

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

MIGUEL ANGEL CALLE GONZALES

**Análise numérico-experimental das tensões residuais induzidas por  
jateamento com granalha em molas automotivas**

São Paulo  
2009

MIGUEL ANGEL CALLE GONZALES

**Análise numérico-experimental das tensões residuais induzidas por  
jateamento com granalha em molas automotivas**

Tese apresentada à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo para obtenção do  
título de Doutor em Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Edison Gonçalves

São Paulo  
2009

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus agradecimentos a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para que este trabalho fosse levado a cabo.

Quero começar agradecendo principalmente a pessoa que depositou confiança em mim e cujas sugestões motivaram a realização deste trabalho, meu orientador, professor Edison Gonçalves, pela dedicação e paciência.

À CAPES e à FAPESP, pelo apoio financeiro durante o período do meu doutorado.

A minha mulher Orialy e meus enteados Marco Antônio e Túlio Caio pela paciência e apoio na minha caminhada.

A meus amigos Daniel Benítez, Jocy Donato e Philip Pritzelwitz pela sua valiosa ajuda neste trabalho.

À empresa Cindumel, e especialmente a meu amigo Marcos Fazolari pelo seu apoio no fornecimento e tratamento do material usado nesta pesquisa.

Aos professores Arnaldo Paes de Andrade e Néelson Batista de Lima do Centro de Ciência e Tecnologia de Materiais do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares pela sua colaboração na execução dos ensaios de difração de raios-X.

Ao professor Marcílio Alves do Grupo de Mecânica de Sólidos e Impacto em Estruturas pela sua colaboração na execução de ensaios de caracterização do material.

## RESUMO

CALLE G., M. A. **Análise numérico-experimental das tensões residuais induzidas por jateamento com granalha em molas automotivas.** 2009. 143 f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

O jateamento com granalha (*shot peening*) é um processo mecânico a frio onde um jato de granalhas é impelido contra a superfície dos componentes. Cada impacto provoca deformação plástica e introduz tensões residuais de compressão na superfície, as quais aumentam a sua resistência à fadiga. Este tratamento é muito usado na indústria automotiva, particularmente no tratamento de molas automotivas devido à alta sollicitação a carregamentos cíclicos. Uma variante aprimorada deste processo, exclusivo para molas automotivas planas, é o jateamento com granalha sob tensão (*stress peening*) onde é imposta uma pré-carga de flexão na mola que aumenta a intensidade do processo.

Neste trabalho foram desenvolvidas as modelagens numéricas, usando o Método dos Elementos Finitos (MEF), do jateamento com granalha e do jateamento com granalha sob tensão, ambos aplicados a molas automotivas, para analisar o campo de tensões residuais induzido.

Os modelos numéricos desenvolvidos contemplam: análise dinâmica explícita, modelagem tridimensional de múltiplos impactos de granalha numa superfície plana, avaliação da velocidade real das granalhas, atrito entre as superfícies de contato, propriedades mecânicas do aço ABNT 5160 (molas automotivas), encruamento do material e sensibilidade do material às altas taxas de deformação.

A partir dos resultados da modelagem foram avaliados: o progresso da cobertura ao longo do tempo da aplicação dos múltiplos impactos de granalha, as tensões residuais, as deformações elásticas e as deformações plásticas resultantes induzidas pelo jateamento.

Neste trabalho, foi realizado um programa experimental para introdução e avaliação das tensões residuais em duas molas parabólicas automotivas, uma delas submetida ao jateamento com granalha e a outra submetida ao jateamento com granalha sob tensão. A avaliação experimental das tensões residuais foi desenvolvida usando as técnicas de difração de raios-X e do furo incremental cego.

Os resultados das modelagens numéricas são corroborados com as medições experimentais e com os resultados experimentais e numérico-computacionais obtidos por outros autores. Finalmente, algumas conclusões são inferidas diante da análise comparativa entre os resultados numéricos e experimentais.

Palavras-chave: Jateamento com granalha, tensão residual, mola automotiva.

---

## ABSTRACT

CALLE G., M. A. **Numerical and experimental analysis of the residual stresses induced by shot peening in automotive springs**. 2009. 143 f. Thesis (Doctor) - Polytechnic School of the University of São Paulo, São Paulo, 2009.

The shot peening is a cold-working mechanical process where a stream of tiny small balls is impelled against the surface of components. Each impact causes plastic deformation and introduces compressive residual stresses on the surface, which consequently increases their resistance to fatigue.

This process is widely used in the automotive industry, particularly in the treatment of automotive springs due to high cyclic loads required. An improved variant of the shot peening process for leaf springs is the stress peening, in which a flexion pre-load is imposed to bend the spring while a conventional shot peening process is applied, resulting in an increase in the intensity of the process.

In this work, numerical models of the shot peening and the stress peening process were created to be applied to automotive leaf springs. To analyze the induced residual stress field the finite elements method was used.

Numerical models include: dynamic explicit formulation, three-dimensional modeling of multiple impacts of balls on a plane target, the calculation of the real shot speed, friction between the contact areas, mechanical properties of ABNT 5160 steel (for automotive leaf springs), plastic work of the material and high strain rate sensitivity of the material.

The indentation coverage progress over the analyzed area, the residual stresses, the remaining elastic and plastic strains induced by the shot peening were evaluated from the modeling.

In this work an experimental programme was carried out to introduce and to evaluate residual stresses in one automotive leaf spring submitted to conventional shot peening and another submitted to stress peening. The experimental evaluation of the residual stresses was done using X-ray diffraction and incremental hole drilling techniques.

Results for the numerical model are compared to the experimental measurements and the experimental measurement, as well as to numerical modeling results obtained by other authors. Finally, conclusions are drawn after comparing the numerical results to experimental ones.

Keywords: Shot peening, residual stress, automotive spring.

## SUMÁRIO

<b>CAPA</b> .....	i
<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	ii
<b>RESUMO</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	iv
<b>SUMÁRIO</b> .....	v
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	ix
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	xi
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	xvii
<b>LISTA DE ABREVIATURAS</b> .....	xxiv
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO</b>	
<b>1.1 ASPECTOS GERAIS</b> .....	1
<b>1.2 OBJETIVOS</b> .....	2
<b>1.3 RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA</b> .....	3
<b>1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO</b> .....	5
<b>CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	
<b>2.1 MOLAS AUTOMOBILÍSTICAS</b> .....	7
2.1.1 Definição .....	7
2.1.2 Classificação de molas planas .....	8
2.1.3 Fabricação de molas planas .....	9
<b>2.2 JATEAMENTO COM GRANALHA</b> .....	11
2.2.1 Generalidades .....	11
2.2.2 Breve Histórico do JCG .....	13
2.2.3 Parâmetros de controle do processo .....	15
2.2.4 Revisão bibliográfica sobre o JCG .....	17
<b>2.3 TENSÕES RESIDUAIS</b> .....	26
2.3.1 Generalidades .....	26
2.3.2 Técnicas de medição de tensões residuais .....	28
2.3.2.1 Técnica do Furo Passante .....	29
2.3.2.2 Técnica do Furo Incremental Cego (TFIC) .....	29
2.3.2.3 Técnica Fotoelástica .....	30
2.3.2.4 Técnica Holográfica .....	31

2.3.2.5	Técnica de Curvatura ou Remoção de Camadas .....	32
2.3.2.6	Técnica proposta por Rosenthal e Norton .....	33
2.3.2.7	Técnica proposta por Gunnert .....	34
2.3.2.8	Técnica proposta por Ueda, Kim e Umekuni .....	36
2.3.2.9	Técnica de difração de raios-X .....	37
2.3.2.10	Synchrotron .....	38
2.3.2.11	Técnica de difração de nêutrons .....	39
2.3.2.12	Técnica de difração de elétrons .....	39
2.3.2.13	Técnicas Magnéticas .....	40
2.3.2.14	Técnica por Ultra-som .....	41
2.3.2.15	Técnica por efeito Raman .....	42
2.3.2.16	Técnica Termo-elástica .....	42
<b>CAPÍTULO 3. CARACTERÍSTICAS DA MOLA AUTOMOBILÍSTICA</b>		
<b>3.1</b>	<b>MOLA AUTOMOBILÍSTICA .....</b>	<b>44</b>
<b>3.2</b>	<b>MATERIAL .....</b>	<b>45</b>
3.2.1	Composição Química .....	45
3.2.2	Tratamentos Térmicos .....	46
3.2.3	Propriedades Mecânicas .....	46
<b>3.3</b>	<b>TENSÕES DE SERVIÇO .....</b>	<b>48</b>
<b>3.4</b>	<b>APLICAÇÃO DO JATEAMENTO COM GRANALHA .....</b>	<b>50</b>
<b>CAPÍTULO 4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b>		
<b>4.1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>53</b>
<b>4.2</b>	<b>ANÁLISE POR RAIOS-X .....</b>	<b>54</b>
4.2.1	Procedimento .....	54
4.2.2	Tensões residuais obtidas por difração de raios-X .....	56
<b>4.3</b>	<b>ANÁLISE PELA TFIC .....</b>	<b>60</b>
4.3.1	Sistema de medição pela TFIC .....	61
4.3.2	Fundamentos da TFIC .....	66
4.3.3	Método da integral .....	70
4.3.4	Tensões residuais obtidas pela TFIC .....	76
<b>CAPÍTULO 5. MODELAGEM NUMÉRICA-COMPUTACIONAL DO PROCESSO DE JCG</b>		
<b>5.1</b>	<b>GENERALIDADES DA MODELAGEM NUMÉRICA .....</b>	<b>83</b>
5.2.1	Análise de Impacto explícito .....	83

5.2.2	Elementos .....	84
5.2.3	Modelos dos materiais .....	85
5.2.4	Velocidade da granalha .....	88
5.2.5	Contato .....	92
5.2.6	Tamanho da granalha .....	94
<b>5.2</b>	<b>MODELO NUMÉRICO DE JCG .....</b>	<b>96</b>
<b>5.3</b>	<b>MODELO NUMÉRICO DE JCGST .....</b>	<b>98</b>
<b>5.4</b>	<b>ANÁLISE DE COBERTURA .....</b>	<b>102</b>
<b>5.5</b>	<b>TENSÕES RESIDUAIS OBTIDAS NA MODELAGEM NUMÉRICA .....</b>	<b>107</b>
5.5.1	Tensões residuais obtidas na modelagem numérica do JCG .....	107
5.5.2	Tensões residuais obtidas na modelagem numérica do JCGST ...	111
<b>5.6</b>	<b>ANÁLISE DAS DEFORMAÇÕES NA MODELAGEM NUMÉRICA .....</b>	<b>116</b>
<b>CAPÍTULO 6. ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>		
<b>6.1</b>	<b>COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA MODELAGEM NUMÉRICA DO JCG COM RESULTADOS EXPERIMENTAIS E OUTRAS MODELAGENS .....</b>	<b>121</b>
<b>6.2</b>	<b>COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA MODELAGEM NUMÉRICA DO JCGST COM RESULTADOS EXPERIMENTAIS E OUTRAS MODELAGENS .....</b>	<b>124</b>
<b>6.3</b>	<b>ANÁLISE COMPARATIVA GERAL .....</b>	<b>128</b>
<b>CAPÍTULO 7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b>		
<b>7.1</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>132</b>
<b>7.2</b>	<b>RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS .....</b>	<b>134</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>		<b>135</b>
<b>APÊNDICES</b>		
APÊNDICE A. Ensaio de tração do aço ABNT 5160		
APÊNDICE B. Sistema de medição pela técnica do furo cego incremental		
APÊNDICE C. Distribuição de tensões residuais resultantes e deformações remanescentes da modelagem numérica do processo de JCG		
APÊNDICE D. Distribuição de tensões residuais resultantes e deformações remanescentes da modelagem numérica do processo de JCGST		
APÊNDICE E. Medições experimentais pela técnica de difração de raios-X das tensões residuais nos corpos de prova tratados por JCG		
APÊNDICE F. Medições experimentais pela técnica de difração de raios-X das tensões residuais nos corpos de prova tratados por JCGST		



APÊNDICE G. Dados dos registros das deformações

APÊNDICE H. Dados dos registros das deformações depois do ajuste polinômico

APÊNDICE I. Dados para cálculo dos fatores de correção das matrizes da função de influência

APÊNDICE J. Correlação entre  $m$  equivalente e o limite de escoamento

APÊNDICE K. Estimativa da temperatura superficial na mola

APÊNDICE L. Tensões residuais obtidas no corpo de prova sem tratamento de jateamento obtidas por difração de raios-X

APÊNDICE M. Modelos de material

APÊNDICE N. Programa para manipulação das distribuições de tensões residuais ou deformações remanescentes resultantes da modelagem numérica do jateamento

APÊNDICE O. Avaliação do estado de tensões no campo de tensões gerado na modelagem do JCGST pela aplicação da pré-carga

## ANEXOS

ANEXO A. Funções de influência

ANEXO B. Formulações para cálculo das constantes  $A^{int}$  e  $B^{int}$  da técnica do furo passante, ASTM E 837 (1989)

ANEXO C. Estimativa de outros autores

- C1. Pesquisa teórica de Al-Obaid (1995)
- C2. Pesquisa teórica de Watanabe e Hasegawa (1996)
- C3. Análise experimental de Wang et al. (1998)
- C4. Análise experimental de Gao, Yao e Li (2002)
- C5. Análise adimensional dos valores característicos resultantes da modelagem numérica do processo de JCG desenvolvida por Meguid, Shagal e Stranart (1999)
- C6. Análise adimensional dos valores característicos resultantes da modelagem numérica do processo de JCG desenvolvida por Meguid, Shagal e Stranart (2002)
- C7. Análise adimensional dos valores característicos resultantes da modelagem numérica do processo de JCG desenvolvida por Hong, Ooi e Shaw (2008)

ANEXO D. Comparação das técnicas de medição de tensões residuais

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Incremento típico da vida útil pela aplicação do JCG .....	1
Tabela 2	Áreas industriais onde o processo de JCG é implementado (WHEELABRATOR GROUP, 2007) .....	4
Tabela 3	Composição química da liga de aço ABNT 5160 padrão .....	45
Tabela 4	Propriedades mecânicas de engenharia obtidas no ensaio de tração .....	47
Tabela 5	Características da curva tensão-deformação real do ABNT 5160 .....	48
Tabela 6	Parâmetros de JCG aplicados nas duas molas (CINDUMEL, 2006) .....	51
Tabela 7	Características das máquinas de tratamento de JCG e JCGST (CINDUMEL, 2006) .....	51
Tabela 8	Composição química da granalha de aço (IKK DO BRASIL, 2007) .....	52
Tabela 9	Distribuição cumulativa do tamanho da granalha S330, SAE J444 (1993) .....	52
Tabela 10	Corpos de prova escolhidos para análise das tensões residuais na superfície extraídos da mola tratada por JCG, numerados segundo esquema de corte .....	54
Tabela 11	Corpos de prova escolhidos para análise das tensões residuais ao longo da profundidade, extraídos da mola tratada por JCG, numerados segundo esquema de corte .....	54
Tabela 12	Corpos de prova escolhidos para análise das tensões residuais ao longo da profundidade, extraídos da mola tratada JCGST, numerados segundo esquema de corte .....	54
Tabela 13	Valores característicos da distribuição de tensões residuais induzidas por JCG e medidas pela técnica de difração de raios-X .....	58
Tabela 14	Valores característicos da distribuição de tensões residuais induzidas por JCGST e medidas pela técnica de difração de raios-X .....	60
Tabela 15	Funções do projeto e alternativas de solução selecionadas .....	61
Tabela 16	Diâmetros dos furos cegos usinados obtidos empregando microscópio eletrônico, em mm .....	78
Tabela 17	Distâncias entre as beiras dos extensômetros até a beira do furo usinado obtidas empregando microscópio eletrônico, em mm .....	78
Tabela 18	Fatores de correção, calculadas pela equação (22) .....	79
Tabela 19	Valores característicos da distribuição de tensões residuais induzidas por JCG e medidas pela técnica do furo incremental cego usando o método integral .....	81

## Gracias por visitar este Libro Electrónico

Puedes leer la versión completa de este libro electrónico en diferentes formatos:

- HTML(Gratis / Disponible a todos los usuarios)
- PDF / TXT(Disponible a miembros V.I.P. Los miembros con una membresía básica pueden acceder hasta 5 libros electrónicos en formato PDF/TXT durante el mes.)
- Epub y Mobipocket (Exclusivos para miembros V.I.P.)

Para descargar este libro completo, tan solo seleccione el formato deseado, abajo:

