

# ANÁLISE DE TENSÕES RESIDUAIS EM BARRAS DE AÇO AISI 1048 PRODUZIDAS POR TREFILAÇÃO COMBINADA<sup>1</sup>

Rafael Menezes Nunes<sup>2</sup>

Maurício Metz<sup>3</sup>

Thomas Hirsch<sup>4</sup>

Alexandre da Silva Rocha<sup>5</sup>

## 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 AISI 1048 em decorrência do processo de fabricação. As barras foram retiradas após cinco diferentes etapas do processo de trefilação combinada guardando-se a orientação inicial do fio-máquina, sendo elas: pré-endireitamento, jateamento, trefila, endireitamento e polimento por rolos cruzados (PTN) com ângulos de 16° e 18°. Estas barras foram ensaiadas através do método do furo cego para a determinação de tensões residuais. Os ensaios foram realizados até uma profundidade de 1 mm em diferentes posições angulares periféricas para caracterizar heterogeneidades impostas pelo processo. 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 global do desenvolvimento de tensões na região superficial de barras após as etapas do processo foi obtida.

**Palavras-chave:** Trefilação combinada; Tensões residuais; Método do furo; Hole-drilling.

## ANALYSIS OF THE RESIDUAL STRESSES IN AISI 1048 STEEL BARS INDUCED BY COMBINED DRAWING-STRAIGHTENING PROCESS

### Abstract

The residual stresses can affect positively or negatively the behavior of mechanical components. These residual stresses also represent one of the main potentials for distortion (i.e. 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 are of great importance. In this work the variation of residual stresses in cold-drawing of AISI 1048 steel bars due to the production process was analyzed. Samples were taken from five different stages of the process of combined cold-drawing with special care to keep the information about initial orientation. The process steps from where samples were taken were: pre-straightening, shot-blasting, drawing, straightening and polishing in crossed rolls (PTN) with angles of 16° and 18°. The determination of residual stresses was accomplished by the hole drilling method. The measurements were done until a depth of 1 mm in different angular positions on the periphery to characterize heterogeneities imposed by the process. Starting with the obtained strains, the residual stresses were calculated in the longitudinal and tangential directions for each measurement point. With this work a global view of the developed stresses in the surface of the bar after each process stage was obtained.

**Key words:** Combined cold-drawing; Residual stresses; Hole-drilling.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 63° Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1° de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil*

<sup>2</sup> *Bolsista de Mestrado do Laboratório de Transformação Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. rafael.nunes@ufrgs.br*

<sup>3</sup> *Aluno de Mestrado - PPGEM – Universidade Federal do Rio Grande do Sul*

<sup>4</sup> *Priv Doz. Dr. Ing., IWT – Stiftung Institut fuer Werkstofftechnik – Bremen - Germany*

<sup>5</sup> *Prof. Dr. Eng. do PPGEM – UFRGS e pesquisador do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) da Escola de Engenharia da UFRGS, Brasil.*

## 1 INTRODUÇÃO

O processo de trefilação é um dos processos mais freqüentemente usado na confecção de barras, este processo é usado com grande vantagem complementando a etapa de laminação do fio-máquina. As principais vantagens são o aumento da resistência mecânica pelo trabalho a frio e o ótimo acabamento superficial. Porém, este processo não induz deformações homogêneas no material gerando tensões residuais no produto.

Tensões residuais são as tensões existentes em um material sem aplicação de forças externas (incluindo gravidade) ou gradientes térmicos. Todo sistema de tensões residuais está em equilíbrio e o somatório das forças resultantes e os momentos produzidos é zero.

O valor máximo em módulo que as tensões residuais podem atingir é a própria tensão de escoamento local do material numa dada condição (temperatura, grau de deformação prévio, dentre outros).

Assim toda vez que tensões ultrapassam o limite de escoamento local e uma determinada região de um corpo e este sofre deformações plástica ocorrerá uma redistribuição das tensões residuais no corpo, que no entanto continuarão em equilíbrio.

Um aspecto importante associado a tensões residuais é a distorção, que em barras longas se manifesta principalmente por um empenamento. Em etapas subseqüentes de manufatura, tais como tratamentos térmicos e operações de usinagem, as tensões residuais vão sofrendo redistribuições durante toda rota de fabricação. Alívio e redistribuição de tensões residuais pode ocorrer de várias formas, dentre elas através de deformação plástica, quando a resistência ao escoamento do material cai, por exemplo, devido ao aquecimento, ou devido a retirada de material (por exemplo em uma etapa de usinagem). Esta redistribuição de tensões pode então gerar distorções, causando a perda do componente ou ainda a necessidade de re-trabalho para corrigir este empenamento.

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 durante uma rota de fabricação. Objetivou-se um maior entendimento do processo de geração e redistribuição de tensões residuais, bem como tentou-se identificar as etapas do processo mais críticas em relação às tensões residuais geradas no produto final (barras trefiladas).

Atualmente há vários métodos de medida das tensões residuais em um componente, podendo-se classificar estes métodos como destrutivos, que são aqueles que de alguma forma removem material para fazer a medida, não-destrutivos que são os métodos de análise de propriedades físicas do material e assim não causam a perda deste componente, e finalmente os métodos semi-destrutivo, que são aqueles onde a preparação do ensaio não compromete o componente.

Durante o processo de trefilação, especialmente tensões trativas são geradas, diminuindo assim a vida em fadiga de componentes mecânicos e também diminuindo a resistência a corrosão. Tensões residuais axiais merecem uma atenção especial, pois podem provocar empenamentos em etapas subseqüentes de manufatura, tais como usinagem, tratamentos térmicos e operações de corte e desbaste.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

O método de análise deste nível de tensões residuais foi feito a partir da técnica de hole-drilling (método do furo-cego), considerado semi-destrutivo, este método 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, utilizando para tanto extensômetros de resistência elétrica.

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 1. Onde o  $\sigma_{\max}$  e  $\sigma_{\min}$  são as tensões residuais principais e  $\varepsilon$  são as deformações relativas e  $\bar{A}$  e  $\bar{B}$  são as constantes de calibração.

$$\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} = \frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_1}{4\bar{A}} \pm \sqrt{\frac{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2}{4\bar{B}}} \quad (\text{equação 1})$$

O método de cálculo das tensões residuais é apresentado na equação 2, segundo Kockelmann e o das direções das tensões residuais máximas principais é apresentado na equação 3.

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

$$\beta(\xi) = \frac{1}{2} \arctan \frac{2\sigma_b(\xi) - \sigma_a(\xi) - \sigma_c(\xi)}{\sigma_a(\xi) - \sigma_c(\xi)} \quad (\text{equação 3})$$

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.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A composição química (Tabela 1) apresentada pela amostra confirmou a qualidade do aço como sendo AISI 1048, apresentando-se dentro dos padrões estabelecidos para esta qualidade de aço.

**Tabela 1** - Composição Química do aço AISI 1048.

Elemento	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Nb
% em peso	98,05	0,4311	0,2192	0,737	0,0113	0,0251	0,1990	0,0164	0,1965	0,0899	0,002

O processo de trefilação serve para conferir ao material oriundo de rolos de fio-máquina laminado suas propriedades finais. Este processo a partir do fio-máquina segue as seguintes etapas:

- Preparação dos rolos;
- Endireitamento horizontal e vertical;
- Jateamento com granalhas;
- Trefilação;
- Corte por cisalhamento;
- Endireitamento e polimento por rolos cruzados (PTN);
- Operações de corte e chanfro e controle de qualidade.

Para a medição das tensões residuais apresentadas no item resultados, foram retiradas amostras de 300 mm de comprimento após as etapas de endireitamento horizontal e vertical, jateamento, trefilação, endireitamento e polimento por rolos cruzados (PTN) com ângulos de 16° e 18°. As amostras foram caracterizadas quanto a microestrutura, dureza, composição química, e tensões residuais. Um aspecto importante levado em consideração na retirada das amostras foi a orientação da amostra retirada em relação ao maquinário (Figura 1). A preparação de amostras para a realização dos ensaios de hole-drilling seguiram a norma ASTM E-837-01.

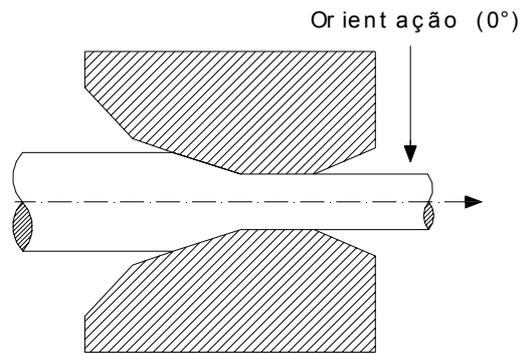


Figura 1 - Sistema de orientação na retirada das amostras.

### 3.1 Caracterização Metalográfica do Material



Figura 2 - Fio Máquina aspecto longitudinal da amostra caracterizando o sentido de trefilação, estrutura perlítica (região escura) e ferrita (região clara), ataque Nital 2% Aumento:50X.

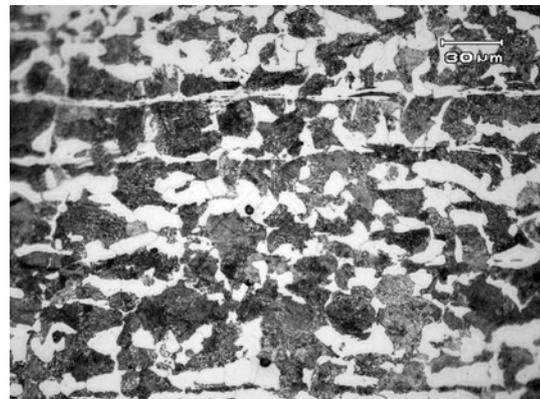


Figura 3 - Fio Máquina, aspecto longitudinal da amostra caracterizando o sentido de trefilação, estrutura perlítica (região escura) e ferrita (região clara), ataque Nital 2% Aumento:200X.

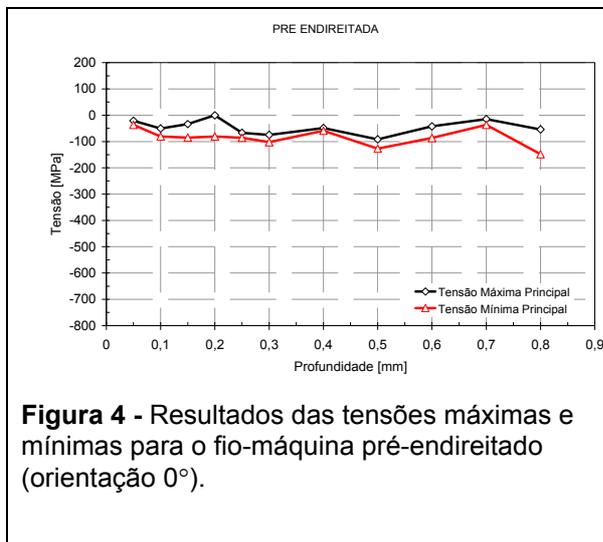
As metalografias acima mostram uma estrutura ferrítica (parte clara) e perlita (escuro), estando de acordo com o tipo de microestrutura esperada para esta qualidade de aço trefilado. Pode ser identificada, claramente a direção de trefilação.

### 3.2 Caracterização das Tensões Residuais

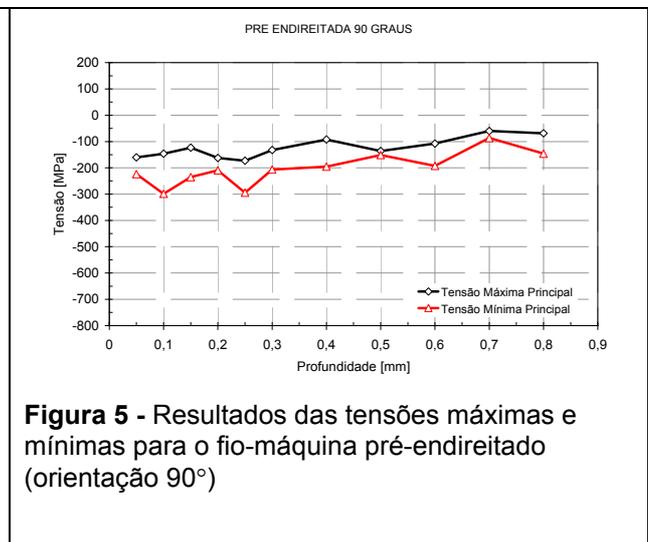
Neste item serão apresentados os resultados da análise de tensões residuais após cada etapa de fabricação, mostrando-se os perfis de tensões residuais medidos para posições a 0° e 90°, conforme a Figura 1.

### 3.3 Fio-Máquina Pré-Endireitado

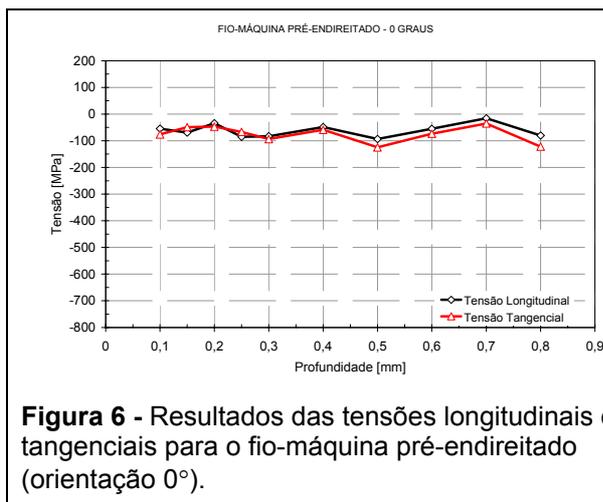
Comparando-se os perfis de tensões residuais da Figura 4 e Figura 5 ( $0^\circ$  e  $90^\circ$ ), observa-se uma diferença significativa no nível de tensões residuais, na posição de  $90^\circ$  são mais compressivas em relação a posição  $0^\circ$ . Esta diferença está relacionada aos diferentes níveis de deformações aplicados nos rolos de pré-endireitamento vertical e horizontal, isto se deve ao formato inicial do fio-máquina ser em rolo. Desta forma o nível de tensões aplicado no material na parte superior deve ser muito menor do que o nível de tensões aplicado na lateral, ocasionando desta forma diferença no nível de tensões residuais. Nas Figuras 6 e 7 observa-se o nível de tensões residuais longitudinais e tangenciais do fio-máquina pré-endireitado, pode-se observar o mesmo comportamento apresentado pelas tensões máximas e mínimas onde nota-se uma diferença significativa em relação aos dois ângulos comparados  $0^\circ$  e  $90^\circ$ .



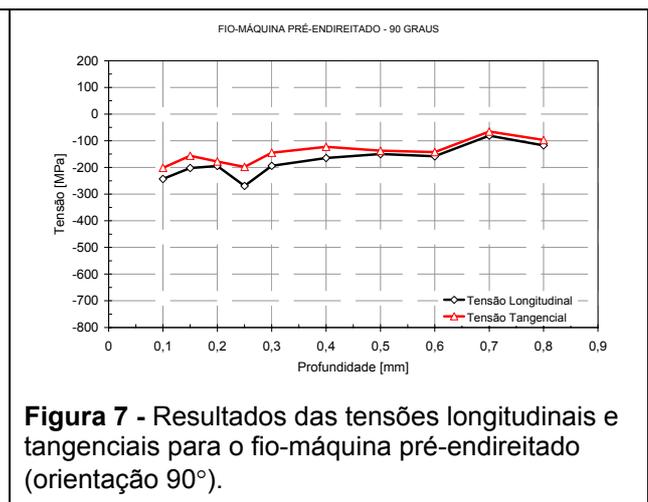
**Figura 4** - Resultados das tensões máximas e mínimas para o fio-máquina pré-endireitado (orientação  $0^\circ$ ).



**Figura 5** - Resultados das tensões máximas e mínimas para o fio-máquina pré-endireitado (orientação  $90^\circ$ ).

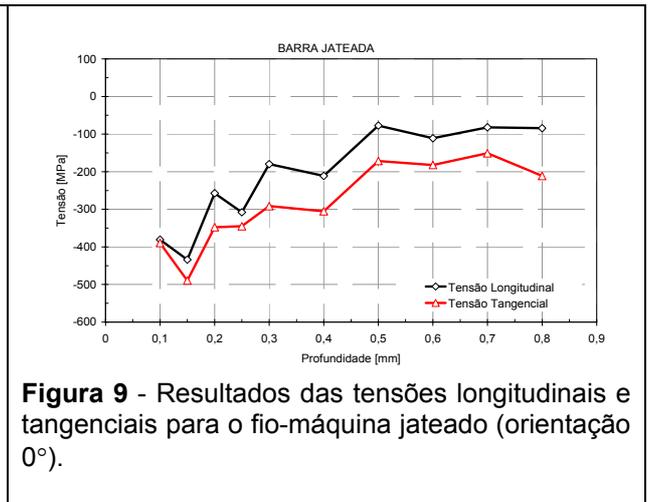
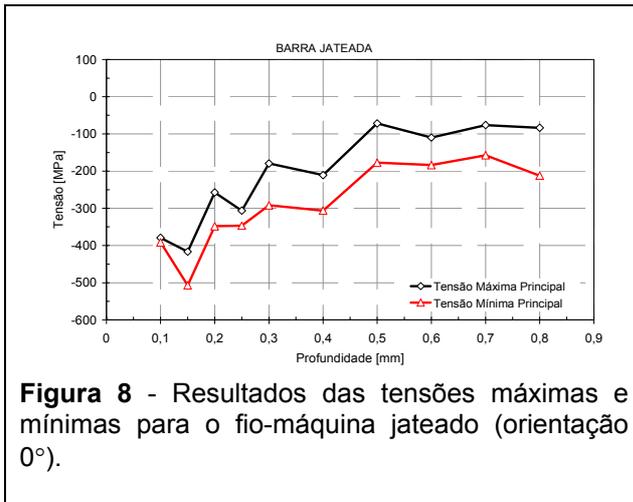


**Figura 6** - Resultados das tensões longitudinais e tangenciais para o fio-máquina pré-endireitado (orientação  $0^\circ$ ).



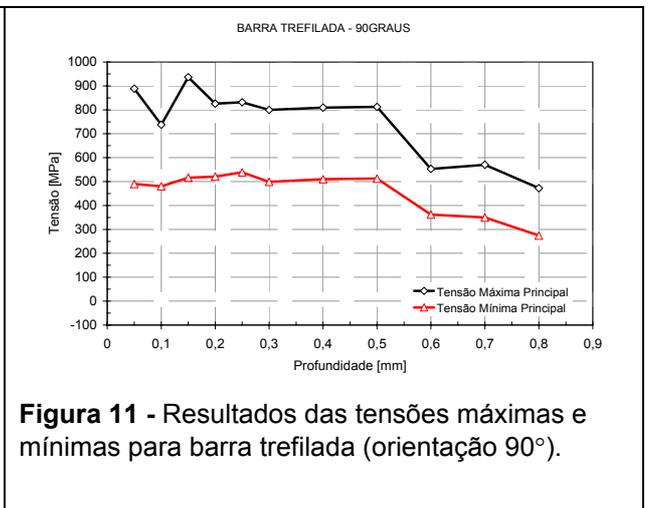
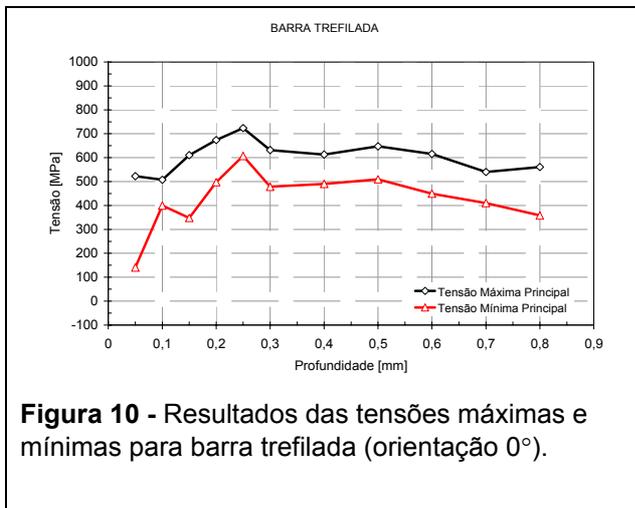
**Figura 7** - Resultados das tensões longitudinais e tangenciais para o fio-máquina pré-endireitado (orientação  $90^\circ$ ).

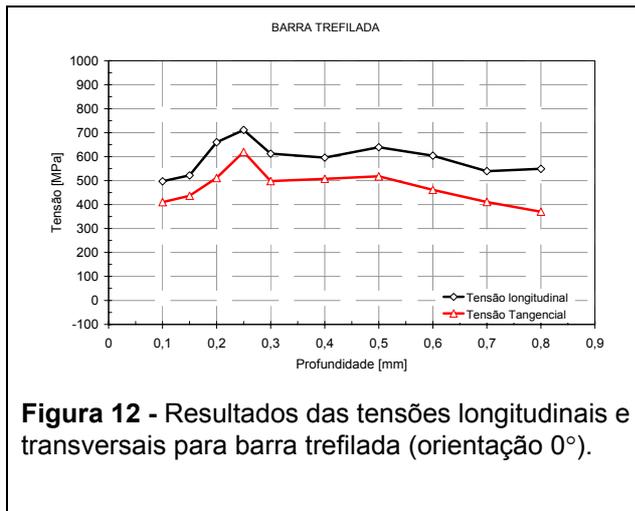
### 3.4 Fio-Máquina Jateado



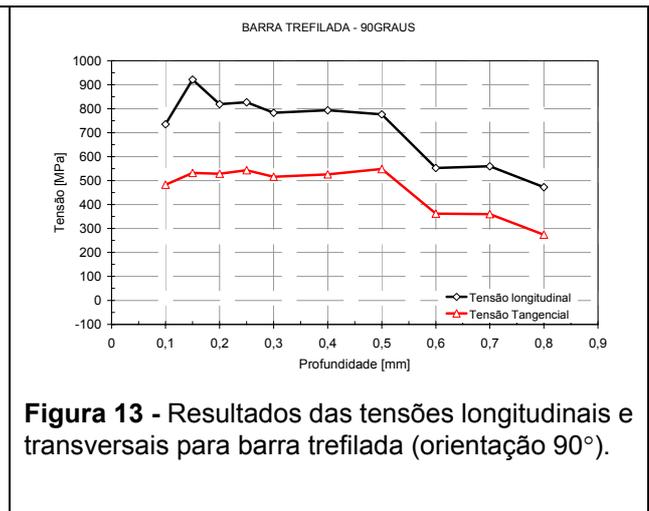
Na Figura 8 e Figura 9 observa-se as tensões residuais induzidas na superfície do fio-máquina durante o jateamento, comparando-se os resultados obtidos na mesma orientação do fio-máquina pré-endireitado e na mesma posição (0°) pode-se observar um diminuição de aproximadamente 300MPa (na direção de compressão) nas tensões residuais presentes na superfície do material.

### 3.5 Barra Trefilada





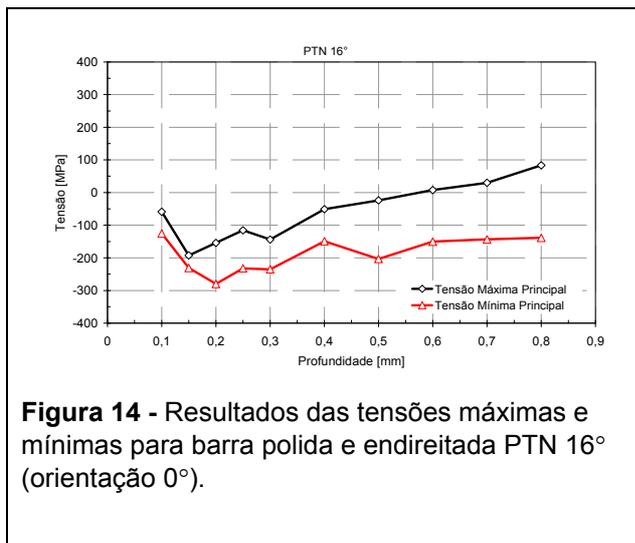
**Figura 12** - Resultados das tensões longitudinais e transversais para barra trefilada (orientação 0°).



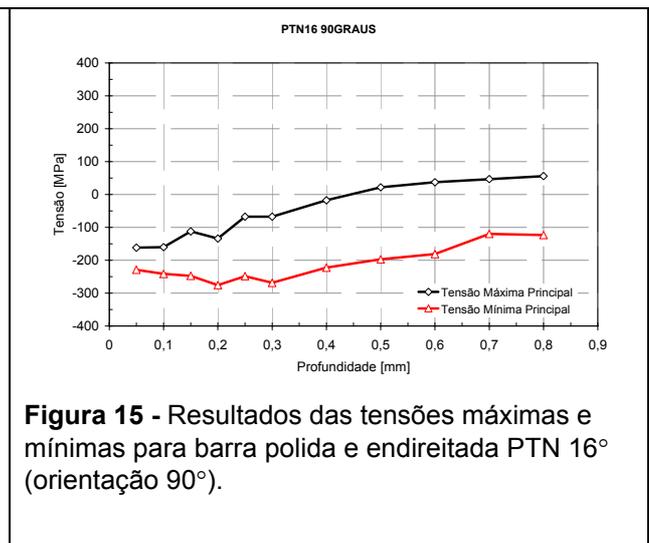
**Figura 13** - Resultados das tensões longitudinais e transversais para barra trefilada (orientação 90°).

Nas Figura 10 e 11 são apresentadas as tensões residuais principais máximas e mínimas após a etapa de trefilação para as duas orientações (0° e 90°), nestes gráficos é possível observar a permanência das diferenças de tensões residuais após a trefilação ocasionado pela etapa de pré-endireitamento. Também observa-se o alto nível de tensões residuais trativas na superfície da barra.

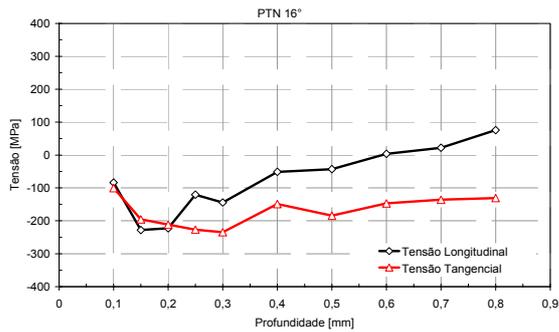
### 3.6 - Barra Endireitada e Polida PTN 16°



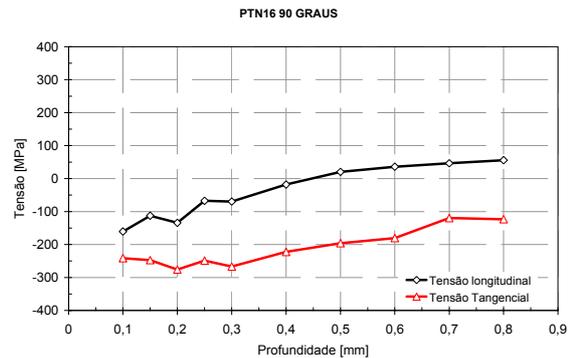
**Figura 14** - Resultados das tensões máximas e mínimas para barra polida e endireitada PTN 16° (orientação 0°).



**Figura 15** - Resultados das tensões máximas e mínimas para barra polida e endireitada PTN 16° (orientação 90°).



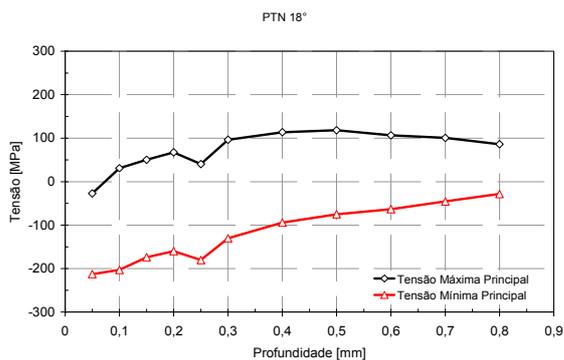
**Figura 16** - Resultados das tensões longitudinais e transversais para barra polida e endireitada PTN 16° (orientação 0°).



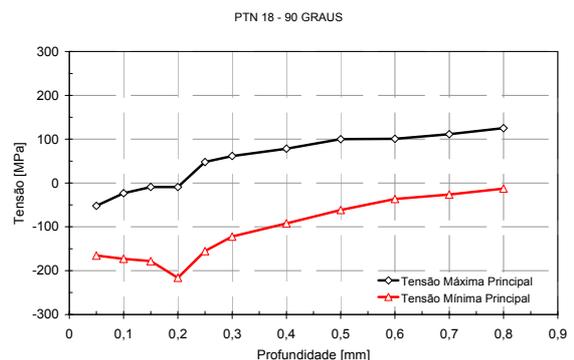
**Figura 17** - Resultados das tensões longitudinais e transversais para barra polida e endireitada PTN 16° (orientação 90°).

Após o PTN significativa deformação é introduzida na superfície, fazendo com que os valores mudem para compressão novamente. Observa-se também uma tendência dos valores tornarem-se trativos após 0,5 a 0,6 mm de profundidade da superfície.

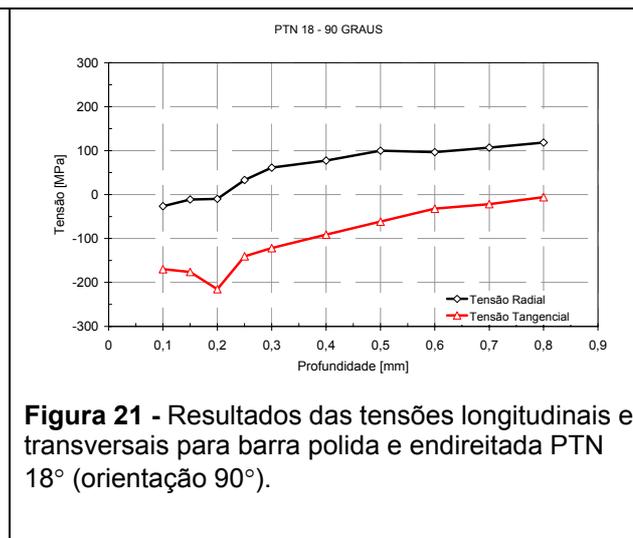
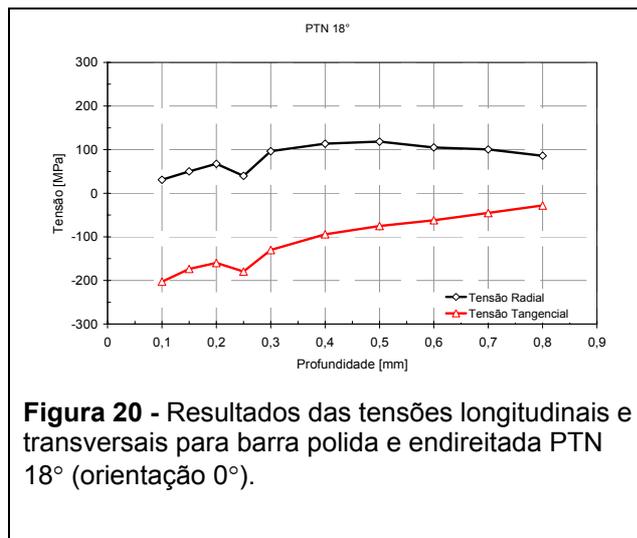
### 3.7 Barra Endireitada e Polida PTN 18°



**Figura 18** - Resultados das tensões máximas e mínimas para barra polida e endireitada PTN 18° (orientação 0°).



**Figura 19** - Resultados das tensões máximas e mínimas para barra polida e endireitada PTN 18° (orientação 90°).



Nas Figuras 18 e 19 observa-se o comportamento do nível de tensões residuais presentes na superfície da barra endireitada e polida (PTN 18°) onde pode-se notar que a diferença entre as tensões residuais nas posições 0° e 90° observada em etapas anteriores do processo se torna imperceptível. Observa-se também que o nível de tensões residuais é trativo na superfície, tendendo a aumentar conforme aumenta a profundidade até um valor máximo, porém este valor não pode ser determinado devido a profundidade máxima de medida do método de hole-drilling. O comportamento do nível de tensões no núcleo da barra não pode ser determinado por este método.

#### 4 CONCLUSÕES

Os resultados apresentados estão coerentes com a bibliografia e servirão de base para o entendimento do comportamento das tensões residuais durante o processo de trefilação combinada e também na definição de parâmetros a serem otimizados visando um nível de tensões residuais favorável, evitando assim o empenamento das barras em processos posteriores devido a tensões residuais remanescentes do processo de trefilação.

Observou-se que com a presente geometria de fieira, tensões trativas são geradas após trefilação. Independentemente do empenamento após saída da trefilação, tensões trativas não são desejáveis, pois levam a um aumento na possibilidade de surgimento de defeitos superficiais e interferem negativamente nas propriedades mecânicas. Além disso, quanto maiores as tensões trativas após trefilação, maior deverá ser a pressão aplicada no endireitamento posterior, o que também não é desejável, pois o alívio destas tensões em processos de usinagem (remoção de material) ou tratamentos térmicos tende a gerar empenamento. Deste modo conclui-se que o caminho para a otimização do processo inclui duas etapas, uma reduzir as tensões trativas após trefilação ao mínimo possível e minimizar as pressões dos rolos de endireitamento (utilização de maiores ângulos). Estas modificações do processo já foram implementadas.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem a Gerdau Aços Especiais Piratini e a FINEP pelo suporte financeiro para a realização deste trabalho.

## BIBLIOGRAFIA

- 1 D.C. Ko, The evaluation of residual stress on the drawn wire using nano-indentation test. *Journal of Materials Processing Technology* 191 (2007) 64–67.
- 2 Lu, J. “Handbook of Measurement of Residual Stresses”. SEM, Inc. 1996. 05 – 12.
- 3 J.M. Atienza, J. Ruiz-Hervias, M.L. Martinez-Perez, F.J. Nonpean, M. Garcia-Hernandez, M. Elice, Residual stresses in cold drawn ferrite rods, *Scr. Mater.* 52 (2005) 305–309.
- 4 M. Elice, Influence of residual stresses in the performance of cold-drawn pearlite wires, *J. Mater. Process. Technol.* 39 (2004) 3889–3899.
- 5 Akikazu Nakagiri, Takaaki Yamano, Masazumi Konaka, Motoo Asakawa, Wataru Sasaki and Kazunari Yoshida, Behavior of residual stress and drawing stress in conical-type die and circle-type die drawing by FEM simulation and experiment. *WIRE JOURNAL INTERNATIONAL*, August 2001. 72- 80.
- 6 KOCKELMANN, H. e SCHWARZ, T. 1993. Die Bohrlochmethode—ein für viele Anwendungsbereiche optimales Verfahren zur experimentellen Ermittlung von Eigenspannungen. *MTB von HBM*, 29(2):33–38.
- 7 ASTM E-837, Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method. ASTM International, 2004.
- 8 ASTM E3-01, Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. ASTM International 2004.
- 9 Motoo Asakawa, Effect of die approach geometry and bearing length on residual stress after bar drawing. *WIRE JOURNAL INTERNATIONAL*, 2002. p68-72.
- 10 D.C. Ko, The evaluation of residual stress on the drawn wire using nano-indentation test. *Journal of Materials Processing Technology* 191 (2007) 64–67
- 11 G.F. Vander Voort, *ASM Handbook Volume 9: Metallography and Microstructures*. ASM International, 2004.