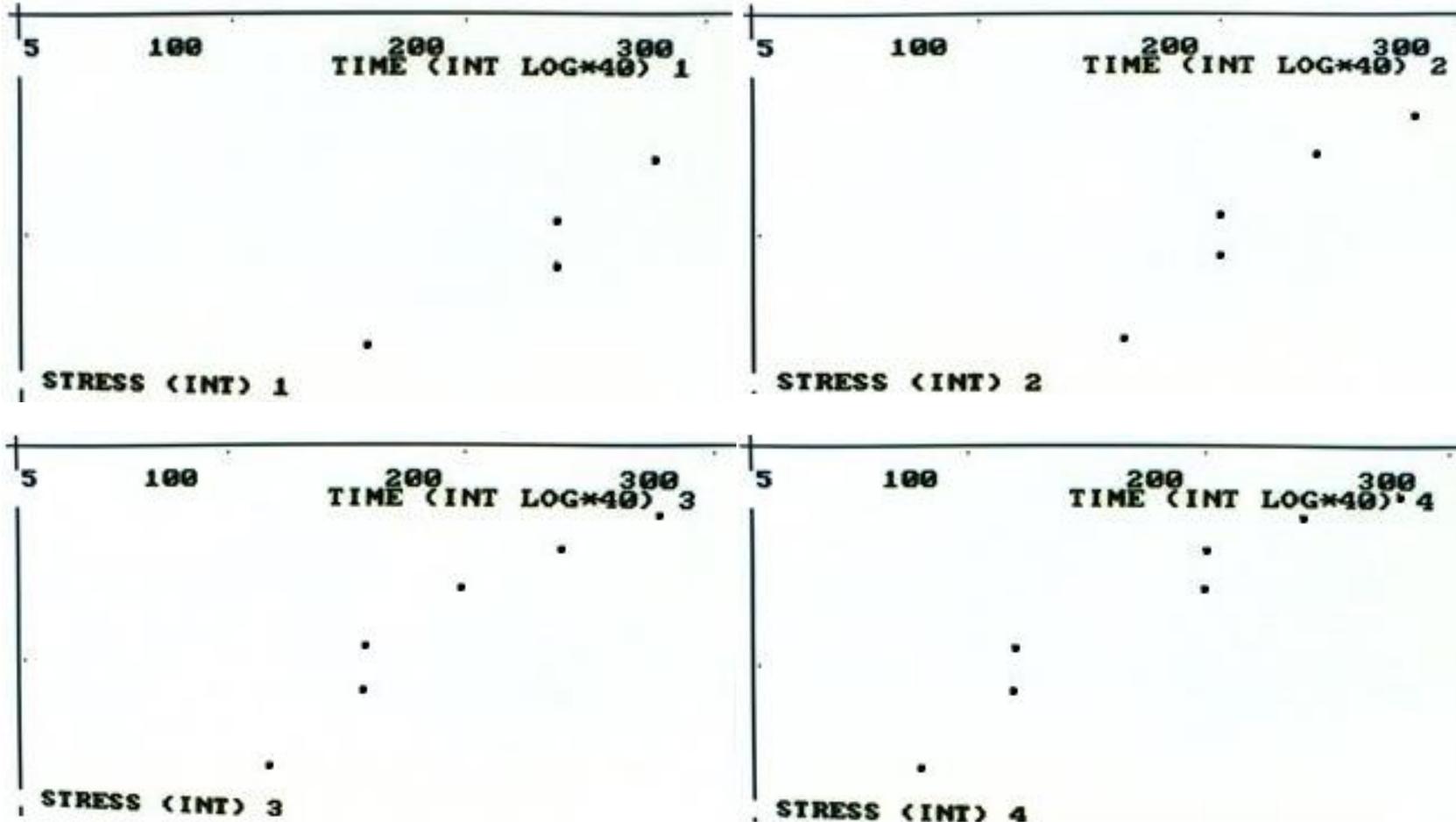
- **Modello polinomiale** trovato per l'acciaio P22:

$$PLM(\sigma) = 20130.46 + 8429.686 \log(\sigma) - 6084.275 \log^2(\sigma) + 815.5421 \log^3(\sigma)$$

- **Migliore approssimazione:** numero di punti  $(T, R_m)$  da Raccolta M,  $n = \mathbf{otto}$ , costante di Larson-Miller  $C = \mathbf{venti}$ , grado del polinomio  $m = \mathbf{tre}$ .
- PAT 1.1 non superato in due punti, gli altri controlli tutti superati.

# ESEMPIO DI APPLICAZIONE DEL METODO DI PRIMA SCELTA 3/7

## Modello trovato per il P22, controllo visivo sulle isoterme 1/2



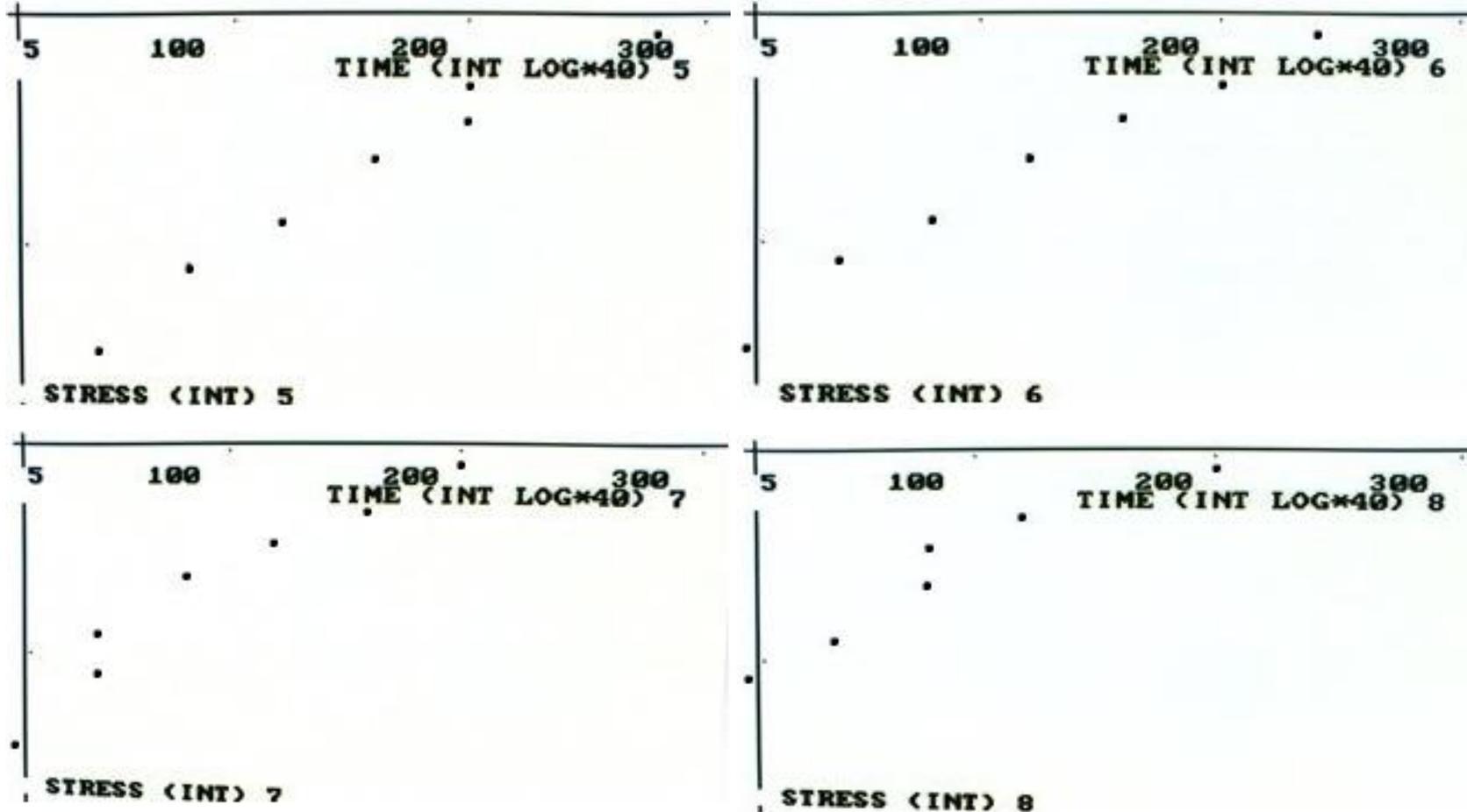
Interprete Basic ->  
Output grafici solo in  
modalità schermo intero ->  
Max. n. di punti per  
schermata: 190 x 300.

Tempi in scala 40 log, dati  
in valore intero -> Possibili  
**punti sovrapposti o  
affiancati in verticale.**

Cattura immagine non  
consentita (**foto video**).

# ESEMPIO DI APPLICAZIONE DEL METODO DI PRIMA SCELTA 4/7

## Modello trovato per il P22, controllo visivo sulle isoterme 2/2



Interprete Basic ->  
Output grafici solo in  
modalità schermo intero ->  
Max. n. di punti per  
schermata: 190 x 300.

Tempi in scala 40 log, dati  
in valore intero -> Possibili  
**punti sovrapposti o  
affiancati in verticale.**

Cattura immagine non  
consentita (**foto video**).

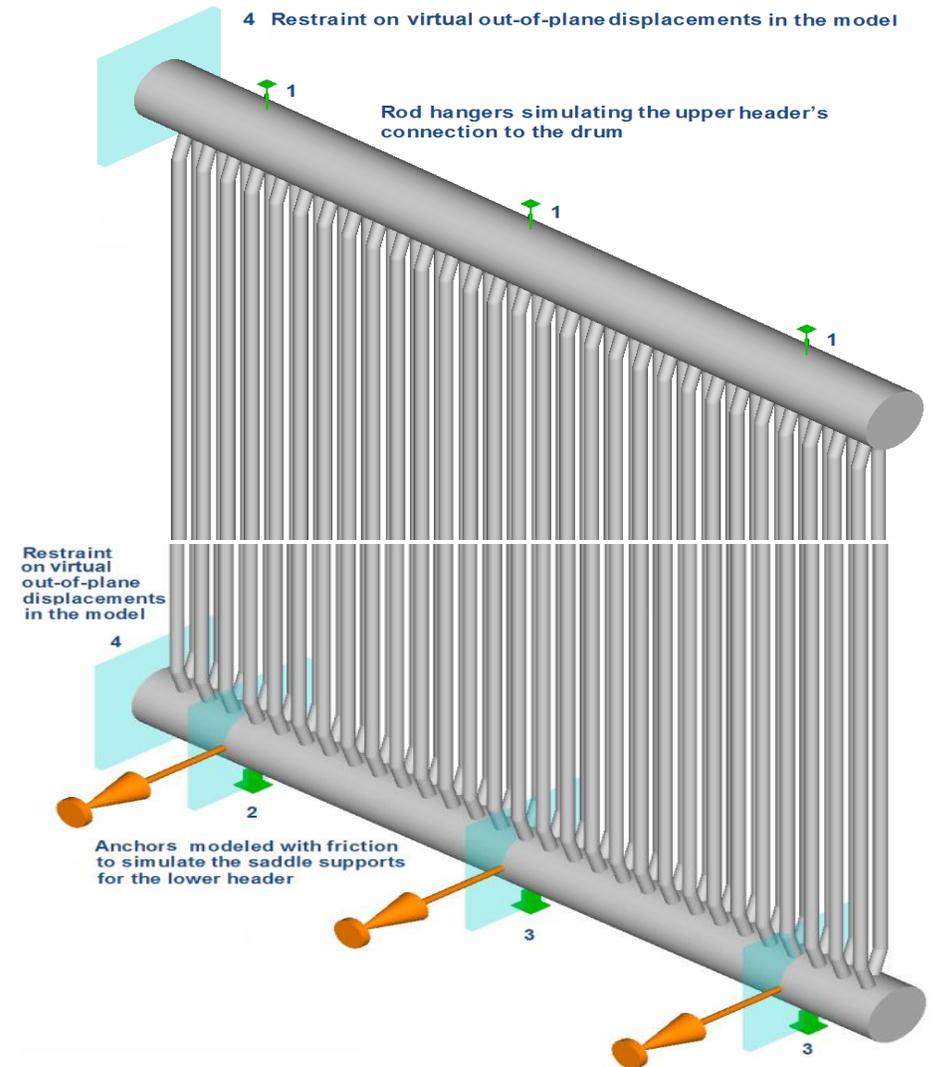
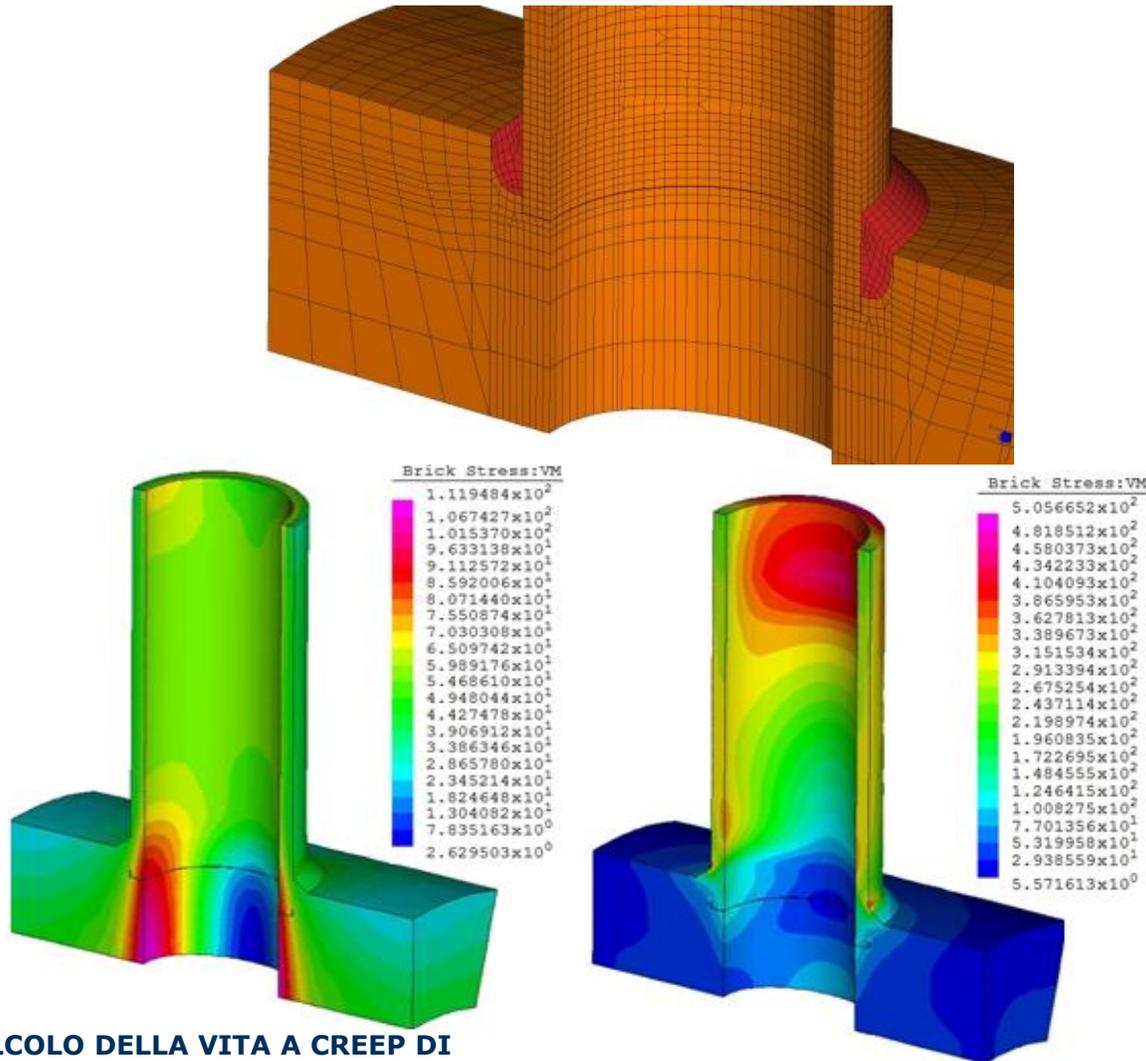
# ESEMPIO DI APPLICAZIONE DEL METODO DI PRIMA SCELTA 5/7

## Modello trovato per il P22, risultati di vita a 538°C 1/3

- **Giunto saldato collettore**, sezione **surriscaldatore** ("reheater") **generatore a recupero** (**intersezione tubo arpa/collettore**, lato collettore ("header tee") e lato tubo ("branch tee"); **saldatura angolare** ("tee weld"), SIF di 2.05).
- Modello polinomiale per il P22 proposto da API 579-1:
$$P_{LM}(\sigma) = (43.981719 - 40.483005 \sigma^{1/2} + 15.373650 \sigma + 0.66049429 \sigma^{1/5}) / (1 - 0.84656117 \sigma^{1/2} + 0.26236081 \sigma - 0.049673781 \sigma^{1/5})$$
- Sollecitazioni applicate ottenute da analisi lineare elastica FEM tridimensionale con classificazione degli sforzi, API 579-1, Level 2.
- **Risultati di vita consistenti** con risultati del modello ottenuto da procedura automatica (condizioni di esercizio future uguali alle presenti, resistenze a caldo affette da 0.8 per la dispersione dei dati sperimentali e da 0.9 per la presenza della saldatura).

# ESEMPIO DI APPLICAZIONE DEL METODO DI PRIMA SCELTA 6/7

## Modello trovato per il P22, risultati di vita a 538°C 2/3



**INAIL** CALCOLO DELLA VITA A CREEP DI  
ATTREZZATURE IN PRESSIONE

SICUREZZA IMPIANTI INDUSTRIALI A PRESSIONE, Udine, 23 Maggio 2018

ORDINE DEGLI INGEGNERI  
PROVINCIA DI UDINE



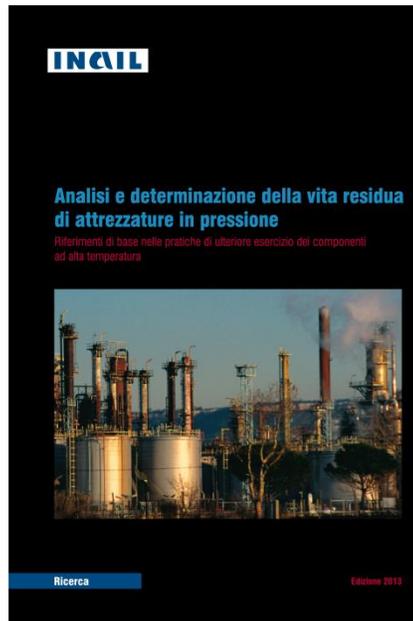
# ESEMPIO DI APPLICAZIONE DEL METODO DI PRIMA SCELTA 7/7

## Modello trovato per il P22, risultati di vita a 538°C 3/3

<b>Risultati di vita a scorrimento viscoso per il P22 a 538° da norma italiana (procedura automatica) e americana (analisi FEM lineare elastica)</b>					Automatic Procedure			3-D FEM Analysis with stress classification (Minimum PLM)				
					R <sub>m</sub> mean values · 0.8 · 0.9			R <sub>m</sub> minimum values				
					REFERENCE			CONSISTENT				
Component selected (Critical zone considered)	P <sub>L</sub> [MPa]				t <sub>r</sub> [hours]			t <sub>r</sub> [hours]				
	FEA stress	Base, H	Base, B	W					Base, Header (H)	Base, Branch (B)	Weld (W)	
52 mm Tube-hole, header tee (Weld, SRF = 0.9)	SOP(PLM) = 121				PLM = 18633 { TR = <b>1991</b>			<b>4150</b>				
52 mm Tube-hole, branch tee (Weld, SRF = 0.9)	SOP(PLM) = 96				PLM = 19285 { TR = <b>11924</b>			<b>47632</b>				
Tee weld, SRF = 0.9 (Header's finned-tube joint, SIF = 2.048)	SOP(PLM) =	124	103	67	PLM =	Base, H	Base, B	Weld				
					TR =	18595 <b>1642</b>	19098 <b>6967</b>	20201 <b>166010</b>	-	<b>2642</b>	<b>7132</b>	<b>82553</b>

# APPENDICE

## Volume monografico, caratteristiche



**Prodotto di sintesi • Ricerca bibliografica**

**Testo divulgativo • Didattica**

**Manuale • Progetto, Controlli**

**Esperienza • Industria, INAIL**

# APPENDICE

## Volume monografico, genesi

- Atti di convegno, Letteratura, Laboratorio
  - > **Relazioni bibliografiche**
  - > **Rapporto finale**
- Pratiche di ulteriore esercizio, Verifiche ex-post
  - > **Volume**



# APPENDICE

## Volume monografico, fonti

	FONTI DI AGGIORNAMENTO									
	Atti di convegno		Letteratura							
	EMAS	ASME	Viswanathan	Cise	L AWF	ISPESL	Daddi	Fossati	Grisolia	Altri (3)
N. di citazioni	57	8	41	11	5	5	5	5	2	3
N. di figure	15	4	30	-	3	2	1	-	2	-
Autorizzate dall'editore	Si	Si	Si		Si				Si	

# APPENDICE

## Volume monografico, contenuti

### **Scorrimento viscoso (creep)**

Meccanismi di governo

Leggi costitutive

Parametri di carico macroscopico

Leggi di crescita di cricche

### **Fatica (in alta temperatura)**

Alto numero di cicli

Basso numero di cicli

Interazione con lo scorrimento viscoso

Fatica termica

### **Metodi analitici**

Somma di frazione di vita

Sovrapposizione lineare del danno

Valutazione non lineare del danno

Prove di interazione creep/fatica

Modelli di crescita di cricche

Esempio d'uso dei modelli analitici

Prove di durata

### **Metodi con rilevazione sull'impianto**

Esami metallografici

- Classificazione di Neubauer

- Curva vita spesa - classe di danno

Misura della tenacità

- Stima della FATT

- Correlazioni con il contenuto di fosforo

- Correlazioni con la T di transizione  
(prove di impatto «small punch»)

Misura dello spessore d'ossido

# APPENDICE

## Volume monografico, contenuti

### **Tubi saldati**

Riduzione della vita a creep

Somma di frazione di vita per il creep

Estrapolazione dalla curva iso-stress

Problemi della saldatura e loro controllo

- Indurimento del metallo base
  - Porosità del metallo di saldatura
  - Intenerimento del metallo base
  - Cricche del metallo di saldatura
  - Cricche del metallo base
- Cricche da creep nelle saldature
- Analisi della vita residua
  - Classificazione delle cricche

### **Trattamenti termici e leghe**

Austenite e fasi strutturali

Trattamenti termici

Tipi di lavorazione

Acciai al carbonio

Acciai legati

Effetti degli elementi di lega

Acciai per getti

Fusioni in acciaio

Acciai inossidabili

### **Appendice**

Parametri integrali di correlazione

Misura sperimentale della velocità di propagazione di cricche ad alta temperatura

Misura dei parametri integrali mediante simulazione numerica di crescita di cricche ad alta temperatura

Risultati delle prove e dell'analisi

FINE

Grazie dell'attenzione!

INGIL

**CALCOLO DELLA VITA A CREEP DI  
ATTREZZATURE IN PRESSIONE**

**SICUREZZA IMPIANTI INDUSTRIALI A PRESSIONE, Udine, 23 Maggio 2018**

 ORDINE DEGLI INGEGNERI  
PROVINCIA DI UDINE

 CONFINDUSTRIA UDINE

Dipartimento Innovazioni Tecnologiche e Sicurezza degli Impianti Prodotti e insediamenti Antropici