

AVALIAÇÃO DAS IRREGULARIDADES DE FLUXO NO PROCESSO DE TREFILAÇÃO DE BARRAS CILÍNDRICAS ATRAVÉS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS¹

*Tércio Assunção Pedrosa²
Antônio Eustáquio de Melo Pertence³
Haroldo Béria Campos³
Paulo Roberto Cetlin⁴*

Resumo

O processo de trefilação é responsável pela produção de diversos itens como barras, vergalhões, arames e tubos. É caracterizado pela passagem de uma barra metálica através de uma matriz cônica, comumente conhecida como fieira, mediante a aplicação de um esforço de tração à saída da matriz. Os padrões de fluxo observados podem variar com o semi-ângulo da matriz, redução de área, condições de atrito e outros fatores. Em função de variações destas condições podem ser encontrados padrões que vão desde o fluxo normal, ocorrência de rupturas centrais, formação de zona morta e descascamento. 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. Assim o estudo das condições que favorecem a ocorrência de irregularidades de fluxo pode trazer benefícios para o conhecimento mais detalhado do processo de trefilação, auxiliando 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 irregularidades de fluxo através da simulação pelo método de elementos finitos, considerando-se o caso de uma trefilação de barra cilíndrica.

Palavras-chave: Irregularidade de fluxo; Trefilação; Método de elementos finitos

THE EVALUATION OF FLOW IRREGULARITIES IN THE AXISYMMETRIC DRAWING OF BARS THROUGH THE FINITE ELEMENT METHOD

Abstract

Axisymmetric bar drawing is widely employed in the manufacturing of bars, tubes and wires. The material is pulled through a conical die, involving the application of a force on the material after the die exit. The material flow pattern during this type of processing depends on die semi-angle, reduction of area in the pass, friction between the material and the die and other factors. A variety of situations may be found, involving normal conical flow, central bursts, dead zone formation, shaving, bulging and convergence. Convergent flow leads to a decrease in the bar diameter before its entrance in the die, whereas bulging corresponds to a diameter increase before the die entrance. The study of flow irregularities in bar drawing is of importance in order to achieve a better understanding of these phenomena, aiming at a better theoretical approach of the process. The present paper presents an analysis of flow irregularities in the axisymmetric drawing of bars, employing the finite element method.

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

¹ *Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ*

² *Eng. Met. Msc. GERDAU-AÇOMINAS, Ouro Branco, MG.*

³ *Prof. Adjunto do Depto. de Eng. Mecânica da UFMG*

⁴ *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. É também comum a aplicação de camadas de conversão como fosfatos, sulfatos e oxalatos, em conjunto com um lubrificante.

Os blocos de trefilação são equipamentos 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 múltiplas unidades 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.

Os defeitos encontrados nos produtos trefilados podem originar-se na matéria-prima empregada ou no processo de conformação em si, que, entretanto, o 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 1. Nota-se a existência de quatro regiões distintas ao longo de seu eixo. A entrada da matriz 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. A seção de saída diminui ainda o desgaste abrasivo na interrupção do processo ou em consequência de um desalinhamento da matriz. As matrizes para trefilação são normalmente constituídas em carboneto de tungstênio e normalmente são envoltas numa carcaça de aço.

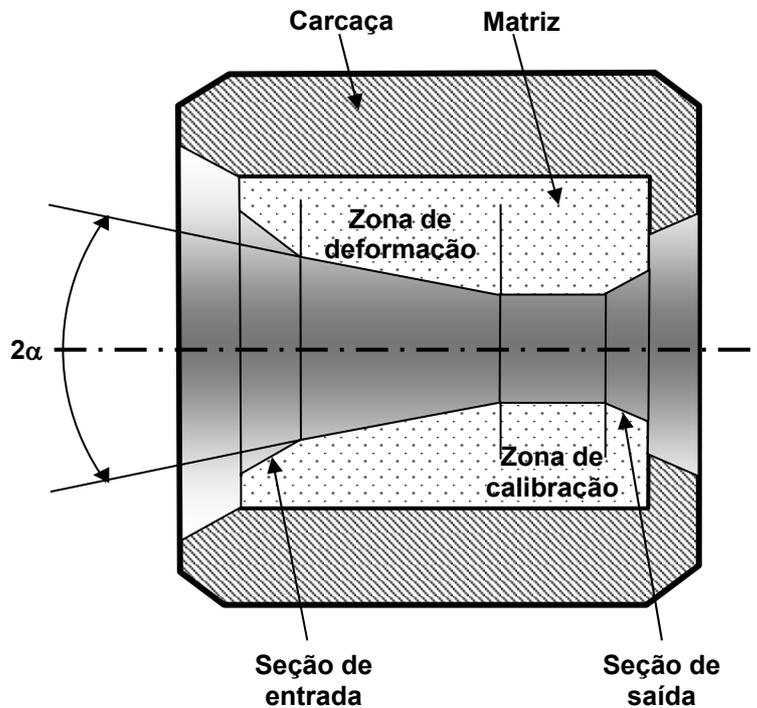


Figura 1. Seção transversal de uma matriz de trefilação

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.⁽¹⁾

2 Padrões de Fluxo na Trefilação

Os padrões de fluxo através de matrizes foram analisados por Avitzur.^(2,3) Observa-se nas análises que os padrões mudam com a variação do semi-ângulo da fiação, 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 fiação pode determinar a formação de zona morta e, para semi-ângulos muito elevados, o descascamento. Outras condições podem também favorecer a ocorrência de rupturas centrais.

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 fiação, resultando no encruamento do metal antes de seu ingresso na zona de deformação plástica (Figura 2a). 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 2b). O bojamento pode ocorrer para pequenas reduções de área e elevados semi-ângulos da fieira.

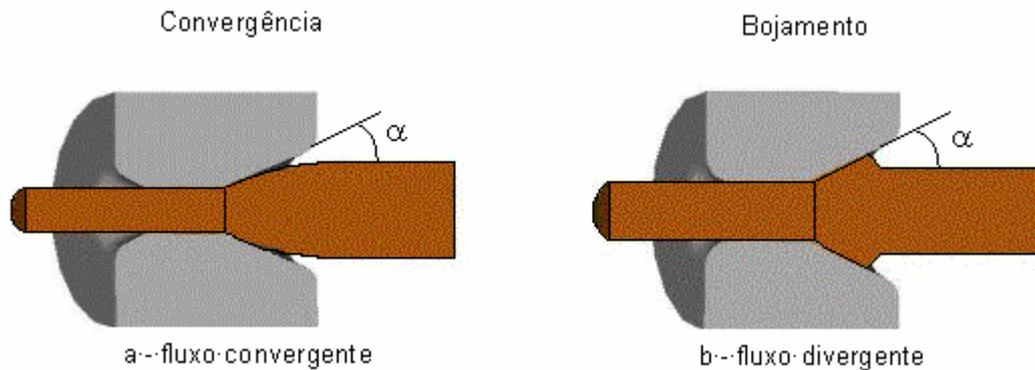


Figura 2. Ilustração esquemática de irregularidades de fluxo observadas em trefilação: (a) fluxo convergente; (b) fluxo divergente.

A ocorrência de fluxo convergente foi observada nos trabalhos de Campos⁽⁴⁾ e Castro.⁽⁵⁾ 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,⁽⁴⁾ em seu trabalho, verificou a ocorrência de um ligeiro fluxo divergente imediatamente antes do contato metal-matriz.

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). As simulações numéricas foram realizadas através do programa comercial de elementos finitos DEFORM 2D 7.1, fornecido pela SFTC – Scientific Forming Technologies Corporation.

Campos⁽⁴⁾ 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.

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 1. A trefilação dos corpos de prova foi realizada numa banca de trefilação horizontal Bestlé, com velocidade de 3mm/s no passe.

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 3 ilustra este procedimento.

Tabela 1. Dimensões dos corpos de prova, reduções de área, taxa de deformação e semi-ângulos das matrizes utilizadas por Campos.⁽⁴⁾

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
3	10,777	10,011	13,70	24,5	0,4903
7	10,657	10,011	11,77	24,5	0,4982
9	10,608	10,011	10,96	24,5	0,5016
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

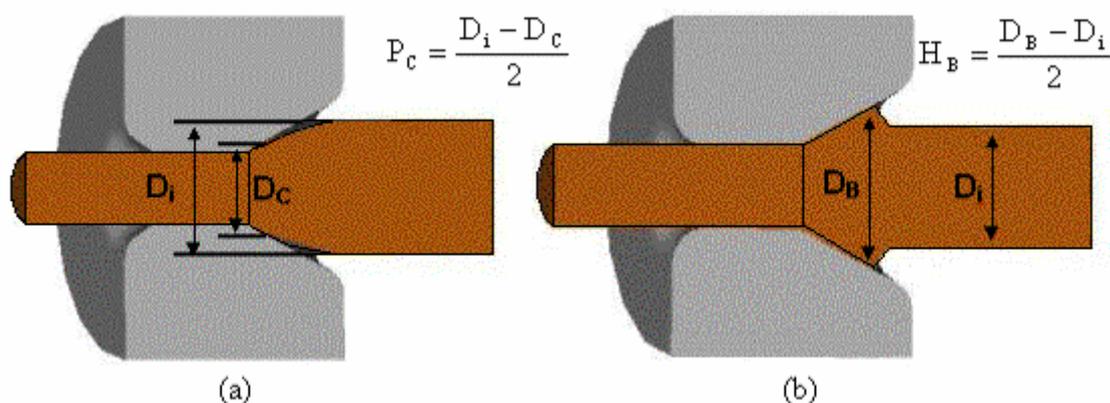


Figura 3. Desenho esquemático do procedimento para medição das irregularidades de fluxo. (a) convergência; (b) bojamento

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.⁽⁶⁾ Os coeficientes de atrito utilizados nas simulações são as médias aritméticas de resultados experimentais obtidos através da técnica de Johnson e Rowe,⁽⁷⁾ para pequenos semi-ângulos de matriz.⁽⁴⁾ A Tabela 2 indica os valores utilizados.

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 4 ilustra esquematicamente o exposto acima

Tabela 2. Média dos valores de coeficientes de atrito obtidos por Campos.⁽⁴⁾

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

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 3. Para as matrizes, foram mantidos o raio final (metade de D_f , na Tabela 1 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.⁽⁴⁾ A temperatura introduzida foi de 25°C e utilizaram as mesmas taxas de deformação deste trabalho. As velocidades de trefilação adotadas foram de 3 mm/s. Para as simulações foram realizados 400 passos. Neste caso, a duração de cada passo foi de 0,033s. Os dados das simulações foram armazenados a cada 10 passos da simulação.

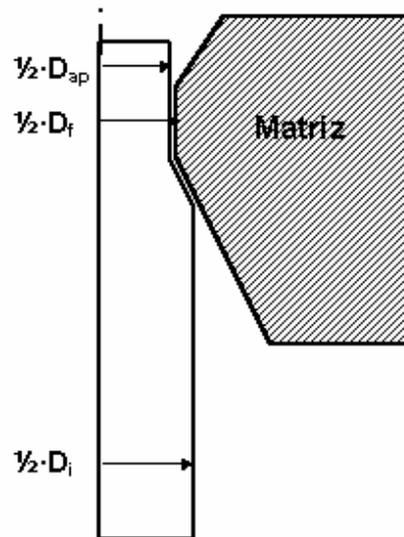


Figura 4. Corpo de prova e matriz de trefilação como inseridos no DEFORM.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras de 5 a 12 indicam respectivamente os perfis de irregularidades de fluxo obtidos na simulação numérica para o corpo de prova 1, 3, 7, 9, 62, 73, 87 e 96. A Tabela 3 indica os dados da simulação por elementos finitos das profundidades de convergência (P_C) e alturas de bojamento (H_B).

Na maioria dos casos os perfis de irregularidade de fluxo mostrados nas figuras indicam a existência de um primeiro estágio de convergência, seguido posteriormente por um segundo estágio deste fenômeno, com profundidade maior que o primeiro. Para efeito de descrição dos resultados, optou-se por caracterizar o fenômeno como um fluxo convergente único cuja profundidade corresponde à soma das profundidades observadas nos dois estágios.

Qualitativamente, a simulação numérica concorda com os resultados experimentais obtidos na literatura,⁽⁴⁾ entretanto, o fluxo convergente associado ao bojamento é observado.

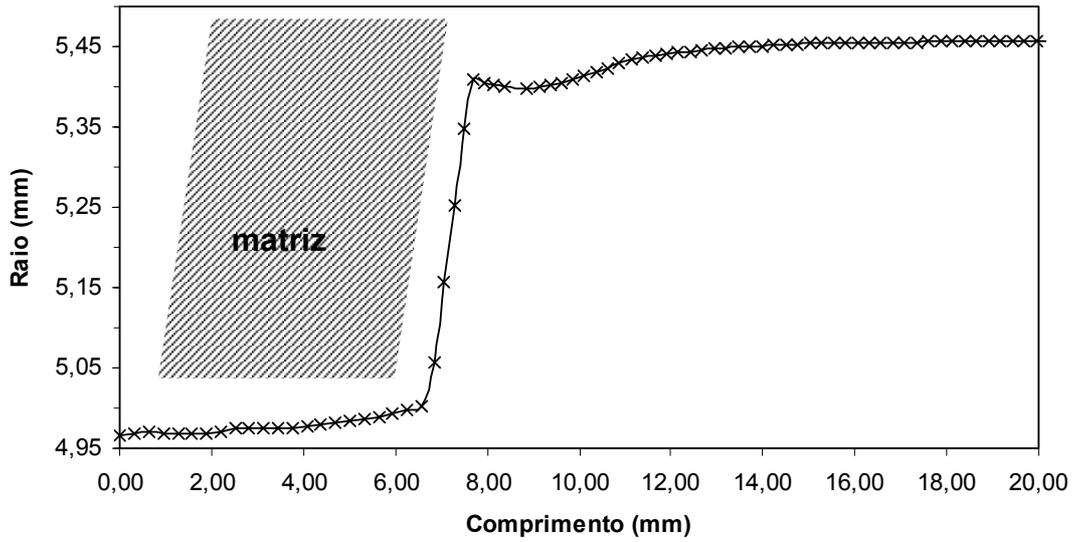


Figura 5. Simulação do perfil de irregularidade de fluxo para o corpo de prova 1

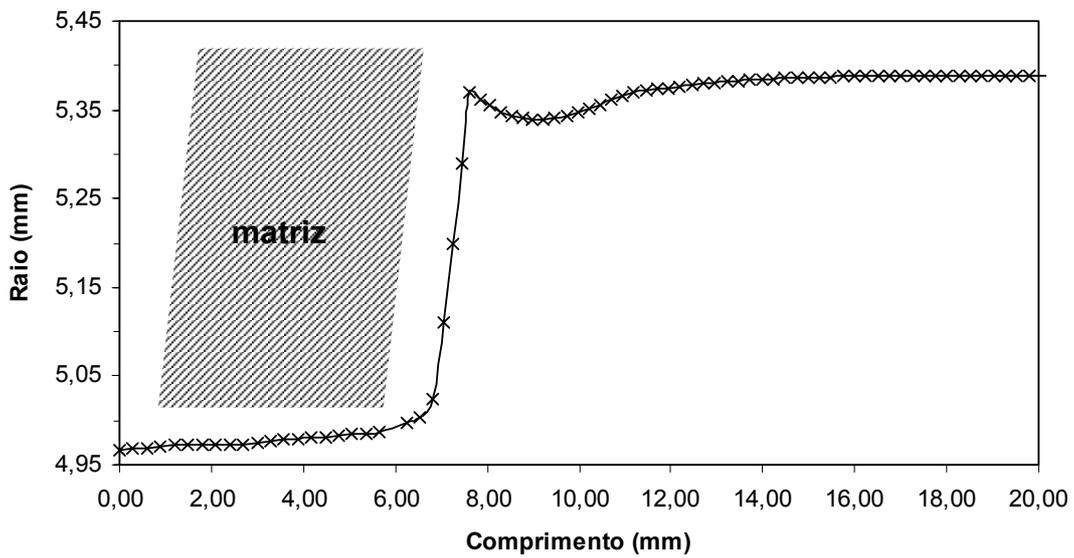


Figura 6. Simulação do perfil de irregularidade de fluxo para o corpo de prova 3

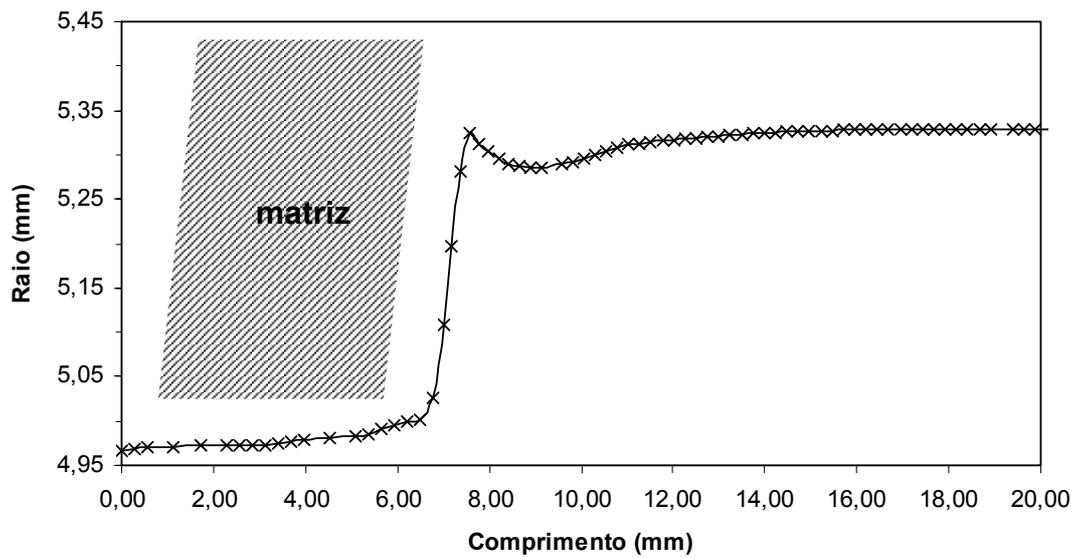


Figura 7 Simulação do perfil de irregularidade de fluxo para o corpo de prova 7

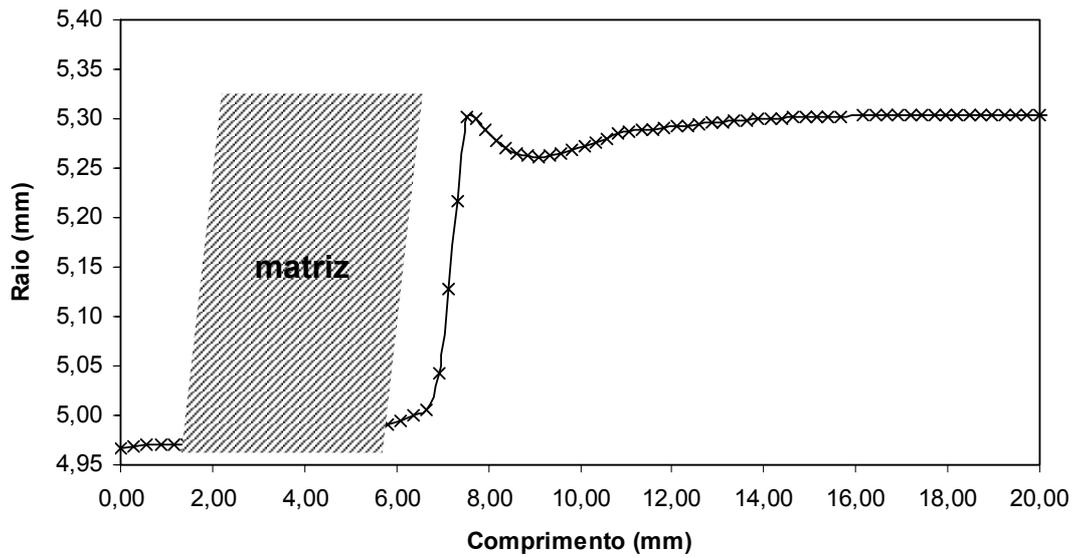


Figura 8 Simulação do perfil de irregularidade de fluxo para o corpo de prova 9

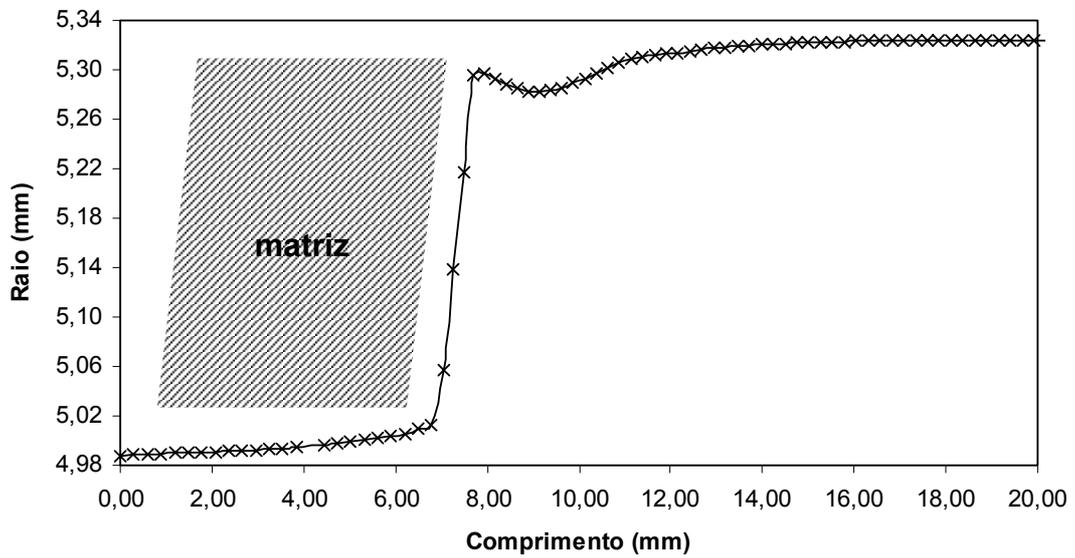


Figura 9 Simulação do perfil de irregularidade de fluxo para o corpo de prova 62

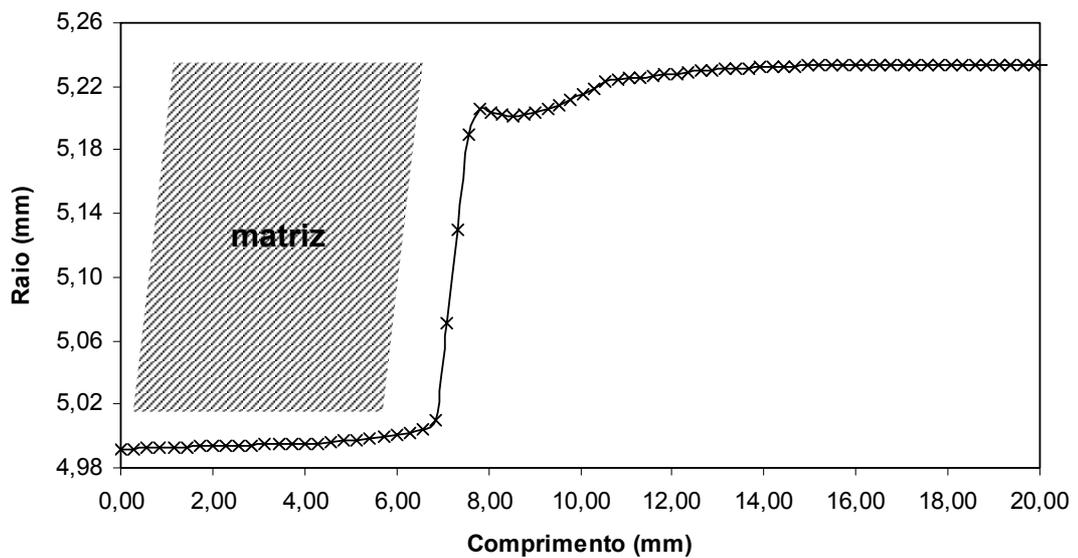


Figura 10. Simulação do perfil de irregularidade de fluxo para o corpo de prova 73

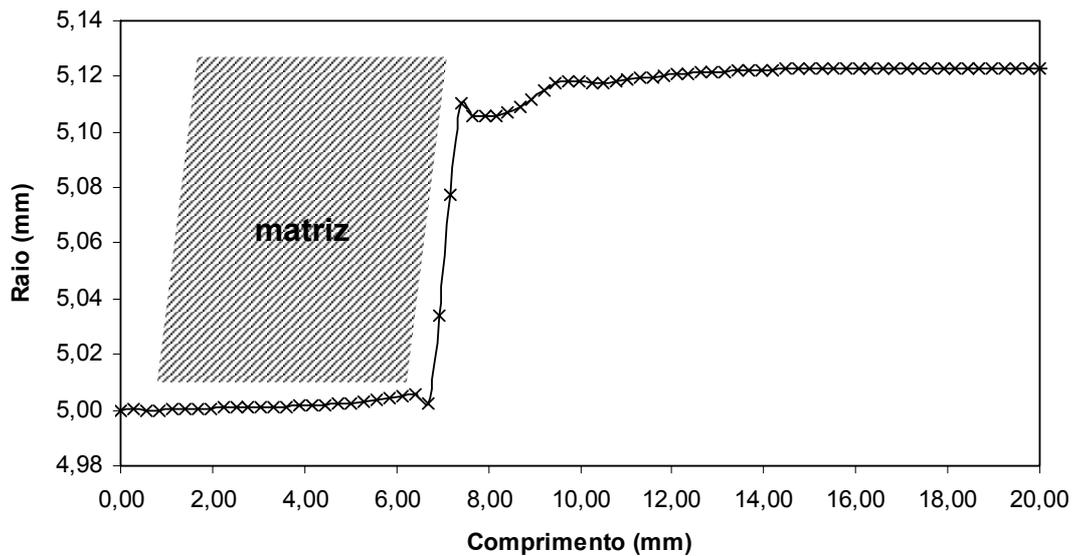


Figura 11. Simulação do perfil de irregularidade de fluxo para o corpo de prova 87

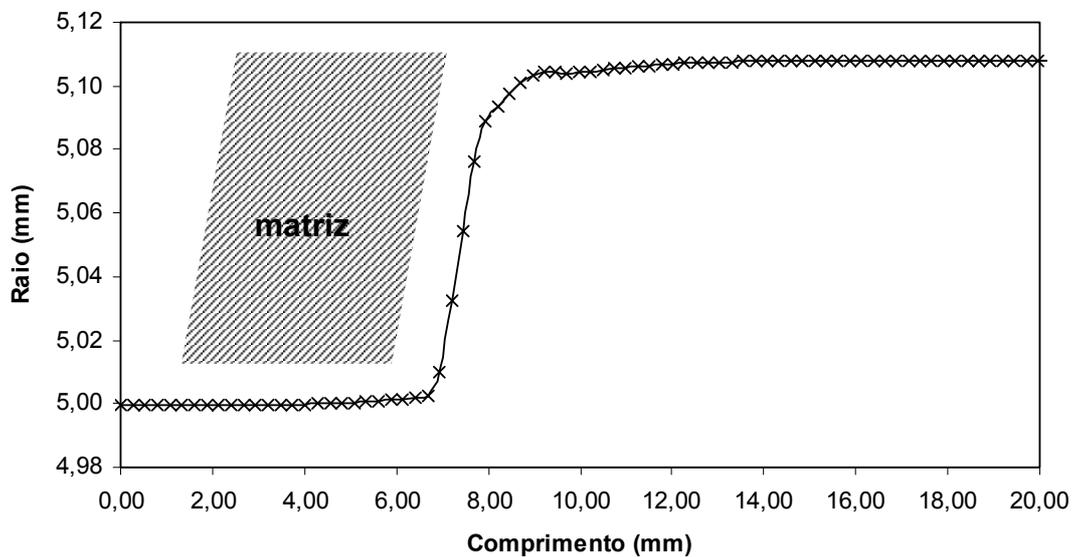


Figura 12. Simulação do perfil de irregularidade de fluxo para o corpo de prova 96

Tabela 3. 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	
				P_C (mm)	H_B (mm)
1	15,82	24,5	Conv./Boj.	0.058	0.010
3	13,70	24,5	Conv./Boj.	0.050	0.030
7	11,77	24,5	Conv./Boj.	0.044	0.041
9	10,96	24,5	Conv./Boj.	0.043	0.041
62	11,35	20,00	Conv./Boj.	0.042	0.016
73	8,53	14,20	Conv./Boj.	0.032	0.005
87	4,54	10,00	Conv./Boj.	0.005	0,001
96	4,07	5,00	Conv.	0.004	-x-

5 CONCLUSÃO

De qualquer forma, a análise 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

- 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.