

# AVALIAÇÃO DE ABORDAGENS DISTINTAS DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS PARA A PREVISÃO DA CARGA DE TREFILAÇÃO

## **Carlos Augusto dos Santos**

Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, UFMG, Belo Horizonte, MG.  
landre@demet.ufmg.br

## **Elaine Carballo Siqueira Côrrea**

Doutora em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, UFMG, Belo Horizonte, MG.  
elaine@demet.ufmg.br

## **Margareth Spangler Andrade**

Doutora em Ciências Aplicadas, Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG. margareth.spangler@cetec.br

## **Maria Teresa Paulino Aguiar**

Professora Adjunta no Departamento de Engenharia de Materiais e da Construção Civil, UFMG, Belo Horizonte, MG. teresa@demc.ufmg.br

## **Paulo Roberto Cetlin**

Professor Titular no Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, UFMG, Belo Horizonte, MG. pzetlin@demet.ufmg.br

**Resumo.** *A carga de trefilação do aço inoxidável 420 recozido foi obtida para diferentes condições de semi-ângulo e redução de área, utilizando duas abordagens da formulação elasto-plástica do método de elementos finitos, a saber: uma ou três curvas de fluxo. Com uma curva de fluxo, o encruamento de toda a barra foi descrito através dessa curva. Para a condição de três curvas de fluxo, a barra de cada condição foi dividida em três regiões, conforme dados experimentais, e o encruamento de cada região descrito por sua curva de fluxo. Os resultados numéricos foram comparados com as cargas experimentais das condições analisadas. Essa comparação evidenciou a aplicabilidade de cada formulação em relação às condições de trefilação e a necessidade de melhoria no modelo numérico para previsão da carga de trefilação do aço inoxidável 420.*

**Palavras-chave:** *Carga de Trefilação, Elementos Finitos, Curva de Fluxo*

## **1. INTRODUÇÃO**

O estudo dos processos de conformação mecânica tem sido realizado através de métodos analíticos, experimentais e numéricos<sup>(1,2,3,4)</sup>. Os métodos analíticos caracterizam-se por fornecerem análises mais limitadas em termos de geometria e variáveis de saída, fornecendo geralmente apenas valores de carga de conformação. Os estudos experimentais, na maioria das vezes, demandam um grande número de experimentos e um custo elevado quando comparado aos outros métodos. Dentre as análises numéricas, o método de elementos finitos tem sido amplamente utilizado por apresentar as seguintes características: possibilidade de avaliação de um grande número de geometrias de processos, maior número de informações sobre o processo (fluxo do material, distribuição de deformação e tensão, dano, entre outras), rapidez na geração dos resultados e custo relativamente baixo.

Na literatura<sup>(5,6,7)</sup>, inúmeras formulações de elementos finitos são apresentadas para análise dos processos de conformação. Em termos comerciais, a maioria dos pacotes de elementos finitos

trabalha com duas formulações: rígido-plástica ou elasto-plástica. Na abordagem rígido-plástica, a deformação da peça conformada é considerada apenas de ordem plástica e, para a outra abordagem, a deformação é dividida nas parcelas elástica e plástica. Essas formulações têm como ponto chave a definição da curva de fluxo do material a ser conformado (curva tensão efetiva x deformação efetiva), a qual geralmente é obtida através do ensaio de tração. A curva de fluxo fornece o parâmetro da equação de escoamento que descreve o encruamento isotrópico do material.

Em função das diversas formulações do método de elementos finitos, uma prática importante na utilização do método é verificar a proximidade dos resultados numéricos em relação aos dados experimentais do processo de conformação sendo estudado. Essa verificação indica se a formulação utilizada está apropriada para o estudo em questão ou se necessita de modificações.

No presente artigo, a carga de trefilação do aço inoxidável 420 recozido foi obtida para diferentes condições de semi-ângulo e redução de área, utilizando duas abordagens da formulação elasto-plástica. Na primeira abordagem, uma única curva de fluxo foi adotada para descrever o encruamento de todo o material sendo trefilado. A segunda abordagem utilizou três curvas de fluxo para diferentes camadas do material trefilado. Cada condição simulada teve seu respectivo conjunto de curvas. Em seguida, a carga numérica foi comparada com a carga real do processo.

A idéia da utilização de três curvas de fluxo fundamentou-se nos resultados experimentais da análise do efeito caminho de deformação na trefilação do aço inoxidável 420<sup>(8)</sup>, para as mesmas condições de semi-ângulo e redução de área analisadas nesse artigo. Os resultados experimentais evidenciaram que a barra trefilada pode ser dividida em três camadas: externa, intermediária, central. A diferença entre as camadas é indicada pelo nível de cisalhamento sofrido por cada uma delas. A região externa está sujeita ao cisalhamento mais intenso devido à proximidade com a feira, a região central é considerada praticamente isenta de cisalhamento e a região intermediária marca a transição entre as outras duas regiões.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Simulações com Uma Curva de Fluxo

As condições de trefilação simuladas no presente artigo são apresentadas na tabela I. Em todas as simulações, o diâmetro final das barras foi de 10,00 mm.

Tabela I - Condições de trefilação.

Condição de Trefilação	Semi-ângulo	Redução de Área	Abreviação	φ Inicial
1	3°	8%	03G08P	10,43 mm
2	3°	15%	03G15P	10,85 mm
3	8°	8%	08G08P	10,43 mm
4	8°	15%	08G15P	10,85 mm
5	20°	8%	20G08P	10,43 mm
6	20°	15%	20G15P	10,85 mm

Para cada condição acima, o processo de trefilação foi definido como axissimétrico e isotérmico no pré-processador do programa de elementos finitos DEFORM2D V\_8.0, conforme ilustrado na figura 1.

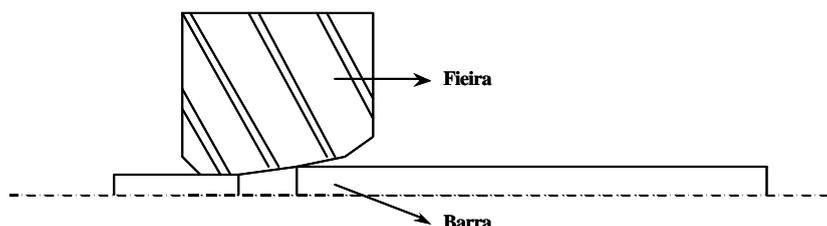


Figura 1 – Desenho do processo de trefilação usado no pré-processamento.

A feira foi identificada como material rígido e a barra considerada como um material elastoplástico. A malha representando a geometria da barra foi elaborada com elementos quadrangulares bilineares<sup>(9,10)</sup>, sendo gerada automaticamente no pré-processador. A curva de fluxo utilizada para a barra durante a simulação foi retirada da literatura<sup>(8)</sup>. O modelo de atrito utilizado para descrever o contato entre a feira e a barra foi o de Coulomb. O coeficiente de atrito adotado nas simulações foi retirado da literatura<sup>(11)</sup>, sendo o valor utilizado de  $\mu_a = 0.1$ . O modelo isotrópico foi adotado para representar o encruamento do material. A simulação foi considerada isotérmica.

Nas simulações, a carga de trefilação foi obtida a partir da integração das cargas atuantes na feira. O valor dessa integral é fornecido como variável de saída pelo programa DEFORM2D V8\_0. A partir das cargas obtidas, o gráfico da carga de trefilação x condição de trefilação foi elaborado. A carga nos gráficos correspondeu ao valor médio após estabilização da simulação.

## 2.2. Simulações com Três Curvas de Fluxos

Os parâmetros gerais das simulações utilizando três curvas de fluxo foram idênticos àqueles das simulações anteriores. A diferença entre as simulações dos dois itens residiu no fato que, para o presente item, a barra a ser simulada foi dividida em três camadas, conforme ilustrado na figura 2. A divisão das camadas teve por base a intensidade do cisalhamento presente em cada camada, segundo as orientações do trabalho experimental de Corrêa<sup>(8)</sup>.

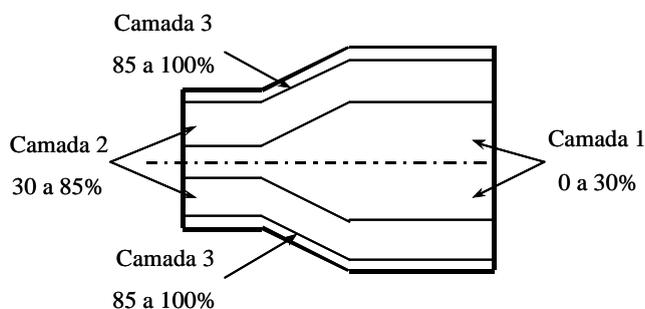


Figura 2 – Camadas adotadas na simulação com três curvas de fluxo.

No pré-processador do programa DEFORM2D V8\_0, a curva de fluxo de cada camada foi especificada, conforme ilustrado na figura 3. As equações na figura 3 representam as curvas utilizadas para a simulação da condição de 03G08P. As curvas apresentadas na figura 3 e aquelas utilizadas para as demais condições de trefilação foram retiradas da literatura<sup>(12)</sup>.

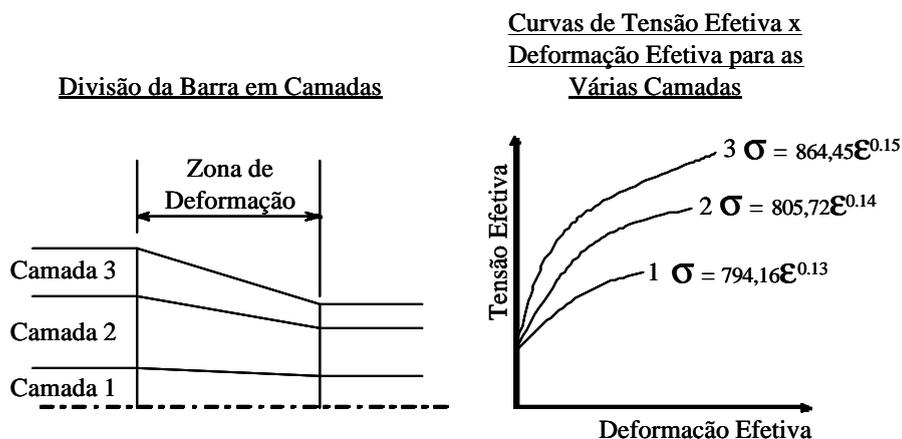


Figura 3 – Definição das curvas para as camadas.

Assim como no item anterior, usando os valores de carga obtidos nas simulações com três curvas de fluxo, o gráfico da carga de trefilação x condição de trefilação foi elaborado.

### 2.3. Comparação da Carga de Trefilação Numérica com a Carga de Trefilação Experimental

Visando analisar os resultados numéricos de carga de trefilação, o gráfico de carga de trefilação x condição de trefilação foi elaborado onde, para cada condição, foram locadas as cargas das duas simulações dos itens 2.1 e 2.2 e o respectivo valor de carga experimental. As cargas experimentais foram retiradas da literatura<sup>(12)</sup>. Para obtenção das cargas experimentais foram utilizadas feiras de carbeto de tungstênio e pasta de Molykote para lubrificação.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1. Carga de Trefilação na Simulação com uma Curva de Fluxo

A figura 4 ilustra a carga média de trefilação obtida para cada condição de trefilação descrita na tabela I. No gráfico da figura, considerando uma mesma redução de área, é possível perceber um ponto de mínimo da carga de trefilação, indicando a existência de um semi-ângulo ótimo de trefilação, assim como é relatado na literatura<sup>(1,13,14)</sup>. A existência desse mínimo é justificada em Avitzur<sup>(1)</sup> através do somatório dos termos que contribuem para a carga de trefilação, o qual passa por um mínimo à medida que o semi-ângulo de trefilação aumenta. A figura 4 também revela que a carga de trefilação aumenta com o crescimento da redução de área, considerando fixo o semi-ângulo. O trabalho de Dixit *et al.*<sup>(13)</sup> também mostra um comportamento semelhante para a variação da redução de área.

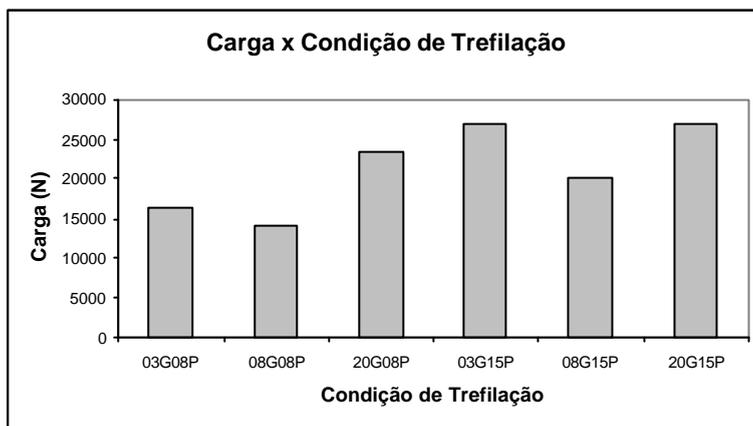


Figura 4 – Carga média de trefilação (única curva de fluxo).

### 3.2. Carga de Trefilação na Simulação com Três Curvas de Fluxo

A carga média de trefilação de todas as condições é mostrada no gráfico da figura 5. O comportamento das cargas revela uma análise idêntica àquela feita para o gráfico da figura 4.

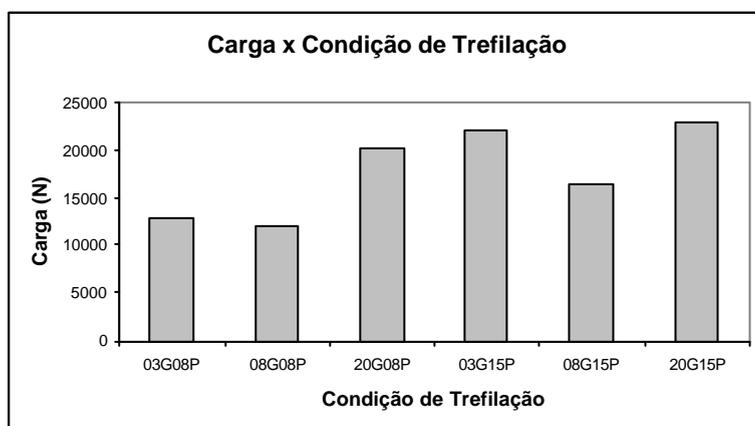


Figura 5 – Carga média de trefilação (três curvas de fluxo).

### 3.3. Comparação dos Resultados Numérico e Experimental

Os dados numéricos de carga de trefilação na figura 6 mostram que, para todas as condições de trefilação, as simulações utilizando três curvas de fluxo (COMECD) provocam uma redução da carga de trefilação em relação aos resultados da simulação com uma única curva (SEMECD). Exceto para a trefilação de 3° e 15% (03G15P), a carga prevista pela simulação com três curvas aproxima-se mais do valor experimental que a carga obtida pela simulação com uma única curva. O comportamento do valor numérico da carga de trefilação indica que a formulação utilizada no programa adotado subestima o valor de carga para a condição de trefilação com baixo semi-ângulo e alta redução (03G15P) e superestima o valor de carga para as demais condições de trefilação.

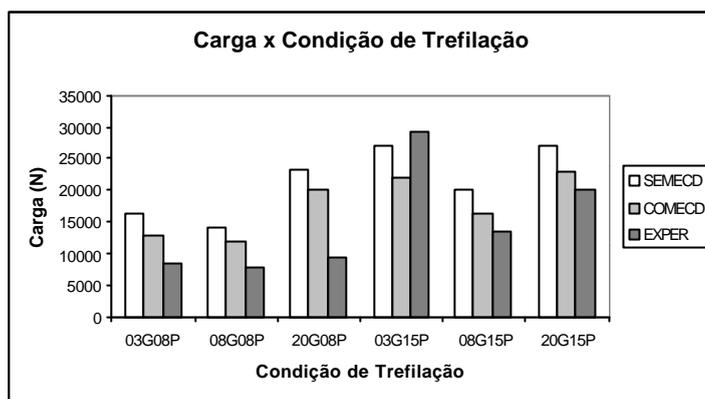


Figura 6 – Carga média de trefilação (valores numérico e experimental).

## 4. CONCLUSÕES

As duas formulações (um curva e três curvas de fluxo) são capazes de reproduzir o comportamento qualitativo da carga de trefilação previsto na literatura (ângulo ótimo de trefilação<sup>(1,13,14)</sup>; aumento da carga com o aumento da redução, mantido o semi-ângulo de trefilação<sup>(13)</sup>).

Para o programa utilizado, a formulação usando três curvas de fluxo é mais indicada para analisar a carga de trefilação que a formulação com uma só curva, exceto para uma das condições estudadas (3° e 15%). Entretanto, esse comportamento deve ser objeto de maior estudo para eliminar dúvidas relativas ao comportamento numérico do programa adotado.

Os resultados obtidos no artigo indicam a necessidade de estudar novas formulações para previsão de carga, a fim de obter aproximações com menor erro em relação à carga experimental de trefilação.

## 5. AGRADECIMENTO

Os autores agradecem à CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pelo apoio financeiro das atividades realizadas no presente artigo.

## REFERÊNCIAS

1. AVITZUR, Betzalel. **Metal forming: processes and analysis**. New York: McGraw-Hill, c1968. 500p.
2. HOSFORD, William F; CADDELL, Robert M. **Metal forming: mechanics and metallurgy**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, c1983. 330p.
3. THOMSEN, Erich G; YANG, Charles T; KOBAYASHI, Shiro. **Mechanics of plastic deformation in metal processing**. New York: Macmillan, c1965. 486p.
4. KOBAYASHI, Shiro; OH, Soo-Ik; ALTAN, Taylan. **Metal forming and the finite-element method**. New York: Oxford Univ-Press, c1989. 377p.

5. SZABO, Barna. Aladar; BABUSKA, Ivo. **Finite element analysis**. New York: c1991. 368p.
6. SIMO, J. C.; HUGHES, T. J. R. **Computational inelasticity**. 1. ed. New York: Springer-Verlag, 1998. 392p.
7. ZIENKIEWICZ, O. C; TAYLOR, R. L. **The finite element method**. 4. ed. London; New York: McGraw-Hill, 1991. v.2, 807p.
8. CORRÊA, E. C. S. **Aspectos do encruamento de metais previamente deformados a frio**. 2004. 233 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.
9. LEE, C. H. et al. Analyses of axisymmetric upsetting and plane-strain side-pressing of solid cylinders by the finite element method. **Journal of Engineering for Industry**, p. 445-454. Maio 1971.
10. ZIENKIEWICZ, O. C. et al. Elasto-plastic solutions for engineering problems – “initial problems”, finite element approach. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, p. 75-99. Maio 1968.
11. LANGE, K. **Handbook of metal forming**. London: McGraw Hill, 1985.
12. SANTOS C. A. **Simulação numérica da trefilação axissimétrica do aço inoxidável 420 considerando o efeito do caminho de deformação**. 2005. 265 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.
13. DIXIT, U. S. et al. An analysis of the steady-state wire drawing of strain-hardening materials. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 47, p. 201-229, 1995.
14. MALBERG, M. et al. Influence of process parameters in drawing of superconducting wire. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, v. 9, p. 2577-2580, June 1999.

## **EVALUATION OF DIFFERENT FINITE ELEMENT APPROACHES TO PREDICT THE DRAWING LOAD**

### **Carlos Augusto dos Santos**

Doctor in Metallurgical and Materials Engineering, UFMG, Brazil. landre@demet.ufmg.br

### **Elaine Carballo Siqueira Côrrea**

Doctor in Metallurgical and Materials Engineering, UFMG, Brazil. elaine@demet.ufmg.br

### **Margareth Spangler Andrade**

Doctor in Applied Sciences, Technology Center Foundation of Minas Gerais, Brazil. margareth.spangler@cetec.br

### **Maria Tereza Paulino Aguiar**

Associate Professor in the Department of Materials and Civil Construction Engineering, UFMG, Brazil. teresa@demc.ufmg.br

### **Paulo Roberto Cetlin**

Professor in the Department of Metallurgical and Materials Engineering, UFMG, Brazil. pzetlin@demet.ufmg.br

**Abstract.** *In different area reductions and drawing semi-angle conditions, the AISI 420 stainless steel drawing load was obtained using different elasto-plastic finite element approaches, namely: one flow curve and three flow curves. In the first approach, the single curve described the whole bar hardening. Based on experimental data in the second approach, the bar was separated in three regions and specific curves represented the hardening in each region. The numerical results were compared with the experimental drawing load of the analyzed conditions. This comparison showed the applicability of each approach in relation to the drawing conditions. The necessity to improve the numerical model to predict the drawing load became evident.*

**Keywords.** *Drawing Load, Finite Elements, Flow Curve*