

COMPARAÇÃO DE RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS DA CONVERGÊNCIA E DO BOJAMENTO NO PROCESSO DE TREFILAÇÃO DE BARRAS CILÍNDRICAS ⁽¹⁾

*Tércio Assunção Pedrosa⁽²⁾
Antônio Eustáquio de Melo Pertence⁽³⁾
Haroldo Béria Campos⁽⁴⁾
Paulo Roberto Cetlin⁽⁵⁾*

Resumo

A trefilação é responsável pela produção de barras, vergalhões, arames e tubos. É caracterizado pela passagem de uma barra metálica através de uma matriz cônica, conhecida como fieira, com aplicação de um esforço de tração à saída da matriz, determinando a redução do diâmetro da barra. Os padrões de fluxo podem variar com o semi-ângulo da matriz, redução de área, condições de atrito e outros fatores. Podem ser encontrados padrões de fluxo normal, ocorrência de rupturas centrais, formação de zona morta e descascamento. No fluxo normal, foram relatadas ocorrências de irregularidades provocadas pela geometria da matriz e pela redução de área imposta ao metal durante a trefilação. O fluxo convergente ou convergência corresponde à redução da área da seção transversal da barra sendo trefilada, anteriormente ao contato com a fieira, resultando no encruamento do metal antes de seu ingresso na zona de deformação plástica. O fluxo divergente ou bojamento é caracterizado por um ligeiro aumento do diâmetro da barra, restrito a uma pequena região da mesma antes do contato com a matriz. O estudo das condições que favorecem a ocorrência de irregularidades de fluxo pode auxiliar na solução das disparidades existentes entre a análise teórica do processo e os resultados experimentais disponíveis. No presente artigo é indicada a avaliação das condições que determinam a ocorrência de bojamento através da simulação pelo método de elementos finitos, considerando-se o caso de uma trefilação de barra cilíndrica. Os resultados obtidos através da simulação são comparados com os resultados experimentais obtidos na literatura.

Palavras-chave: Bojamento; Trefilação; Método de elementos finitos.

⁽¹⁾Artigo a ser apresentado no 60º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM de 25 a 28 de julho de 2005 em Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil

⁽²⁾Atualmente na GERDAU-AÇOMINAS, Ouro Branco, MG.

⁽³⁾Prof. Adjunto do Depto. de Eng. Mecânica da UFMG

⁽⁴⁾Prof. Adjunto do Depto. de Eng. Mecânica da UFMG

⁽⁵⁾Prof. Titular do Depto. de Eng. Metalúrgica e de Materiais da UFMG

1 INTRODUÇÃO

O processo de trefilação é caracterizado pela passagem de um corpo metálico através de uma matriz ou fieira com diâmetro interno cônico, por meio de uma força de tração aplicada à saída da matriz. Produtos como arames, barras, vergalhões e tubos podem ser fabricados através deste processo. Grande parte do escoamento plástico que ocorre durante a passagem pela matriz se dá por forças de compressão que aparecem em função da reação do metal com a matriz. O processo é conduzido normalmente à temperatura ambiente, entretanto, devido às grandes deformações envolvidas e ao atrito existente entre o metal e a matriz, há uma considerável elevação da temperatura durante o processamento por trefilação.

Os princípios envolvidos na trefilação de barras, arames e tubos são basicamente os mesmos, embora os equipamentos utilizados sejam diferentes em virtude das diferentes dimensões destes produtos. Tubos e barras que não podem ser bobinados são produzidos em bancas de trefilação. Neste caso, a matéria-prima é apontada por forjamento, colocada sobre a banca e inserida na matriz. Em seguida, a extremidade apontada é presa por uma garra que é deslocada por meio de correntes ou cabos que proporcionam a força de tração necessária para a trefilação.

A trefilação de arames se inicia com uma barra laminada a quente e bobinada, denominada fio-máquina. A bobina é primeiramente decapada para remoção da camada superficial de carepa, evitando assim a ocorrência de defeitos superficiais no produto final ou desgaste excessivo da matriz devido à abrasão. O passo seguinte é a preparação superficial da barra buscando uma lubrificação efetiva. Em materiais de alta resistência mecânica, o recobrimento da superfície com metais macios como cobre e estanho pode ser aplicado. Entretanto, a preparação típica é feita através da aplicação de camadas de conversão como fosfatos, sulfatos e oxalatos, em conjunto com um lubrificante.

Os blocos de trefilação são o equipamento comumente empregado na produção de arames e permitem o processamento de grandes comprimentos com um espaço muito menor que no caso das bancas de trefilação. Em virtude das reduções de área serem menores que 30-35% na maioria dos casos, muitas reduções são necessárias para que se alcance a redução total desejada. Máquinas de múltiplos blocos com um bloco de trefilação e uma matriz ou fieira para cada redução são comuns. O produto final pode ser fornecido no estado recozido ou outros graus de encruamento chegando até ao estado totalmente encruado (*full hard*). Dependendo do metal sendo trefilado e as reduções de área envolvidas, tratamentos térmicos intermediários podem ser necessários. A Figura 1 abaixo ilustra o exposto acima.

Os defeitos encontrados nos produtos trefilados podem resultar de defeitos existentes na matéria-prima empregada ou do processo de conformação em si. Entretanto, o processo tem como características peculiares um bom acabamento superficial e bom controle dimensional.

A seção transversal de uma matriz ou fieira para trefilação é mostrada na Figura 2. Nota-se a existência de quatro regiões distintas ao longo de seu eixo. A entrada da matriz (sino) é construída de tal forma que o material sendo trefilado carregue o lubrificante para o interior da mesma. Na seção cônica da matriz se dá a deformação plástica do metal, determinando a redução de área da barra, sendo algumas vezes mencionada como “zona de deformação”. O semi-ângulo da matriz (α) é a metade do ângulo que constitui a região cônica ou zona de deformação,

sendo este um importante parâmetro de processo. A seção cilíndrica, também conhecida como zona de calibração, é responsável pelo ajuste das dimensões do produto trefilado, além de remover eventuais defeitos provocados pelo desgaste da seção cônica. A seção de saída permite uma leve expansão do metal trefilado quando deixa a matriz e evita o desgaste abrasivo na interrupção do processo ou em consequência de um desalinhamento da matriz. As matrizes para trefilação são normalmente constituídas de metal duro ou de carboneto de tungstênio e normalmente são envoltas numa carcaça de aço.

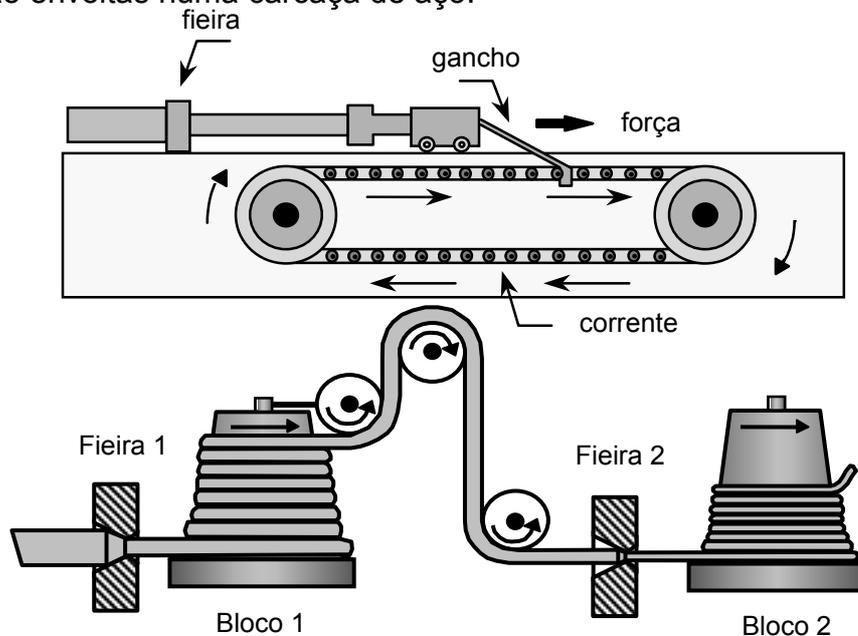


Figura 1. Ilustração esquemática da banca de trefilação e do bloco de trefilação

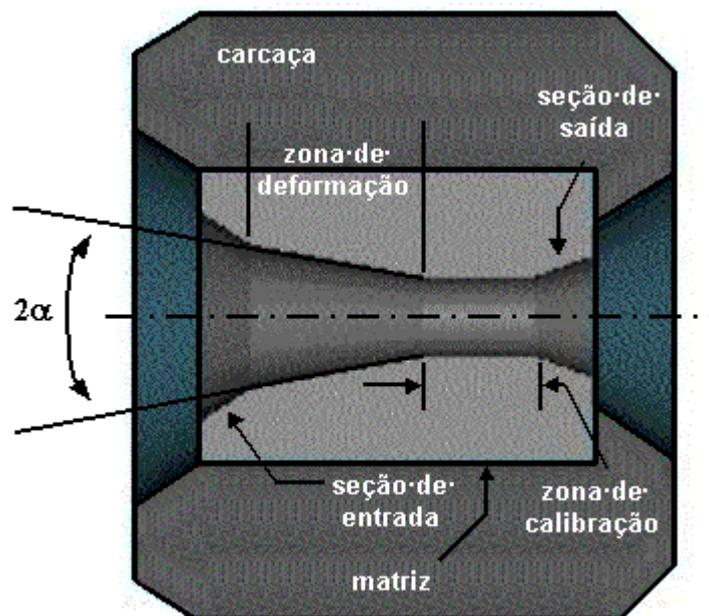


Figura 2. Seção transversal de uma matriz de trefilação.

A heterogeneidade de deformação na trefilação é caracterizada pelos diferentes níveis de deformação interna sofrida por elementos de diferentes camadas, tendo como resultado um gradiente de deformação ao longo da seção transversal. O grau de heterogeneidade de deformação obtida na trefilação

depende, essencialmente, do semi-ângulo da matriz (α) e da redução de área (r) imposta ao material, dentre outros parâmetros (Cetlin, 1983)

2 PADRÕES DE FLUXO NA TREFILAÇÃO

Os padrões de fluxo através de matrizes foram analisados por Avitzur (1964, 1989). Observa-se nas análises que os padrões mudam com a variação do semi-ângulo da fieira, redução de área, condições de atrito e outros, havendo três campos de velocidades possíveis, cinematicamente admissíveis: os campos esférico, triangular e trapezoidal. O aumento do semi-ângulo de fieira pode determinar a formação de zona morta e, para semi-ângulos muito elevados, o descascamento. Outras condições podem favorecer a ocorrência de rupturas centrais, uma transição entre fluxo normal e a formação de zona morta.

Na faixa de fluxo normal, podem ocorrer irregularidades de fluxo, provocadas essencialmente pela geometria da matriz e pela redução de área imposta ao metal durante a trefilação. O fluxo convergente ou convergência corresponde à redução da área da seção transversal da barra sendo trefilada, anteriormente ao contato com a fieira, resultando no encruamento do metal antes de seu ingresso na zona de deformação plástica (Figura 3a). O fluxo divergente ou bojamento é caracterizado por um ligeiro aumento do diâmetro da barra, restrito a uma pequena região da mesma antes do contato com a matriz (Figura 3b). O bojamento pode ocorrer para pequenas reduções de área e elevados semi-ângulos da fieira.

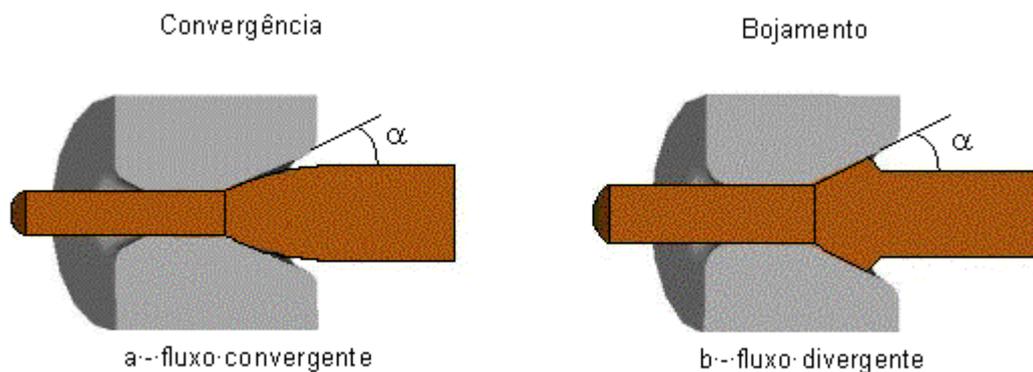


Figura 3. Ilustração esquemática de irregularidades de fluxo observadas em trefilação: (a) fluxo convergente; (b) fluxo divergente.

A ocorrência de fluxo convergente foi observada nos trabalhos de Campos (1993) e Castro (1996). Nestes trabalhos, o fluxo convergente foi observado em passes de trefilação de barras de cobre ainda no estado recozido. Para uma dada matriz, a profundidade de convergência se eleva à medida que a redução de área cresce.

A literatura sobre a ocorrência de bojamento em arames é restrita. Campos (1993), em seu trabalho, verificou a ocorrência de um ligeiro fluxo divergente imediatamente antes do contato metal-matriz. Este fenômeno tornou-se mensurável nas trefilações com semi-ângulo de 24.5° e para reduções de área de até 10%. O fenômeno se acentua com a diminuição da redução, com o aumento do semi-ângulo da matriz, independentemente das condições de atrito.

3 METODOLOGIA

As irregularidades de fluxo na trefilação de barras de cobre comercialmente puro foram avaliadas através da aplicação do método de elementos finitos. Tal avaliação se deu através de simulações numéricas onde foi observada a influência de parâmetros como redução de área (r), semi-ângulo da matriz (α) e o estado do material (recozido ou pré-deformado por trefilação). Os dados obtidos foram confrontados com os resultados dos trabalhos experimentais de Campos (1993). As simulações numéricas foram realizadas através do programa comercial de elementos finitos DEFORM 2D 7.1, fornecido pela SFTC – Scientific Forming Technologies Corporation.

Campos (1993) realizou o estudo de irregularidades de fluxo na trefilação em passe único de barras de cobre comercialmente puro. O cobre comercialmente puro foi escolhido em virtude de sua importância tecnológica na indústria de trefilação, disponibilidade e facilidade para se conseguir boa lubrificação. Além disto, este material não apresenta envelhecimento durante e/ou após a trefilação. A análise química do cobre utilizado no trabalho é dada na Tabela 1. Os corpos de prova foram usinados, em alguns casos jateados com areia, e, posteriormente, sofreram tratamento térmico de recozimento com o objetivo de se eliminar o encruamento observado após a usinagem/jateamento.

Tabela 1. Análise química das barras de cobre utilizadas por Campos (1993).

Elementos	Pb	Ni	Mn	Al	Co	Fe	Sn	Zn	O ₂	Cu
% Máxima	0.015	0.015	0.005	0.02	0.001	0.005	0.091	22ppm	200ppm	balanço

Os corpos de prova foram trefilados até aproximadamente 50% do seu comprimento útil, empregando-se água, óleo e pasta de Molykote como lubrificantes. Em seguida, foram retirados das matrizes sem a aplicação de tração. As medidas de irregularidades de fluxo foram realizadas com o auxílio de um projetor de perfis com ampliação de 50 vezes. Foram medidos os diâmetros ao longo do comprimento do corpo de prova nas proximidades da região de contato entre o metal e a matriz com espaçamento entre as medições de 0,2 mm.

As dimensões de alguns dos corpos de prova, suas reduções de área e os semi-ângulos das matrizes utilizados nas trefilações são mostrados na Tabela 2. A trefilação dos corpos de prova foi realizada numa banca de trefilação horizontal Bestlé, com velocidade de 3mm/s no passe.

Tabela 2. Dimensões dos corpos de prova, reduções de área, taxa de deformação e semi-ângulos das matrizes utilizadas por Campos (1993).

C. Prova	D. Inicial (mm)	D. Final (mm)	Redução (%)	α (graus)	Taxa de deformação (s ⁻¹)
1	10,911	10,011	15,82	24,5	0,4817
7	10,657	10,011	11,77	24,5	0,4982
16	10,314	10,011	5,79	24,5	0,5226
62	10,647	10,011	11,35	20,00	0,3988
73	10,468	10,011	8,53	14,20	0,2839
87	10,245	10,011	4,54	10,00	0,2042
96	10,215	10,011	4,07	5,00	0,1018
108	10,055	10,011	1,11	3,00	0,0624

A profundidade de convergência (P_C) foi definida como sendo a metade da diferença entre o diâmetro nominal (D_i) e o maior diâmetro de contato metal/matriz

(D_c). A altura de bojamento (H_B) foi definida como sendo a metade da diferença entre o maior diâmetro de contato metal/matriz (D_B) e o diâmetro de nominal (D_i). A Figura 4 ilustra este procedimento.

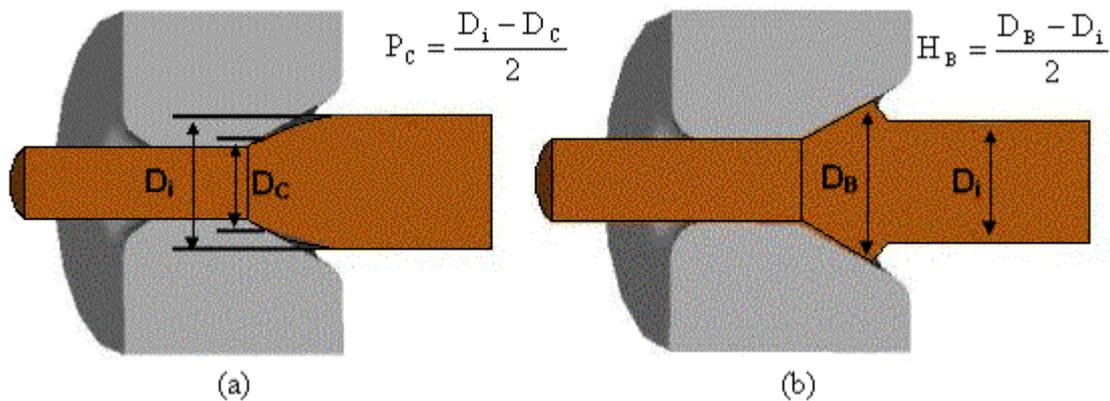


Figura 4. Desenho esquemático do procedimento para medição das irregularidades de fluxo. (a) convergência; (b) bojamento

Na simulação através do método de elementos finitos utilizou-se o refino da malha ao longo da barra, controlando a quantidade de elementos e sua densidade de tal forma que o tempo computacional de simulação não fosse demasiado grande (Zienkiewicz e Taylor, 1989).

Os coeficientes de atrito utilizados nas simulações são as médias aritméticas de resultados experimentais obtidos através da técnica de Johnson e Rowe (1968), para pequenos semi-ângulos de matriz (Campos, 1993). A Tabela 3 indica os valores utilizados.

Tabela 3. Média dos valores de coeficientes de atrito obtidos no trabalho de Campos (1993)

Condição	I	II	III	IV
Acabamento superficial	Jateado com areia	Usinado	Usinado	Usinado
Lubrificante	Pasta de Molykote	Óleo	Água	Pasta de Molykote
Coef. de atrito médio μ	0,04	0,06	0,14	0,01

Em virtude da simetria do sistema barra/matriz, a condição de axissimetria do DEFORM foi escolhida. Assim, desenhou-se somente a metade da seção longitudinal dos corpos de prova e das matrizes. A Figura 5 ilustra esquematicamente o exposto acima. Os corpos de prova foram desenhados respeitando-se o raio inicial, o raio da seção apontada ($1/2 D_{ap}$) e o ângulo α , que equivale ao semi-ângulo da matriz, de acordo com a Figura 4. Para as matrizes, foram mantidos o raio final (metade de D_f , na Tabela 2 e o semi-ângulo α . O comprimento da zona de calibração foi definido como trinta por cento do diâmetro final das matrizes. O comprimento da zona de deformação foi determinado de forma que o diâmetro de entrada da matriz fosse sempre maior que o diâmetro inicial da barra no passe. As matrizes foram definidas como corpos rígidos (ausência de deformação plástica) e foram mantidas fixas em relação à origem do sistema de coordenadas que as define.

Os corpos de prova foram definidos como materiais plásticos. A curva tensão x deformação verdadeira para o cobre comercialmente puro recozido, introduzida nas simulações, foi obtida no trabalho de Campos (1993). A temperatura introduzida foi de 25°C e utilizou-se as mesmas taxas de deformação. As velocidades de

trefilação adotadas foram de 3mm/s. Para as simulações das condições de trefilação do trabalho de Campos (1993), foram realizados 400 passos. Neste caso, a duração de cada passo foi de 0,033s. Em ambos os casos, os dados das simulações foram armazenados a cada 10 passos da simulação.

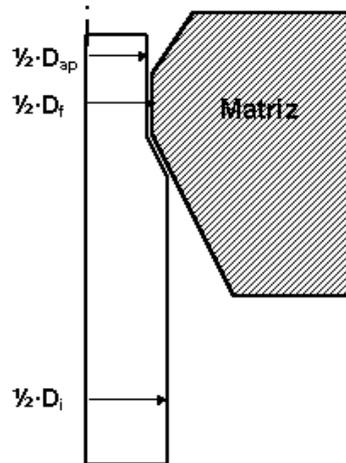


Figura 5. Corpo de prova e matriz de trefilação como inseridos no DEFORM.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 6 mostra, a título de exemplo, o perfil de irregularidades de fluxo obtido na simulação numérica para o corpo de prova 1; a Tabela 4 indica os dados experimentais e da simulação por elementos finitos das profundidades de convergência (P_C) e alturas de bojamento (H_B).

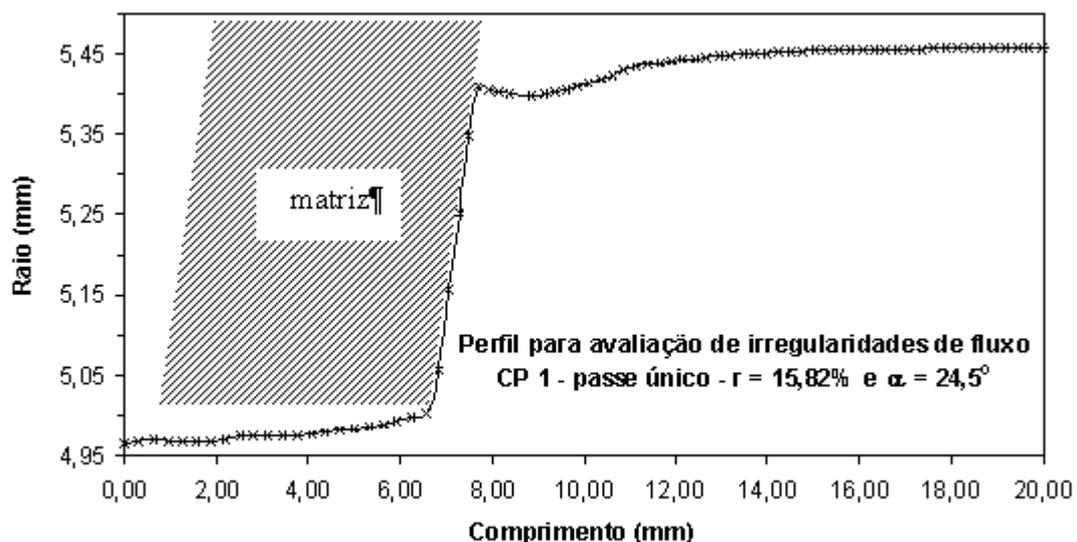


Figura 6. Perfil de irregularidades de fluxo para o corpo de prova 1.

Os perfis de irregularidades de fluxo observados nas simulações numéricas através do método de elementos finitos revelam que houve uma tendência para ocorrência de fluxo convergente associado ao bojamento. Na literatura (Campos, 1993 e Castro, 1996), é freqüente a caracterização das irregularidades de fluxo observadas nas simulações com diferentes valores de semi-ângulo e redução de área utilizadas por Campos como “fluxo convergente associado ao bojamento”.

Tabela 4. Dados experimentais e da simulação por elementos finitos das profundidades de convergência (P_C) e alturas de bojamento (H_B).

Corpo Prova	Redução (%)	α (graus)	Perfil Elementos Finitos	Simul. Elementos Finitos		Experimental	
				P_C (mm)	H_B (mm)	P_C (mm)	H_B (mm)
1	15,82	24,5	Conv./Boj.	0.058	0.010	0.064	-x-
7	11,77	24,5	Conv./Boj.	0.044	0.041	0.034	0.003
16	5,79	24,5	Conv./Boj.	0.029	0.040	0.007	0.007
62	11,35	20,00	Conv./Boj.	0.042	0.016	0.054	-x-
73	8,53	14,20	Conv./Boj.	0.032	0.005	0.027	-x-
87	4,54	10,00	Conv./Boj.	0.005	0,001	0.012	-x-
96	4,07	5,00	Conv.	0.004	-x-	0.015	-x-
108	1,11	3,00	Conv./Boj	0,001	0,001	0.002	-x-

De acordo com os resultados experimentais, o fluxo convergente associado ao bojamento foi observado para os corpos de prova 7 e 16 na Tabela 4. Já para os corpos de prova 1, 62, 73, 87, 96 e 108, experimentalmente observa-se somente a convergência. Qualitativamente, a simulação numérica concorda com os resultados experimentais para os corpos de prova 7, 16 e 96, prevendo valores maiores que os observados para a convergência/bojamento (corpos de prova 7 e 16) e menores que os experimentais para o caso só de convergência (corpo de prova 96).

Para os corpos de prova 1, 62, 73, 87 e 108 a simulação numérica prevê a ocorrência da convergência/bojamento, o que não é confirmado experimentalmente. No entanto, o valor de bojamento previsto numericamente para o bojamento dos corpos de prova 73, 87 e 108 é bastante pequeno.

A análise das observações acima permite concluir que a simulação por elementos finitos permite detectar a tendência para a ocorrência de convergência e bojamento na trefilação axissimétrica do cobre.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 CETLIN, P.R. Propriedades mecânicas à tração de barras e arames de seção circular obtidos por trefilação. Belo Horizonte: UFMG, 1983. 219p. **Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica)** – Escola de Engenharia da UFMG, 1983.
- 2 AVITZUR, B. Flow through dies update, 1989, **Wire Industry**, p.243-249, april 1989.
- 3 AVITZUR B. Analysis of wire drawing and extrusion through dies of large cone angle. **Trans. ASME, Journal of Engineering for Industry**, v. 66, p.305-316, November 1964.
- 4 CAMPOS, H.B. Estudo da deformação na trefilação em passes simples de barras de cobre. Belo Horizonte: UFMG, 1993. 369p. **Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica)** – Escola de Engenharia da UFMG, 1993.
- 5 CASTRO, U.D. Irregularidades de fluxo na trefilação em passes múltiplos de cobre. Belo Horizonte: UFMG, 1996. 108p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Escola de Engenharia da UFMG, 1996.
- 6 ZIENKIEWICZ, O.C., TAYLOR. R.L. The Finite Element Method. 4 ed. New York: McGraw-Hill, 1989. 648p.
- 7 JOHNSON, R.W., ROWE, G.W. Bulge formation in strip drawing with light reductions in area, Proc. Inst. Mech. Engrs., v. 182, n. 22, 1968, p.521-529.

THE COMPARISON OF NUMERICAL AND EXPERIMENTAL RESULTS FOR BULGING AND CONVERGENCE IN THE DRAWING OF CYLINDRICAL BARS

*Tércio Assunção Pedrosa⁽²⁾
Antônio Eustáquio de Melo Pertence⁽³⁾
Haroldo Béria Campos⁽⁴⁾
Paulo Roberto Cetlin⁽⁵⁾*

Abstract

Drawing is widely employed in the manufacturing of bars, tubes and wires. The material is pulled through a conical die, causing a reduction the cross-section of the work-piece. The material flow during drawing depends on die semi-angle, reduction of area in the pass, die/material friction and other factors. A normal converging flow is usually observed, but central bursts, dead-zone formation and surface shaving can be observed. Two flow irregularities can occur during normal flow: convergence and bulging. Convergence is observed when the deformation imposed by the die starts before the die entrance. Bulging is characterized by an increase in the bar diameter immediately before the contact of the material with the die. The present paper presents a comparison between the experimentally observed and numerically predicted occurrence of these phenomena, for the axissymmetric drawing of copper bars. The predictions coincide qualitatively with the experiments in a number of cases. The values of bulging and convergence are similar to those measured experimentally.

Key-words: Bar drawing; Convergence; Bulging; Finite elements.