

Análise do "potencial de distorção" de barras cilíndricas de aço ABNT 1048

Analysis of "distortion potential" of cylindrical bars of AISI 1048 steel

Alexandre da Silva Rocha

Prof. Dr. Eng. Laboratório de Transformação Mecânica, Departamento de Metalurgia, UFRGS
Av. Bento Gonçalves, 9500, Agronomia
Porto Alegre, RS, Brasil CEP 91501-970
alexandre.rocha@ufrgs.br

Rafael Menezes Nunes

M. Sc. Eng. Laboratório de Transformação Mecânica, Departamento de Metalurgia, UFRGS
Av. Bento Gonçalves, 9500, Agronomia
Porto Alegre, RS, Brasil CEP 91501-970
rafael.nunes@ufrgs.br

Eduardo Moller Ferlauto

Eng. Mecânico Laboratório de Transformação Mecânica, Departamento de Metalurgia, UFRGS
Av. Bento Gonçalves, 9500, Agronomia
Porto Alegre, RS, Brasil CEP 91501-970
ferlautoeduardo@terra.com.br

Resumo

As tensões residuais podem afetar positiva ou negativamente o desempenho dos componentes mecânicos. Estas tensões residuais também representam um dos principais potenciais para a distorção (isto é empenamentos e mudanças dimensionais) em componentes mecânicos durante a manufatura. Por isso são de grande importância a determinação da distribuição e o controle destas tensões residuais em cada etapa do processo de manufatura. Neste trabalho, foram realizadas análises da variação das tensões residuais em barras trefiladas de aço ABNT 1048 em decorrência do processo de fabricação. As barras foram analisadas por difração de raios-X e hole-drilling para caracterizar as tensões residuais. A partir dos valores de deformações obtidos, foram calculadas as tensões residuais nas direções longitudinal e tangencial para cada ponto ensaiado. Com este trabalho uma visão detalhada do desenvolvimento de tensões na região superficial de barras após as etapas do processo foi obtida.

Palavras-chave: trefilação, tensões residuais, difração de raios-X, método do furo cego.

Abstract

The residual stresses can affect positive or negatively the behavior of the mechanical components. These residual stresses also represent one of the main potentials for the distortion (which are bending and dimensional changes) in mechanical components during the manufacture. Therefore, the determination of the distribution and the control of these residual stresses in each stage of the manufacturing process is of great importance. In this work, an analysis of the variation of the residual stresses were accomplished in cold-drawn bars of AISI 1048 steel due to the manufacturing process. The bars were analyzed by X-ray diffraction and hole-drilling to characterize the residual stresses. Starting from the values of strains obtained, the hoop and longitudinal residual stresses were calculated for each tested point. With this work, a detailed view of the development of stress in the surface area of bars after the process steps was obtained.

Key words: cold drawing, residual stresses, x-ray diffraction, hole-drilling.

1. Introdução

A produção de barras calibradas do aço ABNT 1048 atendendo determinados requisitos de resistência mecânica e geometria pode ser feita a partir de rolos de fio-máquina, que são endireitados e trefilados num processo conhecido como trefilação combinada. Este processo impõe deformações plásticas ao material que induzem distribuições de tensões residuais, as quais se alteram durante as diferentes etapas do processo (Dieter, 1986). Este artigo apresenta um estudo a cerca da influência de cada etapa do processo de trefilação combinada sobre a distribuição das tensões residuais em barras trefiladas durante uma rota de fabricação. Objetivou-se um maior entendimento do processo de geração e redistribuição de tensões residuais, bem como procurou-se identificar as etapas do processo mais críticas em relação às tensões residuais geradas no produto final (barras trefiladas).

Um aspecto importante associado às tensões residuais é a distorção, que em barras longas se manifesta principalmente por um empenamento. Em etapas encadeadas de manufatura, tais como conformação por deformação, operações de usinagem e tratamentos térmicos, as distribuições de tensões residuais na peça vão sendo alteradas. As tensões residuais podem ser aliviadas em etapas subseqüentes de processamento do material nos clientes, tais como, conformação, usinagem e tratamentos térmicos, resultando em distorções.

A idéia principal no controle de distorções está associado a uma análise de todo o processo de manufatura, em que cada etapa do processo produtivo contribui para o comportamento em distorção do componente. Desta forma, cada etapa altera propriedades do material que assim poderão alterar o potencial de distorção do material (Zoch, 2006; Klein *et al.*, 2006).

No processo de trefilação, as tensões residuais introduzidas pela fieira são diretamente dependentes dos ângulos utilizados e do grau de redução aplicado (Wang e Gong, 2002). O ângulo de trabalho na fieira provavelmente é o parâmetro mais importante a ser controlado na confecção de uma boa ferramenta de trefilação, o efeito deste ângulo no fluxo de material trefilado não pode ser apenas considerado a partir do nível de redução do processo, desta forma foi introduzido o parâmetro " Δ ", que é definido pela razão entre o diâmetro (h) e o tamanho do contato entre o metal deformado e a ferramenta (L).

$$\Delta = \frac{h}{L} \text{ (equação 1)}$$

Para o processo de trefilação de eixo simétrico onde (h) é o diâmetro, e a redução é dada por $r = \frac{(d_o^2 - d_f^2)}{d_o^2}$. Aplicando essa variável na equação acima obtemos:

$$\Delta = \frac{\text{sen}\alpha(1 + (1-r)^{1/2})^2}{r} \text{ (equação 2)}$$

A partir do parâmetro " Δ " podemos estimar a natureza das tensões residuais, pois estas dependem da forma da zona de deformação. Com valores de " Δ " iguais ou menores que 1, um exemplo prático seria uma redução com ângulo de ferramenta baixo, o padrão de fluxo de material é praticamente uniforme, gerando menores tensões residuais no perfil trefilado. Desta forma, as tensões residuais geradas no perfil

são diretamente ligadas ao parâmetro " Δ " e sua magnitude aumenta ou diminuiu de acordo com que o ângulo de ferramenta varia (Wang e Gong, 2002).

O processo de trefilação combinada analisado neste artigo é representado na Figura 1, consistindo das seguintes etapas.

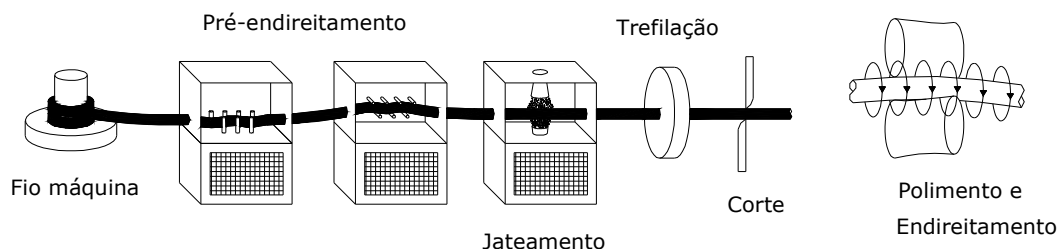


Figura 1: Principais etapas do processo de trefilação combinada.

O fio máquina é obtido em um processo de laminação a quente. Após o fio-máquina é bobinado em rolos e estocado. Antes do processo de trefilação o fio-máquina é decapado com solução ácida para remoção de carepa e posteriormente neutralizado com solução alcalina. O processo de trefilação combinada inicia pelo pré-endireitamento do fio-máquina que é fornecido em bobinas, sem este pré-endireitamento o processo de trefilação ficaria inviável. A próxima etapa é o jateamento, este tem como objetivos a remoção de carepas provenientes do processo de laminação e consequentemente a limpeza da superfície. Após o jateamento é feita a trefilação e em seguida a operação de corte da barra (6 metros). Após o corte ainda é necessário um polimento e endireitamento final, que será denominado neste trabalho pela sigla "PERC". Finalizando o processo, são realizadas operações de medições do empenamento das barras e ainda o enfeixamento.

2. Materiais e Métodos

As amostras analisadas foram retiradas de quatro diferentes etapas do processo de trefilação combinada, sendo elas: pré-endireitamento horizontal e vertical (1ª etapa), jateamento (2ª etapa), trefilação (3ª etapa) e polimento e endireitamento por rolos cruzados – "PERC" (4ª etapa). Na obtenção de amostras foi levado em conta a orientação das amostras retiradas em relação a um referencial fixo no maquinário, esta orientação é importante para correlacionar dados obtidos da caracterização do material com as tensões aplicadas durante o processo. A Tabela 1 mostra a análise química do material, aço ABNT 1048.

Tabela 1: Análise química do aço ABNT 1048.

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr
%	0,43	0,21	0,73	0,01	0,02	0,19
Elemento	Mo	Ni	Cu	Nb	Al	Fe
%	0,01	0,19	0,08	<0,01	<0,01	98,05

Na trefilação, a geometria de ferramenta, o atrito, a redução e velocidade de processamento do material, ângulos de "PERC" são os principais fatores que poderão ocasionar mudanças significativas no nível de tensões residuais e assim causar empenamentos em etapas subseqüentes de processamento (Akikazu *et al.*, 2001). No processo de fabricação foram variados três parâmetros de processo, sendo eles, ângulo de fieira, pressão de pré-endireitamento vertical e ângulo de endireitamento final - "PERC", assim, fazendo-se as combinações de alterações de parâmetros foram formados quatro conjuntos de diferentes parâmetros de processamento do material e em cada conjunto foram analisados dois ângulos diferentes de "PERC", 16° e 18°.

Tabela 2: condições de processamento do material até a trefilação.

Condição de Processamento do material	Ângulo de fieira	Pressão de Pré-endireitamento vertical
Condição I	20°	Normal
Condição II	20°	Máxima
Condição III	18°	Máxima
Condição IV	18°	Normal

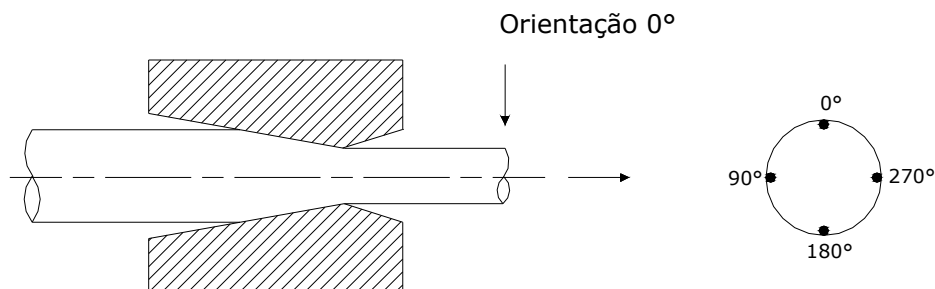


Figura 2: Sistema de orientação na retirada das amostras.

2.1. Medição das tensões residuais

A análise de tensões residuais foi feita a partir da técnica de hole-drilling e também da difração de raios-X.

A difração de raios-X foi usada para caracterizar a distribuição de tensões residuais na superfície em quatro posições da periferia conforme orientação apresentada na Figura 2, com medições para as posições 0°, 90°, 180° e 270°. Após análise dos valores superficiais, foram feitas medições através do método de difração de raios-X com remoção de camadas e do método do furo a fim de avaliar a variação das tensões com a profundidade, escolhendo-se para esta análise algumas posições consideradas críticas de acordo com os resultados superficiais.

As barras foram medidas utilizando difratômetros - Ψ (modo de inclinação lateral) equipados com tubos de raios-X de Cr- $K\alpha$ com abertura primária de 1mm de diâmetro. As linhas de difração {211} do ferro- α foram registradas para 11 Ψ ângulos de inclinação na faixa de $45^\circ < \Psi < -45^\circ$. As tensões residuais foram calculadas usando o método de $\sin^2 \Psi$ (Hauk, 1997) com $E = 210000$ MPa e $\nu = 0.28$.

O método do hole-drilling foi usado para avaliar os perfis de tensões residuais. Esta técnica baseia-se na deformação aliviada devido à introdução de um furo de pequenas dimensões na superfície do componente. O método de aquisição deste alívio de tensões é por extensimetria elétrica (Lu, 1996), utilizando para tanto extensômetros de resistência elétrica (ASTM E-837, 2004).

Para o cálculo das tensões residuais é necessário medir-se as deformações em três direções diferentes e conhecidas, atuando no mesmo plano. Assim, pode ser provado analiticamente que as tensões residuais principais apresentam a relação com a deformação radial medida nos três extensômetros descrita pela equação 3. Onde o σ_{\max} e σ_{\min} são as tensões residuais principais e ε são as deformações relativas e \bar{A} e \bar{B} são as constantes de calibração (Kockelmann e Schwarz, 1993).

$$\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} = \frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_1}{4\bar{A}} \pm \sqrt{\frac{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2}{4\bar{B}}} \quad (\text{equação 3})$$

O método de cálculo das tensões residuais é apresentado na equação 4, segundo Kockelmann e o das direções das tensões residuais máximas principais é apresentado na equação 5.

$$\frac{\sigma_{\max}(\xi)}{\sigma_{\min}(\xi)} = \frac{\sigma_a(\xi) + \sigma_b(\xi)}{2} \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_a(\xi) - \sigma_b(\xi))^2 + (\sigma_c(\xi) - \sigma_b(\xi))^2} \quad (\text{equação 4})$$

$$\beta(\xi) = \frac{1}{2} \arctan \frac{2\sigma_b(\xi) - \sigma_a(\xi) - \sigma_c(\xi)}{\sigma_a(\xi) - \sigma_c(\xi)} \quad (\text{equação 5})$$

O método de Kockelmann apresenta vantagens em relação aos métodos convencionais, tais como o método da integral em relação a erros de instrumentação e medição, sendo menos sensível a estes erros e apresentando assim dados mais confiáveis (Kockelmann e Schwarz, 1993).

3. Resultados e Discussão

Na Figura 3 são apresentadas as médias dos níveis de tensões residuais superficiais ao longo do perímetro da barra para cada etapa do processo e para cada variação de parâmetro utilizada conforme a Tabela 2. No pré-endireitamento há uma variação no nível de tensões residuais e de acordo com a pressão utilizada nos rolos de pré-endireitamento vertical estas tensões podem variar de trativas para a condição de processamento I a compressivas para a condição de processamento II, porém este nível de variação é baixo. No processo de jateamento com granalhas o nível de tensões residuais é compressivo (Kennedy *et al.*, 2005) e apresenta valores de aproximadamente -320MPa para a condição I na condição II a variação em relação ao perímetro da barra é maior do que a variação em relação a condição de processamento I. Na etapa de trefilação o nível de tensões residuais apresenta-se trativo (Atienza e Elices, 2004) para as quatro condições de processamento independente dos semi-ângulos de fiação utilizados 20° e 18°. Pode-se observar também para a etapa de trefilação que o ângulo de 20° induz menores níveis de tensões residuais na superfície do material utilizando a condição de processamento I. Para a etapa de endireitamento e polimento por rolos cruzados – “PERC”, independente do ângulo utilizado o nível de tensões residuais apresenta um comportamento compressivo (Wu *et al.*, 2000).

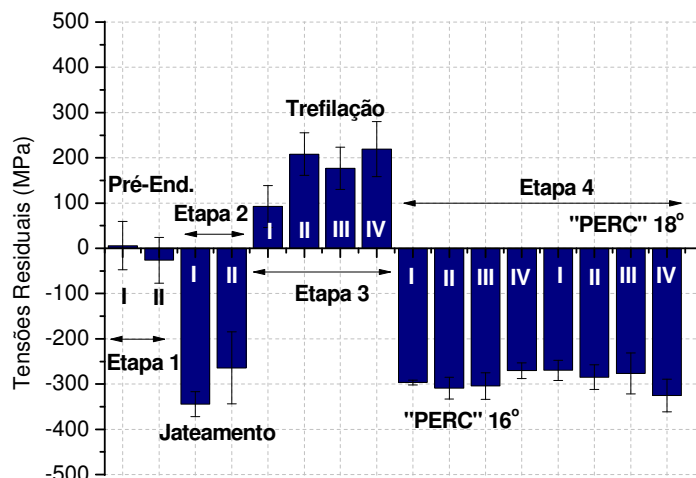


Figura 3: Média de tensões residuais superficiais em cada etapa do processo.

A Figura 4 apresenta as tensões residuais na superfície após cada etapa do processo de trefilação combinada, observa-se que a influência do pré-endireitamento é mantida na superfície da amostra após a etapa de trefilação mesmo a amostra sendo jateada por granalhas após o pré-endireitamento e antes de ser trefilada. Este comportamento ocorre para todas as condições de processamento do material que também pode ser observado na Figura 5. Observa-se também que utilizando um ângulo de 16° e a condição de processamento I há uma maior homogeneidade no nível de tensões residuais superficiais ao longo do perímetro da barra.

Na Figura 5 fica clara a influência do pré-endireitamento, mesmo alterando parâmetros do processo, tais como, semi-ângulo de fieira e pressão no pré-endireitamento vertical. Também é mostrada a influência da posição periférica onde fica evidente a diferença no nível de tensões em relação ao ângulo periférico, este comportamento é devido ao formato inicial do fio-máquina (rolo) e também a efeitos de empenamentos das barras durante o processamento do material.

Na Figura 6 observa-se a influência do ângulo de fieira no nível de tensões residuais na barra após a trefilação, nota-se uma diferença considerável no nível de tensões residuais apresentado utilizando ângulos de fieira diferentes (Asakawa *et al.*, 2002), utilizando-se o ângulo de 20° nota-se um comportamento menos trativo na superfície devido a menor área de contato entre o fio-máquina e a ferramenta (fieira), porém em profundidades superiores a 50µm este nível de tensões é mais trativo em comparação ao ângulo de ferramenta de 18° e isto é devido a deformação plástica no ângulo de 20° ficar mais concentrada na superfície do que utilizando-se um ângulo de 18° (Atienza e Elices, 2004). Wang & Gong e Dieter mostraram que há um incremento do parâmetro "Δ" para ângulos de fieira maiores, mantendo-se uma deformação constante e assim, maiores tensões residuais trativas são geradas (Wang e Gong, 2002; Dieter, 1986).

A Figura 7 apresenta o nível de tensões residuais gerados após o polimento e endireitamento por rolos cruzados - "PERC", onde pode-se observar o nível mais compressivo usando-se um ângulo de 16° em relação ao ângulo de 18°. Isto pode ser entendido pelo aumento do arco de contato entre rolos e barra, induzindo, desta forma, mais deformação superficial. Comparando-se os resultados da Figura 4 com a Figura 7 para etapa de "PERC" observa-se que o ângulo de 16° introduz tensões residuais superficiais mais

homogêneas em relação à posição periférica do que o ângulo de 18° e isto também pode ser explicado pela maior deformação superficial. Um nível de tensões residuais mais compressivo sempre é mais favorável para um produto final, aumentando a vida em fadiga do produto, o que indica uma vantagem do uso do ângulo menor de "PERC", porém do ponto de vista da distorção tensões residuais altas (compressivas ou trativas) presentes em uma profundidade considerável são um alto potencial para distorção. Estas tensões podem ser aliviadas durante o tratamento térmico por escoamento plástico, gerando momentos que levam ao empenamento.

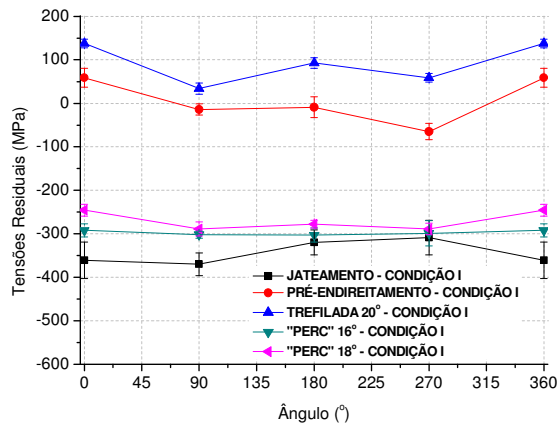


Figura 4: Principais etapas do processo de trefilação combinada.

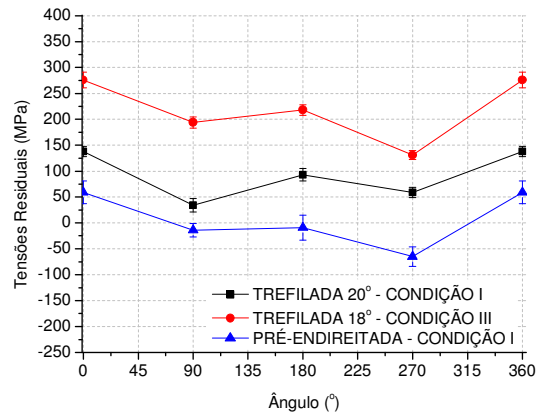


Figura 5: Influência das tensões residuais geradas no pré-endireitamento nas tensões residuais após a trefilação.

Na Figura 8 observa-se o nível de tensões residuais apresentado em todas as etapas do processo medidas pelo método do furo cego. Utilizando o método do furo cego para as etapas de pré-endireitamento, jateamento e "PERC" os resultados mostram-se coerentes em relação aos resultados medidos pelo método de difração de raios-X. As etapas de pré-endireitamento, jateamento e "PERC" 16° induzem tensões compressivas, para a etapa de trefilação e "PERC" 18° as tensões desenvolvidas são trativas.

Na Figura 9 é apresentada uma comparação no nível de tensões residuais desenvolvidas após polimento e endireitamento por rolos cruzados - "PERC" com ângulo de 18° para duas amostras retiradas em dias distintos e com a mesma orientação em relação ao maquinário, observa-se que não houve diferenças significativas no processo.

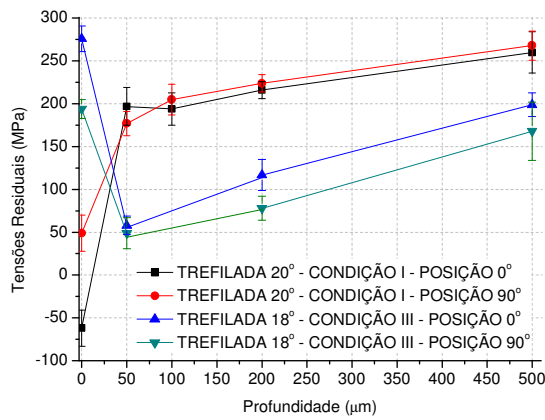


Figura 6: Barra trefilada – influência do semi-ângulo de feira.

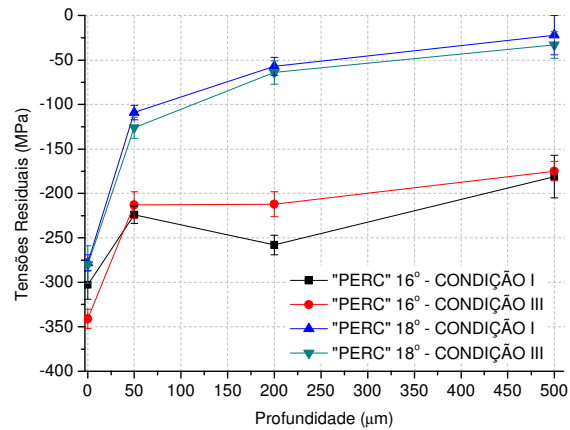


Figura 7: Comparação do nível de tensões após endireitamento e polimento ("PERC").

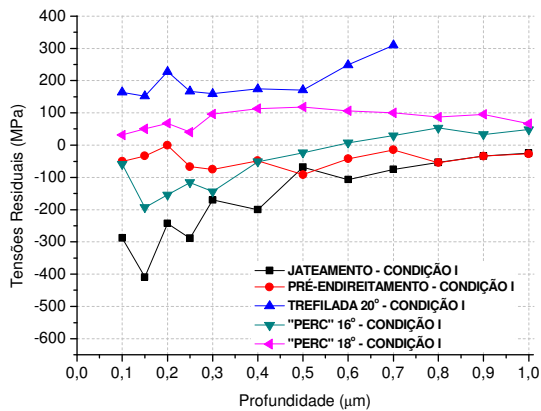


Figura 8: Tensões residuais medidas pelo método do furo para todas as etapas de processamento do material – Condição de processamento I.

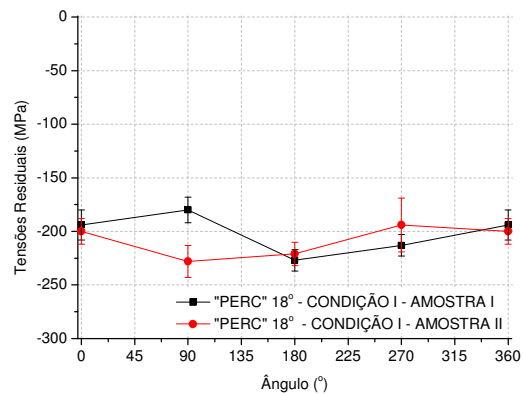


Figura 9: Comparação do nível de tensões residuais em duas amostras diferentes, "PERC" 18° condição de processamento I.

A Figura 10 apresenta resultados obtidos para profundidades superiores, até 3500μm usando o método de difração de raios-X com remoção de camadas. Observa-se o alto nível de tensões compressivas na superfície das amostras induzidos pelos processos de jateamento e polimento e endireitamento por rolos cruzados - "PERC". Nas etapas de pré-endireitamento e jateamento as tensões são mais altas na superfície das barras, até uma profundidade de 1mm aproximadamente, após esta profundidade as tensões tendem a um nível próximo a zero. Também, pode-se observar na Figura 10 o nível de tensões residuais trativos após a trefilação, o que está de acordo com o previsto Atienza e Elices (2004).

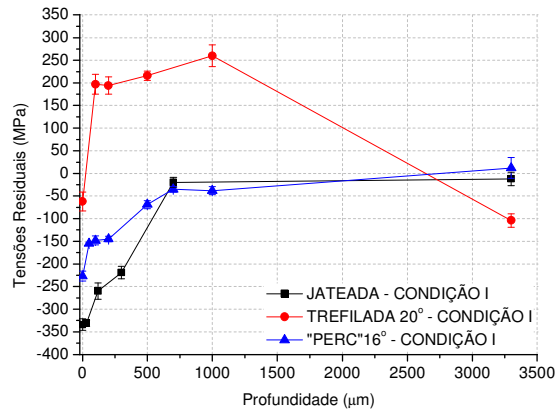


Figura 10: Tensões residuais medidas pelo método de difração de raios-X para o fio-máquina jateado, barra trefilada e "PERC" 16°.

4. Conclusão

O entendimento de todas as etapas do processo de fabricação é fundamental para a otimização do processo, afim de minimizar o nível de empenamentos em etapas subseqüentes de manufatura. Nos resultados obtidos fica evidente a contribuição de cada etapa do processo na geração de heterogeneidades. As principais contribuições identificadas foram as seguintes:

- O pré-endireitamento introduz heterogeneidades de tensões residuais que permanecem durante todo o processo.
- O jateamento coloca tensões residuais compressivas, mas com baixa profundidade.
- Após a trefilação as tensões residuais são trativas na superfície independentemente do ângulo de fiação utilizado. Reduzindo-se o ângulo de trefilação, reduz o nível destas tensões, porém efeitos de fricção alteram este nível numa região inferior a 50μm. Este comportamento pode ser explicado pelos parâmetros Δ e pelos efeitos de fricção na superfície.
- O processo de "PERC" (Polimento e Endireitamento entre Rolos Cruzados) coloca tensões residuais compressivas na superfície e reduz as heterogeneidades. Ângulos menores reduzem mais as heterogeneidades que maiores, porém introduzem tensões residuais compressivas em profundidades maiores. Ambos efeitos foram explicados pelo comportamento do arco de contato dos rolos. Reduzindo o ângulo de "PERC" aumentam as tensões residuais compressivas na superfície.
- Deste modo conclui-se que o caminho para a melhoria do processo inclui duas etapas, uma reduzir as tensões residuais trativas após trefilação ao mínimo possível e minimizar as pressões dos rolos de endireitamento e polimento - "PERC".

5. Agradecimentos

Agradecemos ao CNPq, FINEP pelo financiamento do projeto. E ao IWT Stiftung Institut für Werkstofftechnik – Bremen, pelo apoio nas medições de tensões residuais usando difração de raios-X.

Referências

- AKIKAZU, N.; TAKAAKI, Y.; MASAZUMI, K.; MOTOO, A.; WATARU, S.; KAZUNARI, Y. 2001. Behavior of residual stress and drawing stress in conical-type die and circle-type die drawing by FEM simulation and experiment. *Wire Journal International*, **34**(8):72-80.
- ASTM E-837. 2004. *Standard test method for determining residual stresses by the hole-drilling strain-gage method*. West Conshohocken – USA, ASTM International, 10 p.
- ASAKAWA, M.; SASAKI, W.; SHISHIDO, S. 2002. Effect of die approach geometry and bearing length on residual stress after bar drawing. *Wire Journal International*, **35**(10):68-72.
- ATIENZA, J.M.; ELICES, M. 2004. Influence of residual stresses in the stress relaxation of cold drawn wires. *Materials and Structures*, **37**:301-304.
- DIETER, G. 1986. *Metalurgia mecânica*. Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 653 p.
- HAUK, V. 1997. Stress evaluation of mechanically isotropic materials. In: V. HAUKE, *Structural and residual stress analysis by nondestructive methods: evaluation, application, assessment*. Amsterdam, Elsevier, p. 136-215.
- KENNEDY, D.M.; VAHEY, J.; HANNEY, D. 2005. Micro shot blasting of machine tools for improving surface finish and reducing cutting forces in manufacturing. *Materials and Design*, **26**:203-208.
- KLEIN, D.; THOBEN, K.-D.; NOWAG, L. 2006. Using indicators to describe distortion along a process chain. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, **37**(1):19-22.
- KOCKELMANN, H.; SCHWARZ, E.T. 1993. Die Bohrlochmethode—ein für viele Anwendungsbereiche optimales Verfahren zur experimentellen Ermittlung von Eigenspannungen. *MTB von HBM*, **29**(2):33-38.
- LU, J. 1996. *Handbook of measurement of residual stresses*. SEM, Inc. – Senlis France, p. 5-12.
- WANG, Z.; GONG, B. 2002. Residual stress in the forming of materials. In: G.E. TOTTEN; M.A.H. HOWES; T. INOUE, *Handbook of residual stress and deformation of steel*. Materials Park, ASM International, p.141-149.
- WU, B.J.; CHAN, L.C.; LEE, T.C.; AO, L.W. 2000. A study on the precision modeling of the bars produced in two cross-roll straightening. *Journal of Materials Processing Technology*, **99**:202-206.
- ZOCH, H.-W. 2006. From single production step to entire process chain – the global approach of distortion engineering. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*. **37**(1): p.6-10.

Submissão: 17/09/2008
Aceite: 27/10/2008