

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO COEFICIENTE DE ATRITO NO PROCESSO DE TREFILAÇÃO DE BARRAS CILÍNDRICAS¹

Alexandre da Silva Rocha²

Martin Geier³

Milena Macarini Mondardo⁴

Resumo

Este estudo apresenta uma comparação entre pesquisas analíticas e numéricas para o processo de trefilação de barras cilíndricas, em relação ao coeficiente de atrito, visando determinar as condições ideais de semiângulo de trabalho que minimizam a carga de conformação e a temperatura (aporte de calor). As análises são feitas em função de dados de literatura, bem como dos dados levantados experimentalmente para o aço AISI 1045. Os resultados demonstraram que o coeficiente de atrito influencia na avaliação da força de conformação, no semiângulo de trabalho e no aporte de calor. Observa-se boa correlação entre os resultados obtidos pelos diferentes métodos de análise.

Palavras-chave: Conformação mecânica; Processo de trefilação; Lubrificação; Análises numéricas.

AN ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE FRICTION COEFFICIENT ON THE WIRE DRAWING PROCESSES OF CYLINDRICAL RODS

Abstract

This study presents a comparison between analytical and numerical analysis for wire drawing processes of cylindrical bars with respect to the friction coefficient, aiming the ideal die semi-angle conditions which minimizes the forming load and temperature (heat input). Analyses are evaluated considering literature and experimental data for AISI 1045 steel alloy. Achieved results show that the friction coefficient has influenced the evaluation of forming load, die semi-angle and heat input. Achieved results from different analysis methods present good correlation.

Key words: Metal forming; Wire drawing process; Lubrication; Numerical analysis.

¹ *Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Prof. Dr. Eng. Do PPGEM – UFRGS e pesquisador do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) da Escola de Engenharia da UFRGS, Brasil. alexandre.rocha@ufrgs.br*

³ *Doutorando do Laboratório de Transformação Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. martin.geier@ufrgs.br*

⁴ *Mestrando do Laboratório de Transformação Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. milena.mondardo@ufrgs.br*

1 INTRODUÇÃO

Apesar da aplicação dos processos de conformação mecânica estar amplamente consolidada na indústria de transformação, ainda há falta de informação com relação a parâmetros e variáveis de processo e suas influências no produto acabado. Um mercado cada vez mais competitivo, aliado à pressão por parte dos clientes para obter produtos de elevada qualidade, faz com que esse controle se torne indispensável para o sucesso econômico da indústria de conformação de metais.

Entre as variáveis dos processos de conformação, o coeficiente de atrito é considerado importante, já que pode afetar diretamente o comportamento do escoamento do material (fluxo), a carga total de conformação e, conseqüentemente, nos cálculos de tensão e deformação, além das propriedades finais do produto, podendo causar perdas de energia e desgaste prematuro de ferramentas. Outro importante parâmetro é a temperatura pela geração de calor decorrente da deformação, fazendo se necessário o uso de um lubrificante que mantenha suas propriedades na faixa de temperatura do processo em questão e que, de preferência, opere também como um isolante térmico entre a peça e a ferramenta nos processos a quente.⁽¹⁾

A trefilação é um processo de conformação mecânica geralmente utilizada para a produção de fios, barras e tubos. Associado ao efeito benéfico do aumento de resistência mecânica pelo encruamento, há simultaneamente os problemas causados pela distorção interna do material metálico representado pelo afinamento e alongamento dos grãos cristalinos.⁽²⁾ Com relação aos defeitos internos de barras trefiladas (rupturas centrais), pode-se afirmar que a tensão normal média (σ_N), ou tensão hidrostática, está fortemente relacionada com a ocorrência deste problema, onde valores positivos (trativos) indicam a possibilidade de formação de cavidades que contribuem para o aparecimento de rupturas internas.⁽³⁾ Desta maneira é possível, a partir de análises numéricas, determinar as condições ideais de processo que minimizem a tensão hidrostática e, conseqüentemente, a possibilidade de ocorrência de rupturas internas.

Este trabalho objetiva determinar o valor ótimo para semi-ângulo de trabalho em processos de trefilação do aço AISI 1045 em relação ao coeficiente de atrito. Primeiramente são utilizadas formulações e parâmetros da literatura para a curva de escoamento e atrito nos cálculos para semiângulo ótimo e carga de conformação. A seguir determina-se experimentalmente a curva de escoamento do aço AISI 1045 e realiza-se a caracterização do atrito através de correlações experimentais e simulações numéricas verificando sua influência face aos valores de literatura. Por fim, os dados obtidos pelas formulações de literatura são confrontados com análises numéricas em função dos valores de atrito, semi-ângulo de trabalho, tensão hidrostática e carga de conformação.

1.1 O Processo de Trefilação

Uma das mais antigas operações de conformação metálica, a trefilação permite uma excelente superfície final e controles dimensionais obtidos em produtos não planos com seção constante. No processo de trefilação, a seção de corte e/ou a forma da barra, tubo ou fio é reduzida através da fieira. A deformação é realizada por uma combinação de tensões trativas e compressivas que são criadas por força de tracionamento na saída da fieira e pela configuração desta.⁽⁴⁾

Associado ao efeito benéfico do aumento de resistência mecânica pelo encruamento há simultaneamente os problemas causados pela distorção interna do material metálico com o acúmulo de tensões internas, a perda da ductilidade e a queda da resistência,⁽²⁾ necessitando analisar os parâmetros que influenciam no resultado final do material.

A fieira (Figura 1) é uma ferramenta cilíndrica que contém um furo no centro, com o formato de um funil, por onde passa o material, diminuindo seu diâmetro. Como a fieira é cônica, existe uma relação entre o ângulo de entrada e o de saída, ou seja, o ângulo de entrada é geralmente maior que o ângulo de trefilação para permitir que haja lubrificação de forma a facilitar a passagem do material pela fieira.⁽⁵⁾

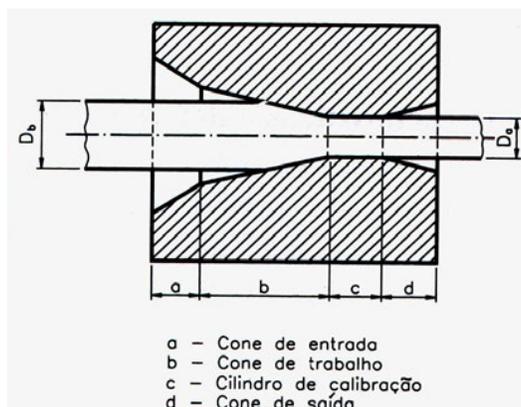


Figura 1: Geometria da fieira.

A intensidade das tensões compressivas é determinada pela conicidade do ângulo de trabalho (2α) e pelo coeficiente de atrito (μ) entre material trefilado e matriz de trefilação.⁽⁶⁾ Quanto maior o semiângulo da fieira (α), maior a área de contato e conseqüentemente o atrito,⁽³⁾ pois para uma mesma redução de área, ângulos de trabalho menores corresponderão a um comprimento maior da região de trabalho e conseqüentemente definirão uma maior força para vencer o atrito. Já para ângulos maiores haverá uma menor região de contato (Figura 2) e assim, uma menor força devida ao atrito

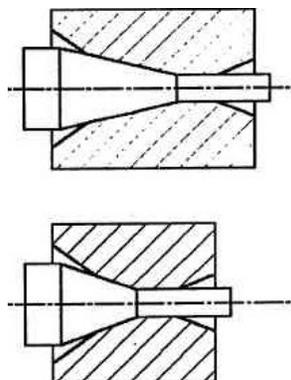


Figura 2: Efeito da variação do ângulo de entrada da matriz sobre a área de contato metal-matriz.

Quando não há modificação da geometria, apenas a redução da seção transversal de barras cilíndricas, pode se calcular a razão de trefilação e a deformação verdadeira através das Equações 01 e 02, respectivamente.

$$R = \frac{A_1}{A_0} \quad \text{Equação 01}$$

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{A_1}{A_0}\right) \quad \text{Equação 02}$$

Onde: A_1 = área inicial
 A_0 = área final

A energia total de conformação depende diretamente da redução de seção, desta forma o ângulo ideal de trabalho também dependerá da redução imposta. A Tabela 1 apresenta valores de ângulos ideais teóricos para os diversos processos possíveis de trefilação em função da redução de seção (R):⁽¹⁾

Tabela 1: Relação da redução ⁽¹⁾

Processo	R (%)	$\alpha_{\text{ótimo}}$
Trefilação de barras	14	5°
	40	10°
Estiramento de tubos	14	5 a 6°
	40	10 a 12°

A literatura informa que não há um consenso bem definido sobre o ângulo ideal de ferramenta, visto que para Dieter,⁽⁷⁾ o ângulo ideal $\alpha_{\text{ótimo}}$ corresponde à faixa entre 5 a 7°. Além disso, há uma relação de semiângulo ótimo de trabalho da fiação, apresentado em Lepand,⁽⁸⁾ que mostra a sua influência com relação a força de conformação (Equação 03).

$$\alpha_{\text{ótimo}} = \sqrt{1,5 \cdot \mu \cdot \ln \frac{A_0}{A_1}} \quad \text{Equação 03}$$

Onde, μ é o coeficiente de atrito.

Ainda existem dificuldades no estudo do atrito e o que se faz é definir alguns modelos de atrito e realizar ensaios simplificados de fabricação para determinar coeficientes de atrito relativos às condições de processamento próximas àquelas encontradas nos processos de conformação.⁽⁶⁾

O semiângulo ótimo de trabalho da fiação da Equação 03 mostra a influência em relação à força de trefilação para minimizar energia (Equação 04). Quando ultrapassa desse semiângulo, nem todo o material toca a superfície da matriz diminuindo o atrito gerado pelo contato, estabilizando a energia ou tensão consumida, porém a perda de contato com a matriz piora a qualidade da superfície do trefilado.⁽⁶⁾

$$F_1 = A_1 \cdot k_{fm} \cdot \varphi_1 \left(1 + \frac{\mu}{\alpha} + \frac{2\alpha}{3\varphi_1} \right) \quad \text{Equação 04}$$

O ensaio de compressão do anel é um método experimental utilizado para a determinação de condições de atrito nos processos de conformação mecânica. Foi inicialmente proposto por Kunogi, em 1956, e então, desenvolvido por Male e Cockcroft entre 1964-1965.⁽⁹⁾

A técnica do teste do anel consiste em uma operação de recalque no corpo de prova em forma de anel, onde a variação do diâmetro para uma determinada variação na espessura é função do atrito interfacial. Se o atrito for zero o anel deforma-se como um disco sólido, com cada elemento fluindo radialmente para fora em uma taxa proporcional a sua distância ao centro. Quando existe atrito na interface, a condição torna-se energeticamente favorável à existência de um raio neutro, que é a linha de divisão da região em que o material fluirá radialmente para fora e a que fluirá em sentido oposto. A magnitude do atrito irá determinar a localização do raio neutro e, portanto a variação do raio interno para uma dada deformação em espessura, sendo que o decréscimo do raio interno é mais acentuado quando o atrito é elevado (Figura 3⁽¹⁰⁾).

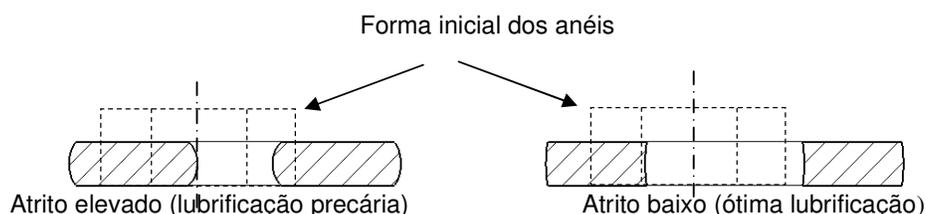


Figura 3 – Efeito da magnitude do atrito no escoamento do metal durante o ensaio de compressão do anel.

Realizando-se sucessivas deformações na altura para um dado material de trabalho e condições específicas de lubrificação, é possível obter curvas de calibração para o atrito. Cada geometria de anel tem seu conjunto específico de curvas de calibração, sendo a mais usual a que respeita a proporção 6:3:2, onde o primeiro número denota o diâmetro externo, o segundo número o diâmetro interno e o último a altura do anel. A grande vantagem do teste do anel é de não necessitar de medições de força e envolver grande escala de deformação do material de trabalho, conforme o caso prático no qual se faz o estudo. Este teste pode também ser usado para classificar diferentes tipos de lubrificantes para processos de forjamento.

2 MATERIAL E MÉTODO

O material em questão é o aço carbono AISI 1045. Na Tabela 2 encontram-se demais valores para propriedades do material.

Tabela 2: Valores com as características do Aço 1045⁽¹¹⁾

Densidade (kg/mm ³)	7,83 x 10 ⁻⁶
Coefficiente de Expansão Térmica (1/k)	1,5 e-005
Coefficiente de transferência de calor (W/K*mm ²)	0,05
Coefficiente de Radiação	0,82
Calor específico (J/kg*K)	419
Módulo de Elasticidade (GPa)	200
Poisson	0,29
Condutividade Térmica (W/mK)	46,73
Tensão de escoamento (Pa)	4,6 x 10 ⁸

No estudo de um determinado material o ideal é que seja feita uma análise do ensaio de tração ou compressão, onde uma amostra apropriada do objeto é submetida a um esforço uniaxial. Tanto os esforços quanto os deslocamentos do

objeto são medidos durante o ensaio e em seguida dispostos em um gráfico, tensão em função da deformação. A partir desse gráfico, correspondente ao regime plástico, é obtida a curva de escoamento ou de fluxo do material.⁽¹²⁾ Com esta curva se obtém uma expressão matemática da curva de escoamento do material, representada na equação 05, sendo um elemento básico para a determinação das condições de trabalho na conformação mecânica

$$k_f = C \cdot \varphi^n \quad \text{Equação 05}$$

Onde “C” é o coeficiente de resistência e “n” o coeficiente de encruamento do material. O escoamento de um material inicia quando as tensões atuantes atingirem um determinado valor, característica do mesmo: a resistência ao escoamento, k_f .⁽¹³⁾ Para adquirir a curva de resistência ao escoamento experimental, corpos de provas cilíndricos de 20 mm de diâmetro e 30 mm de altura foram preparados e então, com os dados do ensaio de compressão, se obteve a relação matemática para sua curva de escoamento (equação 05), onde o resultado da equação experimental e a teórica pode ser visualizada na Tabela 3.

Tabela 3: Equações de resistência ao escoamento

	Equação	Resistência ao escoamento (para $\epsilon = 13,27\%$)
Experimental - Trefilado	$K_f = 1298,934 \cdot (\varphi)^{0,1075}$	$K_f = 1045,497 \text{ N/mm}^2$
Literatura ⁽¹⁴⁾	$K_f = 848 \cdot (\varphi)^{0,1817}$	$K_f = 587,52 \text{ N/mm}^2$

O semiângulo ótimo (equação 03) obtido para o coeficiente de atrito 0,1 foi de 8° e para o coeficiente de atrito 0,07 foi de 6,7 (aproximando-se para 7°). Os valores de força para minimizar energia estão na Tabela 4.

Para a caracterização do atrito, realizou-se ensaios de compressão de corpos de prova em forma de anel, à temperatura ambiente, em uma prensa hidráulica de 1.800 kN a uma velocidade média de 0,2 mm/s com ferramentas planas em aço M2 (HRC 60 e $R_a = 4 \mu\text{m}$). Para os experimentos de caracterização do atrito utilizou-se anéis com diâmetro externo de 18 mm, diâmetro interno de 12 mm e altura de 6 mm, com um conjunto de ferramentas para cada condição de lubrificação testada, sendo que as ferramentas eram examinadas e limpas com álcool isopropílico. As reduções de altura compreenderam a faixa dos 20% aos 65% e a verificação dimensional do diâmetro interno e da altura foi obtida a partir da média de três leituras realizadas com auxílio de um paquímetro.

Os ensaios de compressão do anel foram realizados para o óleo *Siderstamp®*, fabricado pela Quaker e sua composição consiste basicamente em uma emulsão de óleo parafínico com fluido lubrificante de óleos básicos. O procedimento consistiu em colocar óleo lubrificante em uma das ferramentas para, em seguida, colocar a outra em contato, de modo a espalhar e criar um filme lubrificante homogêneo entre as mesmas. Após, as ferramentas foram afastadas e o corpo de prova foi posicionado para a realização do ensaio.

Para estudar a influência do atrito nos testes de compressão do anel e nas análises numéricas, a partir do método de elementos finitos (MEF) do processo de trefilação, foi utilizado o software comercial Simufact.FormingSFM. Os parâmetros de processo adotados para as simulações numéricas foram tratados como análise bidimensional (2D) utilizando elementos tipo QUAD, com o refinamento de malha implementado automaticamente pelo software. A curva de escoamento utilizada foi obtida experimentalmente (Tabela 3) e demais propriedades pertinentes ao material

foram utilizadas a partir da tabela 02. Para o atrito, considerou-se o coeficiente de atrito da literatura e o obtido experimentalmente para o óleo lubrificante em questão, já para o semiângulo de trabalho os valores considerados foram 7° e 8°. A velocidade do processo foi considerada como 1250 mm/s, com diâmetro inicial de 21,64 mm para uma dimensão final de 20,25 mm, inicialmente à temperatura de 20°C.

3 RESULTADOS

De posse da curva de escoamento do material e dos dados experimentais do ensaio de compressão do anel, realizaram-se análises numéricas para reproduzir o ensaio de compressão do anel e obter o valor de coeficiente de atrito. Com este resultado foi possível avaliar, tanto qualitativamente como quantitativamente, o atrito para as condições de lubrificação estudadas. A partir do ensaio do anel, obteve-se o gráfico apresentado na Figura 4, com a redução do diâmetro interno (%) em função da redução da altura (%).

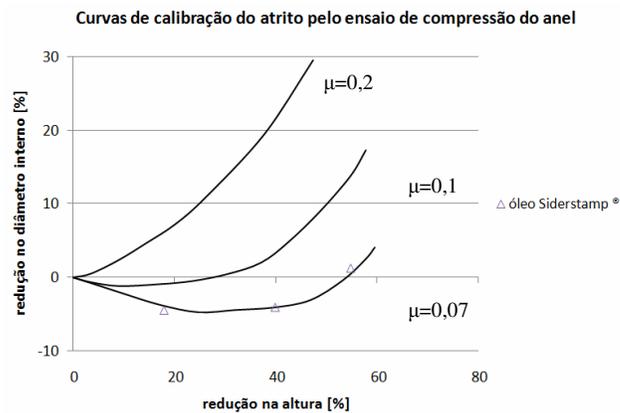


Figura 4 – Curvas de calibração do atrito pelo ensaio de compressão do anel. Material: aço AISI 1045.

Com o resultado da Figura 4, pode se completar os dados no programa de simulação computacional SimufactForming e adquirir o valor do coeficiente de atrito do lubrificante estudado. O óleo lubrificante apresentou um coeficiente de atrito de $\mu = 0,07$. A literatura informa que usualmente, o valor do atrito para processos de trefilação barras é de $\mu = 0,1$.⁽¹⁵⁾

De posse do coeficiente de atrito encontrado e de equações de resistência ao escoamento, foi possível, através da Equação 04 e de análises numéricas (MEF), prever a força (kN) que produz menor energia para puxar a barra. A Tabela 4 apresenta os valores de forças encontradas em função do semiângulo e coeficiente de atrito.

Tabela 4: Força para Minimizar Energia de Trefilação para uma redução de área em 13,27%

Semi ângulo	$\mu=0,07$			$\mu=0,1$		
	Formulação de Siebel		MEF	Formulação de Siebel		MEF
	Dados Experimentais	Dados de Literatura	Dados Experimentais	Dados Experimentais	Dados de Literatura	Dados Experimentais
7°	97,75 kN	44,76 kN	71,38 kN	108,73 kN	49,79 kN	80,23 kN
8°	98,47 kN	45,09 kN	71,40 kN	108,07 kN	49,49 kN	82,10 kN

Pela Tabela 4 observa-se que os valores de força pouco variam quando relacionados com o tipo de método de cálculo em função ao semiângulo. É possível notar que o atrito, bem como a formulação da curva de escoamento, exerce variação significativa na força de conformação.

O aporte de calor decorrente da deformação plástica é um importante parâmetro de análise, pois pode afetar as propriedades do lubrificante em questão. A Figura 05 apresenta os resultados de distribuição da temperatura para os valores ótimos de semiângulo em função do coeficiente de atrito.

A partir da Figura 5 se nota um menor gradiente de temperatura para o caso do coeficiente mais baixo ($\mu=0,07$). Além disso, observa-se também uma menor porção de material afetada termicamente.

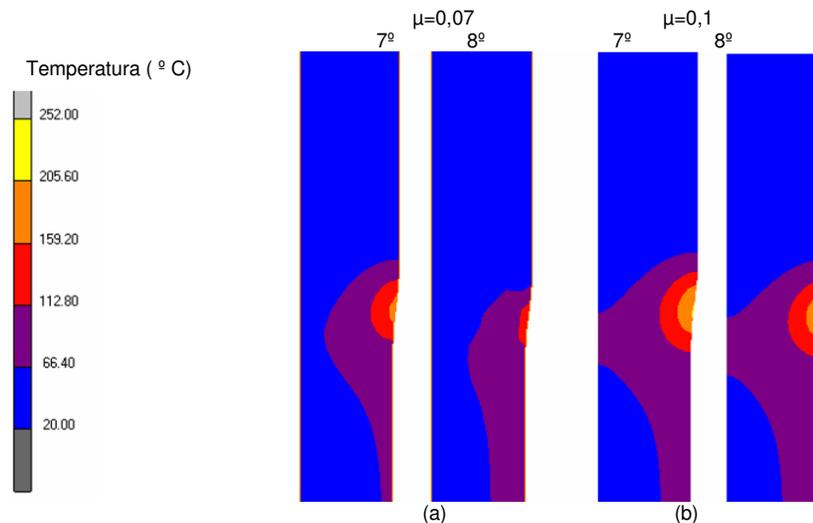


Figura 5: Distribuição de temperatura para os valores de semiângulos de 7° e 8° em função dos coeficientes de atrito. Em (a) $\mu=0,07$ e (b) $\mu=0,1$.

A Figura 6 apresenta a distribuição de deformação plástica efetiva, onde se observa que há diferença na abrangência dessa deformação (referente ao valor de 0,2) em função do semiângulo de trabalho.

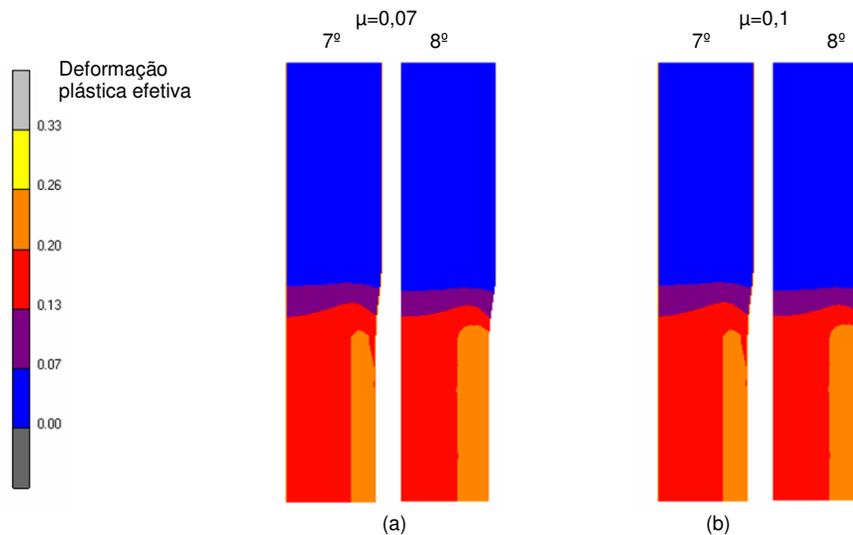


Figura 6: Distribuição de deformação plástica efetiva para os valores de semiângulos de 7° e 8° em função dos coeficientes de atrito. Em (a) $\mu=0,07$ e (b) $\mu=0,1$. Observa-se maior abrangência para deformação 0,2 nos casos de semiângulo igual a 8°.

4 DISCUSSÃO

Mesmo que no geral tenha sido verificada uma divergência para os resultados de força de conformação, observa-se coerência entre os métodos utilizados no que diz respeito ao ângulo ótimo de trabalho (Tabela 4). Uma razão para esta divergência estaria baseada nos diferentes parâmetros utilizados (curva de escoamento, velocidade do processo) e pela natureza distinta dos métodos de cálculo utilizados.

Analisando os resultados em função do atrito, verifica-se que este parâmetro apresentou maior influência para os valores de força de conformação quando comparado com o semiângulo de trabalho, estando condizente com a literatura (Tabela 4). Nota-se também que o semiângulo de trabalho apresenta valores ótimos distintos em função do coeficiente de atrito. Além disso, observa-se que o método analítico foi o que apresentou menor variação da força em relação ao semiângulo de trabalho, o que pode ser explicado pelo fato de ser uma formulação que não considera a variação do fluxo de material decorrente da variação do coeficiente de atrito.

Com relação ao aporte de calor decorrente da deformação plástica, nota-se através da Figura 5 que para a situação de atrito mais baixo ($\mu=0,07$) o semiângulo de trabalho influencia na porção de material afetado termicamente e também no valor de pico para temperatura. Já para a situação em que o atrito é maior ($\mu=0,1$), não há diferença significativa na porção de material, nem no valor máximo de temperatura em relação aos dois semiângulos estudados. Esta diferença de aporte de calor está condizente com os resultados dos cálculos de força, onde para a situação de maior atrito ($\mu=0,1$) verificam-se os maiores valores de força, o que pode ser explicado em função do atrito influenciar no fluxo do material.

Os resultados obtidos para a distribuição de deformação plástica efetiva, figura 06, não apresentaram diferença quando comparados em função do coeficiente de atrito. Entretanto, observa-se que a distribuição de deformação plástica efetiva para um valor de 0,2 apresentou abrangência maior para o semiângulo de trabalho igual a 8°. Tal fato se deve ao fator geométrico, onde o ângulo mais fechado (8°)

impõe maior deformação volumétrica, o que pode ser explicado através da tabela 04, onde se verifica que apenas a análise numérica acusou valor maior de força para a condição de semiângulo de trabalho igual a 8°.

5 CONCLUSÃO

Observou-se que os métodos de cálculo apresentaram boa coerência para os valores de força de conformação em função do coeficiente de atrito. A diferença entre os valores calculados para mesmas condições de semiângulo de trabalho e coeficiente de atrito foi atribuída as diferentes curvas de escoamento do mesmo material e em virtude dos diferentes métodos de cálculo.

As análises que consideraram um coeficiente de atrito $\mu=0,1$ apresentaram um semiângulo ótimo de 8°. Já para a condição de $\mu=0,07$, este valor foi de 7°.

Com relação ao aporte de calor decorrente da deformação plástica, a análise numérica demonstrou que o semiângulo de trabalho apresenta influência na abrangência e valor máximo da distribuição de temperatura para um coeficiente de atrito $\mu=0,07$. Já para a condição do coeficiente de atrito $\mu=0,1$, não foi observada significativa diferença para o aporte de calor.

A análise de deformação plástica efetiva não apresentou sensibilidade ao atrito, mas sim ao semiângulo de trabalho, sendo possível relacionar a abrangência da mesma com os valores calculados para força de conformação.

Os resultados obtidos a partir deste trabalho reafirmam que, entre os parâmetros de processo de trefilação, o atrito influencia os cálculos de cargas de conformação, bem como exerce grande influência no aporte de calor em função da deformação plástica. Por fim, é possível concluir que os métodos analíticos constituem-se de boa alternativa frente ao método de elementos finitos, pois através de simples correlações é possível obter um entendimento do processo físico.

REFERÊNCIAS

- 1 LANGE, K. "**Handbook of metal forming**". New York. McGraw-Hill, 1985.
- 2 BUTTON, S. T. "**Programa de Educação Continuada**". Cursos ABM – Trefilação, 2004.)
- 3 CETLIN, P. R; SANTOS, C. A. "**Simulação Numérica da Trefilação Axissimétrica do Aço Inoxidável 420 Considerando o Efeito do Caminho de Deformação**". Universidade Federal de Minas Gerais. Junho/2005
- 4 DIETER G.E., KUHN H.A. and S.L. "**Semiation Drawing of Wire, Rod and Tube**", editors, p 278-290. ASM international – 2003).
- 5 LIMA, V. T. "**Apostila de Processos Mecânicos e Metalúrgicos de Fabricação**". Universidade de Rio Verde – Faculdade de Engenharia Mecânica – FESURV, 2006
- 6 BUTTON, Cito In: "**Apostila de Conformação Plástica dos Metais**". MORAIS W. A Universidade Santa Cecília – UNISANTA. <http://cursos.unisanta.br>, acessado dia 18/12/2008; 2002
- 7 DIETER, G. E.; KUHN H. A.; "**Handbook of Workability and Process Design**", ASM International, Parks Ohio 2003. p280
- 8 H. Lepand: "**Herstellung von Stahldraht**" Teil 1, Verlag Stahl- eisen mbH, Düsseldorf, 1969, Herausgegeben vom Verein Deutscher Eisenhüttenleute,
- 9 MALE, A. T.; COCKCROFT, M. G. "**A Method for Determination of the Coefficient of Friction of Metals under Conditions of Bulk Plastic Deformation**". *Journal of the Institute of Metals*, v. 93, p. 38-46, 1964.

- 10 GEIER, M. **“Considerações sobre o Atrito para Processos de Forjamento a Frio através do Ensaio de Compressão do Anel”**. 2007. Dissertação (Mestrado em PPGEM/UFRGS Programa de Pós-Graduação em Eng Minas, Metalúrgica e Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- 11 www.matweb.com (16/12/07)
- 12 BLAKE et al, 1996, Cito In: **“Estudo numérico e analítico das evoluções da força e da espessura em chapas de aço livre de intersticiais durante processamento por embutimento e ironing”**; Frederico de Castro Magalhães, Haroldo Beria Campos. UFMG, 2005
- 13 <http://www.ufrgs.br/ldtm/ensaios/curvadeescoamento.html> - acessado em 03/12/2008
- 14 . SCHAEFFER, L. **“Conformação dos Metais”**, Metalurgia e Mecânica. Ed. Rígel, 1995, pg.60.
- 15 SCHEY, A.; J. **“Tribology in metalworking: friction, lubrication and wear”**. 1984