

PERFIL DE TENSÕES RESIDUAIS PRODUZIDO PELO PROCESSO DE *SHOT-PEENING* COM GRANALHA FINA APLICADO EM MOLAS¹

Bruno Geoffroy Scuracchio²
Laís Bezerra Bertunes³
Robinson Ferrari Barbosa⁴
José Roberto Curitiba⁵

Resumo

O *shot-peening* é um processo de jateamento com granalha de aço, com o objetivo de aumentar a vida em fadiga de componentes. Esse aumento na durabilidade é causado pelo encruamento superficial, e pela adição de tensões residuais compressivas nas camadas mais superficiais da peça. Este processo torna-se mais importante ainda para a indústria de molas automotivas, pois aumentando a durabilidade das peças, pode-se aumentar também a tensão de trabalho. Assim, é permitida uma redução de diâmetro ou de espessura, que leva a uma redução de peso da mola. O objetivo deste trabalho é medir a tensão residual por difração de raios-X, causada por diferentes tratamentos de *shot-peening* (variando a granulometria da granalha), a fim de determinar a condição que produza maiores níveis de tensão residual superficial compressiva.

Palavras-chave: *Shot-peening*; Tensões residuais; Difração de raios-X.

RESIDUAL STRESS PROFILE INDUCED BY FINE GRANULOMETRY SHOT- PEENING ON SPRINGS

Abstract

The shot peening is a blasting process with steel shot, aiming to increase the fatigue life of parts. This increase on durability is caused by surface hardening, and by adding compressive residual stresses in the superficial layers of the part. This process has being very important to the automotive springs industry, while increasing durability of parts, we can increase also the operating stresses. Therefore, a reduction of spring's thickness is permitted, and hence a spring weight reduction. The objective of this study is to determine residual stress by X-ray diffraction, produced by different shot peening process (changing the shot granulometry), in order to determine the best condition that produce high levels of compressive residual stress in the superficial layers.

Key words: Shot-peening; Residual stress; X-ray diffraction.

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

² Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, ThyssenKrupp Bilstein Brasil Molas e Componentes de Suspensão Ltda, São Paulo, Brasil.

³ Graduanda em Engenharia de Materiais, ThyssenKrupp Bilstein Brasil Molas e Componentes de Suspensão Ltda, São Paulo, Brasil.

⁴ Graduado em Engenharia Mecânica, ThyssenKrupp Bilstein Brasil Molas e Componentes de Suspensão Ltda, Ibirité, Brasil.

⁵ Graduado em Engenharia Mecânica, ThyssenKrupp Bilstein Brasil Molas e Componentes de Suspensão Ltda, São Paulo, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Shot-Peening

O processo de *shot-peening* é um método bastante eficaz de aumentar a resistência à fadiga de estruturas e componentes mecânicos e é sem dúvida um dos mais importantes passos na fabricação de molas (Figura 1). O *shot-peening* é um processo de tratamento superficial mecânico onde pequenas partículas esféricas produzidas de um material duro (aço carbono, aço inoxidável, ferro fundido, vidro, ou material cerâmico) são projetadas em alta velocidade, bombardeando a superfície a ser tratada. Tal processo repercute, principalmente, sobre as superfícies tratadas aumentando a rugosidade, introduzindo tensões residuais de compressão, e provocando endurecimento pelo encruamento do material. O principal efeito desse processo é a indução de tensões de compressão na superfície e abaixo dela.⁽¹⁾ São formadas micro-indentações resultantes da deformação plástica da superfície, e é criada uma camada de compressão que se sobrepõe para manter toda a superfície tensionada negativamente.

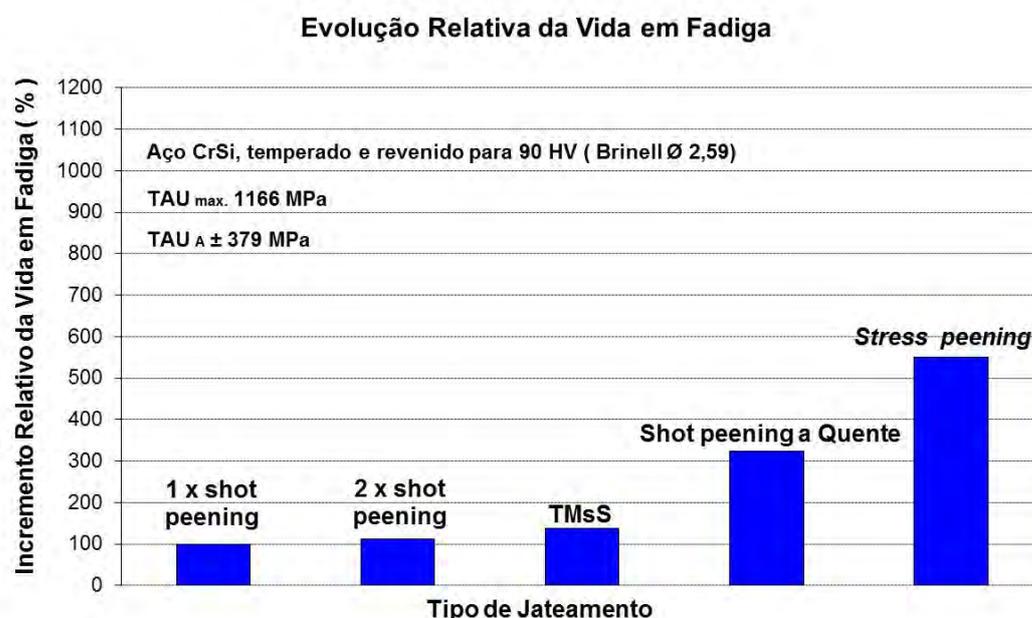


Figura 1. Aumento relativo da vida em fadiga de molas que sofreram diferentes tipos de processo de *shot-peening* (jateamento), com a intenção de adicionar tensões de compressão em sua superfície.⁽²⁾

Após o martelamento da superfície, camadas internas mais profundas são deformadas de forma elástica. No entanto, pela deformação plástica induzida na superfície, estas camadas internas não podem recuperar sua geometria original permanecendo, como consequência, com deformação elástica remanescente, originando as tensões residuais compressivas resultantes da interação entre estas duas camadas.^(3,4) Estas tensões residuais aumentam a resistência à fadiga das molas retardando a nucleação e a propagação de trincas na superfície das peças (área da peça onde estão concentradas as maiores tensões durante o uso). A resistência à fadiga é fundamental para garantir que estes componentes sejam utilizados com o mínimo de risco de falha ao longo de sua vida em serviço.⁽⁵⁾

A seleção dos parâmetros de *shot-peening*, como tamanho e tipo de granalha, depende da dureza e da natureza do material a ser tratado. O tamanho das esferas

para o processo de *shot-peening* varia geralmente de 0,1 a 2,4 milímetros de diâmetro. Outros parâmetros de *shot-peening* que devem ser mantidos sob controle são: intensidade do jateamento, ângulo de ataque, cobertura, velocidade de impacto, tempo de jateamento e saturação do material. As características mais importantes da granalha são: composição química, dureza, tamanho, distribuição granulométrica, densidade e forma, tendo que esses valores são controlados por métodos de teste definidos pelas especificações.⁽⁶⁾ Para a indústria de molas, os dois parâmetros principais para a eficácia e o controle do processo são a intensidade Almen e a cobertura.

A intensidade Almen está relacionada à medida da altura do arco de uma lâmina de teste depois de submetida ao jateamento. A intensidade Almen é regida pelos seguintes parâmetros do processo de jateamento: tamanho da granalha, dureza da granalha, e velocidade do jato. A intensidade Almen é diretamente proporcional à integral da tensão residual induzida, porém não define o perfil destas tensões (intensidade X profundidade).⁽⁷⁾

Quanto maior a intensidade de *shot-peening*, ao mesmo tempo em que as tensões compressivas aumentam, a superfície do material é agredida mais intensamente. Além do aumento da rugosidade, existe também um aumento na probabilidade em se formar um tipo de defeito superficial conhecido como remonta ou *overlap* (Figura 2), gerando pontos concentradores de tensão que facilitam a nucleação de trincas de fadiga.⁽²⁾

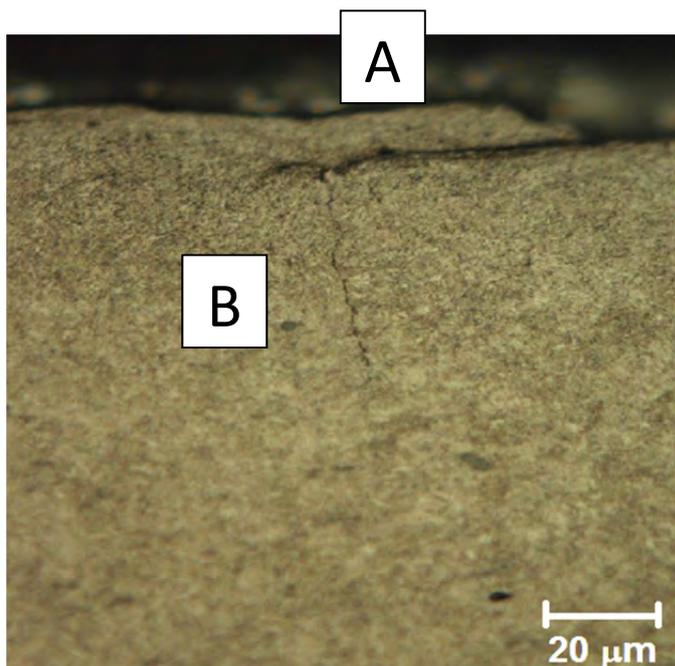
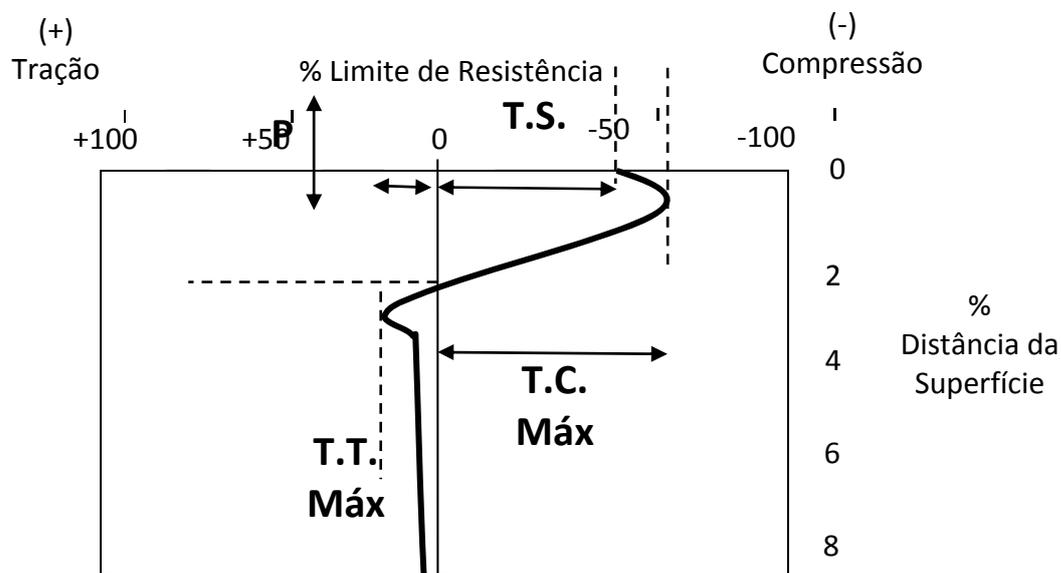


Figura 2. Análise de falha em uma mola, demonstrando uma remonta de shot-peening (A), com uma trinca de fadiga nucleada exatamente na raiz do defeito (B). (Ataque: Nital 2%). Fonte: SCURACCHIO, 2012.

A cobertura estima quão completa uma área, submetida ao jateamento, foi coberta pelo impacto das granalhas. Os parâmetros que afetam diretamente a cobertura do jateamento são os seguintes: tempo de exposição, tamanho e distribuição granulométrica da granalha, e fluxo (vazão) médio de granalhas. Tamanhos menores de granalhas resultarão em maiores taxas de cobertura para um determinado fluxo de massa de granalha.⁽²⁾

1.2 Perfil de Tensões

O controle do processo de jateamento e os efeitos das tensões residuais inseridas no material podem ser determinados a partir do perfil de tensões residuais promovido pelo processo de *shot-peening*. Tal processo produz um campo de tensões e uma série de mudanças ao longo da profundidade do material (Figura 3). Em camadas superficiais são encontradas tensões residuais compressivas sendo equilibradas por tensões residuais de tração de maior magnitude que se desdobram sobre um maior volume de material. Na transição entre as regiões compressiva e trativa existe um elevado gradiente de tensões, o que aumenta ainda mais a necessidade de controle da profundidade e do sinal destas tensões. A condição de tensão compressiva obtida após o carregamento reduz a tendência não só da iniciação de uma trinca, mas também a sua propagação.⁽²⁾



T.S (Tensão superficial) – Tensão residual medida exatamente na superfície do material.

T.C. Máx (Tensão compressiva máxima) - Máximo valor da tensão residual compressiva, situada pouco abaixo da superfície.

P (Profundidade) - Profundidade da camada compressiva, determinada pelo ponto em que a tensão residual passa pelo ponto 0.

T.T. Máx (Tensão trativa máxima) - Máximo valor de tensão residual de tração.

Figura 3. Principais características do perfil de tensões residuais em uma placa que sofreu *shot-peening*.⁽⁸⁾

Existem diversos métodos para medida de tensões residuais, estes se utilizam do fato de que as tensões residuais induzem deformações proporcionais a estas tensões. O escopo principal é qualificar e quantificar estas deformações, e convertê-las em valores de tensão. A rede cristalina é considerada como um extensômetro, sendo que qualquer alteração no parâmetro de rede representará a deformação elástica induzida por um carregamento externo. O método mais utilizado atualmente para levantamento de perfis de tensão, tanto do ponto de vista de equipamentos, bibliografia especializada, e de aplicação em casos práticos, é o método não destrutivo por difração de raios-x.⁽⁹⁾

1.3 Processo de Fabricação de Molas

Na fabricação de molas em lâmina se utiliza, basicamente, dos materiais SAE 5160, SAE 6150 e SAE 9254 como matéria-prima. A estrutura em todos os casos é basicamente perlita+ferrita pro-eutetóide, bruta de laminação a quente. O processo de laminação é realizado a aproximadamente 1.000°C. De acordo com o projeto do componente, o perfil do laminado será parabólico ou convencional.

Após a laminação segue o processo de forjamento a quente para enrolamento dos olhais nas extremidades, e/ou estampagem de furos de ressaltos, dependendo do projeto da mola.

A etapa seguinte é o tratamento térmico de têmpera, em que o aquecimento da peça é realizado a aproximadamente 900°C e têmpera em óleo a aproximadamente 70°C com posterior revenimento, variando a temperatura entre 350°C e 450°C. Essa etapa é responsável por conferir alto limite de escoamento e um alto limite de resistência ao material.

Após o tratamento térmico, a peça segue para o processo de *shot-peening*. O tratamento superficial pode ser a temperatura ambiente, a morno (~250°C), simples, duplo com granalha similar, duplo com granulometria de granalha diferente, com alívio parcial de tensões (TMSS), e do tipo *stress-peening* (material pré-tensionado). Após o processo de *shot-peening*, o material segue para a montagem de acessórios, montagem do feixe, e pintura.

A pré-carga é a última etapa importante do processo de fabricação, visando calibrar a altura da mola.

2 MATERIAL

As molas em lâmina utilizadas na condução da experiência foram fabricadas com o aço SAE 5160 produzido pela Gerdau. A composição química da corrida utilizada está de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1. Composição química da corrida utilizada

%C	%Si	%Mn	%Cr	%P	%S	%Cu	%Ni	%Mo	%Al	%Sn	%Ti
0,59	0,23	0,81	0,73	0,022	0,015	0,15	0,06	0,02	0,018	0,011	0,0030

Todas as lâminas foram produzidas em conjunto, de acordo com o processo normal de conformação e têmpera, com os parâmetros de processo fixados de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros de processo para a produção das amostras

Temperatura de Laminação (°C)	920 ± 50
Temperatura de Austenitização p/ Têmpera (°C)	890 ± 30
Temperatura do Óleo de Têmpera (°C)	Entre 45 e 85
Temperatura de Revenimento (°C)	470 ± 10
Dureza média das Peças após Revenimento	2,85(461) - 3,10(388) mm (HB)

3 METODOLOGIA

Foram produzidas 6 peças, de acordo com o desenho de uma monolâmina parabólica conhecida, atualmente aplicada em um veículo compacto nacional.

A fornecedora da granalha de aço esférica fundida é a IKK do Brasil, e está dentro da faixa de dureza especificada para *shot-peening* de molas (520 a 640 HV). As classes de distribuição granulométrica utilizadas estão de acordo com o usual.⁽⁶⁾

As peças foram submetidas a diversas condições de *shot-peening* utilizando diferentes tipos de granalha e realizando jateamento duplo e simples, de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3. Condição de *shot-peening* das amostras

	Tipo de Granalha: 1 ^o Jateamento (Diâmetro nominal)	Tipo de Granalha: 2 ^o Jateamento (Diâmetro nominal)
Condição 1	S230 (0,6mm)	-
Condição 2	S330 (0,8mm)	S170 (0,4mm)
Condição 3	S330 (0,8mm)	S110 (0,3mm)

Para cada condição foram produzidas duas lâminas para análise de tensões residuais. Os perfis de tensões foram analisados pela técnica de difração de raios-X, com o método $sen^2\psi$. Amostras foram retiradas da lâmina para a medição, todas de uma mesma região padrão nas peças. Para evitar qualquer tipo de aquecimento durante o corte, foi utilizada uma serra com líquido refrigerante. A dimensão das amostras cortadas (50 mm x 50 mm) foi baseada na área máxima do porta amostras do difratômetro.

Para a medição por raios-X o equipamento utilizado é o modelo DMAX 2000 da marca Rigaku, com tubo de Cromo em tensão de 40 kV e corrente de 20 mA, do laboratório de difração de raios-X do Centro de Ciência e Tecnologia de Materiais do IPEN/CNEN-SP (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares).

Foram seguidos alguns procedimentos já consagrados deste laboratório: para a aplicação do método $sen^2\psi$, foi utilizada a variação em ψ de -50° a $+50^\circ$, com intervalos de 10° ; e foi usado como parâmetro inicial o ângulo 2θ de $156,41^\circ$, de acordo com a distância interplanar de 1,1702 Å para o plano 2 1 1.

Para o levantamento do perfil de tensões, foi utilizada a técnica de remoção de camadas através de ataque químico superficial. Foram objetivadas três profundidades diferentes para medição (0,00mm / 0,05mm / 0,10mm). O reagente utilizado foi uma mistura de água destilada e HNO_3 (50% HNO_3 + 50% água destilada), e o tempo médio de exposição para cada profundidade é mostrado na Tabela 4.

Tabela 4. Tempo médio de exposição x profundidade de remoção

Tempo de Exposição Médio (s)	42	84	126	210
Profundidade (mm)	0,02	0,04	0,06	0,10

4 RESULTADOS

Foram realizadas medições de tensão residual superficial em todas as amostras. Os resultados gerais da medição do perfil de tensões residuais são apresentados a seguir na Tabela 5 e na Figura 4. Os resultados são uma média simples da medição

em duas peças diferentes, sempre na mesma região e com a mesma profundidade de remoção.

A Tabela 5 apresenta os valores de tensão residual medidos para três condições distintas de *shot-peening* em três profundidades da amostra.

Tabela 5. Perfil de tensões residuais para as diferentes condições de *shot-peening* de acordo com a profundidade.

Profundidade (μm)	0	50	100
Condição 1	-535 MPa	-624,75 MPa	-651,5 MPa
Condição 2	-554 MPa	-550,5 MPa	-473,5 MPa
Condição 3	-561,75 MPa	-451,75 MPa	-420 MPa

A Figura 4 apresenta a comparação entre os perfis de tensões residuais para diferentes condições de *shot-peening* e medições em três profundidades da amostra.

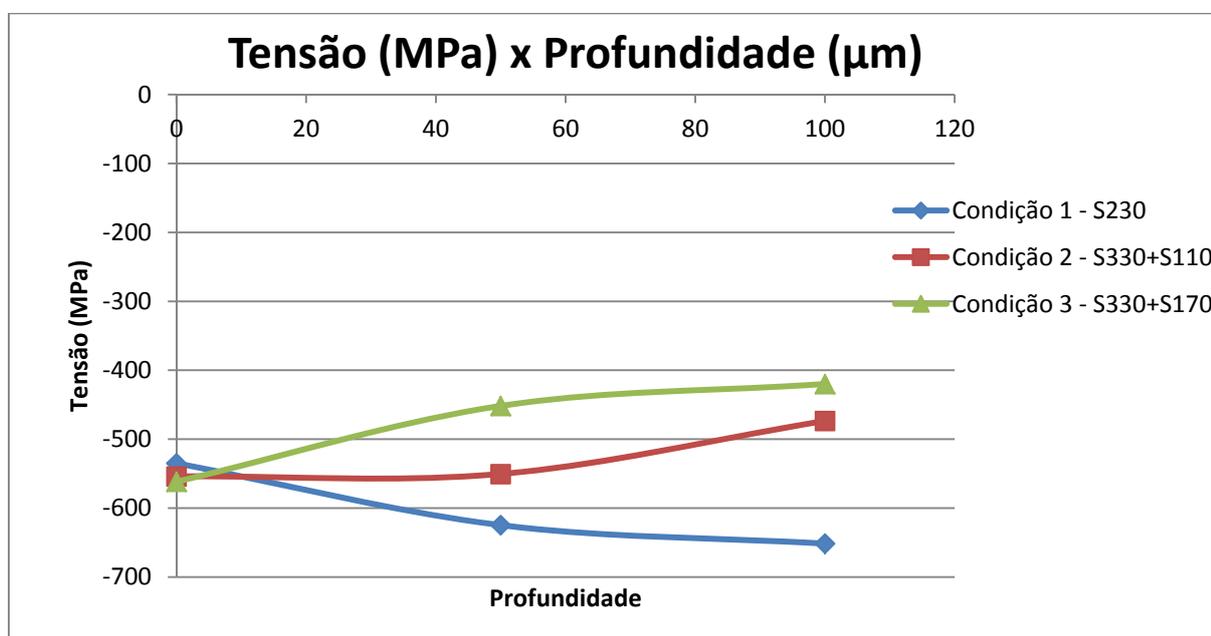


Figura 4. Comparação dos perfis de tensões residuais para diferentes condições de *shot-peening* incluindo medições na superfície, em 50 μm e 100 μm de profundidade.

5 DISCUSSÃO

Com a finalidade de verificar a profundidade da camada atingida pelo tratamento de shot peening, foi feito um perfil do comportamento das tensões residuais versus a espessura do material. As curvas obtidas (Figura 4) mostram que os perfis das tensões introduzidas estão coerentes com o perfil clássico encontrado na literatura,⁽¹⁰⁾ pois a maior magnitude em compressão encontra-se em uma camada subsuperficial.

O perfil de tensão residual é influenciado pelas propriedades do metal e pelos parâmetros de *shot-peening*. Na superfície, a amostra tratada de acordo com a condição 1 de único *shot-peening* tem tensão residual compressiva de -535 MPa, menor do que as outras duas amostras tratadas de acordo com as condições 2 e 3 apresentando valores de tensão de -554MPa e -561MPa. Esses valores mostram que na superfície o duplo *shot-peening* é mais eficaz que o único jateamento.

Analisando a tensão ao longo da profundidade das amostras tratadas com condições 2 e 3 de duplo *shot-peening*, percebe-se que houve alívio de tensões para maiores profundidades, diferente da amostra tratada com único shot peening, exatamente conforme alguns dados de literatura.⁽¹⁾

A condição 3 de duplo *shot-peening* fino apresenta o maior valor de tensão residual, se comparada às outras condições, algo em torno de -560MPa na superfície.

Discutindo o efeito do duplo *shot-peening*, faz-se a comparação das curvas de tensão residual da condição de único *shot-peening* e duplo *shot-peening* (condição 1 e 2). As duas curvas são similares, demonstrando que o segundo *shot-peening* pouco alterou o perfil das mesmas. O duplo *shot-peening* tem efeito de alívio de tensões.

Analisando as duas condições de duplo *shot-peening*, percebe-se que quanto maior o tamanho da granalha do segundo *peening*, maior é o alívio de tensões de compressão, também confirmando alguns resultados previamente levantados em outras molas. O alívio de tensões pode estar relacionado com a manutenção do equilíbrio de forças no material, devido ao aquecimento localizado gerado pelo segundo *peening*, ou mesmo devido a efeitos de alívio gerados pela deformação plástica gerada.^(1,2)

A manutenção do equilíbrio de forças no material se dá quando o segundo jateamento é aplicado com granalha de menor energia (0,3 mm) e as camadas mais externas do material tendem a sofrer um encruamento ainda maior, levando a um aumento das tensões compressivas nestas regiões. Para manter o equilíbrio de forças internas no material, as camadas seguintes tendem a mover-se no sentido das tensões de tração.⁽²⁾

Quando se utiliza maiores energias de impacto, ou seja, granalha de tamanhos maiores, é gerado um aquecimento localizado. Este aquecimento pode levar a uma redistribuição e um alívio das tensões residuais compressivas no material nas camadas mais superficiais.^(2,11)

Devido a semelhança das curvas de perfil de tensão, infere-se que o uso de granalhas mais finas na condição 3 foi dominante para o aumento da tensão residual superficial.⁽¹²⁾

A informação obtida neste estudo pode ser aplicada a situações específicas no que diz respeito a rugosidade da peça. A utilização da granalha fina é aconselhável por duas razões. Primeiro, a origem de falha é sempre na superfície, no lado de tração e a tensão residual na superfície é positivamente influenciada pela granalha mais fina, e segundo, a granalha de tamanho maior criaria uma superfície de efeito de indentação indesejado, o que seria prejudicial para a vida em fadiga da peça. Por outro lado, se a mola apresentar defeitos de superfície graves antes do *shot-peening*, uma granalha de tamanho maior seria aconselhável uma vez que o padrão mais profundo de tensão aliviaria parcialmente o efeito de concentração de tensões causados por esses defeitos.⁽¹³⁾

6 CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi estudar diferentes condições de *shot-peening* no perfil de tensões residuais de uma lâmina de mola para uso em feixe de mola, fabricada com o aço SAE 5160. Foi analisada a tensão residual para três profundidades da amostra, o que exigiu que houvesse a remoção das camadas superficiais.

As medições de tensão residual foram realizadas utilizando a técnica difração de raios X. A partir dos resultados encontrados do perfil de tensão residual para cada condição pode-se afirmar que na superfície das amostras o duplo *shot-peening* é

mais eficaz que o único *shot-peening*. Para molas em lâmina, o duplo *shot-peening* é um processo que pode resultar em um aumento na vida em fadiga das peças. Esse efeito só se torna benéfico quando as granalhas do segundo *peening* são de diâmetro menor (0,3 mm, neste estudo). Portanto, a condição 3 de duplo *shot-peening* fino apresentou melhores resultados de tensão residual compressiva superficial. Futuros testes de fadiga serão conduzidos e publicados em um trabalho posterior, para confirmar esta hipótese.

Agradecimentos

À empresa ThyssenKrupp Bilstein Brasil por possibilitar que o trabalho fosse desenvolvido.

REFERÊNCIAS

- a. SCURACCHIO, B. G.; SCHÖN, C. G.; LIMA, N. B.; Role of residual stresses induced by double peening on fatigue durability of automotive leaf springs. *Materials & Design*, Available online since 03/01/2013, DOI: 10.1016/j.matdes.2012.12.066
- 2 SCURACCHIO, B. G., Tensões residuais induzidas por shot-peening e durabilidade de molas em lâmina. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2012. Tese de Doutorado, Engenharia, São Paulo, 2012.
- 3 TORRES, M.A.S. Considerações sobre a relaxação das tensões residuais induzidas por *shot-peening* durante o processo de fadiga do aço AISI 4340, In: Anais do 8º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica, Cusco-Peru, Outubro, 2007.
- 4 GONZALES, M. Análise Numérico-Experimental das tensões residuais induzidas por jateamento com granalha em molas automotivas. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2009. Tese de Doutorado, Engenharia Mecânica, São Paulo, 2009.
- 5 COLOSIO, M. Uma abordagem da vida em fadiga em barra estabilizadora automotiva considerando defeito superficial fisicamente pequeno. São Paulo: Instituto de Pesquisa Energética e Nuclear, 2003. Tese de Doutorado, Ciências na Área de Tecnologia Nuclear-Materiais, São Paulo, 2003.
- 6 IKK DO BRASIL; Catálogo de Granalhas, 2010.
- 7 ALMEN, J.O.; BLACK, P. H.; residual Stresses and Fatigue in Metals. New York, MacGraw Hill, Book Company, 1963.
- 8 HOESCH; Warm geformte Federn – Konstruktion und Fertigung, 1987.
- 9 MACHERAUCH, E., KLOOS, K. "Origin, Measurement and Evaluation of residual Stress". *Residual Stress in Science and Technology*, Vol. 1, 1987, p. 3–27.
- 10 WANG, S. ET AL. Compressive residual stress introduced by shot peening. *Journal of Materials Processing Technology*, Republic of China, v.73, p.64-73, 1998.
- 11 ROUQUETE, S. et al. Coupled Thermo-Mechanical Simulations Of Shot Impacts: Effects of the Temperature on the Residual Stress Field due to Shot- Peening; *Journal of Material Processing Technology*, vol.209, 2009, p3879-3886.
- 12 CAMMET, J. Shot Peening of Springs - a case study. Shot peening of leaf springs. Meiji University Tokyo, Japan, 2008.
- 13 ROBERTSON, G.T., The effects of shot size on the residual stresses resulting from shot peening. *The Shot Peener*, v.2, 1971.