

CARACTERIZAÇÃO DE PROCESSO DE *SHOT PEENING* EM NAVALHAS PARA ROÇADEIRA ¹

Bruna Vidor e Souza ²

Maria Beatriz Nunes de Oliveira Borsa ³

Tonilson de Souza Rosendo ⁴

Toni Roger Shifelbain de Lima ⁴

Afonso Reguly ⁵

Resumo

Este trabalho tem por objetivo a avaliação do processo de *shot peening* em navalhas para roçadeiras para processos com e sem tratamento térmico posterior ao jateamento. Segundo especificação do projeto, o processo de *shot peening* deve garantir a introdução de tensões residuais (TR) compressivas até uma profundidade mínima de 0,3mm a partir da superfície da navalha. Além disso, a tensão residual introduzida deve ser homogênea em todos os pontos da superfície. Portanto, a determinação das TR é de suma importância para a qualificação do processo. Neste trabalho são analisados dois lotes de navalhas que foram submetidos às mesmas condições de *shot peening*, sendo que um dos lotes sofreu tratamento térmico posterior para alívio parcial das tensões. As tensões residuais foram determinadas em 4 pontos da superfície de cada navalha através do método do furo cego (*the hole drilling method*), utilizando o modelo matemático desenvolvido por Kockelmann. Uma navalha sem *shot peening* também foi analisada. O perfil de TR para cada ponto medido é apresentado e os resultados são discutidos em termos da espessura da camada compressiva e da magnitude e homogeneidade das tensões residuais para ambos os processos.

Palavras-chave: Tensões residuais; *Shot peening*; Navalhas

SHOT PEENING PROCESS CHARACTERIZATION ON CUTTING BLADES

Abstract

This work aims the assessment of the shot peening process on cutting blades with and without heat treatment after the shot peening. According to the design specifications for these blades, the shot peening process shall provide compressive residual stresses up to 0,3 mm depth, at least. Furthermore, the residual stresses obtained shall be homogeneous all over the surface. Hence, the residual stress determination is very important for the qualification of the process. In this work, two lots of cutting blades were submitted to the same shot peening process, having one of the lots undertaken a tempering heat treatment for partial residual stress relief. Two samples of each lot were set aside for the residual stress measurements, which were carried out in four points along the surface of the samples. The hole drilling method had been used for the measurements and the stress evaluations were performed using the mathematical model developed by Kockelmann. A sample without shot peening was also analysed. The residual stress profiles obtained in every point are presented and the results are discussed in terms of the depth of the compressive layer. The maximum compressive residual stress and the homogeneity of the stresses for both lots are discussed as well.

Key words: Residual stresses; Shot peening; Cutting blades.

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

² Graduanda em Engenharia de Materiais – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

³ Engenheira de Materiais – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

⁴ Doutorando – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

⁵ Professor Doutor Engenheiro – Laboratório de Metalurgia Física – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

1 INTRODUÇÃO

As demandas atuais exigem que os componentes de engenharia usem uma quantidade cada vez menor de material sem apresentar decréscimo de desempenho. Assim, se faz necessário o desenvolvimento ou aprimoramento de técnicas que proporcionem a garantia das propriedades dos componentes, como os tratamentos de endurecimento superficial, que têm como uma de suas aplicações o aumento da resistência à fadiga nos metais. Sendo a fadiga um processo que depende tanto de superfície quanto da tensão aplicada, a grande maioria das técnicas empregadas para aumentar a vida em fadiga almeja produzir uma camada de material comprimido na superfície do componente. Em se tratando de um componente como uma navalha para roçadeira, é necessário que a camada compressiva do material também possua uma elevada tenacidade ao impacto.

Este trabalho especificamente trata da avaliação da distribuição de tensões residuais produzida por processo de *shot peening* em navalhas para roçadeira com e sem posterior tratamento térmico para alívio parcial de tensões, além da caracterização do processo com base nos resultados obtidos com o método do furo cego, a fim de verificar a melhor condição para a obtenção das características desejadas.

1.1 Shot Peening

O *shot peening* é uma técnica largamente utilizada para melhorar a performance de componentes estruturais e soldas sujeitas a carregamento em fadiga, corrosão sob tensão e outros mecanismos que possam comprometer a integridade do componente. Em geral, assume-se que seus efeitos benéficos se dão pela introdução de um campo de tensões residuais compressivas na superfície do componente em virtude da deformação plástica imposta pelo impacto da granalha.^[1-4] A Figura 1 mostra uma distribuição típica de tensões residuais produzida por *shot peening* em componentes mecânicos de engenharia.

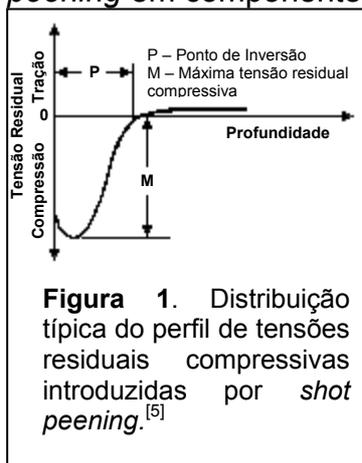


Figura 1. Distribuição típica do perfil de tensões residuais compressivas introduzidas por *shot peening*.^[5]

O *shot peening* produz uma camada com tensões residuais compressivas resistente à formação de trincas pela formação de indentações que podem tanto cobrir toda a superfície tratada como tratar apenas uma parte desta. Durante o jateamento a granalha deforma o material plasticamente ao

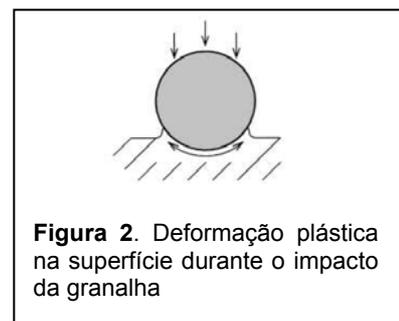


Figura 2. Deformação plástica na superfície durante o impacto da granalha

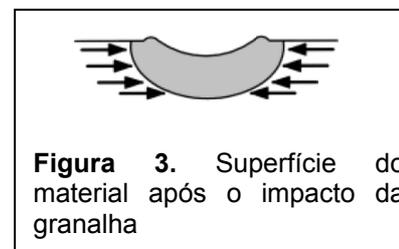


Figura 3. Superfície do material após o impacto da granalha

longo da superfície (Figura 2). Quando a granalha é retirada, o material expande na direção normal e o núcleo produz contração ao longo da superfície (Figura 3). Esta contração produz a distribuição de tensões residuais compressivas na região.^[1-3,5] Este processo é geralmente utilizado quando há concentradores de tensão atuando no componente ou materiais de alta resistência mecânica.

O jateamento é feito com granalhas, elementos de dureza elevada, o que influencia na magnitude das tensões residuais introduzidas no material. Dessa forma a dureza desta deve ser igual ou maior à do componente a menos que o acabamento superficial seja um fator crítico. Para um número considerável de ligas ferrosas e não-ferrosas este critério encontra-se entre 45 e 52 HRC.

1.2 Aumento da Vida em Fadiga

O comportamento em fadiga é um importante parâmetro a ser considerado no caso de componentes mecânicos sujeitos a amplitudes variáveis de carregamento, uma vez que as condições mecânicas e metalúrgicas influenciam a resistência a fadiga de componentes estruturais.

Uma das maneiras mais conhecidas de se aumentar a resistência a fadiga é usando *shot peening* a fim de que sejam introduzidas tensões residuais compressivas nas camadas superficiais do componente, dificultando a nucleação e propagação de trincas de fadiga.^[1]

Geralmente as falhas por fadiga iniciam na superfície do componente.^[1,5,6] Isso porque ela é a parte mais vulnerável em uma estrutura, por apresentar imperfeições que agem como concentradores de tensão, principalmente em fadiga, caso em que os esforços trativos no componente são maximizados.^[1]

Quando um material é submetido a algum processo de endurecimento superficial como, por exemplo, o *shot peening*, tem a superfície em estado de tensões residuais compressivas. Uma vez submetido a um esforço de natureza trativa, estas tensões residuais compressivas somar-se-ão às tensões e contribuirão para a melhoria do desempenho do componente como pode ser visto na Figura 4.

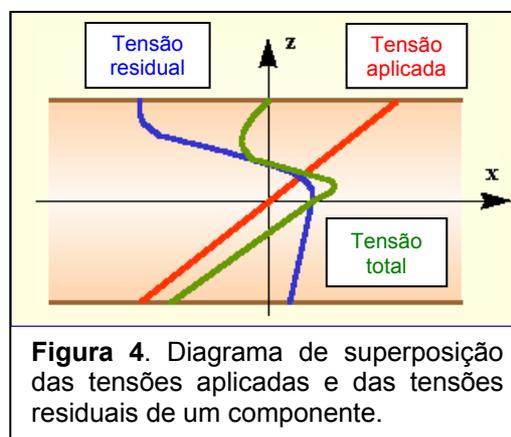


Figura 4. Diagrama de superposição das tensões aplicadas e das tensões residuais de um componente.

2 MATERIAIS

2.1 Caracterização do Material

As navalhas estudadas são utilizadas em roçadeiras para corte de vegetação tipo pastagem, grama dura, ervas daninhas, etc sendo manufaturadas em aço de baixo carbono DIN 28NiCrMo55. A caracterização do material quanto à composição química foi feita por espectroscopia de emissão ótica no equipamento Spectrolab calibrado conforme a norma DIN ISO 100.12.1.

O material possui teoricamente no seu estado beneficiado (laminado a frio + temperado + revenido) um limite de escoamento de 1400MPa, uma resistência à tração entre 1550 e 1800MPa e uma dureza entre 48 e 52HRC.

2.2 Processo de Fabricação das Lâminas

O processo de fabricação das navalhas obedece à seguinte seqüência: primeiramente, as chapas são cortadas a laser e após são submetidas a um processo de fresamento para usinagem do gume cortante. Depois disso, são

submetidas ao processo de *shot peening* por um tempo determinado. Na seqüência, seguindo a especificação antiga do fabricante, passam por um tratamento térmico de revenimento a 180°C por duas horas para alívio parcial das tensões e, finalmente, são pintadas e embaladas. De acordo com a nova especificação, cuja justificativa não é divulgada pelo fabricante, este tratamento térmico não é mais necessário. Por este motivo, foram estudadas navalhas processadas segundo as duas especificações.

2.3 Processo de Shot Peening

As navalhas são submetidas ao processo de *shot peening* em um equipamento com capacidade para produção de 12 peças por ciclo. Foi utilizada granalha de arame cortado com 0,6 mm de comprimento e dureza de 640HV. A Figura 5 mostra uma fotografia da navalha após o processo de jateamento.



Figura 5. Navalha depois do processo de *shot peening*.

3 MÉTODOS

Foram analisadas navalhas sem tratamento algum, apenas com *shot peening* e com *shot peening* e tratamento térmico, sendo que as últimas tinham como especificação ser necessária uma camada compressiva de, no mínimo, 0,3 mm. Não havia especificação quanto à magnitude das tensões residuais compressivas a serem obtidas.

3.1 Avaliação das Tensões Residuais

As tensões residuais foram determinadas nas amostras de material base sem tratamento, nas submetidas ao processo de *shot peening* após 10 minutos de processo e nas que, além do jateamento foram submetidas a um revenimento a 180°C por duas horas.

A determinação foi feita pelo Método do Furo Cego,^[6,10,2-17] as tensões residuais foram calculadas com o modelo matemático proposto por Kockelmann. [24,25]. As medições foram conduzidas com um equipamento da Micro Measurements modelo RS-200. Uma unidade condicionadora de sinal HBM modelo UPM-100 foi empregada para a aquisição de dados.

A Figura 6 mostra o sistema de medição utilizado, juntamente com um detalhe do processo de furação. Devido ao posicionamento das amostras no equipamento de *shot peening*, a energia de impacto em um dos lados da amostra pode ser maior do que no outro.



Figura 6: Sistema de medição utilizado e detalhe do processo de furação.

Por essa razão a avaliação das tensões residuais foi realizada em ambos os lados da amostra em duas posições diferentes.

3.1.1 Localização dos pontos de medição

A Figura 7 mostra a disposição das amostras no equipamento de *shot peening*, evidenciando a distinção entre os lados de cima e de baixo da amostra. No equipamento utilizado, a granalha é lançada de baixo para cima. Deste modo, há diferença na distância de impacto – da granalha – que é menor para o lado de cima da amostra.

Os campos de tensões residuais foram caracterizados em dois pontos em ambos os lados das amostras totalizando quatro pontos. Os pontos pertencentes à amostra sem *shot peening* não foram nomeados, pois são apresentados apenas para ilustrar o perfil de tensões residuais no material como foi recebido. Os demais pontos, que são os de interesse para comparação, estão devidamente descritos na Tabela 1 abaixo, que contém um resumo do sistema de posicionamento adotado.

| Tabela 1: Identificação dos pontos de acordo com a sua condição de tratamento superficial e o seu posicionamento em cada navalha. | | | | |
|---|----------|---------|-------|-----------------|
| Identificação do ponto de medição | Condição | Amostra | Lado | Localização |
| X1C15 | X | 1 | Cima | 15 mm da borda |
| X1C60 | X | 1 | Cima | 60 mm do centro |
| X1B15 | X | 1 | Baixo | 15 mm da borda |
| X1B60 | X | 1 | Baixo | 60 mm do centro |
| X2C15 | X | 2 | Cima | 15 mm da borda |
| X2C60 | X | 2 | Cima | 60 mm do centro |
| X2B15 | X | 2 | Baixo | 15 mm da borda |
| X2B60 | X | 2 | Baixo | 60 mm do centro |
| Y1C15 | Y | 1 | Cima | 15 mm da borda |
| Y1C60 | Y | 1 | Cima | 60 mm do centro |
| Y1B15 | Y | 1 | Baixo | 15 mm da borda |
| Y1B60 | Y | 1 | Baixo | 60 mm do centro |
| Y2C15 | Y | 2 | Cima | 15 mm da borda |
| Y2C60 | Y | 2 | Cima | 60 mm do centro |
| Y2B15 | Y | 2 | Baixo | 15 mm da borda |
| Y2B60 | Y | 2 | Baixo | 60 mm do centro |

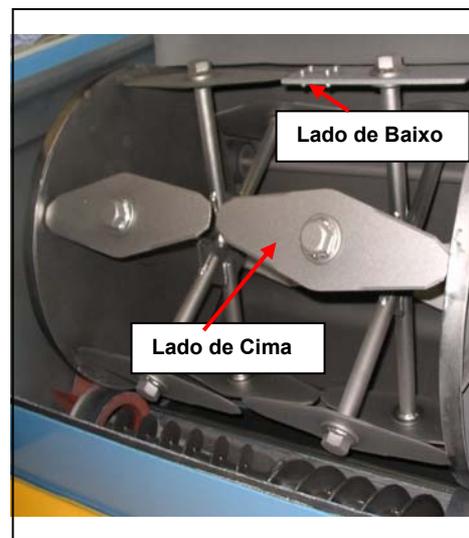


Figura 7. Visualização do posicionamento das amostras no equipamento, definindo os lados de cima e de baixo.

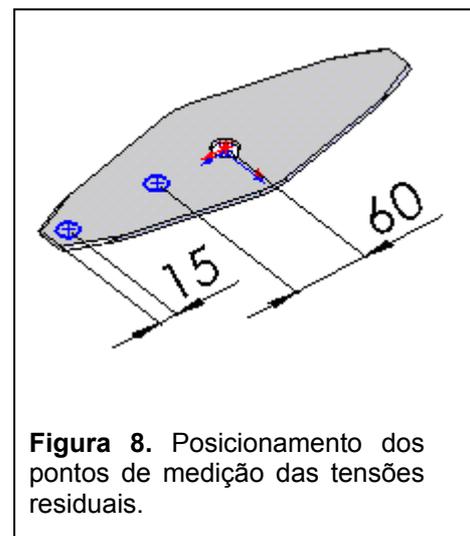


Figura 8. Posicionamento dos pontos de medição das tensões residuais.

Conforme mostrado na Tabela 01 as navalhas que sofreram apenas *shot peening* são identificadas pela letra **X**, e as que sofreram o tratamento térmico após o jateamento têm sua condição representada pela letra **Y**. Para cada condição, são estudadas duas amostras, que recebem os números **1** e **2**. Em cada amostra são medidos quatro pontos, cujo posicionamento já foi descrito anteriormente.

A Figura 8 mostra o posicionamento dos pontos de medição na amostra. Os pontos são identificados segundo este critério para cada navalha, juntamente com o tipo de tratamento superficial realizado.

4 RESULTADOS

4.1 Caracterização do Material

O material do qual as navalhas são feitas foi caracterizado por espectrometria de emissão ótica e apresentou composição química dentro da faixa especificada, como mostra a Tabela 2. Foram realizadas medidas de dureza Rockwell C na lâmina antes e depois do jateamento. Para a amostra antes do *shot peening* a dureza média foi de 50 HRC e depois do processamento a dureza foi de 52 HRC.

| Tabela 2. Composição química medida da amostra e composição química nominal do aço DIN 28CrNiMo55 | | | | | | | | | | | | | |
|--|--------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|
| | Elemento [%] | C | Si | Mn | Cr | Ni | Mo | V | S | P | Al | Ti | B |
| Amostra | Medido | 0,2987 | 0,2582 | 0,565 | 1,284 | 1,320 | 0,4211 | 0,0109 | 0,0031 | 0,0045 | <0,0010 | 0,1041 | 0,0010 |
| Nominal | Mínimo | 0,27 | 0,1 | 0,5 | 1,2 | 1,2 | 0,25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,08 | 0,001 |
| | Máximo | 0,33 | 0,4 | 0,8 | 1,5 | 1,5 | 0,45 | 0,15 | 0,003 | 0,015 | 0,050 | 0,12 | 0,003 |

Foi realizada uma análise metalográfica no material antes do jateamento a fim de determinar a microestrutura presente. A partir dessa análise foi observada a presença de martensita revenida (Figura 9) como determinado na especificação.

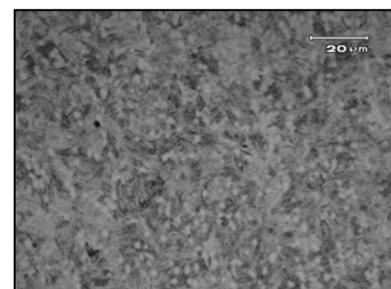


Figura 9. Microestrutura do aço DIN 28CrNiMo55, revelando martensita revenida.

4.2 Determinação das Tensões Residuais

O perfil de tensões residuais obtido para ambos os pontos da amostra sem *shot peening* mostra uma distribuição homogênea e próxima de zero ao longo da navalha, conforme mostrado na Figura 10. Estes valores são condizentes com o perfil de tensões residuais esperado para um componente submetido a tratamento térmico de revenimento, que leva ao alívio parcial das tensões.

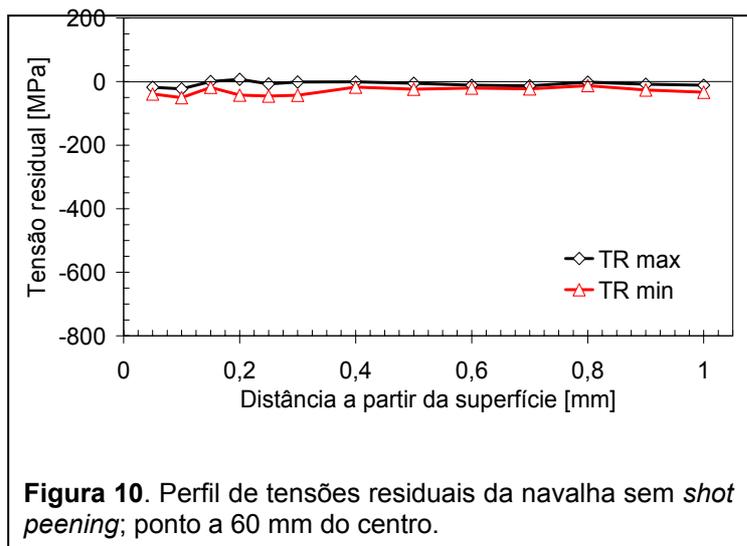


Figura 10. Perfil de tensões residuais da navalha sem *shot peening*; ponto a 60 mm do centro.

Para as amostras submetidas ao *shot peening* e sem tratamento térmico, observou-se uma certa disparidade na magnitude das tensões residuais entre os dois lados da navalha. Isto também foi observado comparando-se o ponto próximo da borda ao ponto próximo do centro. Estes resultados são insatisfatórios em termos de homogeneidade do processo. A profundidade da camada compressiva se manteve uniforme, em torno

de 0,6 mm, superando a especificação exigida pelo fabricante da navalha. A Figura 11 mostra os perfis de tensões residuais obtidos para as quatro diferentes posições medidas em uma navalha, evidenciando o que foi discutido anteriormente.

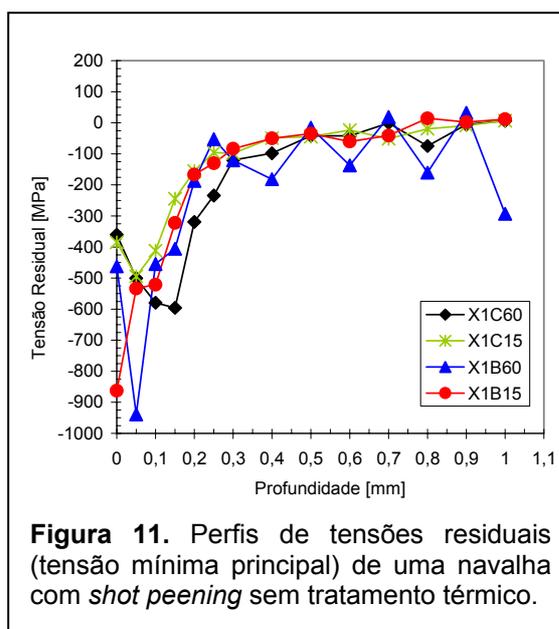


Figura 11. Perfis de tensões residuais (tensão mínima principal) de uma navalha com *shot peening* sem tratamento térmico.

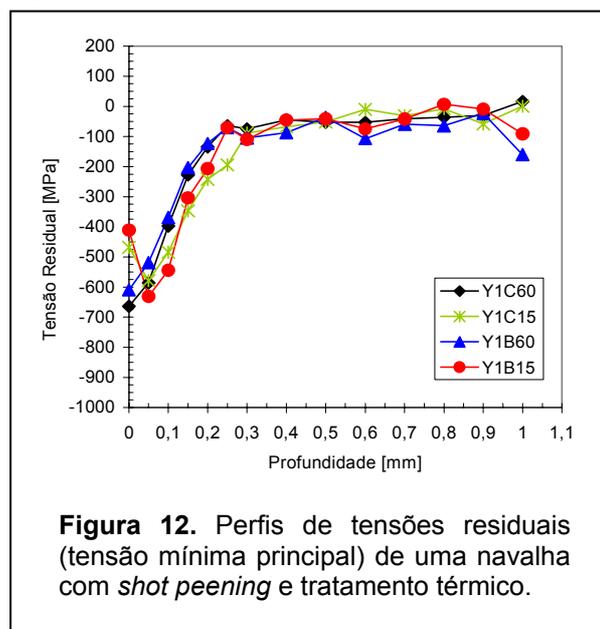
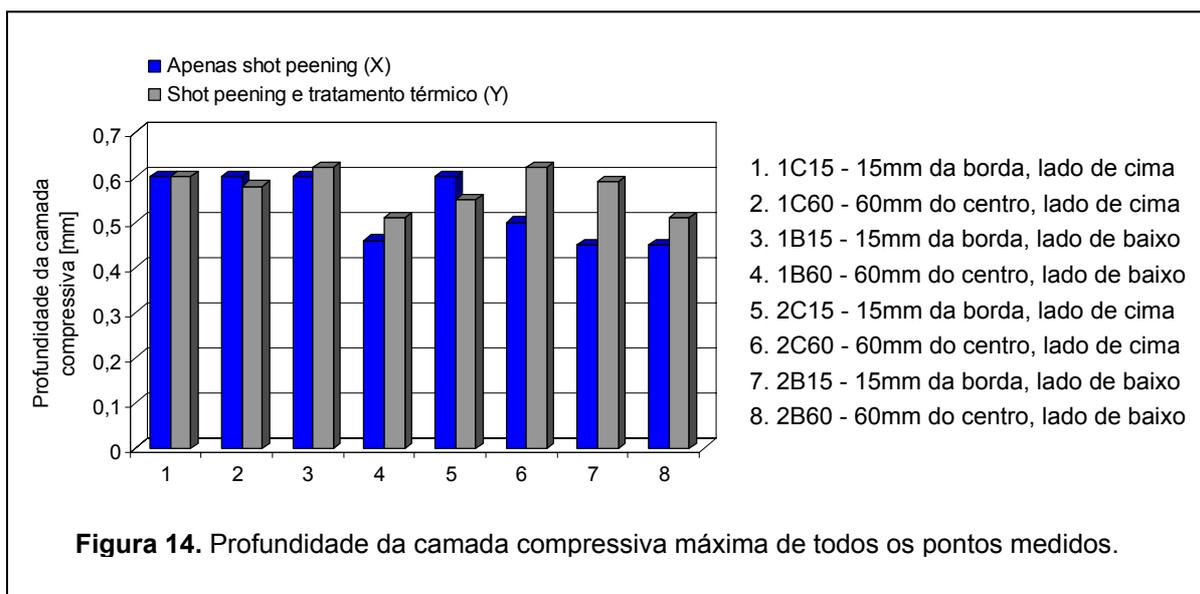
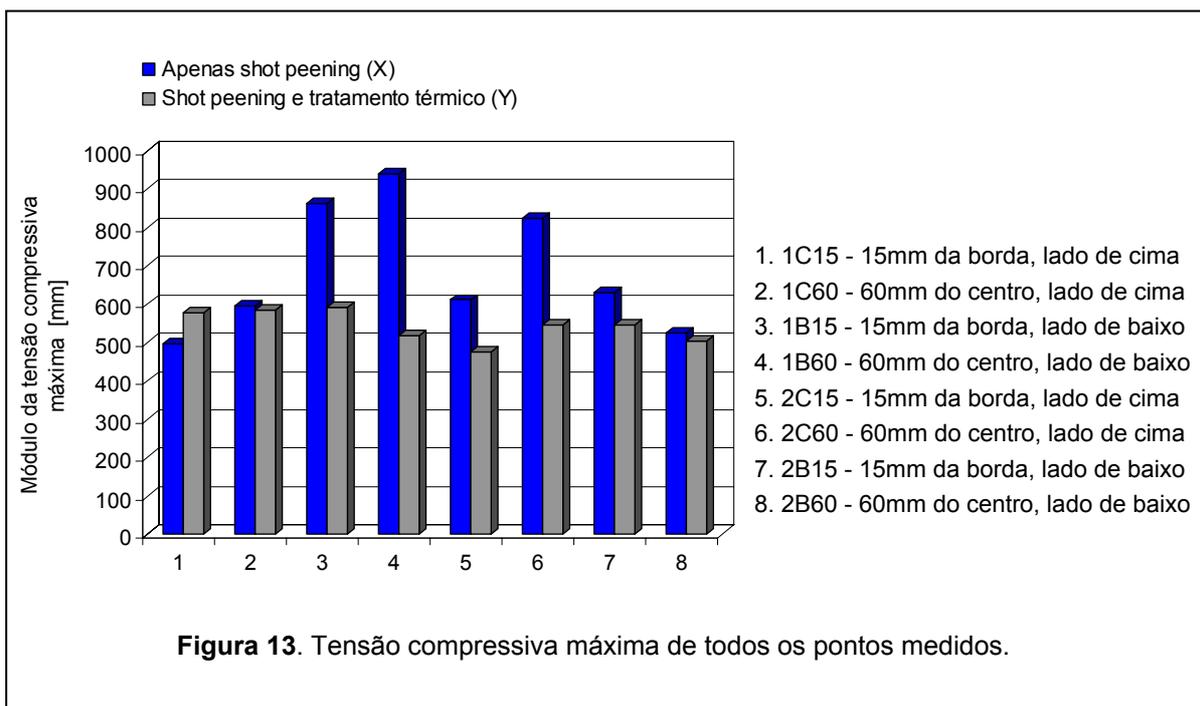


Figura 12. Perfis de tensões residuais (tensão mínima principal) de uma navalha com *shot peening* e tratamento térmico.

As navalhas submetidas ao jateamento e ao tratamento térmico apresentaram um perfil uniforme de tensões com magnitude da tensão máxima da ordem de 600 MPa nos quatro pontos medidos. Também foi verificada uniformidade para a profundidade da camada compressiva, em torno de 0,6 mm. A magnitude das tensões medidas apresentou-se menor em comparação com as amostras que não sofreram tratamento térmico. A homogeneidade obtida nos perfis de tensões residuais das navalhas nestas condições pode ser observada na Figura 12.

Uma comparação entre as tensões compressivas máximas das amostras de ambas as condições (com e sem tratamento térmico) é apresentada na Figura 13 Também é apresentada na Figura 14 uma comparação entre as profundidades de camada compressiva de todas as amostras.



5 CONCLUSÕES

Nos perfis de tensões residuais obtidos nas medições observou-se que as amostras submetidas a tratamento térmico de revenimento apresentaram tensões residuais máximas inferiores àquelas das amostras sem tratamento.

A profundidade da camada compressiva não sofre grande influência do tratamento térmico posterior ao *shot peening*.

O tratamento térmico proporciona uma distribuição mais homogênea das tensões residuais nas diferentes regiões onde foram realizadas medições.

Agradecimentos

Ao Dr. Mario Wolfart e a empresa Andréas Stihl pela colaboração na realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 Leghorn, G.; The Story of Shot Peening, A.S.N.E. Journal 1957, pg 653-666
- 2 Fuchs, H. O., et al, "Metal Fatigue in Engineering", Wiley-Interscience Publication 2ª Edição, 2000, 496 p.
- 3 Shot Peening Applications, Metal Improvement Company Inc. 8ª edição, 2001.
- 4 Stephens, R.; Fatemi, A.; Stephens, R.R.; Fuchs, H.O.; Metal Fatigue in Engineering, John Wiley & Sons, 2nd edition, 2000, 496p
- 5 Torres, M.A.S., Voorwald, H.J.C., An evaluation of shot peening, residual stress and stress relaxation on the fatigue life of AISI 4340 steel, International Journal of Fatigue 24 (2002)877-886
- 6 Martins, C.O.D.; Comparação entre as técnicas de Análise de Tensões residuais em Anéis de Rolamento, Dissertação de Mestrado, PPGEM - UFRGS, 2004
- 7 Wang, Qy; Subsurface crack initiation due to ultra-high cycle fatigue, Proceeding of EUROMAT 2000, vol. II France, 2000, Elsevier; 2000:1083-1087
- 8 Wang, Shenping et al; Fatigue limits of shot-peened metals, Journal Materials Processing Technology 1998; 73: 57-63
- 9 Majzoubi, G.H. Azizi, R.; Nia, A.A.; A Three Dimensional Simulation of Shot Peening Process Using Multiple Shot Impacts, Journal of Materials Processing Technology 164-165 (2005) 1226-1234
- 10 Lu, J.; Handbook of Measurements of Residual Stresses, SEM, Inc. , 1996
- 11 Hauk, V.; Structural and Residual Stress Analysis by Non-destructive Methods, ELSEVIER, 1997.
- 12 Macherauch, E., Kloos, K.; Origin, Measurement and Evaluation of residual Stress; Residual Stress em: Science and Technology, Vol. 1, p 3-27, Alemanha 1987.
- 13 Hauk, V.; Höller, P.; Macherauch, E.; Measuring Techniques of Residual Stresses-Present Situation and Future Aims, ICRS5, p. 231-242.
- 14 Lima, T.R.S.; Análise da Integridade Estrutural de Tubos Autofretados, Dissertação de Mestrado, PPGEMM – UFRGS , 2000, 71p.
- 15 A Review of Residual Stress Measurement Methods, A Guide to Technique Selection", Edited by Tony Fry, National Physical Laboratory, UK, 2001.
- 16 Grant, P.V.; Lord, J.D.; Whitehead, P.S.; The Measurement of Residual Stresses by The Incremental Hole Drilling Technique, National Physical Laboratory. 2002
- 17 ASTM E837-01, "Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gauge Method", American Society For Testing And Materials Standards, Philadelphia, 2001.
- 18 Webster, G. A.; Ezeilo, A. N.; Residual Stress Distribution an Their Influence on Fatigue Lifetimes, International Journal of Fatigue, Vol. 23, 2001, p. 375-383.
- 19 Roldo, L.; Análise de Tensões Residuais em Trilhos Ferroviários, Dissertação de Mestrado, PPGEMM – UFRGS, 1998, 98p.
- 20 Rosendo, T.S.; Medição de Tensões Residuais Pelo Método do Furo, Trabalho de Conclusão de Curso, URI, 2002

- 21 Schajer, G.; Stress Calculation Error Analysis for Incremental Hole-Drilling Residual Stress Measurements, Journal of Engineering Materials and Technology, Volume 118, 1996, p. 120–126.
- 22 Schajer, G.S. and Tootoonian, M.; A New Rosette Design for More Reliable Hole-Drilling Residual Stress Measurements, Experimental Mechanics, Vol. 37, No. 3, 1997, pp. 299–306.
- 23 Hills, D.A.; Waterhouse, R.B.; Noble, B.; An Analysis of Shot Peening, J. Strain Anal. 18 (2) (1983) 95-100
- 24 Schwarz, T., Kockelman, H.; Die Bohlochmethode-ein für Viele Anwendungsbereiche Optimales Verfahren zur experimentellen Ermittlung von Eigenspannungen, MTB von HBM 29, Heft 2, 1993, p. 33-38.
- 25 Kockelmann, H., Artigo traduzido de: MTB 29, No. 2, 1993, p. 33 – 38.