



DETERMINAÇÃO DAS CONSTANTES DAS EQUAÇÕES CONSTITUTIVAS DE FLUÊNCIA UTILIZADAS EM MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS

Carlos J. C. de Vilhena

PETROBRAS/CENPES

Cidade Universitária quadra 7, Ilha do Fundão

21949-900 - Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Luiz Landau

José L. D. Alves

COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Civil

Cidade Universitária, Centro de Tecnologia bl. I2000 / MM05D

21949-900 - Rio de Janeiro, RJ, Brasil

***Resumo.** Na modelação do fenômeno de fluência pelo Método dos Elementos Finitos, utilizam-se equações constitutivas que relacionam a taxa de deformação por fluência com o estado de tensão, deformação e temperatura atuantes. Em geral, essas equações são formuladas de maneira genérica, apresentando um conjunto de constantes que devem ser determinadas para cada material e faixa de temperatura. Este trabalho propõe uma metodologia para a determinação dessas constantes baseada no método dos mínimos quadrados. É apresentado também os resultados da aplicação dessa metodologia na determinação das equações constitutivas do Incoloy 800H para temperaturas entre 1200 e 1400 °F.*

***Palavras-chave:** Fluência, Equações Constitutivas para Fluência*

1. INTRODUÇÃO

Para modelar o comportamento de fluência, o método dos elementos finitos requer a definição de equações constitutivas relacionando a taxa de deformação por fluência com a história de carregamento. As equações constitutivas propostas para modelar o comportamento de fluência dos materiais, em geral, baseiam-se na observação dos de ensaios uniaxiais, descrevendo apenas os estágios de fluência primário e secundário. A deformação de fluência é definida como função da tensão, temperatura e tempo, conforme Eq. (1).

$$\varepsilon^c = f(\sigma, T, t) = f_1(\sigma)f_2(T)f_3(t) \quad (1)$$

onde: ε^c - deformação por fluência;

σ - tensão;

T - temperatura absoluta;

t – tempo.

Para que o efeito da variação na tensão e temperatura seja modelado, a equação constitutiva deve considerar a história de carregamento. A formulação utilizada pelo método dos elementos finitos é baseada em equações de estado, onde a resposta do material depende explicitamente do estado corrente. Tomando-se como base a forma diferencial da lei de Bailey-Norton, temos:

$$\dot{\epsilon}^c = \frac{\partial \epsilon^c}{\partial t} = A \sigma^m n t^{n-1} \quad (2)$$

A forma acima é chamada de formulação “time hardening” devido à dependência da taxa de deformação com o tempo. Uma outra formulação chamada de “strain hardening”, que é adotada pela maioria dos programas de elementos finitos, pode ser obtida através da eliminação do tempo como variável:

$$\dot{\epsilon}^c = A^{1/n} n \sigma^{m/n} (\epsilon^c)^{(n-1)/n} \quad (3)$$

2. LEVANTAMENTO DAS PROPRIEDADES DO MATERIAL

As equações constitutivas oferecidas pelos programas de elementos finitos apresentam, em geral, um conjunto de constantes que são dependentes do material. Uma maneira de se calcular essas constantes é através do ajuste da equação escolhida aos resultados de ensaios de fluência do material que se deseja modelar. Nesse trabalho foram escolhidas as duas equações a seguir, que foram utilizadas simultaneamente, ou seja, no cálculo da taxa de deformação por fluência utilizou-se a soma das duas equações. Para modelar a fluência primária foi utilizada a Eq. (4), que é do tipo “strain hardening”, e para a fluência secundária a Eq. (5).

$$\dot{\epsilon}_p^c = f(\epsilon, \sigma, T) = C1 \cdot \sigma^{C2} \cdot \epsilon^{C3} \cdot e^{-C4/T} \quad (4)$$

$$\dot{\epsilon}_s^c = f(\sigma, T) = C7 \cdot \sigma^{C8} \cdot e^{-C10/T} \quad (5)$$

onde: $\dot{\epsilon}_p^c$ - taxa de deformação por fluência primária;
 $\dot{\epsilon}_s^c$ - taxa de deformação por fluência secundária;
 ϵ - deformação total equivalente;
 σ - tensão equivalente;
T - temperatura absoluta;
e - base neperiana.

As informações necessárias para o cálculo das constantes foram levantadas das curvas tensão-deformação isocronológicas do Incoloy 800H dadas pelas figuras T-1800-C-1/12 do Code Case N-47 (ASME, 1990). Uma curva isocronológica apresenta a deformação total em função da tensão atuante, para uma dada temperatura e um dado tempo decorrido. Para cada valor de temperatura, as figuras do Code Case N-47 apresentam a curva tensão-deformação instantânea e as curvas tensão-deformação referentes a tempos variando de 1h a 300000h. A partir dessas curvas, foi possível levantar pares de pontos deformação total *versus* tempo, formando-se um conjunto desses pontos para cada valor de tensão e temperatura, conforme

exemplo da tabela 1.

TABELA 1 - Exemplo de valores de deformação *versus* tempo obtidos das curvas isocronológicas para o Incoloy 800H (temperatura = 1200 °F e tensão = 14000 psi)

tempo (h)	1x10 ⁰	3x10 ⁰	1x10 ¹	3x10 ¹	1x10 ²	3x10 ²	1x10 ³	3x10 ³	1x10 ⁴	3x10 ⁴	1x10 ⁵
def. total	4,40 x10 ⁻⁴	6,62 x10 ⁻⁴	8,09 x10 ⁻⁴	9,57 x10 ⁻⁴	1,25 x10 ⁻³	1,69 x10 ⁻³	2,58 x10 ⁻³	4,00 x10 ⁻³	7,06 x10 ⁻³	1,18 x10 ⁻²	2,15 x10 ⁻²

Das curvas isocronológicas foram levantados conjuntos de pontos de deformação total *versus* tempo para temperaturas de 1000 °F, 1100 °F, 1200 °F, 1300 °F e 1400 °F, e diversos níveis de tensão, totalizando vinte e seis conjuntos semelhantes ao exemplo da tabela 1. Para cada conjunto de pontos, referente a um determinado valor de tensão e temperatura, foi assumido que a deformação total referente ao instante inicial seria dada apenas pela parcela elástica. Para cada conjunto de pontos, o instante inicial foi definido com um valor pequeno para o tempo (1 h ou 0,1 h dependendo do caso) se comparado com os demais valores do mesmo conjunto. Um valor nulo para o tempo do instante inicial traria problemas no cálculo da função aproximada, devido a necessidade de se calcular o logaritmo do mesmo.

No entanto, os valores de deformação levantados não puderam ser aplicados diretamente no cálculo das constantes, já que as informações requeridas para esse cálculo são as taxas de deformação e não as deformações. Além disso, em cada conjunto de pontos os valores lidos para a deformação corresponderam à soma das parcelas elástica, plástica e de fluência. Como a deformação total que aparece na equação constitutiva para fluência primária corresponde apenas às parcelas elástica e de fluência, foi necessário descontar a parte plástica dos valores levantados. O valor da deformação plástica foi obtido também das figuras do Code Case N-47, conforme esquematizado na figura 1.

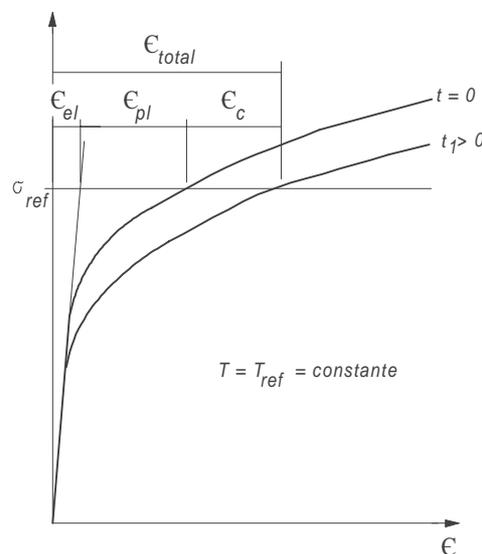


FIG. 1 - Parcelas que compõem o valor de deformação total lido das curvas isocronológicas.

Assim sendo, no cálculo das constantes foi adotada uma estratégia que compreendeu as seguintes etapas:

1) a parcela de deformação plástica foi subtraída dos valores de deformação levantados para cada conjunto de pontos;

2) a partir desses valores corrigidos, foram geradas funções aproximadas $\epsilon = f(t)$ para cada conjunto de pontos;

3) as derivadas dessas funções foram calculadas, sendo geradas as informações de taxa de deformação em função da deformação total para cada valor de tensão e temperatura;

4) essas informações foram então utilizadas para ajustar as equações constitutivas, obtendo-se como resultado as constantes das equações (4) e (5).

3 CÁLCULO DAS FUNÇÕES APROXIMADAS $\epsilon = f(t)$

Na determinação da função aproximada para cada conjunto de pontos foi utilizado o método dos mínimos quadrados. Segundo DORN (1978), a função que melhor aproxima um conjunto de pontos cujo gráfico de $\log y$ em função de $\log x$ se aproxima de uma reta, é a curva geométrica $y = a x^b$. No entanto, os resultados obtidos com essa aproximação não foram muito bons. Adotou-se, então, um procedimento um pouco mais elaborado, também sugerido por DORN, no qual adiciona-se uma reta à curva geométrica, conforme Eq. (6)

$$y = a x^b + c x + d \quad (6)$$

onde: y - corresponde à deformação total;

x - corresponde ao tempo.

Essa forma de função se mostrou mais apropriada para aproximar os valores de deformação em função do tempo provenientes do efeito combinado da fluência primária e secundária. No entanto, para esse tipo de função aproximada a regressão por mínimos quadrados não pode ser aplicada diretamente, já que não existe manipulação matemática que transforme o expoente b em um coeficiente multiplicador. No caso da curva geométrica essa transformação é feita através da aplicação do logaritmo nos dois lados da equação $y = a x^b$, que não surte efeito na equação (6) devido à presença dos termos lineares.

O procedimento apresentado por DORN sugere a adoção de um artifício no qual uma parte das constantes são calculadas em separado, sendo então substituídas na função aproximada para o cálculo das demais. Para a função dada pela equação (6), se as constantes referentes à reta fossem conhecidas, seria possível calcular as demais constantes através de uma regressão por mínimos quadrados. Subtraindo-se os termos referentes à reta, tem-se:

$$y - c x - d = a x^b \quad (7)$$

Definindo-se: $z = a x^b = y - c x - d \quad (8)$

Aplicando-se o logaritmo na equação acima:

$$\ln(z) = A + B \cdot \ln(x) \quad (9)$$

onde: $A = \ln(a)$ e $B = b \quad (10)$

Segundo o método dos mínimos quadrados, a expressão do erro entre os valores calculados pela função aproximada (8) e os valores dos m pontos amostrais (x_i, z_i) é dada por:

$$\text{Erro} = \sum_{i=1}^m [\ln(z_i) - A - B \cdot \ln(x_i)]^2 \quad (11)$$

Para que esse erro seja mínimo, suas primeiras derivadas parciais com respeito às constantes incógnitas devem ser nulas. A solução do sistema de duas equações e duas incógnitas decorrente resulta em:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^m \ln(z_i) \cdot \sum_{i=1}^m [\ln(x_i)]^2 - \sum_{i=1}^m \ln(x_i) \cdot \sum_{i=1}^m [\ln(z_i) \cdot \ln(x_i)]}{m \cdot \sum_{i=1}^m [\ln(x_i)]^2 - \left[\sum_{i=1}^m \ln(x_i) \right]^2} \quad (12)$$

$$B = \frac{m \cdot \sum_{i=1}^m [\ln(z_i) \cdot \ln(x_i)] - \sum_{i=1}^m \ln(x_i) \cdot \sum_{i=1}^m \ln(z_i)}{m \cdot \sum_{i=1}^m [\ln(x_i)]^2 - \left[\sum_{i=1}^m \ln(x_i) \right]^2} \quad (13)$$

As expressões anteriores foram implementadas em um programa de planilha eletrônica, sendo criada uma planilha para cada conjunto de pontos. Com a automação decorrente foi possível adotar um processo de tentativa e erro para o cálculo das constantes, a partir da manipulação das constantes referentes à reta. Inicialmente foi atribuída à constante “c” o valor correspondente à inclinação do segmento de reta ligando os dois últimos pontos amostrais, e à constante “d” o valor correspondente à deformação do instante inicial. Baseado na comparação entre os gráficos correspondentes à curva aproximada e aos pontos amostrais, conforme exemplo da figura 2, foi possível verificar os resultados e variar manualmente os valores das constantes c e d, de forma a melhorar a aproximação.

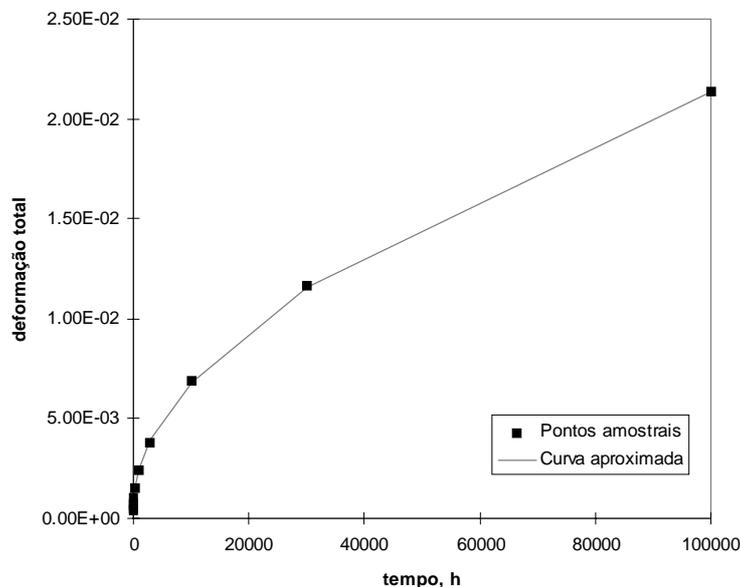


FIG. 2 - Comparação entre a curva aproximada e os pontos amostrais para o conjunto da tabela 1.

Ao final desse processo obteve-se uma função aproximada com a forma da equação (6) para cada conjunto de pontos. O valor da taxa de deformação referente a cada ponto amostral de cada conjunto de pontos foi então calculado a partir da derivada da função aproximada:

$$\dot{\epsilon}^c = \frac{dy}{dx} = a \cdot b \cdot x^{b-1} + c \quad (14)$$

Foram então definidos novos conjuntos de pontos amostrais, relacionando a taxa de deformação calculada pela equação (14) com a deformação total, para cada valor de tensão e temperatura. Esses conjuntos foram utilizados no ajuste das equações constitutivas.

4. CÁLCULO DAS CONSTANTES DAS EQUAÇÕES CONSTITUTIVAS

Para o ajuste da função dada pela soma das equações (4) e (5) aos pontos levantados no item anterior, adotou-se, mais uma vez, o método dos mínimos quadrados. No entanto, a forma da função resultante não permite a aplicação direta desse método, devido à mesma dificuldade observada na equação (6), ou seja, não existe manipulação matemática que permita transformar as constantes que estão na forma de expoentes em multiplicadores.

Para superar essa dificuldade, adotou-se um artifício semelhante ao utilizado no item anterior, no qual as constantes referentes à parcela secundária foram calculadas em separado, sendo então substituídas na equação geral para o cálculo das demais. Assim sendo, o cálculo das constantes foi feito em duas etapas:

1) Inicialmente, as constantes C7, C8 e C10 referentes à fluência secundária foram calculadas assumindo-se que a taxa de deformação para o tempo 100000h seria dada apenas pela parcela secundária. Os valores amostrais referentes a esse instante de tempo de cada conjunto de pontos foram separados, formando um subconjunto que foi aproximado pela equação (5) através do método dos mínimos quadrados.

2) Para cada conjunto de pontos amostrais, a parcela secundária da taxa de deformação foi calculada pela equação (5) em função da tensão e da temperatura correspondentes, e foi subtraída dos valores amostrais de taxa de deformação referentes à todos os instantes de tempo, inclusive o ponto de 100000h. Os valores resultantes foram então aproximados pela equação (4), novamente utilizando o método dos mínimos quadrados.

4.1 Cálculo das Constantes da Parcela Secundária

Aplicando-se o logaritmo nos dois lados da equação (5):

$$\ln(\dot{\epsilon}_s^c) = A + B \cdot \ln(\sigma) + \frac{C}{T} \quad (15)$$

onde: $A = \ln(C7)$, $B = C8$ e $C = - C10$ (16)

A expressão do erro entre os valores calculados pela função aproximada (5) e os valores dos m pontos amostrais $(\dot{\epsilon}_i, \sigma_i, T_i)$ referentes aos instantes de tempo com 100000h de cada conjunto de pontos, é dada por:

$$\text{Erro} = \sum_{i=1}^m \left[\ln(\dot{\epsilon}_i) - A - B \cdot \ln(\sigma_i) - C \cdot \frac{1}{T_i} \right]^2 \quad (17)$$

Para que esse erro seja mínimo, suas primeiras derivadas parciais com respeito às constantes incógnitas devem ser nulas. Tem-se, então:

$$\frac{\partial \text{Erro}}{\partial A} = 0 \quad \frac{\partial \text{Erro}}{\partial B} = 0 \quad \frac{\partial \text{Erro}}{\partial C} = 0 \quad (18)$$

Gerando-se um sistema de três equações e três incógnitas.

4.2 Cálculo das Constantes da Parcela Primária

Aplicando-se o logaritmo nos dois lados da equação (4):

$$\ln(\dot{\epsilon}_p^c) = A + B \cdot \ln(\sigma) + C \cdot \ln(\epsilon) + \frac{D}{T} \quad (19)$$

$$\text{onde:} \quad A = \ln(C1) \quad , \quad B = C2 \quad , \quad C = C3 \quad \text{e} \quad D = -C4 \quad (20)$$

A expressão do erro entre os valores calculados pela função aproximada (4) e os valores dos n pontos amostrais $(\dot{\epsilon}_{pi}, \epsilon_i, \sigma_i, T_i)$, é dada por:

$$\text{Erro} = \sum_{i=1}^n \left[\ln(\dot{\epsilon}_{pi}) - A - B \cdot \ln(\sigma_i) - C \cdot \ln(\epsilon_i) - D \cdot \frac{1}{T_i} \right]^2 \quad (21)$$

$$\text{onde:} \quad \dot{\epsilon}_{pi} = \dot{\epsilon}_i - C7 \cdot \sigma_i^{C8} \cdot e^{-C10/T_i} \quad (22)$$

Os valores amostrais referentes à taxa de deformação primária foram calculados pela equação (22) para todos os instantes de tempo de cada conjunto de pontos, inclusive aqueles referentes a um tempo de 100000 h. O objetivo de incluir todos os instantes de tempo foi o de influenciar o cálculo da função aproximada para a parcela primária no sentido dos resultados gerados tenderem para números pequenos, se comparados com a parcela secundária, para tempos tendendo a 100000 h. Para os pontos onde a aplicação da equação (22) resultou em valores negativos, cujo logaritmo não poderia ser calculado, foi atribuído à taxa de deformação primária um valor igual a 1/100 do taxa de deformação secundária.

Para que o erro definido acima seja mínimo, suas primeiras derivadas parciais com respeito às constantes incógnitas devem ser nulas. Tem-se, então:

$$\frac{\partial \text{Erro}}{\partial A} = 0 \quad \frac{\partial \text{Erro}}{\partial B} = 0 \quad \frac{\partial \text{Erro}}{\partial C} = 0 \quad \frac{\partial \text{Erro}}{\partial D} = 0 \quad (23)$$

Gerando-se um sistema de quatro equações e quatro incógnitas.

4.3 Implementação do Cálculo das Constantes

A construção e solução dos dois sistemas de equações vistos acima foi feita através de um programa em FORTRAN, que foi aplicado em três conjuntos distintos de valores amostrais, gerando os seguintes grupos alternativos de constantes:

1) grupo E4 - contribuíram os pontos amostrais levantados para temperaturas de 1000 °F, 1200 °F e 1400 °F;

2) grupo E5 - contribuíram os pontos amostrais levantados para temperaturas de 1200 °F, 1300 °F e 1400 °F;

3) grupo E6 - contribuíram os pontos amostrais levantados para temperaturas de 1000 °F, 1100 °F, 1200 °F, 1300 °F e 1400 °F.

Os resultados obtidos para cada grupo de constantes estão apresentados na tabela 2.

TABELA 2 - Constantes de fluência.

Constante	Grupo E4	Grupo E5	Grupo E6
C1	$1,0071 \times 10^{-30}$	$5,8066 \times 10^{-27}$	$2,0713 \times 10^{-31}$
C2	11,7868	12,1772	12,0102
C3	-1,5344	-1,3241	-1,7016
C4	109379	128781	112221
C7	$4,1747 \times 10^{-13}$	$1,9683 \times 10^{-11}$	$9,1692 \times 10^{-13}$
C8	5,2557	6,6055	5,1889
C10	62043	89937	62475

4.4 Análise dos Resultados e Alternativas

A análise dos valores obtidos para as constantes de cada grupo alternativo foi feita de duas formas distintas. Inicialmente foi feita uma comparação gráfica entre os valores da taxa de deformação calculados pelas equações (4) e (5) com os respectivos valores dados pela equação (14). Um exemplo desses gráficos está apresentado na figura 3.

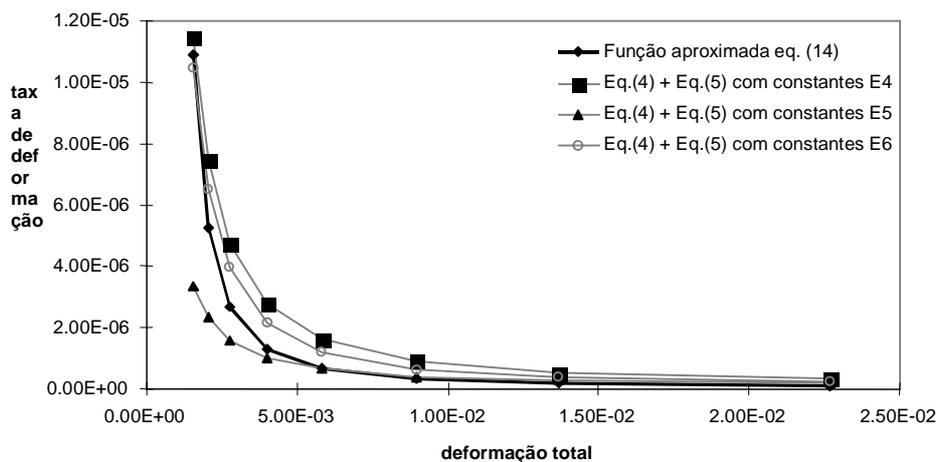


FIG. 3 - Taxa de deformação *versus* deformação total (temp.=1100 °F e tensão=22000 psi).

Da análise dos diversos gráficos gerados, as seguintes conclusões foram tiradas:

1) Os resultados obtidos com as constantes E5 foram bem piores que os obtidos com os outros dois grupos para temperaturas abaixo da faixa utilizada na sua determinação, ou seja, 1000 °F e 1100 °F.

2) Os resultados obtidos com as constantes E5 foram melhores que os obtidos com os outros dois grupos para temperaturas dentro da faixa utilizada na sua determinação, ou seja, de 1200 °F a 1400 °F.

3) A taxa de deformação para tempos curtos foi subestimada para valores baixos de temperatura (1000 °F) e superestimada para valores altos (1400 °F).

A segunda parte da análise dos resultados foi feita através de modelos do programa ANSYS 5.3 simulando ensaios de fluência, ou seja, modelos unidimensionais representando uma barra com seção constante e submetida a valores uniformes e constantes de tensão e temperatura. O objetivo básico desses modelos foi reproduzir as condições teóricas necessárias

para se obter os valores de deformação apresentados nas curvas isocronológicas do Code Case N-47.

Nesses modelos foi utilizado o elemento de viga BEAM23 (ANSYS, 1996), tendo sido gerado um conjunto de modelos para cada grupo de constantes. Os valores de temperatura, tensão e tempo aplicados aos modelos foram os mesmos utilizados no levantamento dos pontos amostrais, permitindo uma comparação direta dos resultados.

Para cada modelo foram gerados os resultados de deformação total (elástica+ fluência), que foram comparados com os valores amostrais, sendo calculado o Fator de Proporção (FP) pela seguinte relação:

$$FP = \frac{\text{def. total dada pelo ANSYS}}{\text{def. total amostral}} \quad (24)$$

Os resultados em termos do Fator de Proporção para os diversos modelos de cada grupo de constantes foram tabulados. A partir desses resultados foram gerados gráficos da dispersão de FP em função do tempo, da temperatura e da tensão, conforme exemplo da figura 4.

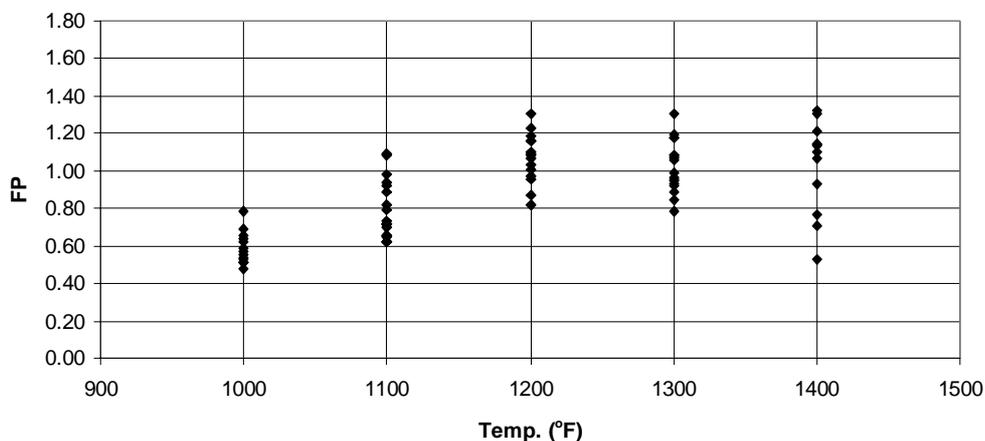


FIG. 4 - Gráficos de dispersão de FP *versus* temperatura (baseados nos resultados para temperaturas de 1000 °F a 1400 °F).

A análise desses gráficos permitiu observar que nenhum dos três grupos de constantes apresentou tendência de concentração do FP para um determinado valor de tempo ou tensão.

Já em relação à temperatura, foi observado que o grupo E5 apresentou as faixas de dispersão para cada valor de temperatura mais estreitas do que os outros grupos. Entende-se por faixa de dispersão a diferença entre os valores máximo e mínimo de cada conjunto de resultados de FP referentes a um determinado valor de tempo, temperatura ou tensão.

Um resumo dos resultados obtidos com o três grupos de constantes é apresentado na tabela 3, onde, além dos valores máximo e mínimo, está apresentada também a faixa de concentração dos resultados de FP. Essa faixa de concentração corresponde aos valores extremos de FP entre os quais se concentra a maioria dos resultados para cada grupo de constantes, obtidos diretamente da observação dos gráficos de dispersão.

Os resultados destacados acima indicaram uma certa vantagem para o grupo de constantes E5. No entanto, visando confirmar essa tendência outros gráficos de dispersão foram gerados utilizando apenas os resultados referentes a temperaturas de 1200 °F, 1300 °F e 1400 °F, que correspondem à faixa utilizada no cálculo do grupo E5. Os valores de temperatura entre 1200 °F e 1400 °F correspondem à faixa de maior interesse prático, já que a mesma estará sempre associada aos maiores valores de deformação por fluência.

TABELA 3 - Resumo dos resultados de FP (para temperaturas de 1000 °F a 1400 °F).

Constantes	FP máx.	FP mín.	Faixa de concentração
E4	1,791	0,358	0,6 a 1,6
E5	1,319	0,475	0,5 a 1,3
E6	1,560	0,336	0,6 a 1,4

A análise desses novos gráficos confirmou as tendências observadas anteriormente. Um resumo dos resultados obtidos é apresentado na tabela 4.

TABELA 4 - Resumo dos resultados de FP (temperaturas de 1200 °F a 1400 °F).

Constantes	FP máx.	FP mín.	Faixa de concentração
E4	1,646	0,358	0,6 a 1,4
E5	1,319	0,529	0,7 a 1,3
E6	1,560	0,336	0,6 a 1,4

5. CONCLUSÃO

Baseado nos resultados e observações apresentados acima, decidiu-se adotar o grupo de constantes E5 para modelar o comportamento de fluência do Incoloy 800H. As equações constitutivas (4) e (5) foram utilizadas em modelos de elementos finitos simulando o comportamento inelástico de componentes de tubulação submetidos a carregamentos cíclicos de natureza termo-mecânica. Os resultados obtidos para a faixa de 1200 °F a 1400 °F foram considerados bastante razoáveis. Um erro de $\pm 30\%$ no cálculo das deformações por fluência, conforme apresentado na tabela 4 para a faixa de concentração de FP do grupo E5, foi considerado dentro da faixa tolerável para os modelos empregados nesse trabalho.

REFERÊNCIAS

- ANSYS, 1996, *Elements Reference*, Release 5.3, Houston, ANSYS Inc.
- ASME, 1990, *Boiler and Pressure Vessel Code Case N-47-29 - Class 1 Components in Elevated Temperature Service*, New York, The American Society of Mechanical Engineers.
- DORN, W.S., McCRACHEN, D.D., 1978, *Cálculo Numérico com Estudos de Casos em Fortran IV.*, 1ª ed., Rio de Janeiro, Editora Campus.

DETERMINATION OF THE CONSTANTS FOR CREEP CONSTITUTIVE EQUATIONS USED ON FINITE ELEMENTS MODELS

Abstract. *To represent the creep behavior of the materials, the Finite Element Method usually uses constitutive equation establishing the creep strain rate as a function of the stress, total strain and temperature. Normally, these equations presents a group of constants to be determinated for each material and temperature range. This work proposes a methodology to the determination of these constants based on the Minimum Square Method. The results of the application of these methodology to the determination of the constitutive equations for the Incoloy 800H submitted to temperatures between 1200 e 1400 °F, are also presented.*

Key-words: *Creep, Constitutive equations for creep*