



Irregularidades de fluxo na trefilação de barras

Ubirajara Domingos de Castro - Pontifícia Universidade de Minas Gerais biracastr@yahoo.com.br
Paulo Roberto Cetlin - Universidade Federal de Minas Gerais
Fernanda Guimarães Borges - Pontifícia Universidade de Minas Gerais fer_borges@hotmail.com
Rodrigo Santiago Coelho - Pontifícia Universidade de Minas Gerais

Resumo

Recentes resultados de pesquisa sobre o fluxo metálico na trefilação de cobre recozido indicaram a ocorrência de fluxo convergente (convergência). Este fenômeno corresponde à deformação do metal em regiões anteriores ao seu contato com a fieira, tornando-se mais pronunciado com o aumento da redução de área e do semi-ângulo da fieira empregados no passe. Além disso, na convergência o material encrua antes de penetrar na fieira. Estudos anteriores já publicados na literatura partem do pressuposto de que a deformação plástica do metal ocorre durante a passagem deste pela fieira. Assim, deve-se buscar uma nova abordagem para a análise do problema, incluindo, agora, os efeitos em discussão. No presente trabalho foi planejado um programa experimental para a avaliação de irregularidades de fluxo durante a trefilação axissimétrica de barras de aço inoxidável 304. Neste, constatou-se a ocorrência de fluxo normal, fluxo convergente e fluxo divergente. A convergência é mais pronunciada com o crescimento da redução de área e do semi-ângulo de fieira. O bojamento ocorre na trefilação do material pré-encruado para pequenas reduções de área e semi-ângulos de fieira da ordem de $\alpha = 12^\circ$ e 13° .

Palavras-chave: Irregularidades de fluxo; convergência; bojamento; encruamento.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Trefilação

O processo de trefilação consiste na passagem forçada de uma barra metálica através de uma matriz cônica denominada fieira, mediante a aplicação de uma força de tração à saída desta.

Este processo é realizado à temperatura ambiente, podendo ocorrer um aumento de temperatura devido aos grandes esforços de compressão e pelo atrito do metal com a matriz (Cetlin, Helman, 1980). O material que atravessa a fieira tem sua seção reduzida e o comprimento aumentado em relação às dimensões iniciais, como mostrado na Fig. (1).

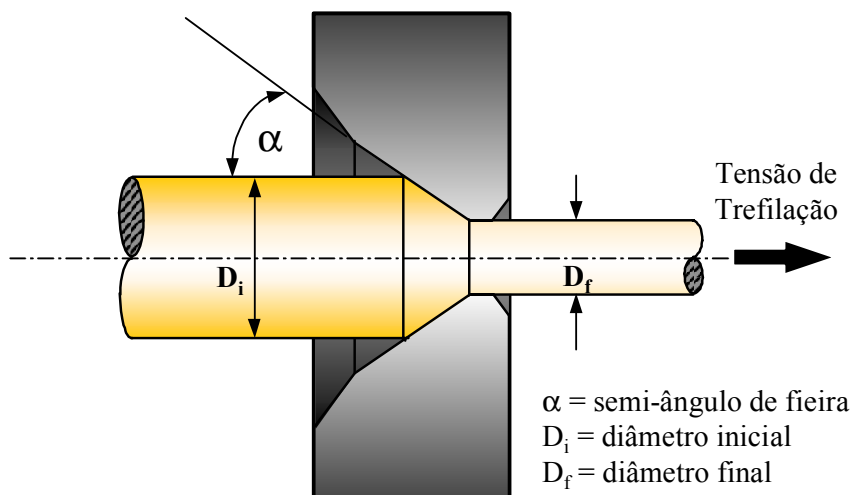


Figura 1. Detalhamento da região de contato metal-fieira no processo de trefilação

O produto trefilado apresenta uma boa qualidade superficial, um bom controle dimensional, retinidade e variações benéficas de suas propriedades mecânicas.

As deformações promovidas no material oriundas do carregamento a tração monotônica e axissimétrica são uniformemente distribuídas ao longo da seção transversal, podendo ser caracterizadas como homogêneas.

Na trefilação isto não ocorre devido à forma geométrica da fieira (Jhonson, 1968). Duas técnicas tem sido propostas para avaliar o perfil de deformação de barras trefiladas. Uma delas baseia-se na execução de medidas de microdureza ao longo de uma direção radial situada na seção transversal da barra. Os perfis de dureza, assim, obtidos representam uma medida da deformação efetiva ao longo desta região, necessitando para tanto de uma pré-calibração através de uma curva de dureza versus deformação, previamente obtida de corpos de prova tracionados até a ruptura.

A outra técnica para avaliação da distribuição de deformação numa barra trefilada é a que foi utilizada por Trozera (1964), e que consiste em usinar tubos a partir da barra. O limite de escoamento dos tubos seria sobreposto à curva tensão-deformação sob tração do metal antes de ser trefilado, obtendo-se assim o nível de deformação ao qual o tubo fora submetido.

O perfil heterogêneo de deformação na seção transversal da barra trefilada se deve ao fato de que, durante o processo, um elemento situado na superfície desta barra pode se mover na direção da fieira e paralelamente ao eixo de trefilação. Quando tal elemento entra na região da fieira, é adicionada à velocidade inicial uma componente radial. O material sofre, então, um processo interno de deformação, além daquela necessária para a sua deformação homogênea, fato que não contribui para a mudança de dimensões externas da barra trefilada.

A avaliação da deformação (ϵ) é feita através das dimensões iniciais e finais da barra. A deformação na barra causada pela trefilação então é heterogênea, porque elementos de diferentes camadas sofrem diferentes deformações internas, obtendo-se ao final, um gradiente de deformação ao longo do raio, o qual é denominado coeficiente de deformação redundante. Este parâmetro está representado na Fig. (2) e pode ser definido pela Eq. (1):

$$\varphi = \frac{\epsilon}{\epsilon} \quad (1)$$

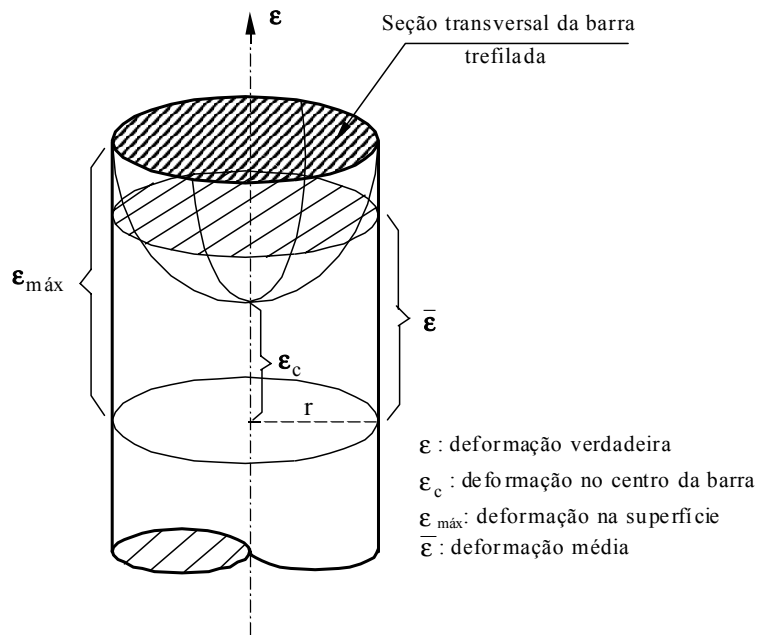


Figura 2. Parabolóide de revolução representativo do perfil de deformação na seção transversal de uma barra trefilada

Para a determinação da heterogeneidade de deformação, em uma primeira aproximação, Backofen (1972) caracterizou os gradientes de dureza na seção transversal de barras e arames trefilados por um fator de heterogeneidade (FH) definido como:

$$FH = \frac{H_{máx} - H_{min}}{H_{min}} \times 100 \quad (2)$$

onde: $H_{máx}$: dureza máxima na seção transversal investigada

H_{min} : dureza mínima na seção transversal investigada

1.2. Ocorrência de Fluxo Convergente

Em recente tese de mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica de Minas da Escola de Engenharia da UFMG constatou-se a ocorrência de fenômenos de irregularidades de fluxo em barras de cobre comercial recozido (Castro, 1997). Nas trefilações, através de fieiras com semi-ângulo de $24,5^\circ$, foi observado que para pequenas reduções de área no primeiro passe (a partir de 10%) ocorria o aparecimento de fluxo convergente, sendo que, este fluxo crescia linearmente com a redução de área, conforme se observa na Fig.(3).

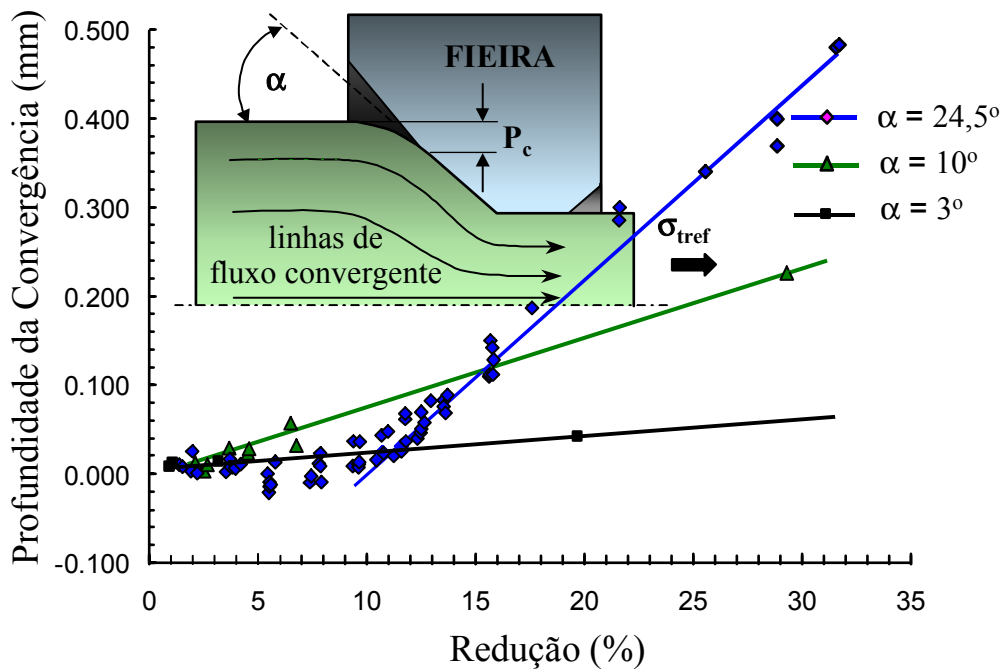


Figura 3. Profundidade de convergência sob condições estáticas na trefilação axissimétrica de barras de cobre comercialmente puro recozidas

Onde P_c é a profundidade da convergência.

1.3. Ocorrência de Fluxo Divergente na Trefilação

Os efeitos de redução de área (r) e de semi ângulo de feira (α) sobre as heterogeneidades de deformação na trefilação (ocorrência de fluxos convergente ou divergente) são comumente englobados num parâmetro (Δ) denominado fator de configuração geométrica.

O fator de configuração geométrica pode ser descrito pela Eq. (3):

$$\Delta = \frac{D_i + D_f}{D_i - D_f} \alpha = \frac{\alpha}{r} (1 + \sqrt{1-r})^2 \quad (3)$$

sendo: α , medido em radianos

r , redução de área (não percentual)

Johnson (1968) admitiu a hipótese da possível ocorrência de fluxo divergente (também conhecido como bojamento), sugerindo as seguintes correções no parâmetro Δ e na redução de área :

$$\Delta = \frac{D_b + D_f}{D_b - D_f} \text{sen } \alpha \quad (4)$$

$$r = 1 - \frac{D_f^2}{D_b^2} \quad (5)$$

onde: D_b = Diâmetro devido ao bojamento

A deformação na superfície da barra, face a ocorrência do fluxo divergente, seria dada por:

$$\varepsilon = 2 \ln \left(\frac{D_b}{D_f} \right) \quad (6)$$

O fenômeno de fluxo divergente caracteriza-se pela acumulação de material na entrada da fieira, conforme mostrado na Fig. (4).

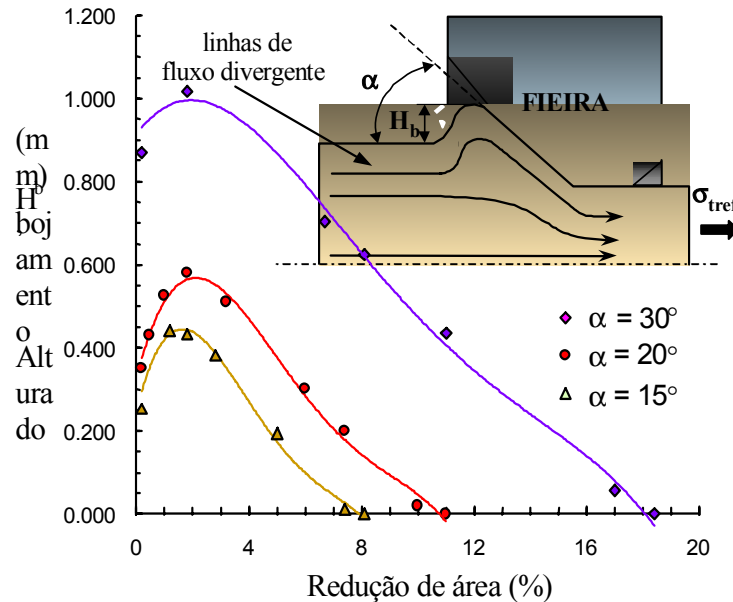


Figura 4. Altura do bojamento sob condições de trefilação estáticas de tiras de alumínio comercialmente puro pré-encruado por laminação

No caso de trefilação por deformação plana, a formação do bojamento é teoricamente pré-dita para valores de $\Delta = 8,72$, ou maiores, dependendo das condições de atrito.

Na literatura, a não ser os trabalhos de Campos (1993) e Castro (1997) para a trefilação de barras, e ainda assim, com pouquíssimos pontos experimentais na faixa onde poderia ocorrer bojamento, nada existe a respeito. Embora estes autores tenham comprovado a ocorrência do fenômeno, os resultados obtidos estão longes de serem conclusivos.

Wistreich (1952) já havia previsto que o bojamento pode ser realçado por um aumento na redução de área ou um acréscimo no semi-ângulo da fieira.

De uma forma geral, os autores de trabalhos relacionados ao assunto afirmam existirem muitas dúvidas com relação à ocorrência dos fenômenos de irregularidades de fluxo na trefilação de barras (bojamento ou convergência).

Avitzur (1989) considerou que irregularidades de fluxo ocorriam para qualquer estado do material (encruado ou recozido).

2. METODOLOGIA

2.1. Material

O material pesquisado neste trabalho foi o aço inoxidável da série SAE 304. A escolha deste material foi fundamentada na sua grande importância tecnológica e no fato de apresentar um arranjo cristalino igual ao do cobre (material já pesquisado por Campos e Castro). As inovações relacionadas à produção de aços inoxidáveis vêm permitindo aumentar sua aplicação em diversos setores produtivos. Uma das características mais notáveis deste produto é sua resistência à corrosão, devido à adição de elementos de liga como cromo e níquel.

O segmento industrial está dividido entre empresas que produzem aços inoxidáveis planos e não-planos. Este último segmento abrange a produção de barras, perfis, cantoneiras e arames atendendo principalmente as indústrias de bens de capital, química, petroquímica e automobilística.

2.2. Projeto dos Corpos de Prova

Os corpos de prova consistiram de barras usinadas em dois diâmetros distintos. O diâmetro menor possibilitaria a introdução de uma das extremidades na fieira. Na região com diâmetro maior foram efetuadas as trefilações. Tomou-se o cuidado de reservar um comprimento suficiente, nessa região, que possibilitasse a execução de dois passes de trefilação.

2.3. Usinagem dos Corpos de Prova

Os corpos de prova (cps.) foram usinados em torno mecânico usual. Para evitar empenamento, estes corpos de prova sofreram desbaste inicial, no torno, em passes de 0,5 mm. Não foi utilizado lixamento no acabamento final dos cps, de forma que estes apresentaram um acabamento oriundo da ferramenta. A rugosidade superficial dos corpos de prova acabados não foi avaliada.

As ranhuras uniformes, provocadas pela ferramenta de corte, tiveram, por objetivo, possibilitar a retenção do lubrificante durante o processamento por trefilação.

2.4. Caracterização do Material

2.4.1. Ensaio de Dureza

Amostras foram retiradas aleatoriamente das barras, no estado como recebido, e ensaiadas pelo método Vickers empregando-se cargas de 5kgf. Os resultados (dureza média de 215HV5) mostraram a presença de um pequeno encruamento e heterogeneidade de deformação nos corpos de prova ao longo da seção transversal.

Desta forma, optou-se por submeter os corpos de prova a um tratamento de recozimento à temperatura de 1040C°, em vácuo de 10⁻⁵ tor, durante 75 minutos. Após o recozimento, foi avaliada a dureza média do material (137HV5). A estreita faixa de variação no perfil dos valores de dureza na seção transversal comprovou a homogeneidade desejada.

2.4.2. Análise Química

A análise química do material pesquisado mostrou a presença dos elementos de liga apresentados na Tab.(1).

Tabela 1. Elementos de liga presentes no material aço inoxidável SAE 304, em estudo

C	Mn	Cr	Ni
< 0,07	1,75	18,15	8,51

2.5. Ensaio de Trefilação

As trefilações foram realizadas em uma máquina universal de ensaios, mecânica, marca EMIC, modelo MEN 10.000, adaptada para o ensaio de trefilação.

O equipamento utilizado foi equipado com uma célula de carga de capacidade máxima de 10.000Kgf, sendo a velocidade de cabeçote fixada em 6mm/min. A variação da carga durante o ensaio foi controlada através de registrador gráfico do tipo X-Y, também acoplado à máquina.

Foram utilizadas feiras de metal duro com semi-ângulos de 24,5°, 13,0° e 11,9° e bitolas de 10,01mm no primeiro passe e 8,82 e 9,75 mm no segundo passe.

A metodologia de trabalho experimental foi baseada em um programa de trefilação, descrito na Tab.(2).

Tabela 2. Parâmetros do programa de trefilação

Cp		1º Passe				2º Passe			
		Fieira				Fieira			
Nº	d _i (mm)	r(%)	Nº	α (°)	d _f (mm)	r(%)	Nº	α (°)	d _f (mm)
01	10,671	12	6	24,5	10,01	5,1	25	13	9,75
02	10,671	12	6	24,5	10,01	5,1	25	13	9,75
03	10,922	16	6	24,5	10,01	5,1	25	13	9,75
04	11,636	26	6	24,5	10,01	5,1	25	13	9,75
05	11,192	20	6	24,5	10,01	22,4	24	11,9	8,82

Os corpos de prova foram parcialmente trefilados no primeiro até cerca de 70% do comprimento útil, e no segundo passe até cerca de 50% do comprimento útil, empregando-se pasta de bissulfeto de molibdênio (Molykote-G) como lubrificante.

Após cada passe de trefilação, os cps. foram desconectados das respectivas feiras sem aplicação de esforço trativo.

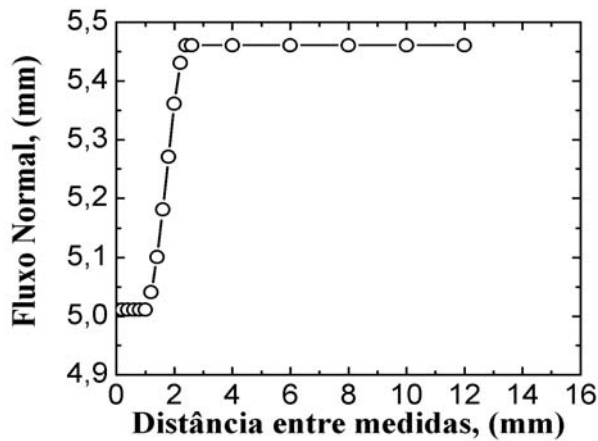
2.6. Medidas das Irregularidades de Fluxo

Com o auxílio de um projetor de perfis (50 vezes de ampliação), foram medidos os diâmetros ao longo do comprimento da barra, nas proximidades da região de contato metal-fieira, com espaçamentos de 0,2mm, com o objetivo de verificar a ocorrência de possíveis irregularidades de Fluxo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente trabalho observou-se a ocorrência de fluxo normal e convergência no primeiro passe de trefilação para o material recozido, e fluxo divergente e fluxo normal no segundo passe. O fenômeno do bojamento ocorre no segundo passe para o material encruado empregando-se feiras com semi-ângulo da ordem de $\alpha \geq 12^\circ$.

As Fig. (5) à (08) apresentam as variações do diâmetro dos corpos de prova, de aço inoxidável SAE 304, medidas ao longo da região de ocorrência de irregularidades de fluxo, após trefilação. As Fig. (5) e (6) referem-se aos fenômenos observados no primeiro passe de trefilação do aço inox, previamente recozido.



(a)

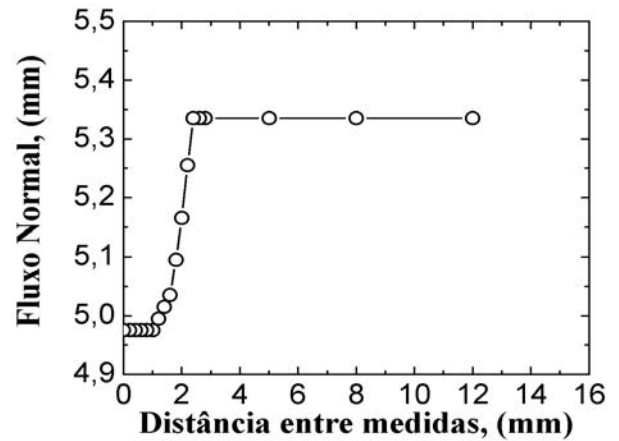
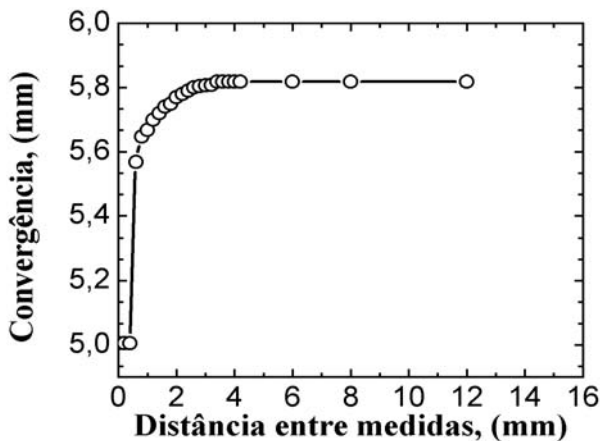


Figura 5. Fluxos normais observados no primeiro passe de trefilação do aço inoxidável 304 recozido (a) cp. 01; (b) cp. 03

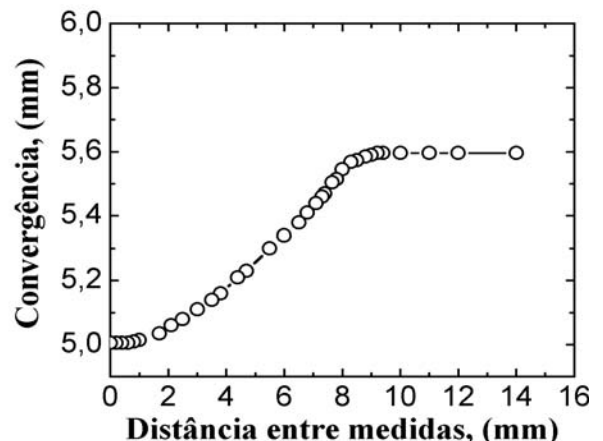
A Fig. (5a) é também representativa do fenômeno ocorrido na trefilação do cp. 02 uma vez que, de acordo com a Tab. 2, este corpo de prova apresenta o mesmo programa de trefilação, no primeiro passe, sugerido para o cp. 01. De acordo com estes resultados, a ocorrência de fluxo normal no primeiro passe de trefilação do material recozido se deu para reduções de área de até 16%, para feiras de semi-ângulo $\alpha = 24,5^\circ$.

A Fig. (6) mostra a ocorrência de fluxo convergente no primeiro passe de trefilação. De acordo com os perfis mostrados verifica-se que o material sendo trefilado sofre deformação antes do contato com a feira. A região da barra próxima à entrada da feira apresenta um ligeiro abaulamento, caracterizando a ocorrência do fenômeno de fluxo convergente. O intervalo de redução percentual de área situado entre 12 e 16% caracteriza a transição entre fluxo normal e fluxo convergente, para um semi-ângulo de $24,5^\circ$. A Fig. (6b) mostra que houve uma certa aderência do material na região do furo de calibragem da feira. Não se pode afirmar que esta aderência se deu devido ao processamento por trefilação ou durante a retirada do corpo de prova da feira. A ocorrência de fluxo convergente para o aço inoxidável SAE 304 se acentua para maiores reduções percentuais de área, confirmando os resultados obtidos por Campos (1993) e Castro (1997) para o cobre.

As Fig. (7) e (8) mostram a região de contato com a feira, no segundo passe de trefilação.

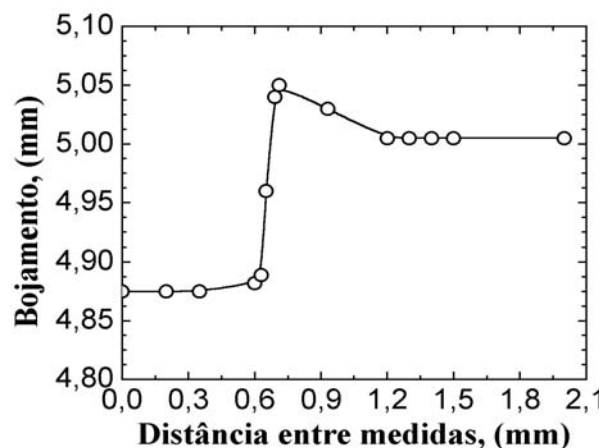
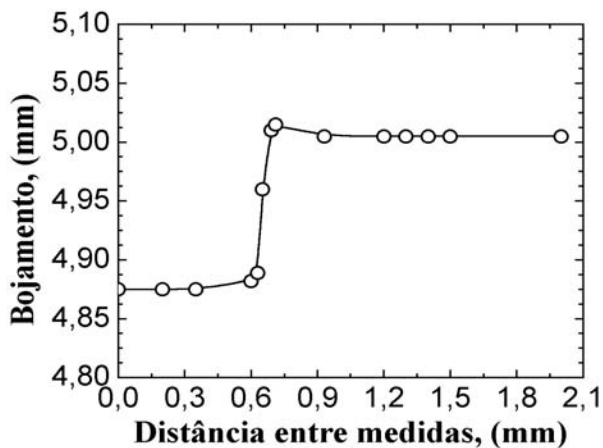


(a)



(b)

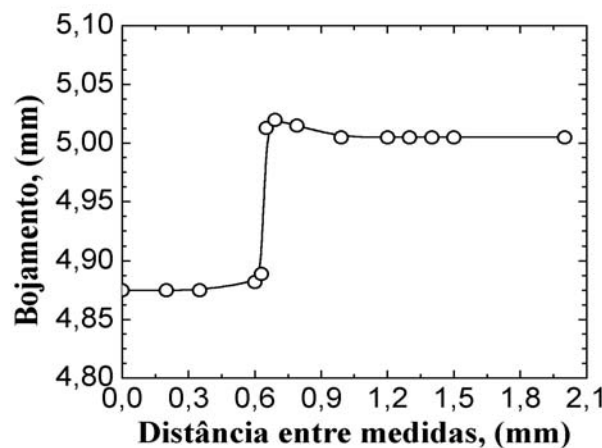
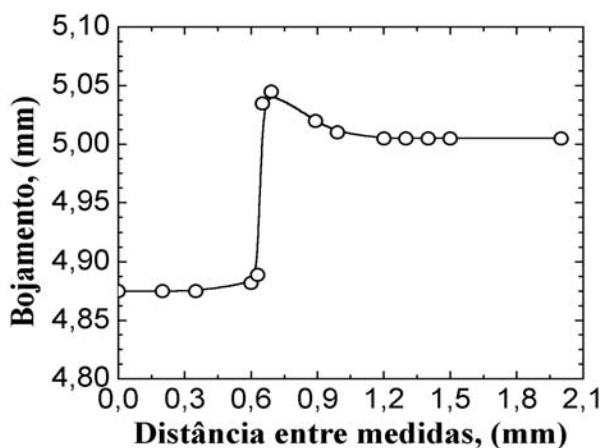
Figura 6. Fluxos convergentes no primeiro passe de trefilação do aço inox 304 (a) cp 04; (b) cp 05



(a)

(b)

Figura 7. Fluxos divergentes no segundo passe de trefilação do aço inox 304 (a) cp. 01 (b) cp. 03



(a)

(b)

Figura 8. Fluxos divergentes no segundo passe de trefilação do aço inox 304 (a) cp. 04 (b) cp. 05

Em sua abordagem quanto ao fluxo divergente, Campos (1993) e Castro (1997) observaram que este fenômeno não ocorria na trefilação do cobre no estado recozido, só ocorrendo para este material no estado pré-encruado, para uma redução de área inferior a 13% e semi-ângulo de fieira da ordem de $24,5^\circ$. Os resultados encontrados neste trabalho para o aço inoxidável SAE 304, com relação a ocorrência de fluxo divergente, comprovam as afirmações dos autores citados quanto ao estudo realizado para o cobre.

A profundidade de convergência (P_c) aumenta com a redução de área no primeiro passe de trefilação, para o aço inoxidável SAE 304, como mostra a Fig. (9). Isto também comprova os resultados obtidos para o cobre (Campos (1993), Castro (1997)).

A Fig. (10) relaciona a dependência da altura do bojamento com a deformação no primeiro passe.

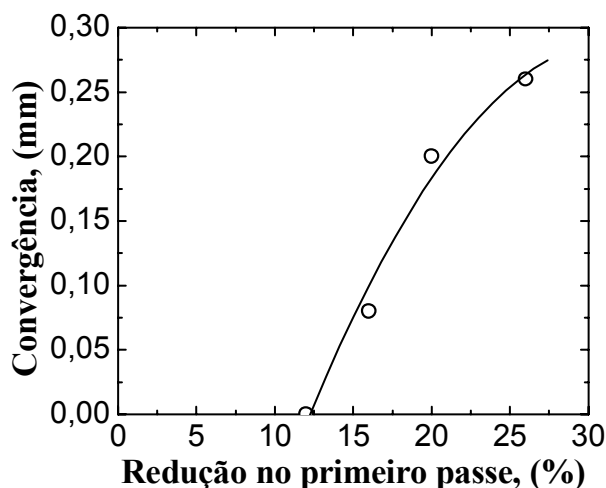


Figura 9. Profundidade de convergência em função da redução percentual de área

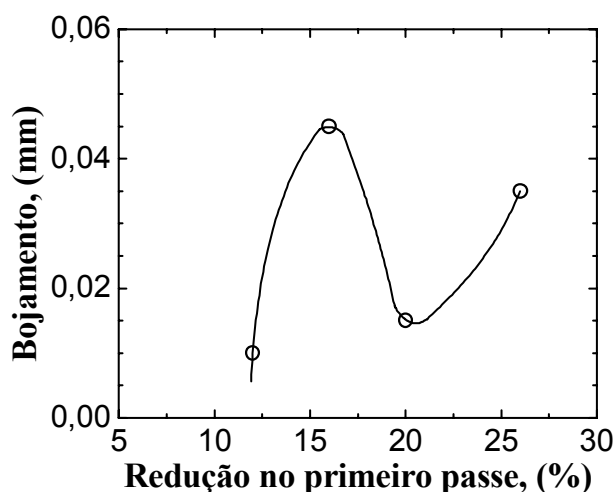


Figura 10. Altura do bojamento com a variação de redução percentual no primeiro passe de trefilação para o aço inoxidável 304.

4. CONCLUSÕES

A ocorrência de irregularidades de fluxo na trefilação é altamente dependente dos parâmetros de trefilação: semi-ângulo de fieira (α) e redução de área (r).

Há ocorrência de fluxo normal e fluxo convergente no primeiro passe de trefilação do aço inoxidável SAE 304. O fluxo convergente surge, na trefilação deste material, no estado recozido quando se utilizam feiras de $24,5^\circ$ e reduções características (entre 12 e 16%). A profundidade da convergência cresce com o aumento da redução de área.

O bojamento ocorre no segundo passe de trefilação do aço inoxidável SAE 304, para semi-ângulos de fieira da ordem de 12° e cresce com o aumento deste parâmetro. Este fenômeno pode ser realçado por um aumento na redução de área ou um acréscimo no semi-ângulo da fieira. Isto está de acordo com os resultados obtidos por Wistreich (1952).

A constatação deste trabalho, de que fluxo convergente ocorre somente em materiais recozidos enquanto o fluxo divergente só ocorre para materiais inicialmente encruados, contraria a análise de Avitzur (1989), segundo a qual ambos padrões de fluxo poderiam ocorrer na trefilação de barras recozidas.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AVITZUR, B. Flow through dies Update - 1989, **Wire Industry**, April 1989, pp.243-249.
- BACKOFEN, W. A. Deformation – zone geometry. In: **Deformation Processing**. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1972. Cap 7, p. 135-153.
- 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 Universidade Federal de Minas Gerais, 1993.
- CASTRO, U. D. **Avaliação de irregularidades de fluxo na trefilação de barras**. Belo Horizonte: UFMG, 1997. 120p. Tese (Mestrado em Engenharia Metalúrgica)– Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 1997.
- CETLIN, P. R., HELMAN, H. et. al., **Fundamentos de ensaios mecânicos de metais**, 1 ed., Belo Horizonte: UFMG, 1980, 193.
- GREEN, A. P., HILL, R. Calculations on the influence of friction and geometry in sheet drawing. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, v.I, p. 31-36,
- JOHNSON, R.W., ROWE, G.W. Redundant work in drawing cylindrical stock. **Journal of the Institute of Metals**, v. 96, p. 97-105, 1968.
- JOHNSON, R. W., ROWE, G. W. Bulge formation in strip drwing with light reductions in area. **Pro. Inst. Metch. Engrs.**, v. 182, n.22, p.521-529, 1967-68.
- TROZERA, T. A. On the non homogeneous work for wire drawing. **Transactions of the ASM**, V. 57, P. 309-323, 1964.
- WISTREICH, J. G. Strip and wire drawing: A simple account of modern theory. **Iron & Steel**, p. 391-395, september 1952.

Flow irregularities of drawing bars

Recent experimental results on the metallic flow of annealed copper during drawing showed the presence of converging flow (convergence). This phenomenon is associated to metal deformation before its contact with the die. Convergence is more pronounced as reduction of area and die semi-angle increase, and causes material hardening before reduction in the die. Since present analyses of the process start from the hypothesis that hardening occurs only in the die, a new approach to this problem should be considered. An experimental program for the avaluation of flow irregularities in the drawing of initially work-hardened stanley alloy steel bars was completed. Normal flow, converging flow and bulging was observed in the present work. Convergence is more pronounced as reduction of area and die semi-angle increase. Bulging was observed in previously work hardened material, for small reductions of area and die semi-angle of $\alpha = 12^\circ$ and 13° .

Keywords: Flow irregularities; convergence; bulging; work-hardened.