

VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM MODELO ANALÍTICO NUMÉRICO PARA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE JOHNSON & COOK PARA O AÇO AISI 1045*

Carlos Alberto Alves Viana¹
Gustavo Fernando Scaduto²
Miguel Ângelo Menezes³

Resumo

O presente trabalho possibilita o entendimento e a análise dos processos de conformação a quente dos metais. Isto, pela validação experimental do modelo de Johnson-Cook, para descrever o comportamento dos materiais no regime plástico, para grandes deformações, às altas taxas de deformações e nas altas temperaturas. Um entendimento dos parâmetros do modelo, utilizando-se um método analítico numérico simples, rápido e confiável foi desenvolvido anteriormente pela linha de pesquisa em Conformação Plástica dos Metais na UNESP – Campus de Ilha Solteira, obtendo-se as constantes empíricas do modelo referido. É proposto nesse trabalho a validação experimental do método simplificado para determinação dos parâmetros empíricos do modelo de Johnson-Cook através de um ensaio de tração a quente, considerando as propriedades mecânicas dos materiais analisados experimentalmente e/ou de dados de materiais disponíveis na literatura. De maneira geral, os resultados experimentais foram satisfatórios para o aço AISI 1045 à temperatura de 500 °C, ensaiado à taxa de deformação de 1000 s⁻¹, quando comparados aos resultados teóricos previstos pelo modelo proposto por SCADUTO e MENEZES. Particularmente, foi possível evidenciar erros máximos de 1,33% para o parâmetro n , 13,15% para o parâmetro B , 295,00% para o parâmetro C e 4,14% para o parâmetro m .

Palavras-chave: Modelo de Johnson-Cook; Conformação Plásticas dos Metais; Trabalho a quente; Processos de Fabricação.

EXPERIMENTAL VALIDATION OF A NUMERICAL ANALYTICAL MODEL FOR DETERMINING JOHNSON-COOK'S PARAMETERS OF AISI 1045 STEEL

Abstract

Present work makes possible the understanding and the analysis of hot forming process of metals. It is done by experimental validation of the Johnson-Cook model to describe the behavior of materials in the plastic regime, at large deformations, high deformation rates and high temperatures. An understanding of parameters of the model using a simple, fast and reliable analytical numerical method was previously developed by research area in Plastic Forming of Metals at UNESP - Ilha Solteira Campus, obtaining the empirical constants of the model mentioned. This work proposes the experimental validation of the simplified method for determination of empirical parameters of Johnson-Cook's model, through a heat traction test, considering the mechanical properties of experimentally analyzed materials and material data available in the literature. In general, the experimental results were satisfactory for AISI 1045 steel at temperature of 500 °C, tested at the strain rate of 1000 s⁻¹, when compared to theoretical results predicted by the model proposed by SCADUTO and MENEZES. In particular, it was possible to show maximum errors of 1,33% for parameter n , 13.15% for parameter B , 295.00% for parameter C and 4.14% for parameter m .

Keywords: Johnson-Cook's model; Forming of Metals; Hot working; Manufacturing Processes.

- ¹ *Engenheiro Mecânico, Departamento de Engenharia Mecânica - Área de Materiais e Processos de Fabricação, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS), Ilha Solteira, São Paulo, Brasil.*
- ² *Engenheiro Mecânico, Departamento de Engenharia Mecânica - Área de Materiais e Processos de Fabricação, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS), Ilha Solteira, São Paulo, Brasil.*
- ³ *Professor Assistente Doutor PhD., Departamento de Engenharia Mecânica - Área de Materiais e Processos de Fabricação, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS), Ilha Solteira, São Paulo, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Diversos modelos empíricos e semi-empíricos são atualmente utilizados para a determinação da plasticidade computacional e, segundo Hoge & Mukherjee [1], o modelo de Johnson-Cook [2] é o mais comumente utilizado, apesar de ser puramente empírico. No entanto, não existe atualmente uma metodologia normalizada para calcular com precisão o modelo de Johnson-Cook, levando cada usuário a desenvolver seu próprio método. A equação (1) empregada neste trabalho fornece a tensão do material, no modelo de Johnson-Cook, que descreve o comportamento plástico a altas taxas de deformação e altas temperaturas.

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left[1 + C \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_f - T_0}\right)^m \right] \quad (1)$$

A variação da temperatura pode ser calculada pela equação (2), onde β é o coeficiente de Taylor-Quinney, ρ massa específica e c_p o calor específico do material.

$$\Delta T = \frac{\beta}{\rho c_p} \int \sigma d\varepsilon \quad (2)$$

O primeiro termo da equação (1) corresponde à parte elástica-plástica, o segundo termo ao termo viscoso e o terceiro ao amolecimento térmico. Utilizando o método proposto, para determinar o fator pré-exponencial (B) e o expoente de encruamento (n) é necessário analisar apenas o termo elástico-plástico. Sabe-se que a constante A é o limite de escoamento do material. No entanto, com dois fatores desconhecidos, duas equações são necessárias, calculadas com dois pontos na curva tensão-deformação, para determinar os parâmetros (B) e (n), como mostrado na equação (3).

$$\begin{cases} \sigma_1 = (A + B\varepsilon_1^n) \\ \sigma_2 = (A + B\varepsilon_2^n) \end{cases} \quad (3)$$

Com o devido desenvolvimento matemático, o expoente de endurecimento (n) pode ser determinado diretamente, de acordo com a equação (4).

$$n = \frac{\log\left(\frac{\sigma_2 - A}{\sigma_1 - A}\right)}{\log\left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}\right)} \quad (4)$$

Com o resultado da equação (4), o parâmetro (B) pode ser isolado na equação (3) para ser determinado diretamente com a equação (5).

$$B = \frac{\sigma_1 - A}{\varepsilon_1^n} \quad (5)$$

Adicionando-se o termo viscoso, e após as manipulações necessárias, Scaduto e Menezes [3] consideram como taxa de deformação de referência $\dot{\varepsilon}_0 = 1.0$. Dessa maneira, o parâmetro (C), chamado de fator da taxa de deformação pode ser determinado pela equação (6).

$$C = \frac{1}{\ln \dot{\epsilon}} \left(\frac{\sigma}{A+B\dot{\epsilon}^n} - 1 \right) \quad (6)$$

E finalmente, com a adição do termo de amolecimento térmico, é possível manipular a equação resultante, determinando-se assim o parâmetro (m), chamado de fator do amolecimento térmico, como mostrado na equação (7).

$$m = \frac{\log \left| \frac{\sigma}{(A+B\dot{\epsilon}^n)(1+C \ln \dot{\epsilon})} - 1 \right|}{\log \left(\frac{T-T_0}{T_f-T_0} \right)} \quad (7)$$

Para determinar a curva tensão-deformação através dos parâmetros de Johnson-Cook, não é suficiente aplicá-los diretamente na equação (1), uma vez que é necessário um método iterativo. Inicialmente, uma aproximação inicial deve ser realizada para determinar a tensão, subtraindo da equação (1) o termo de amolecimento térmico, uma vez que nenhuma informação de temperatura está disponível, e para determiná-la, o campo de tensão é necessário. Após a aproximação inicial, um intervalo de temperatura inicial ΔT deve ser obtido pela equação (2). Com isso, a determinação do campo de temperatura do material, considerando o termo de abrandamento térmico. O próximo passo é recalculá-lo o intervalo inicial ΔT , reaplicando-o na equação (1), repetindo iterativamente, até que um erro mínimo aceitável seja obtido. No final do processo, uma curva pode ser traçada com o vetor de tensões e suas respectivas deformações, como mostrado por Scaduto e Menezes [3].

Para comprovar a eficácia do método proposto, a metodologia foi implementada com o software MatLab®, realizando análises para diferentes materiais, com propriedades disponíveis na literatura, a altas taxas de deformação para avaliar em quais pontos da curva tensão-deformação disponível os melhores valores dos parâmetros do modelo de Johnson-Cook são obtidos a taxas de deformação consideradas altas (originalmente de 1000, 10000 e 100000 1/s).

1.1 Desenvolvimento Numérico – Aço AISI 1045

Com o algoritmo numérico, Scaduto e Menezes consegue gerar a curva tensão-deformação do material nas condições citadas, de maneira a recalculá-lo, em seguida, os parâmetros de Johnson-Cook obtendo-se os valores teóricos.

A demonstração que segue, refere-se ao modelo aplicado no aço AISI 1045 à temperatura de 500 °C. Os parâmetros Johnson-Cook propostos em literatura por Altasim Technologies [1] para o aço AISI 1045 são mostrados na tabela (1). As propriedades do material analisado são mostradas na tabela (2).

Tabela 1. Parâmetros de J&C teóricos para o aço AISI 1045.

Parâmetro	Valor
A	553,1 MPa
B	600,8 MPa
C	0,0134
m	1,0
n	0,234

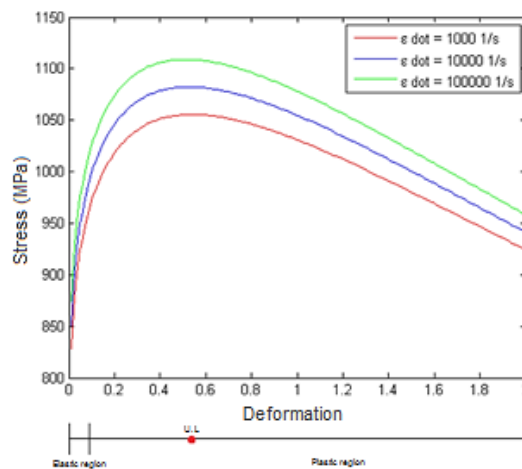
Fonte: Altasim Technologies (2017).

Tabela 2. Propriedades do material aço AISI 1045.

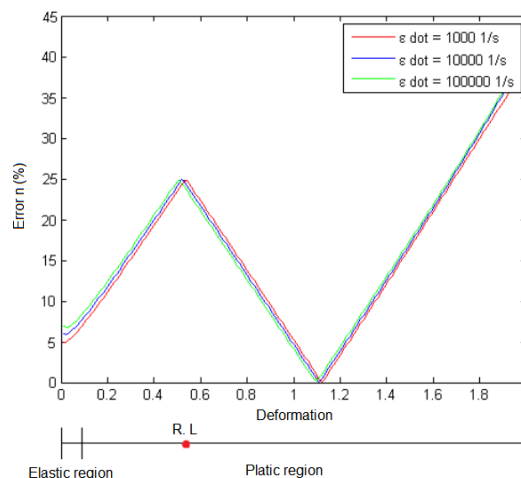
Parâmetro	Valor
Módulo de Elasticidade	200 x 108
Densidade	7830 kg/m ³
Calor específico	477 kJ/kg.K
Temperatura de referência	293 K
Temperatura de fusão	1.793 K

Fonte: Altasim Technologies (2017).

Dessa maneira, é possível plotar-se a curva tensão-deformação do aço AISI 1045 na temperatura de referência, como pode ser visto na figura (1).

**Figura 1.** Curva tensão-deformação do aço AISI 1045 para três taxas de deformação.

Tomando-se inicialmente o expoente de encruamento n do modelo de Johnson-Cook, tem-se uma comparação entre o valor obtido pelo método proposto com a equação (4) e o valor teórico. A figura (2) apresenta a variação do erro do parâmetro n para o aço AISI 1045, para cada nível de deformação utilizando três taxas de deformação consideradas altas.

**Figura 2.** Variação de erro do parâmetro n para o aço AISI 1045 para três taxas de deformação.

Percebe-se que o erro tende a zero em um valor de deformação de aproximadamente 1,12. É uma faixa aceitável de erro, em que se obtém os melhores resultados do parâmetro n , para o aço AISI 1045, entre 1 e 1,2, o que corresponde a um erro de aproximadamente 5%.

Pela ordem proposta, o próximo parâmetro a ser calculado é o fator pré-exponencial B , através da equação (5). A figura (3) apresenta a variação do erro do parâmetro B para o aço AISI 1045, para cada nível de deformação.

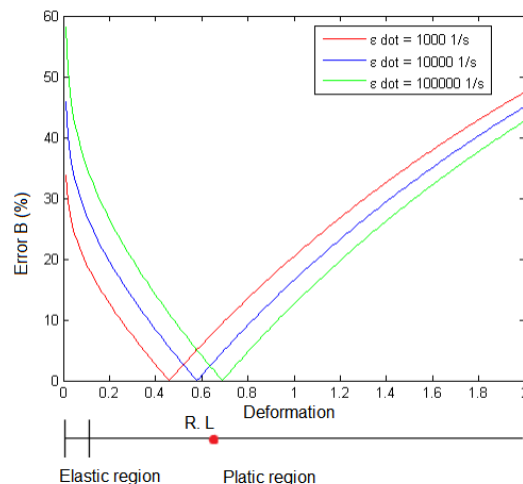


Figura 3. Variação de erro do parâmetro B para o aço AISI 1045 para três taxas de deformação.

Nota-se que o erro tende a zero quando a deformação está próxima do limite de resistência do material, na faixa de deformação entre 0,4 e 0,8, levando a um erro de aproximadamente 4%.

O terceiro parâmetro a ser calculado é o fator da taxa de deformação C , através da equação (6). A figura (4) apresenta a variação do erro do parâmetro C para o aço AISI 1045, para cada nível de deformação.

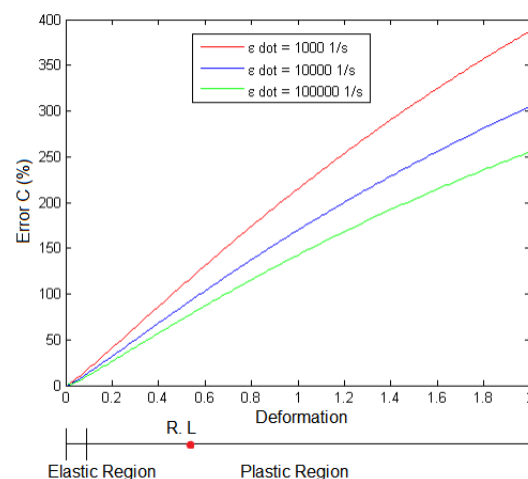


Figura 4. Variação de erro do parâmetro C para o aço AISI 1045 para três taxas de deformação.

Verifica-se que o erro tende a zero quando a deformação é nula, ou na região elástica com um erro de aproximadamente 10%. No entanto, quanto menor a taxa de deformação, menor é o erro. O quarto, e último parâmetro, a ser determinado é o expoente do amolecimento térmico m , através da equação (7). A figura (5) apresenta

a variação do erro do parâmetro m para o aço AISI 1045, para cada nível de deformação.

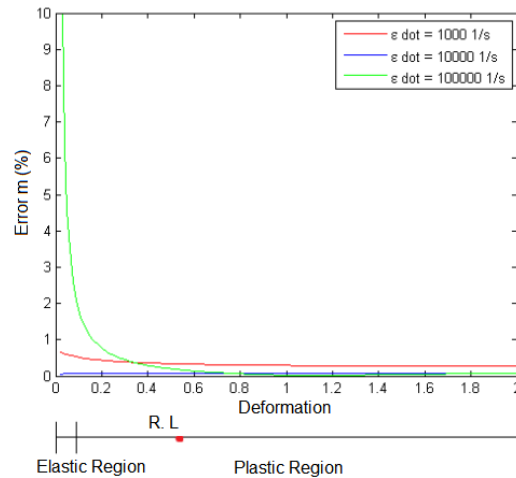


Figura 5. Variação de erro do parâmetro m para o aço AISI 1045 para três taxas de deformação.

Observa-se que, o erro tende a zero quando a curva entra na região plástica, obtendo-se melhores valores para grandes níveis de deformação, a erros menores que 1%.

Conclui-se que os erros obtidos para o parâmetro m são menores que o dos outros parâmetros, pois, neste último parâmetro utiliza-se a equação completa do modelo de Johnson-Cook, diferentemente dos outros parâmetros, em que se utiliza uma formulação numérica mais aproximada.

2 DESENVOLVIMENTO

Assim, com o material disponibilizado, confeccionou-se os corpos de prova para o ensaio de tração a quente e alta taxa de deformação. As dimensões do corpo de prova precisaram ser diminuídas proporcionalmente, devido às dimensões do forno de indução na máquina de tração ser menores, não possibilitando que um corpo de prova com o tamanho padrão da norma ABNT fosse usado. Apesar disso, a proporcionalidade entre as dimensões do corpo de prova e a capacidade da máquina de tração foi mantida, de modo a garantir os resultados do ensaio. A figura (6) mostra os corpos de prova usinados para o ensaio.



Figura 6. Corpos de prova usinados para o ensaio de tração a quente.

Os resultados experimentais foram gerados para os parâmetros A , B , C , m , n dos corpos de prova do aço AISI 1045, nas temperaturas 300 °C, 500 °C e 700 °C,

porém com a taxa de deformação fixada em 1000 s^{-1} (máxima variação de velocidade do cabeçote da máquina utilizada no ensaio).

Considerou-se nos ensaios, para medição da deformação dos corpos de prova, o comprimento inicial L_0 de 12 mm e área inicial A_0 da seção útil de 33 mm^2 . Com isso, foi possível aferir com os extensômetros a variação de comprimento ao longo do ensaio para cálculo a tempo real da deformação, bem como a força axial aplicada, considerando-se a área constante ao longo do ensaio para o cálculo da tensão. A figura (7) mostra o ensaio sendo realizado.



Figura 7. Ensaio de tração a quente sendo realizado no corpo de prova de aço AISI 1045.

Foi realizado o ensaio à temperatura ambiente para cálculo do limite de escoamento do material, que como já explicado, trata-se do parâmetro A do modelo de Johnson-Cook. Para isso utilizou-se a convenção gráfica de que o limite de escoamento corresponde à tensão necessária para promover uma deformação permanente de 0,2% para metais e ligas metálicas, em geral.

A figura (8) mostra o cálculo gráfico do limite de escoamento para o aço AISI 1045 à temperatura ambiente.

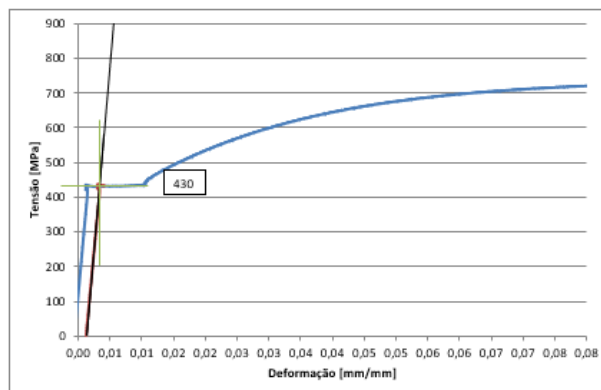


Figura 8. Curva tensão-deformação para o AISI 1045 à temperatura ambiente.

Dessa maneira, conclui-se deste ensaio que o limite de escoamento do aço AISI 1045 à temperatura ambiente foi de 430 MPa, o que corresponde ao primeiro parâmetro do modelo de Johnson-Cook, determinado experimentalmente.

Para obtenção dos demais parâmetros, após o ensaio à temperatura ambiente, foi realizado o ensaio à $500 \text{ }^\circ\text{C}$ e taxa de deformação de 1000 s^{-1} . A curva tensão-deformação obtida é apresentada na figura (9).

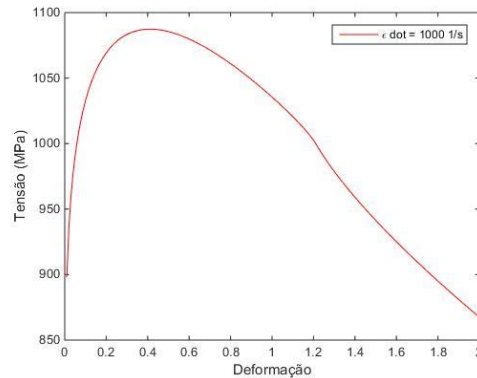


Figura 9. Curva tensão x deformação do aço AISI 1045 no ensaio à temperatura de 500 °C e taxa de deformação de 1000 s⁻¹.

Após os cálculos analíticos dos parâmetros, com as equações de (3) a (7), obtém-se a tabela comparativa com os valores experimentais calculados e o erro relativo aos valores teóricos, determinados pela aplicação do método numérico, proposto por Scaduto & Menezes.

Parâmetro	Valor Experimental	Valor Teórico	Erro relativo
<i>n</i>	0,2378	0,241	1,33%
<i>B</i>	697,74	616,64	13,15%
<i>C</i>	0,0474	0,012	295,00%
<i>m</i>	0,9614	1,0029	4,14%

Figura 10. Comparativo dos parâmetros do modelo Johnson-Cook determinados por SCADUTO e MENEZES (2017) com os obtidos no processo experimental a 500 °C para o aço AISI 1045.

Observam-se erros relativos baixos de 1,33 % para o parâmetro *n*, 13,15% para o parâmetro *B* e 4,14% para o parâmetro *m*. No entanto, o que ficou evidente foi o erro relativo elevado para o parâmetro *C*. Por se tratar de um parâmetro intermediário na sucessão dos cálculos fica pouco provável que o erro tenha sido causado por fatores do experimento, já que a curva tensão-deformação pode ser vista, de certa maneira, homogênea no ensaio. É possível que a aproximação inicial do termo $\dot{\epsilon}_0 = 1,0$ no modelo de Scaduto & Menezes tenha gerado outra ordem de grandeza para os valores do parâmetro *C*, ocasionando erro relativo na faixa de 295 %, como observado.

3 CONCLUSÃO

Observa-se que, de maneira geral, os resultados experimentais foram satisfatórios quando comparados aos resultados teóricos do modelo proposto por SCADUTO e MENEZES, tendo-se encontrados valores razoáveis para os parâmetros *A*, *B*, *m* e *n*. No caso do parâmetro *C*, tem-se a dependência do erro a arbitragem da taxa de referência inicial de valor unitário, como observado na comprovação prática.

Por conclusão, o presente trabalho pôde trazer uma relação com os dados teóricos obtidos com Scaduto e Menezes no sentido de calibração do seu modelo teórico. Nessa linha, em uma situação prática deve-se utilizar o modelo calibrado de Scaduto e Menezes para obtenção da curva tensão-deformação, e com os parâmetros de

Johnson-Cook recalculados para o material, aplicá-los como dados de entrada em um software de simulação numérica de elementos finitos voltado para a deformação plástica. Dessa maneira, será possível encontrar resultados mais próximos do comportamento real do material, em condições de altas temperaturas e altas taxas de deformações apenas com a simulação numérica computacional, não necessitando da curva experimental, já que o modelo terá sido calibrado.

Agradecimentos

Ao Departamento de Engenharia Mecânica (DEM), da Faculdade de Engenharia da UNESP - Campus de Ilha Solteira pelos materiais cedidos para realização dos ensaios, e ao Laboratório de Materiais da USP - São Carlos pela realização dos ensaios experimentais e a todos que contribuíram para concretização desse trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 Altasim Technologies. Structural Mechanics. Available on: <<http://www.altasimtechnologies.com/technology-overview/structural/>>. Accessed on: March, 28, 2017.
- 2 ASM AEROSPACE SPECIFICATION METALS INC. ASM Material Data Sheet. Available on: <<http://asm.matweb.com/>>. Accessed on: March, 28, 2017.
- 3 HOGE, K.G.; MUKHERJEE, A.K. (1977), The temperature and strain rate dependence of the flow stress of tantalum, *Journal of Materials Science* 12 (8): 1666–1672.
- 4 JOHNSON, G. R., COOK, W. H., Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. *Engineering Fracture Mechanics* Vol. 21, No-1, pp 31-48, 1985.
- 5 SCADUTO, G. F.; MENEZES, M. A. Analysis, Determination and Employment of Johnson-Cook parameters and model. 2016. 56 f. TCC (Graduation work) – Mechanical Engineering, *Universidade Estadual Paulista “Júlio de mesquita Filho”, Campus de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2016.*