

INFLUÊNCIA DAS TENSÕES RESIDUAIS NAS PROPRIEDADES OBTIDAS COM ENSAIO DE TRAÇÃO¹

Guilherme Vieira Braga Lemos²
Rafael Meneses Nunes³
Jefferson Haag⁴
Bill Paiva dos Santos⁴
Vagner Costa⁴
Alexandre da Silva Rocha⁵
Telmo Roberto Strohaecker⁵

Resumo

As tensões residuais estão presentes em todos os componentes e a sua magnitude varia conforme a rota de fabricação. É conhecido que estas tensões influenciam na fratura, vida em fadiga e provavelmente em propriedades mecânicas. Neste estudo, avaliaram-se os efeitos das tensões residuais na curva tensão deformação em barras trefiladas. Sendo assim, foram realizados ensaios de tração em barras trefiladas do aço ABNT 1045 com tensões residuais (trativas e compressivas). As amostras foram selecionadas a partir das seguintes condições: tensões residuais superficiais compressivas e tensões residuais trativas. Para isto, utilizaram-se dois ângulos de fiação 15° e 20° e uma deformação de 12% para geração de tensões residuais trativas; já para a geração de tensões residuais compressivas as amostras foram deformadas em ~1% com dois ângulos diferentes de ferramenta (16° e 18°). As tensões residuais superficiais foram caracterizadas utilizando-se a técnica de difração de raios-X. Resultados indicam diferenças significativas na curva tensão-deformação relacionadas às tensões residuais no material.

Palavras-chave: Ensaio de tração; Tensões residuais; AISI 1045.

INFLUENCE OF RESIDUAL STRESS IN THE PROPERTIES OBTAINED BY TENSILE TEST

Abstract

Residual stresses are present in all components and its magnitude varies according to manufacturing route. It is known that these stresses influence the fracture, fatigue life and probably in mechanical properties. This study evaluated the effects of residual stresses in the stress-strain curve of drawn bars. Therefore, tensile tests were carried out in drawn bars of ABNT 1045 steel with tensile and compressive residual stresses. The samples were selected from the following conditions: surface compressive residual stress and tensile residual stresses. For this, we used two drawing angles 15° and 20° and a deformation of 12% for the generation of tensile residual stresses, whereas the generation of compressive residual stresses samples were deformed into ~1% at two different angles of the tool (16° and 18°). Residual stresses surface were characterized using X-ray diffraction. The experimental results indicate significant differences in the stress-strain curve related to the residual stresses in the material.

Key words: Stress-strain curve; Residual stresses; AISI 1045.

¹ Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGE3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, RS, Brasil.

³ Dr. Engenheiro Metalúrgico. Pesquisador. PPGE3M, UFRGS. Porto Alegre, RS, Brasil.

⁴ Mestrando do PPGE3M - UFRGS. Porto Alegre, RS, Brasil.

⁵ Professor Dr. do PPGE3M, UFRGS. Porto Alegre, RS, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Os ensaios de tração são rotineiramente aplicados na caracterização dos diversos tipos de materiais existentes. Os resultados obtidos com os ensaios são influenciados por diversas variáveis como: temperatura, velocidade de deformação, anisotropia do material, tamanho de grão, porcentagem de impurezas e condições ambiente.⁽¹⁾

A velocidade de ensaio é um dos parâmetros mais importantes e precisa ser expressa nos laudos e relatórios dos resultados, bem como nas especificações do material, uma vez que pode exercer influência direta sobre os resultados. De um modo geral, a velocidade de deformação (muitas vezes chamada de velocidade de ensaio) afeta o escoamento e o limite de resistência máxima fazendo com que se observem tensões de escoamento mais altas, quanto maior for a velocidade de deformação.⁽²⁻⁶⁾ Não há um valor definido para a velocidade do ensaio de tração, porém existem algumas faixas de valores mais adequadas, e distintas maneiras de medição destas de acordo com normas técnicas.^(7,8)

Um aspecto pouco investigado em relação ao ensaio de tração é a influência das tensões residuais da amostra nos resultados apresentados pelo ensaio. Em geral, os laboratórios cumprem as normas para realização dos ensaios, mas em nenhuma norma existe referência em relação à distribuição de tensões residuais na amostra. É sabido que as tensões residuais se somam as tensões aplicadas ao componente,⁽⁹⁾ por isso é necessário o conhecimento de quanto à distribuição e magnitude das tensões residuais podem afetar as propriedades mecânicas caracterizadas nos ensaios de tração.

Segundo a literatura, tensões residuais são as tensões existentes em um corpo sólido sem aplicação de forças externas (incluindo gravidade) ou gradientes térmicos.⁽¹⁰⁾ Todo sistema de tensões residuais está em equilíbrio e o somatório das forças resultantes e dos momentos produzidos é zero. O valor máximo em módulo que as tensões residuais poderão chegar é a própria tensão verdadeira de escoamento do material, que por sua vez é função da deformação total, taxa de deformação, temperatura e microestrutura.⁽¹⁰⁾

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A Tabela 1 mostra a composição química que se refere a um aço SAE 1045, resultado de uma análise com espectrometria de emissão ótica (equipamento Spectrolab tipo LAVMB08B).

Tabela 1. Composição química das duas corridas analisadas, aço ABNT 1045.

Corrida	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo
A	0,43	0,24	0,79	0,03	0,02	0,13	0,08	0,03
Norma	0,43-0,50	-	0,60-0,90	Máx. 0,04	Máx. 0,05	-	-	-

A rota de fabricação estudada compreende as etapas de trefilação combinada, alívio de tensões e têmpera por indução. A matéria-prima utilizada no processo de têmpera por indução é proveniente do processo de trefilação. Após o processo de trefilação o fio máquina tem um diâmetro de 20,25 mm, há um corte das barras nas dimensões de 6 m de comprimento e posterior endireitamento e polimento por rolos cruzados (PERC), este endireitamento garante a retinidade da barra. Após o

processo de PERC, as barras foram novamente cortadas com 200 mm de comprimento utilizando-se uma serra fita após a etapa 4 (Figura 1).

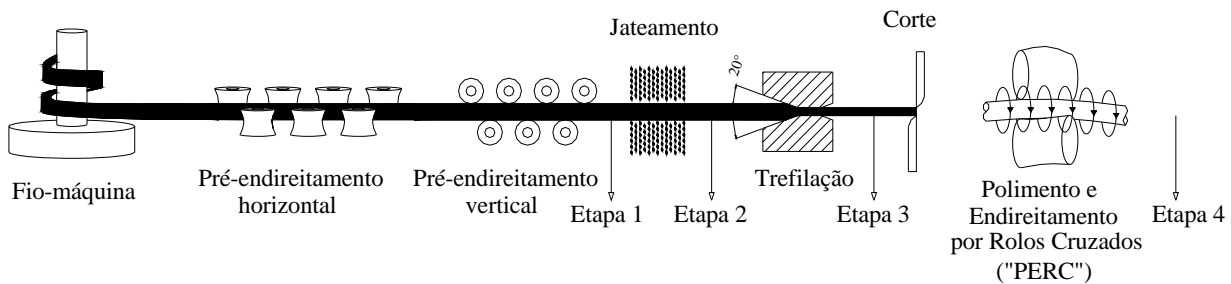


Figura 1. Rota de processo analisada.

Os corpos de prova, em um total de 6 (Figura 2) têm comprimento de aproximadamente 200 mm, diâmetro de 22,25 mm e foram selecionados de acordo com 3 condições específicas relacionadas ao processo de fabricação, são elas:

- condição I: FIEIRA 20 – PERC 16;
- condição II: FIEIRA 20 – PERC 18;
- condição III: FIEIRA 15 – PERC 16 e
- condição IV: FIEIRA 20.

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina eletromecânica marca Instron modelo 5585H com capacidade para 25 toneladas. A base de medida (Lo) para determinação do alongamento foi de 80 mm. Os ensaio foram finalizados antes do limite de resistência do material em decorrência da capacidade da máquina ser limitada em relação ao resistência mecânica do material. Assim, o limite de escoamento e a resiliência foram calculados através dos dados fornecidos pela célula de carga e extensômetro de medição da máquina de ensaios.



Figura 2. Corpos de prova nas condições analisadas.

Os valores de limite de escoamento foram encontrados a partir dos dados fornecidos pela da máquina, que foram conferidos através da análise gráfica das curvas tensão-deformação sugeridos pelas normas internacionais.

A caracterização de tensões residuais utilizando a método DRX foi realizada em um difratômetro ψ (modo de inclinação lateral) marca GE modelo Seifert Charon XRD M – Research Edition, equipado com tubo de raios-X de Cr-K α com abertura primária de 2 mm de diâmetro e um detector linear de 20º marca GE modelo Meteor 1D.

As linhas de difração {211} do ferro- α foram registradas para 27 ângulos de inclinação na faixa de $60^\circ < \psi < -60^\circ$, a faixa nos ângulos Theta e Omega utilizados foram 148-165º e passo de 0,05º com 10s de tempo de passo. A partir da medição dos picos de difração a análise da posição central do pico difração foi realizada utilizando o método de centro de gravidade considerando 20% da altura máxima do pico.

As tensões residuais foram calculadas usando o método de $\sin^2 \psi$ com módulo de elasticidade de 210 GPa e coeficiente de Poisson de 0,28 utilizando o software GE Analyze. O objetivo desta análise é a quantificação e distribuição das tensões residuais ao longo da amostra submetidas ao ensaio de tração. Em cada amostra analisada, foram medidos 24 pontos, sendo 12 pontos de um lado da amostra e outros 12 no lado oposto. A partir das medições calculou-se a média e desvio padrão das tensões residuais em cada amostra.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 4, 6 e 8 apresentam os resultados dos ensaios de tração e as Figuras 5, 7 e 9 apresentam os resultados das análises de tensões residuais, de acordo com as condições de processo de fabricação selecionadas. Para cada uma das condições (I, II e III) foram denominados dois CPs (1 e 2) de maneira aleatória.

A Figura 3 apresenta as curvas tensão-deformação para a condição de processamento I – Fieira 20º - PERC 16º, o limite de escoamento apresenta um valor médio de 761 MPa. O comportamento das duas curvas foi semelhante e, portanto, podem-se aferir adequadamente as propriedades do material.

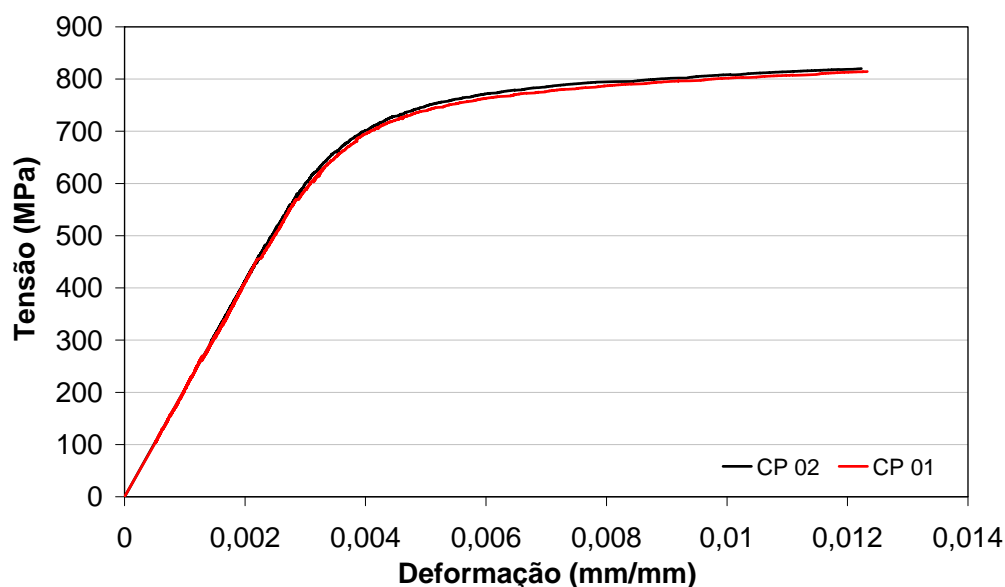


Figura 3. Curva tensão x deformação – Condição I – FIEIRA 20º – PERC 16º.

A Figura 4 apresenta a distribuição de tensões residuais na amostra processada na condição I – Fieira 20° - PERC 16°. Observa-se que as tensões residuais longitudinais superficiais apresentam comportamento compressivo em todos os pontos medidos. O valor médio caracterizado é de -132 MPa.

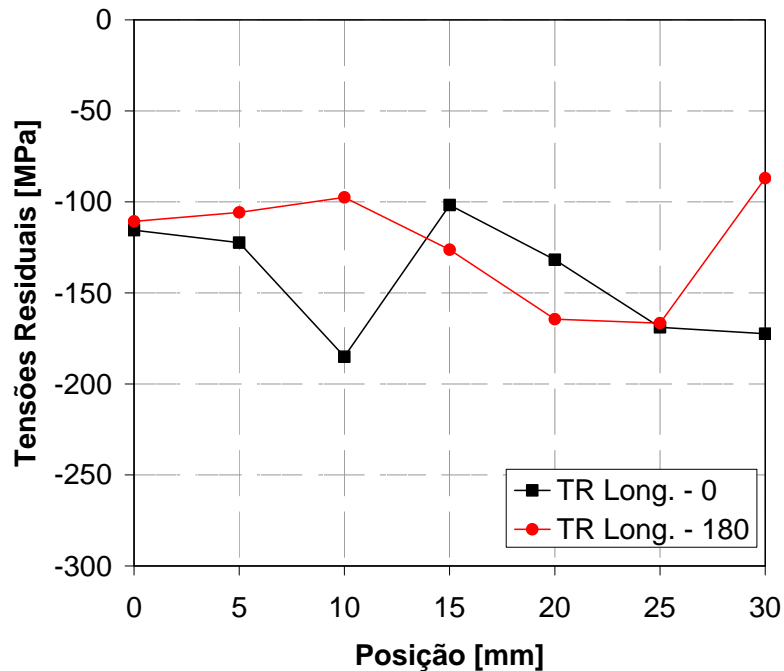


Figura 4. Distribuição de tensões residuais longitudinais – Condição I – FIEIRA 20° – PERC 16°.

A Figura 5 mostra a curva tensão-deformação para o material processado na condição II, o limite de escoamento médio caracterizado para os dois CPs ensaiados é de 774 MPa. Observa-se que houve uma pequena variação no início do ensaio comparando os dois corpos de prova. Após uma pequena quantidade de deformação (0,005m/mm), foi reestabelecida a tensão do CP 02. Sendo assim, o resultado do limite de escoamento não influenciado e os resultados foram similares.

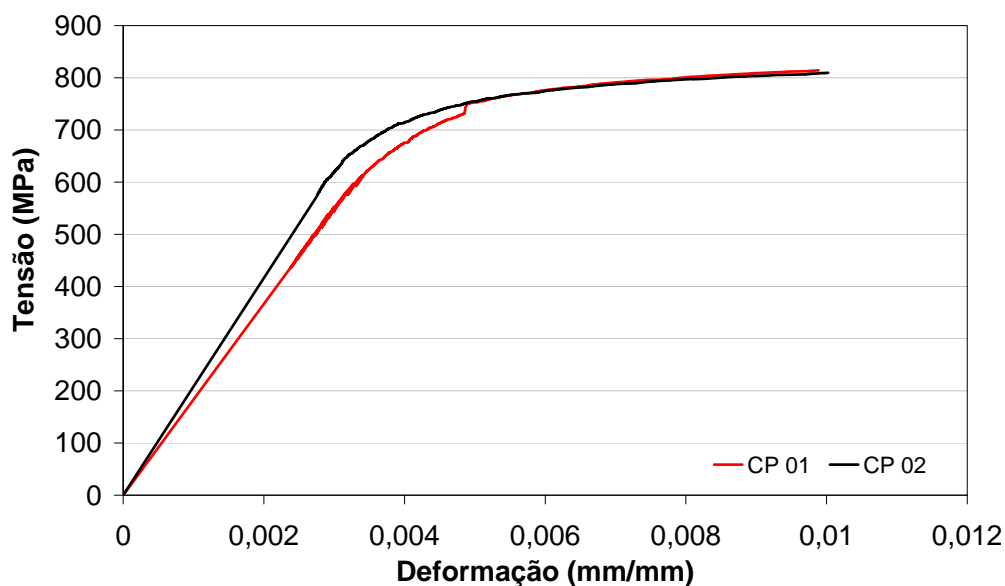


Figura 5. Curva tensão x deformação – Condição II – FIEIRA 20° – PERC 18°.

A Figura 6 mostra a distribuição de tensões residuais na amostra de condição II – Feira 20° e PERC 18°. Observa-se que as tensões residuais apresentam um comportamento compressivo com um valor médio de -171 MPa.

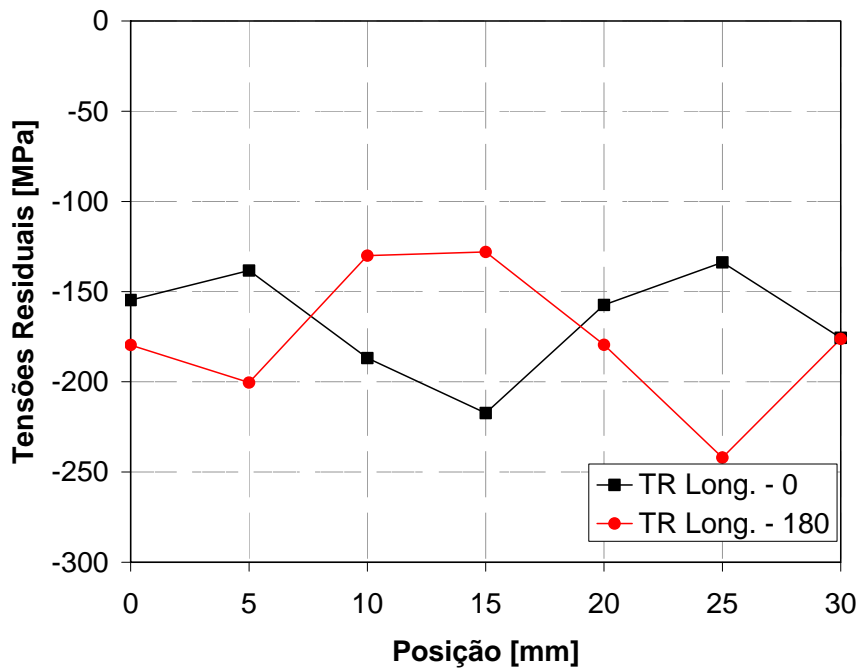


Figura 6. Distribuição de tensões residuais longitudinais – Condição II – FIEIRA 20° – PERC 18°.

A Figura 7 mostra a curva tensão deformação caracterizada para a condição III de processamento do material, o limite de escoamento médio para as duas curvas é de 780 MPa. Conforme pode ser observado, as curvas são muito similares, não havendo diferenças significativas entre as duas amostras.

A Figura 8 apresenta a distribuição de tensões residuais nos CPs processados na condição III – Feira 15° - PERC 16°, as tensões residuais médias são de -90 MPa para a condição de processamento analisada.

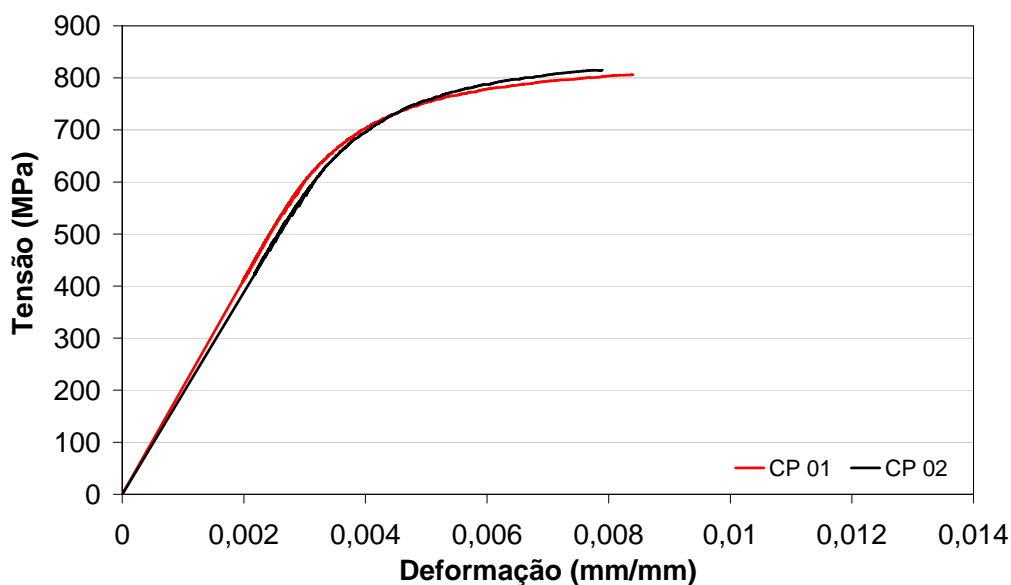


Figura 7. Curva tensão deformação Condição III – FIEIRA 15° – PERC 16°.

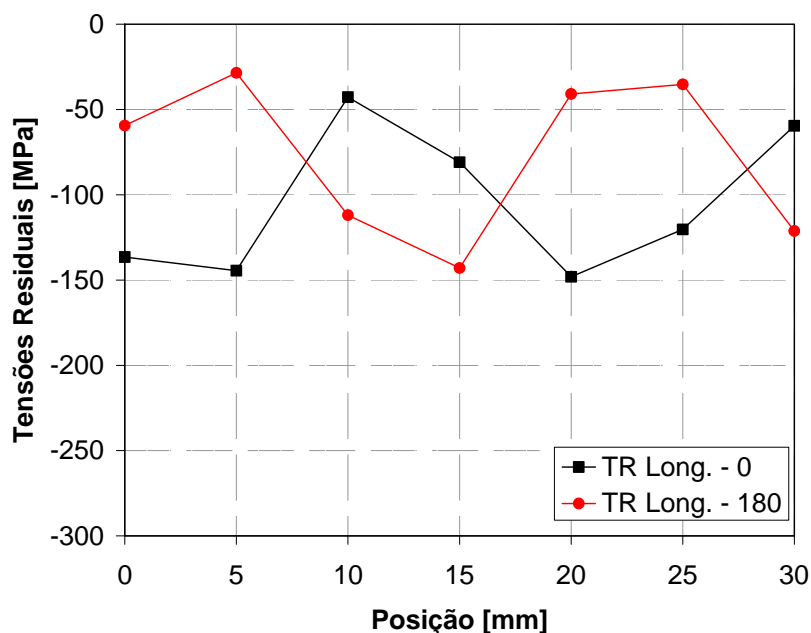


Figura 8. Distribuição de tensões residuais – Condição III – FIEIRA 15° – PERC 16°.

A Tabela 2 apresenta os principais resultados alcançados e as propriedades mecânicas obtidas para cada uma das taxas de deformação empregadas. Nesta tabela são sumarizadas todas as propriedades mecânicas analisadas neste trabalho.

Tabela 2. Resultados dos ensaios de tração

Condições de processo	Amostra	Limite de Escoamento (MPa)
Fieira 20° PERC 16°	CP 01	757
	CP 02	765
Fieira 20° PERC 18°	CP 01	767
	CP 02	780
Fieira 15° PERC 16°	CP 01	787
	CP 02	772
Fieira 20°	CP 01	759

A partir dos resultados obtidos realizou-se o cálculo das médias de tensões residuais e LE para as três condições de processamento analisadas. Estes resultados são sumarizados na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados e propriedades analisadas

Condições de processo	Condição	Média LE (MPa)	Média de tensões residuais (Mpa)
Fieira 20° - PERC 16°	I	761	-132
Fieira 20° - PERC 18°	II	774	-171
Fieira 15° - PERC 16°	III	780	-90
Fieira 20°	IV	759	210

A partir dos resultados obtidos e da comparação das três condições de processamento do material observa-se que há diferenças significativas na distribuição e magnitude de tensões residuais superficiais. Pode-se observar uma diferença máxima entre as condições de processamento II e III com uma variação de aproximadamente 80 MPa entre as médias das duas condições de processamento. Comparando-se os valores médios do limite de escoamento, nas condições onde se observaram as maiores diferenças de tensões residuais não se observa diferenças significativas na média de limite de escoamento. Isto torna um indicativo de que as diferenças de tensões residuais na superfície do material não afetam de forma significativa a curva tensão deformação neste caso.

A Figura 10 mostra um comparativo entre a condição I e a III no que diz respeito ao limite de escoamento e as tensões residuais. Mantendo o ângulo PERC fixo (igual para as duas condições) e aumentando o ângulo de fieira (de 15° para 20°) percebe-se uma diminuição do nível de tensões residuais compressivas e também um decréscimo no limite de escoamento.

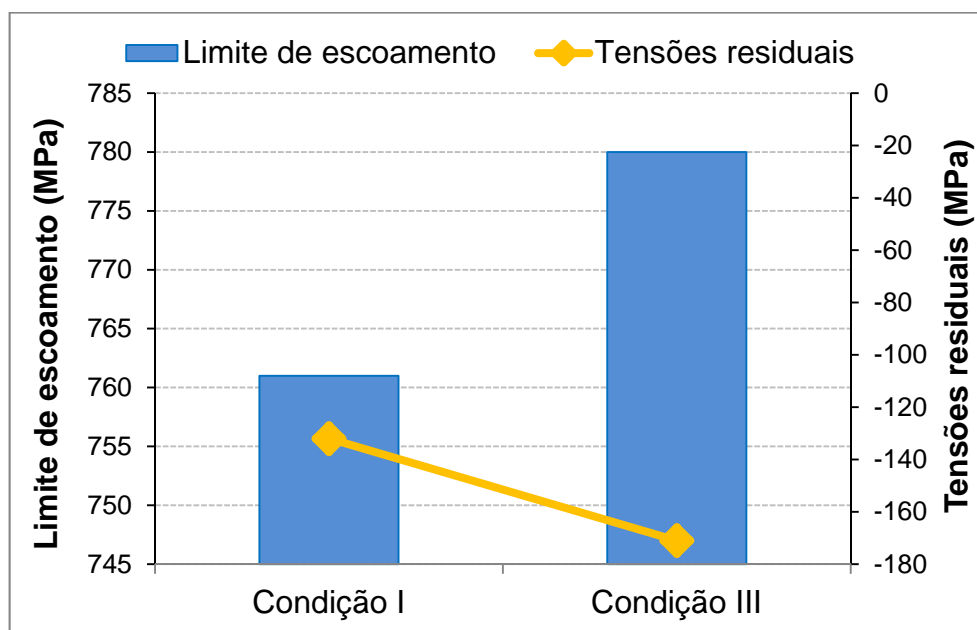


Figura 10. Comparativo entre as condições I e III.

A Figura 11 apresenta um comparativo entre a condição I e a II para o limite de escoamento e as tensões residuais. Mantendo o ângulo de fieira fixo (igual para as duas condições) e aumentando o ângulo PERC (de 16° para 18°) nota-se um aumento do nível de tensões residuais compressivas e também um incremento no limite de escoamento.

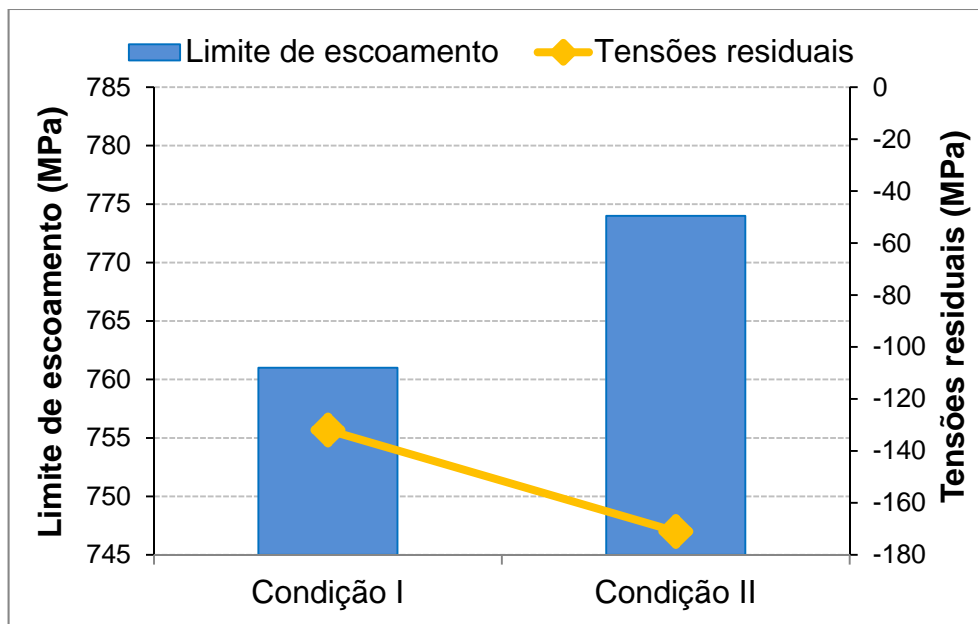


Figura 11. Gráfico comparativo entre as condições I e II.

A Figura 12 apresenta os perfis de tensões residuais para as condições de processamento analisadas neste trabalho caracterizadas via difração de nêutrons, maiores detalhes podem ser vistos em Nunes.⁽¹⁰⁾ Observa-se que os perfis para as condições de processamento II e III, Feira 20° - PERC 18° e Feira 15° - PERC 16°, são muito semelhantes, tanto na superfície como no núcleo do material, e da mesma forma o limite de escoamento caracterizado apresenta valores muito próximos.

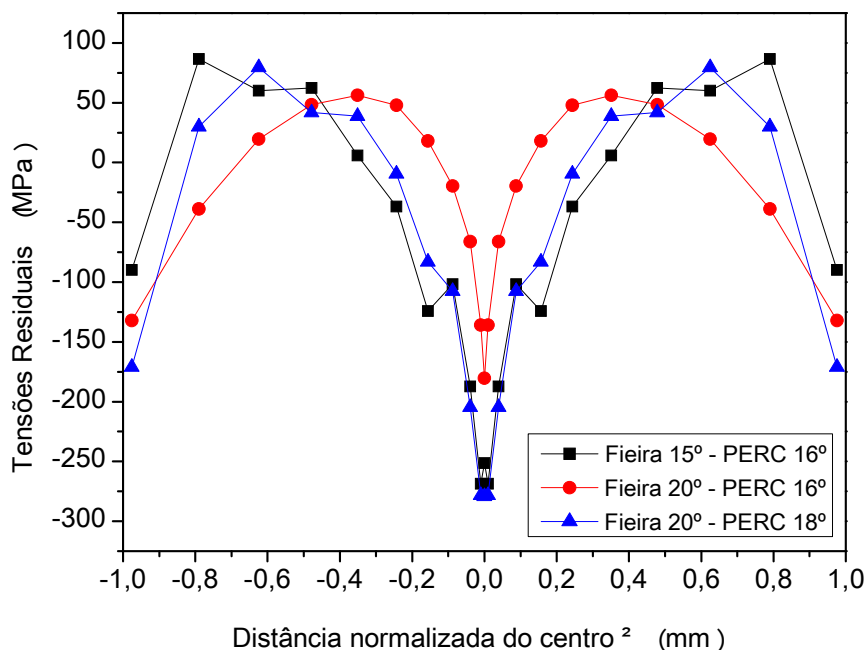


Figura 12. Perfis de Tensões residuais caracterizados por difração de nêutrons para as condições de processamento analisadas.⁽¹⁰⁾

4 CONCLUSÕES

A partir dos ensaios realizados pode-se concluir que:

- a distribuição de tensões residuais na superfície de componentes cilíndricos de aço AISI 1045 com 20,25 mm de diâmetro não afeta de forma significativa as propriedades mecânicas obtidas no ensaio de tração;
- não se obteve uma correlação direta entre tensões residuais superficiais e resistência mecânica em um ensaio de tração; e
- as tensões residuais trativas na superfície da amostra IV não afetaram de forma significativa os resultados obtidos no ensaio de tração.

REFERÊNCIAS

- 1 GARCIA, A; SPIM, J. A.; DOS SANTOS, C. A. Ensaios dos Materiais. 2 ed. Rio de Janeiro. 2012.
- 2 KVAČKAJ, T.; KOVÁČOVÁ, A.; KVAČKAJ, M.; Imrich POKORNÝ, I.; KOČIŠKO, R.; DONIČ, T. Influence of strain rate on ultimate tensile stress of coarse-grained and ultrafine-grained copper. *Materials Letters*. 2010.
- 3 LUO, J.; LI, M.; YU, W.; LI, H. The Variation Of Strain Rate Sensitivity Exponent And Strain Hardening Exponent In Isothermal Compression Of Ti-6Al-4V Alloy. *Materials And Design*. 2010.
- 4 BOYCE, B. L.; DILMORE, M.F. The dynamic tensile behavior of tough, ultrahigh-strength steels at strain-rates from 0.0002 s⁻¹ to 200 s⁻¹. *International Journal of Impact Engineering*. 2008.
- 5 SOUZA, S. A. Ensaios Mecânicos de Materiais Metálicos – Fundamentos teóricos e práticos. 1982.
- 6 DIETER, G. *Metalurgia Mecânica*, Guanabara Dois, Rio de Janeiro. 1981.
- 7 ISO 6892-1. *Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature*. 2009
- 8 ASTM E8/EM8. *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*.
- 9 LU, J.; SOCIETY FOR EXPERIMENTAL MECHANICS (U.S.). *Handbook of measurement of residual stresses*. Lilburn, GA Upper Saddle River, NJ: Fairmont Press, 1996. xv, 238 p.
- 10 Nunes, R.M. Estudo de distorção de barras cilíndricas de aço ABNT 1045 em uma rota de fabricação envolvendo trefilação combinada e têmpera por indução. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, 2012, 219p.