

AVALIAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS EM MOLAS AUTOMOTIVAS

Miguel Angel Calle Gonzales, mcallegonzales@gmail.com¹
Daniel Benítez Barrios, danielbb@mackenzie.com.br²
Nelson Batista de Lima, nblima@ipen.br³
Edison Gonçalves, edison@usp.br¹

¹Centro de Estruturas Navais e Oceânicas (CENO), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Av. Professor Mello Moraes, 2231 CEP 05508-900, São Paulo - SP. Tel: +11-3091-5561,

²Grupo de Simulação Numérica (GSN). Universidade Presbiteriana Mackenzie, Rua da Consolação 930, prédio 6, CEP 01302-907, São Paulo - SP,

³Centro de Ciência e Tecnologia de Materiais (CCTM), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Av. Prof. Lineu Prestes 2242, Cid. Universitária, CEP 05508-900, São Paulo – SP.

Resumo: O sistema de suspensão automotiva tem como função principal a de vincular o movimento das rodas ao do veículo, adequando a excitação transmitida pelas irregularidades do solo e melhorando a capacidade dos pneus de se aderirem ao solo. As molas planas são os elementos básicos que compõem o sistema de suspensão automotiva. Estas podem ser compostas por uma ou várias lâminas e devem sua ampla utilização a sua robustez, confiabilidade e relativo baixo custo. Devido às altas solicitações cíclicas destas molas, o material com que são fabricadas deve possuir uma resistência a qual é obtida pelos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento, assim como pela aplicação do jateamento com granalhas (ou, como é mais conhecido, shot peening). Este último garante o aumento considerável da resistência à fadiga do material. Neste trabalho é proposta uma metodologia para avaliação das tensões em uma mola plana automobilística. De tal modo, foram analisadas as tensões residuais em duas molas parabólicas submetidas aos tratamentos de jateamento com granalha comum e jateamento com granalha sob tensão (shot peening e stress peening). Para esta análise foi empregada a técnica de difração de raios-X junto com a técnica de remoção de camadas para encontrar o perfil das tensões residuais ao longo da profundidade. Observa-se que, embora teoricamente, o jateamento com granalha seja aplicado uniformemente na superfície das molas tratadas, existem alguns fatores que fazem com que os perfis das tensões residuais não sejam homogêneas ao longo da mola. Estes fatores são comentados e algumas soluções são propostas.

Palavras-chave: mola, tensões residuais, jateamento com granalha

1. INTRODUÇÃO

Comumente na indústria, para padronizar a aplicação do processo de JCG é empregado o método Almen, o qual foi criado há mais de 60 anos, como uma forma de quantificar a intensidade do jateamento com granalha nas linhas de produção automotivas. Contudo, estas lâminas são ineficazes para oferecer informação sobre o estado de tensões residuais induzido, o qual depende de fatores como o tipo de granalha, velocidade de impacto, ângulo de incidência, tempo de exposição, propriedades do material tratado etc.

O mapeamento das tensões residuais cria um quadro claro do estado das mesmas em áreas chaves do componente para análise por meio de simulações numéricas computacionais no espectro de carregamento a fim de melhorar a exatidão na predição da vida do componente ou nos modelos de mecanismo de fratura, Gonçalves et al (2005). Assim também, faz possível quantificar a efetividade do tratamento para em função do ajuste dos parâmetros do JCG, melhorar o tratamento de cada componente de forma individual. Por estes motivos, o desenvolvimento de estudos profundos de aplicação do processo de jateamento com granalha requer o conhecimento da distribuição de tensões residuais induzidas, o que não é praticado comumente na indústria.

Neste trabalho é apresentado um sistema de controle de qualidade do processo de jateamento com granalha aplicado em molas automotivas. No entanto, este sistema pode ser ampliado para outros tipos de aplicações levando em consideração as características particulares relevantes de cada caso.

Em primeiro lugar é apresentada uma introdução sobre os conceitos básicos envolvidos neste trabalho, acerca das molas automotivas e do processo de jateamento com granalha. Em segundo lugar, é apresentada uma seqüência lógica das operações do procedimento para avaliação das tensões residuais em molas automotivas, a qual compreende desde os

corpos de prova, forma de análise e apresentação dos resultados. Finalmente, é apresentado um caso exemplo realizando a análise das tensões residuais em duas molas parabólicas automotivas.

2. MOLAS AUTOMOTIVAS

2.1. Aspectos Gerais

O sistema de suspensão automotiva é o componente da estrutura veicular que tem como principal responsabilidade vincular o movimento das rodas ao do veículo, conseqüentemente sendo responsável de adequar a excitação transmitida pelas irregularidades do solo e de melhorar a capacidade dos pneus aderirem ao solo. Adicionalmente, tem como função transmitir ao veículo as tensões geradas pelo próprio peso e pelas manobras, Carvalho (2005).

Os principais componentes dos sistemas de suspensão automobilísticas são: molas, amortecedores e barras estabilizadoras. Estes componentes estão instalados no chassi do veículo. Também podem ser considerados, dentro da estrutura suporte, os pivôs (ou pinos periféricos) e os braços (ou a bandeja de suspensão), Fig. (1).

Por definição, a mola é um objeto elástico flexível cuja função dentro do sistema de suspensão automotiva é armazenar a energia mecânica proveniente da excitação induzida ao veículo pelas irregularidades do solo. Logo, o amortecedor é responsável de dissipar esta energia. Por outro lado, a barra estabilizadora tem a função de vincular o movimento das duas rodas que estão no mesmo eixo. O mecanismo que permite o movimento das rodas é composto pelos pivôs e os braços, Fig. (1).

2.2. Tipos de Molas

Os três tipos de molas usados na maioria dos veículos de passageiros são: molas helicoidais, molas planas ou feixe de molas e molas de torção, sendo que pode ser usado um único tipo de mola ou uma combinação destes nos veículos automobilísticos, Edmunds (2000). As molas helicoidais são usadas geralmente na suspensão de veículos automotivos de pequeno porte por trazer maior conforto, ser mais leves e ocupar menos espaço por um preço relativamente menor. Os amortecedores costumam ser inseridos dentro da mola helicoidal. As molas planas ou feixe de molas são usados comumente em veículos de médio e grande porte, geralmente na suspensão traseira, pela sua grande resistência, o que o faz ideal para seu uso em caminhões pesados. As molas de torção são usadas raramente em veículos de pequeno porte quando se dispõe de pouco espaço para a instalação de uma suspensão por molas helicoidais, a qual traz maior conforto, Edmunds (2000).



Figura 1. Molhas usadas na suspensão dianteira: a) Mola helicoidal no sistema MacPherson, e b) Molhas parabólicas transversais, The Suspension Bible (1998).

2.3. Seqüência de Processos na Fabricação de uma Mola

Devido às altas solicitações cíclicas das molas, o material com que são fabricadas deve possuir um alto limite de escoamento para evitar deformação permanente assim como garantir uma alta resistência obtida pelos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento. A aplicação do JCG garante o aumento da resistência à fadiga.

Na atualidade, as ligas de aço com que são fabricadas normalmente as molas são: SAE 4068, SAE 4161, SAE 5160, SAE 51B60, SAE 6150, SAE 8660 e SAE 9260, Carvalho (2005).

O processo de fabricação contempla estes requerimentos para o material base e atende a conformação da geometria desejada. A seqüência de processos na fabricação de molas planas é a seguinte:

- Aquecimento.

- Conformação da geometria da mola laminada: conformação helicoidal do arame (para molas helicoidais) ou laminação plana ou parabólica (no caso das molas planas), corte, fabricação dos olhais ou finais e furação.
- Aquecimento e conformado da curvatura da mola (para as molas planas).
- Tratamentos térmicos de têmpera e revenimento.
- Acabamento dos olhais e lixamento das bordas.
- Jateamento com granalha.
- Montagem do feixe de molas (para feixe de molas).
- Montagem dos acessórios.
- Controle de qualidade.

2.4. Controle de Qualidade Padrão de Molas Automotivas

O controle de qualidade padrão que existe nas indústrias fabricantes de molas automobilísticas envolve dois parâmetros de jateamento, intensidade Almen e a cobertura.

A intensidade Almen está relacionada à medida da altura do arco da lâmina padrão para teste Almen depois de ser submetida ao JCG, unicamente por um lado só, e sob os mesmos parâmetros de operação de jateamento aplicados à mola (tipo de granalha, velocidade de rotação da turbina ou pressão de ar, ângulo de impacto, distância da turbina ou bico de jateamento ao objeto etc), SAE J442 (2006) e SAE J444 (1993).

A cobertura é a magnitude que estima quão completa uma área, submetida ao jateamento, foi coberta pelas endentações criadas pelos impactos das granalhas. Para a aplicação do JCG convencional é necessário atingir 100% de cobertura, ou tempo de saturação, que na prática é aproximadamente de 98%. A cobertura é expressa em porcentagem e como múltiplo do tempo de exposição requerido para a saturação. A análise de cobertura é realizada por inspeção visual, SAE J442 (2006).

Adicionalmente, para molas helicoidais, é realizada a medição do fator de rigidez, o qual consiste na medição da relação entre a força aplicada e o deslocamento da mola quando comprimida. Para molas planas, é medida também o flecha formada pela curvatura da mola antes e depois do tratamento de jateamento.

3. JATEAMENTO COM GRANALHA

3.1. Definição

O jateamento com granalha (JCG) é um processo de trabalho a frio que consiste em projetar granalhas em alta velocidade contra a superfície externa de elementos de máquinas e estruturas. Os processos de jateamento repercutem, principalmente, sobre as superfícies tratadas de três maneiras: aumentando a rugosidade, introduzindo tensões residuais de compressão, e provocando endurecimento pelo encruamento do material, Calle (2004).

3.2. Tensões Residuais induzidas pelo JCG

O impacto das granalhas induz uma camada com tensões residuais de compressão na superfície da peça tratada. Cada granalha atua como se fosse um pequeno martelo provocando deformação plástica na superfície da mesma. Porém, camadas internas mais profundas da superfície tratada são deformadas de forma elástica durante o impacto. Devido à deformação plástica na superfície, estas camadas internas não podem recobrar sua geometria original permanecendo, como consequência, com deformação elástica remanescente. É desta maneira que se originam as tensões residuais de compressão como resultado da interação entre estas duas camadas, superficial e interna, Fig. (2).

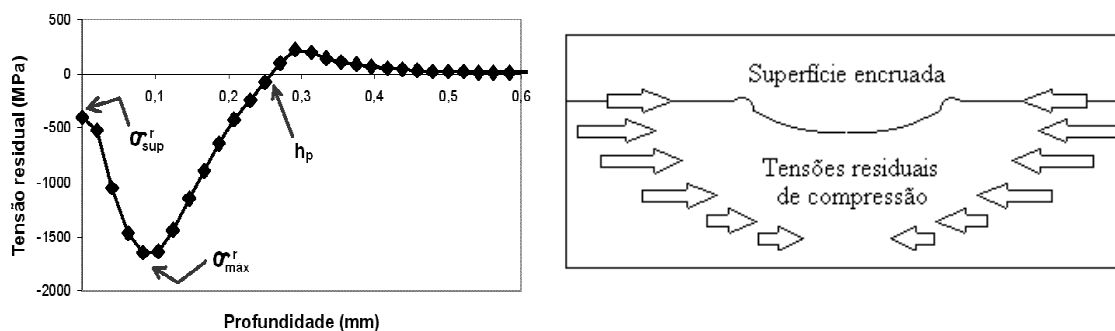


Figura 2. Distribuição de tensões residuais de compressão geradas no processo de JCG e seus valores característicos, Calle (2004).

Como se sabe, as fissuras não nucleiam ou se propagam num campo de tensões de compressão. Devido ao fato de que, geralmente as falhas por fadiga e por corrosão sob tensão aparecem na superfície ou em áreas próximas dela, as tensões residuais de compressão induzidas pelas técnicas de jateamento produzem um significativo incremento na vida

à fadiga do componente tratado. Isto se deve a que as tensões de tração são as responsáveis pela iniciação de trincas devido a que estas tendem a abrir os limites entre os grãos do material, criando as fissuras, Fig. (2).

Já as tensões residuais de compressão mantêm os limites entre os grãos juntos evitando assim a iniciação de fissuração por fadiga e diminuindo a velocidade do crescimento das trincas. Quanto maior for a espessura da camada de tensões residuais de compressão, maior será a resistência ao surgimento e propagação de trincas. Porém, cabe observar que a distribuição de tensões residuais de compressão resultante não é uniforme e está em função da profundidade medida a partir da superfície da peça. As distribuições das tensões residuais, induzidas pela técnica de jateamento com granalha, apresentam uma forma típica, a qual possui três valores característicos notáveis como: a profundidade da camada de tensões residuais de compressão (h_p), a tensão residual máxima de compressão ($\sigma'_{máx}$) e a tensão residual na superfície (σ'_{sup}), Fig. (2).

3.3. Técnicas para Medição das Tensões Residuais induzidas pelo JCG

Existem inúmeras técnicas no mercado para medição de tensões residuais. Como foi visto na Fig. (2), as tensões residuais induzidas pelo JCG variam ao longo da profundidade da área tratada. Esta profundidade pode variar entre 0,1 a 1,5 mm de profundidade dependendo do material tratado e dos parâmetros de jateamento. Porém, neste trabalho, são mencionadas unicamente as técnicas com as quais é mais simples, e possível, a avaliação da distribuição das tensões residuais induzidas pelo JCG, ao longo da profundidade, Fig. (3). Estas técnicas são as seguintes:

- Técnica de difração de raios-X acoplada com operações sucessivas de remoção de camadas.
- Técnica do furo incremental cego acoplada com extensometria.
- Técnica do furo incremental cego acoplada com fotoelasticidade.
- Técnica do furo incremental cego acoplada com holografia.

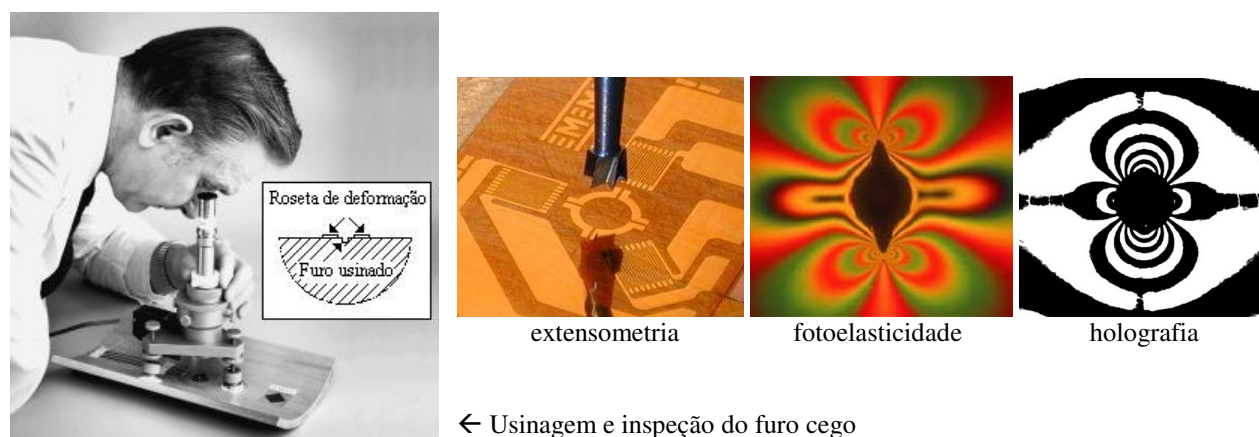


Figura 3. Técnicas de medição de tensões residuais baseadas no princípio do furo incremental cego, Calle (2008).

4. PROCEDIMENTO PARA ANÁLISE DE TENSÕES EM MOLAS AUTOMOTIVAS

4.1. Parâmetros Básicos

A forma de aplicação do processo de jateamento com granalha depende do tipo mola submetida ao tratamento. A mola helicoidal pode ser tratada por jateamento com granalha unicamente de forma externa, sejam as molas transportadas horizontalmente, por faixas transportadoras, ou, verticalmente, penduradas em ganchos como se mostra na Fig. (4). É um método simples e barato de tratamento, porém as superfícies internas das molas helicoidais não são atingidas pelo impacto das granalhas. Nesta forma de tratamento resultam diferentes intensidades de jateamento ao longo do diâmetro do arame da mola. Por isso, na hora da avaliação da intensidade Almen no tratamento da mola, se faz necessário a medição em diversos pontos, tanto exteriores, interiores, assim como pontos intermediários. A cobertura de jateamento segue este mesmo princípio.

Dependendo do nível de tensões de serviço do projeto da mola helicoidal, às vezes não é suficiente a aplicação do processo de jateamento com granalha unicamente da superfície externa, senão também é aplicado, internamente, empregando uma boca de jateamento especial para interior de superfícies fechadas como se mostra na Fig. (4). Da mesma forma que na análise da intensidade Almen em molas helicoidais tratadas só na superfície externa, quando a mola é tratada internamente são analisadas as intensidades Almen e a cobertura nas superfícies internas, externas e intermediárias.

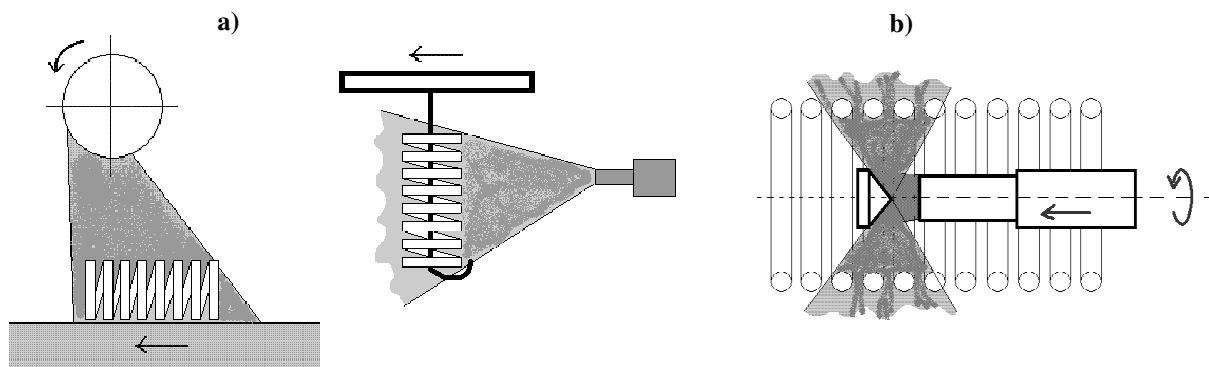


Figura 4. Aplicação do jateamento com granalha em molas helicoidais na sua superfície: a) Externa e b) Interna.

As molas planas, devido à exigência na flexão numa única direção, são tratadas por jateamento com granalha numa única face, a qual é a solicitada por tensões de tração produzidas pela flexão, Fig. (5a). Isto é aplicável a qualquer tipo de mola plana (planas, parabólicas, feixe de molas planas ou parabólicas etc). Por este motivo, a intensidade Almen é medida, prioritariamente, só numa face da mola plana, a face tratada por jateamento, podendo ser calculada em um ou vários pontos ao longo do comprimento da mola. O mesmo se aplica para a cobertura de jateamento. Por outra parte, para parametrização das molas planas também é importante a medição da flecha da mola antes e depois do jateamento. A flecha da mola plana é definida pelo comprimento de flecha que forma o arco da superfície côncava da mola plana medido antes e depois do jateamento. A variação na flecha da mola se deve à introdução de tensões residuais de compressão, num só lado da mola, que causa um rearranjo das tensões na seção transversal da mola por reconfiguração geométrica.

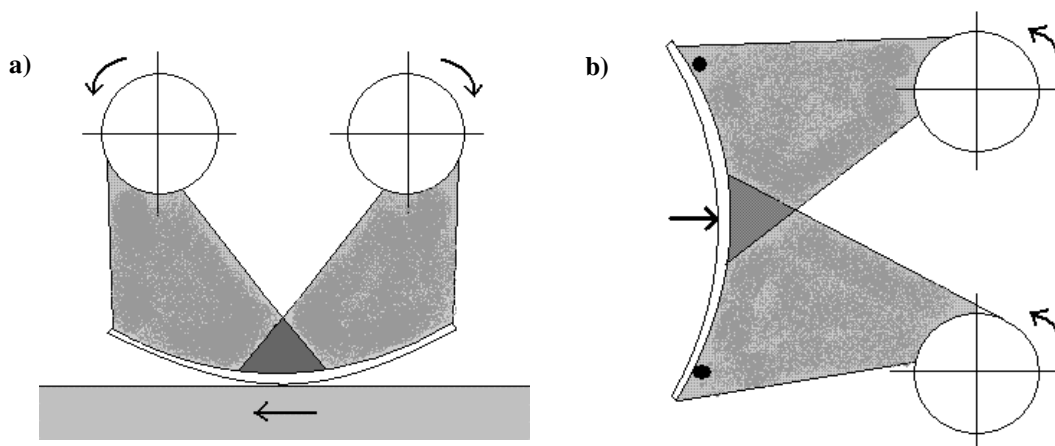


Figura 5. a) Jateamento com granalha e b) Jateamento com granalha sob tensão, Calle (2008).

As molas planas também podem ser submetidas ao processo de jateamento com granalha sob tensão (JCGST) no qual é imposta uma flexão à mola plana antes e durante a aplicação do jateamento como se vê na Fig. (5b). Depois do tratamento, esta flexão na mola é retirada revelando uma intensidade do jateamento maior do que quando não foi aplicada a flexão, para os mesmos parâmetros do processo (intensidade Almen e cobertura), Benítez et al. (2007). Por este motivo, no caso da aplicação do JCGST, a intensidade Almen, ainda que indique quão intenso foi aplicado o processo de jateamento, não contempla, dentro da sua apreciação, o efeito da inclusão da flexão na mola. A flexão da mola é provocada por um deslocamento da parte central da mola que chega a virar a mola plana do avesso, Figura (6b). O valor deste deslocamento é usado como parâmetro na indústria para a aplicação do JCGST em sistemas de produção. A medição da intensidade Almen e a cobertura de jateamento são executadas da mesma maneira que no JCG.

As molas de torção podem ser submetidas ao JCG em faixas transportadoras ou penduradas em ganchos sendo todas as superfícies tratadas de maneira uniforme. Estas molas, pela sua geometria, não possuem superfícies internas nem opostas que requeiram alguma indicação particular na aplicação do JCG.

4.2. Análise Global das Tensões Residuais

Para análise das tensões residuais é necessário, em primeiro lugar, de uma análise global das tensões residuais ao longo de toda a superfície do componente para a avaliação da homogeneidade da intensidade de aplicação do processo de jateamento numa linha de produção.

Por este motivo nesta etapa da análise são avaliadas as tensões residuais na superfície do componente tratado. Esta medição é feita em um número significativo de pontos ao longo do comprimento do componente. Este número significativo pode variar dentre 3 a 7 pontos.

Dependendo do tipo de análise empregada para a medição das tensões residuais pode ser necessária a fabricação de corpos de prova para facilitar a manipulação do componente analisado. Estes corpos de prova devem conter os pontos selecionados e precisam ter o tamanho adequado para a análise das tensões residuais, quando precisar.

Para o caso de uma mola helicoidal a avaliação deve ser realizada em duas linhas diametralmente opostas ou três linhas diametralmente distribuídas, Fig. (6). A direção da tensão medida corresponde à direção do arame da mola por ser mais fácil a sua montagem.

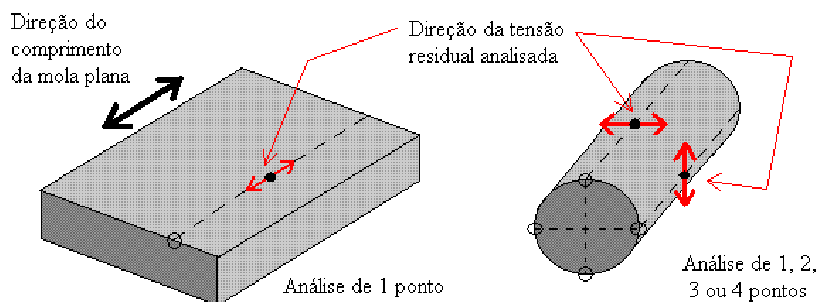


Figura 6. Pontos para análise de tensões residuais em molas submetidas ao jateamento com granalha.

Para o caso de uma mola plana os pontos são selecionados ao longo da superfície tratada, uniformemente separados. A direção da tensão medida corresponde à direção do comprimento da mola plana.

Se for uma mola de torção a avaliação das tensões segue o mesmo esquema proposto para a mola helicoidal.

A partir desta avaliação inicial são identificados os pontos para análise. Pode ser considerado que o componente foi uniformemente tratado por jateamento se a diferença entre as tensões residuais na superfície avaliadas nos diferentes pontos na análise global não podem diferir no máximo em 100 MPa entre eles. No caso das molas em que se demonstre que foram uniformemente tratadas são escolhidos, unicamente, 3 pontos, uniformemente distribuídos, para análise detalhada das tensões residuais. Se existe algum ponto que saia da faixa de 100 MPa, este deve ser incluído também na análise detalhada.

Em segundo lugar é efetuada a análise detalhada das tensões residuais ao longo da profundidade nos pontos chaves dos corpos de prova selecionados para análise detalhada. A partir desta análise são estimados os valores característicos das distribuições de tensões residuais.

4.3. Avaliação das Tensões Residuais

Estes valores característicos são usados para a avaliação final da qualidade do jateamento, além de quantificar a intensidade do processo nas diversas áreas da mola analisada.

Estes valores característicos também podem ser usados para análise das tensões resultantes no componente analisado, com o auxílio de métodos computacionais como o método dos elementos finitos, superpondo as tensões residuais induzidas pelo JCG com as tensões provenientes da solicitação mecânica e as cargas de impacto.

Tendo a informação completa das tensões resultantes no componente e das propriedades de resistência à fadiga do material em questão será possível estimar a vida à fadiga.

5. CASO EXEMPLO

Neste trabalho foram analisadas as tensões residuais em duas molas parabólicas automotivas iguais que compõem a suspensão dianteira de uma van. Para fins de análise, uma das molas foi submetida ao JCG e a outra, a JCGST. A geometria e as dimensões da mola são apresentadas na Fig. (7).

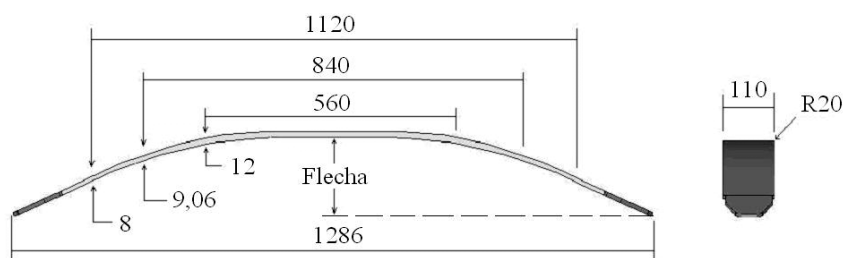


Figura 7. Geometria da mola parabólica automobilística inteira.

5.1. Parâmetros Básicos

Os parâmetros de jateamento, para cada uma das molas, estão expostos na Tab. (1). A intensidade Almen para a mola #1 foi obtida de uma única lâmina Almen colocada na câmara de JCG montada em um suporte plano. Já para a mola #2, a intensidade Almen foi estimada pela média dos valores de intensidade obtidos em três lâminas Almen montadas ao longo do comprimento de uma mola suporte tratada na câmara de JCGST. O tempo de exposição, para ambas as molas, é aproximadamente 3 vezes o tempo necessário para saturação, ou seja, para obter cobertura completa. Portanto, a cobertura resultante, segundo normas técnicas da SAE J442 (2006), é de aproximadamente 300%.

Tabela 1. Parâmetros de jateamento aplicados nas duas molas parabólicas.

Mola	#1	#2
Tratamento	JCG	JCGST
Intensidade Almen A	0,92 mm	0,67 mm
Tamanho da granalha	S330	S330
Tempo de exposição	60 s	50 s
Cobertura	aprox. 300 %	aprox. 300 %
Flecha antes da exposição	164 mm	172 mm
Flecha depois da exposição	158 mm	166 mm

A intensidade Almen, no caso do JCG, foi obtida com uma única lâmina Almen, na posição horizontal, dentro da câmara de jateamento à mesma distância a qual está a mola parabólica que é submetida ao jato de granalhas. No caso do JCGST, foram 3 lâminas Almen distribuídas ao longo de uma mola plana especial usada como teste. A intensidade Almen da mola #2 foi estimada pela média destes 3 valores de intensidade, e cabe ressaltar que não houve uma diferença substancial entre estes valores que ultrapassasse o 5% da média.

5.2. Análise Global das Tensões Residuais

A partir das duas molas parabólicas tratadas por jateamento, JCG e JCGST, são extraídos corpos de prova para analisar as tensões residuais. Cada uma das molas parabólicas foi cortada com serra de fita resultando em 11 corpos de prova de 100×110 mm, mostrados no esquema da Fig. (8). Foi empregada uma serra de fita horizontal basculante marca Franho, modelo SF-250, a uma velocidade de corte de 46 m/min e uma velocidade de avanço de 0,86 mm/min. Estas baixas velocidades de usinagem garantem que as tensões residuais originais não sejam modificadas. O tamanho dos corpos de prova (100×110 mm) foi escolhido em função do máximo tamanho de amostra que a máquina para ensaios por difração de raios-X consegue suportar.

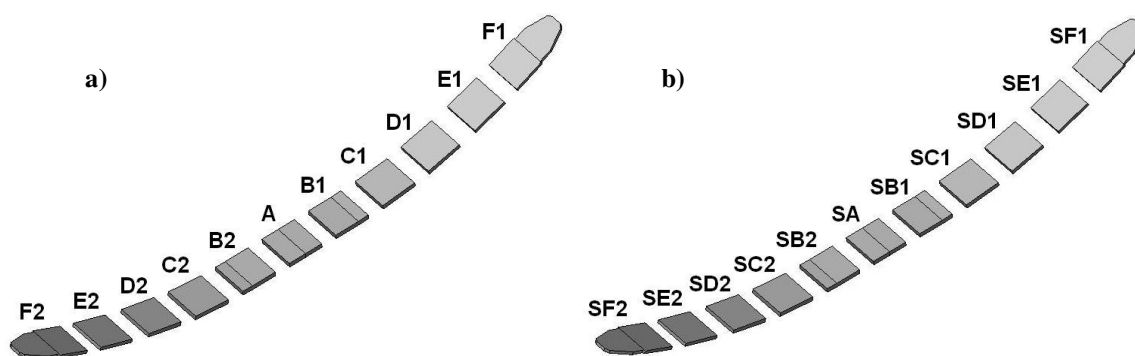


Figura 8. Esquema de corte das molas para a extração dos corpos de prova: a) mola #1 e b) mola #2.

Para a análise global das tensões residuais foram analisados os corpos de prova: A, C1, C2, E1 e E2 da mola submetida a JCG (mola #1), e os corpos de prova: SA, SE1 e SE2 da mola submetida ao JCGST (mola #2), Fig. (9). Observa-se nos resultados desta análise que as tensões residuais próximas de uma das extremidades da mola são menores quando comparadas com o resto das tensões.

Na mola #1 a máxima diferença que existe entre as tensões residuais nos pontos C1, A, C2 e E2 é de 51,3 MPa e o valor médio é de -490,4 MPa, enquanto a diferença da tensão residual no ponto E1 com o valor médio é de 127,9 MPa. Tendo em consideração estas observações, para a análise detalhada são considerados os pontos A, C1, C2 e, adicionalmente, o ponto E1 por ter um valor tensão residual na superfície diferenciado.

De modo semelhante, a diferença entre as tensões residuais nos pontos SA e SE2 da mola #2 é de 36,1 MPa e o valor médio deles é de -660,6 MPa, enquanto a diferença deste valor médio com a tensão residual no ponto SE1 é de 366,5 MPa. Baseado nestas observações, são considerados para a análise detalhada os pontos SA, SE1 e SE2.

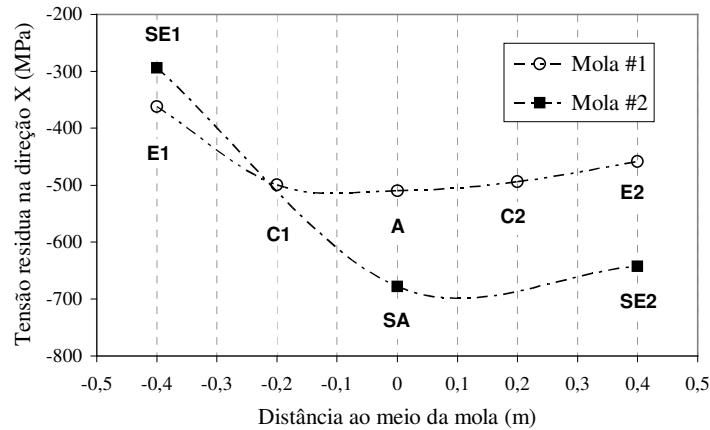


Figura 9. Análise global das tensões residuais na superfície das molas submetidas a JCG e JCGST.

5.3. Análise Detalhada das Tensões Residuais

Na Fig. (10) são apresentados os valores de tensões residuais ao longo da profundidade da superfície analisada nos pontos chave identificados na análise global para as molas submetidas a JCG e JCGST. Na análise das distribuições de tensões residuais da mola submetida a JCG, Fig. (10a), identificou-se uma grande semelhança entre as tensões residuais obtidas nos corpos de prova A, C1 e C2. Porém, o corpo de prova E1 ainda que apresenta uma menor tensão residual na superfície (σ'_{sup}) mostra uma maior profundidade de camada de tensões residuais de compressão (h_p). Estas observações mostram que a quantidade de energia de deformação, energia de impacto, absorvida pela mola nesta área, a área correspondente ao corpo de prova E1, é a mesma.

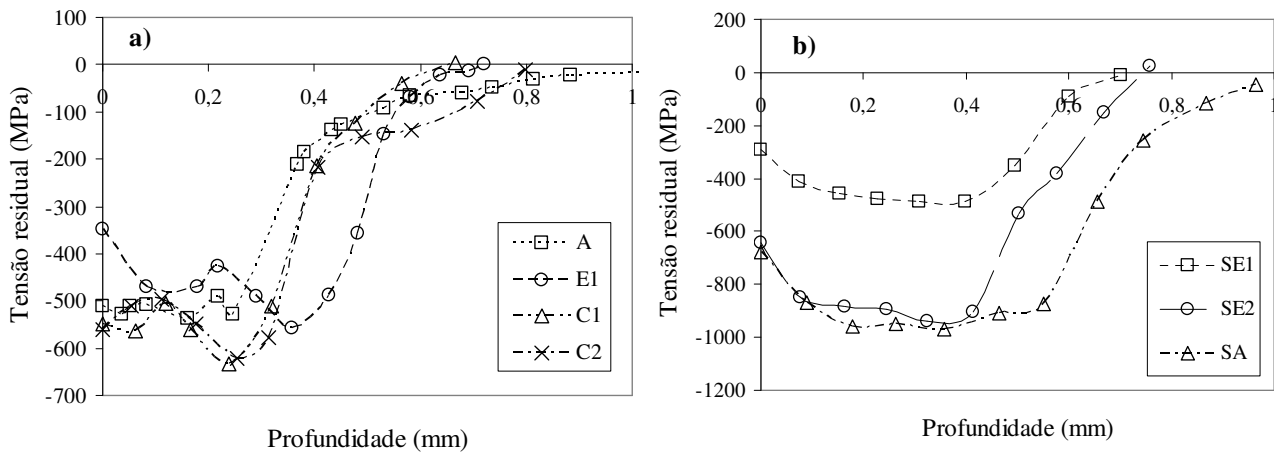


Figura 10. Análise detalhada das tensões residuais das molas submetidas a: a) JCG e b) JCGST.

Por outro lado, na análise das distribuições de tensões residuais da mola submetida a JCGST, veja a Fig. (10b), observou-se uma notável diferença entre a distribuição das tensões residuais no corpo de prova SE1 e a dos corpos de prova SA e SE2. Esta diferença aparece também na energia de deformação absorvida pelo impacto, relacionada com a área abaixo da curva da distribuição das tensões residuais versus a profundidade. Encontrou-se também uma pequena diferença entre as distribuições de tensões residuais dos corpos de prova SA e SE2.

5.4. Avaliação das Tensões Residuais

Sobre a mola submetida ao JCG pode ser constatado:

- A homogeneidade da energia de deformação absorvida por causa do impacto das granalhas nos diversos corpos de prova, embora existam pequenas diferenças entre os valores característicos das distribuições de tensões residuais, demonstra a uniformidade da aplicação do jateamento na mola parabólica.
- Esta pequena diferença nos valores característicos se deve provavelmente a que a mola parabólica não é presa enquanto passa pelo jateamento o que provoca a movimentação da mesma devido à força exercida pelo jato de granalha enquanto vai atingindo a superfície. Por esse motivo, é provável que esta diferença possa ser solucionada fixando a mola à esteira da máquina.

- Outro provável motivo é que a esteira que transporta a mola na câmara de jateamento é feita de corrente sólida, de modo que não permite o fluxo das granalhas, provocando acúmulo de granalhas acima da esteira e da mola o que termina interferindo no vigor do impacto dos projéteis.
- A intensidade de jateamento se vê afetada pelo tempo de aplicação do tratamento, que é aproximadamente 3 vezes o tempo de saturação. Observa-se que os valores característicos da distribuição de tensões residuais induzidas pelo JCG neste caso exemplo estão abaixo das aproximações formuladas por outros autores, Calle (2008). Por este motivo não é recomendável ultrapassar o tempo de saturação na aplicação do JCG, pois isto traz como consequência uma diminuição na intensidade do jateamento (nível de tensões residuais de compressão) ocasionada pela diminuição na qualidade e integridade da superfície tratada devido ao excesso de impactos de granalha.

Sobre a mola submetida a JCGST pode ser constatado:

- Não apresentou uma homogeneidade no tratamento, constatada pela diferença entre as tensões residuais do corpo de prova SE1 quando comparado com os corpos de prova SA e SE2. Esta diferença se faz clara, também, na energia de deformação absorvida pelo impacto das granalhas nos corpos de prova.
- Esta grande diferença se deve provavelmente à montagem inadequada da mola parabólica no suporte da câmara de JCGST, ou ao inadequado direcionamento dos jatos de granalha que acabam atingindo de forma desigual a mola parabólica pela configuração das turbinas em paralelo.
- Por outro lado, a pequena diferença da h_p no corpo de prova SA (extraído do meio da mola parabólica) quando comparado com a do SE2 (extraído da extremidade da mesma mola) se deve a que SA foi submetido duplamente aos jatos de granalha durante o jateamento, segundo pode ser constatado no esquema de aplicação na Fig. (5).
- Dado que a área da mola parabólica com uma intensidade de jateamento deficiente (SE1) está localizada próxima da extremidade se espera que esta deficiência não influencie no desempenho da mola no veículo.

6. CONCLUSÕES

A partir dos resultados da análise de tensões residuais nas duas molas, as seguintes conclusões podem ser inferidas:

- A análise das tensões residuais mostrou aspectos relacionados à qualidade da aplicação do jateamento com granalha, impossíveis de serem percebidos empregando o sistema de controle de qualidade padrão para molas automotivas.
- Para a mola submetida a JCG se sugere adequar um suporte de fixação e uma melhora no vazamento das granalhas que já atingiram a mola.
- Para a mola submetida a JCGST se sugere revisar a direção dos jatos das turbinas em paralelo, na máquina de JCGST, para ver se é possível melhorar o ângulo de incidência dos jatos sobre a superfície da mola.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho gostariam de agradecer à empresa Cindumel, e especialmente ao engenheiro Marcos Fazolari, pela colaboração no desenvolvimento deste trabalho.

8. REFERÊNCIAS

- Calle G., M.A., 2004, "Análise numérico-computacional das tensões residuais induzidas pelo jateamento com granalha", M.S. thesis, Polytechnic School of the University of São Paulo, São Paulo, Brazil, 96 p.
- Calle G., M.A., 2008, "Análise numérico-experimental das tensões residuais induzidas por jateamento com granalha em molas automotivas", Ph.D. thesis, Polytechnic School of the University of São Paulo, São Paulo, Brazil, 142 p.
- Carvalho M., D., 2005, "Análise de fadiga de molas planas para suspensões de veículos comerciais". M.S. thesis, Polytechnic School of the University of São Paulo, São Paulo, Brazil, 166 p.
- Benítez B., D., Calle G., M.A. and Gonçalves, E., 2007, "Theoretical principles of peen forming: an experimental and numerical analysis", Proceedings of the 19th Brazilian Congress of Mechanical Engineering, Brasília, Brasil.
- Edmunds, 2000, Automotive suspension. 7 July 2008 <<http://www.edmunds.com/>>.
- Gonçalves, E. and Calle G., M.A., 2005, "Análise por Elementos Finitos das Tensões Residuais quando Influenciadas por uma Trinca Submetida a Carregamentos Cíclicos". Proceedings of the 6th Ibero-american Congress of Mechanical Engineering, Coimbra, Portugal.
- SAE J442, 2006, "Test Strip, Holder, and Gage for Shot Peening", Engineers. SAE Standards.
- SAE J444, 1993, "Cast Shot and Grit Size Specifications for Peening and Cleaning", SAE Standards.
- The Suspension Bible, 1998, "Automotive suspension". 7 July 2008 <<http://www.carbibles.com/>>.

9. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

RESIDUAL STRESS ANALYSIS OF AUTOMOTIVE SPRINGS

Miguel Angel Calle Gonzales, mcallegonzales@gmail.com¹
Daniel Benítez Barrios, danielbb@mackenzie.br²
Nelson Batista de Lima, nblima@ipen.br³
Edison Gonçalves, edison@usp.br¹

¹Naval and Oceanic Structures Center, Polytechnic School of the University of São Paulo, Av. Professor Mello Moraes, 2231 CEP 05508-900, São Paulo - SP. Tel: +11-3091-5561,

²Numerical Simulation Group. Mackenzie Presbyterian University, Rua da Consolação 930, prédio 6, CEP 01302-907, São Paulo - SP,

³Science and Technology of Materials Center, Institute for Research and Nuclear Energy, Av. Prof. Lineu Prestes 2242, Cid. Universitária, CEP 05508-900, São Paulo – SP.

Abstract. *The primary function of the automotive suspension system is bind the wheels movements to the vehicle, adjusting the excitement transmitted by ground irregularities and improving the capacity of tires to adhere to the ground. The leaf springs are basic elements that conforms the automotive suspension system. They are fabricated using one or more leaf springs and his wide use is due its robustness, reliability and relative low cost. Because of his high cyclical resistance, the material to manufacture these springs must have a high resistance only obtained by heat treatment, quenching and tempering, as well as the application of shot peening. The shot peening guarantees the considerable increase in the fatigue resistance of the material. In this work is proposed a methodology for evaluate the stresses in a automobile leaf spring. Therefore, the residual stresses due shot peening were analyzed in two parabolic springs submitted to shot peening and stress peening. For this analysis was employed the X-ray diffraction and the removing layer techniques to measure the residual stress field along the depth. The shot peening is applied uniformly on the surface of leaf springs treated, however, some factors cause that the residual stress distribution were not the same along the leaf spring. These factors are commented and some solutions are proposed.*

Keywords: *spring, residual stress, shot peening*

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.