

INFLUÊNCIA DO JATEAMENTO COM DIFERENTES GRANALHAS NO PERFIL DE TENSÃO RESIDUAL EM ALUMÍNIO 7050

R.R. de Oliveira
rolivier@ipen.br

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares CNEN/SP
Avenida Professor Lineu Prestes, 2242 Butantã - São Paulo-SP

N.B. Lima
nblima@ipen.br

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares CNEN/SP

RESUMO

O tratamento superficial de shot peening induz a tensão residual compressiva na superfície, que aumenta a resistência a fadiga. Amostras de alumínio 7050 pré tensionadas foram jateadas com granalhas de aço de dureza 43 HR_c com especificações S550(Ø ≈ 0.055 in) e 1/8”(0.125 in), com espessura de 10mm, a pressão de ar em 10, 20 e 30 psi para as esferas S550 e 10, 20 e 25 psi para as esferas 1/8”. Foi estudado neste trabalho a influência dos parâmetros pressão e tamanho de granalha no perfil de tensão residual, efetuada por difração de raios-x utilizando o método de $\sin^2 \psi$.

As curvas de tensão residual medidas em profundidade apresentaram comportamento anômalo para as granalhas de alta energia com o decréscimo da tensão residual compressiva nas distâncias iniciais à superfície e posteriormente assumindo o perfil característico das amostras jateadas.

INTRODUÇÃO

O *Shot Peening* é um método de tratamento superficial que consiste basicamente no lançamento em alta velocidade, de partículas ou esferas dos mais diferentes tipos de materiais, sobre a superfície da peça a ser tratada. O impacto dessas esferas sobre a peça age analogamente ao martelamento, causando um alongamento na superfície, de modo que, imediatamente abaixo da superfície alongada é gerada uma tensão residual compressiva que contribui para elevar o limite de resistência à fadiga, resultado do encruamento da superfície do material. (Bush, 1962; MIC, 2006; Schulze, 2006).

Em geral, a máxima tensão residual compressiva atingida depende mais das propriedades do material do que do método empregado. Isso quer dizer que se tomarmos corpos de prova de um mesmo material e empregarmos na superfície processos diferentes de tratamento mecânico, desde que esses processos estejam

otimizados para se atingir o máximo de tensão residual compressiva obteremos um resultado bastante similares entre eles.

Além do encruamento na superfície do material. o processo shot peening altera o acabamento e a rugosidade ,característica esta que geram grandes influências na determinação da vida em fadiga, (Ypsilants et al, 1984).

Curtis et al (2003) concluíram que o desempenho de materiais submetidos a tratamentos de shot peening dependem do equilíbrio dos efeitos benéficos do campo de tensões residuais de compressão com efeitos deletérios, principalmente relacionados à rugosidade da superfície.

O material em estudo, a liga 7050, composta de AlZnMgCuZr foi desenvolvida com o propósito de combinar propriedades de resistência a fratura e aumento na dureza devido ao uso do Zr no lugar do Cr anteriormente utilizado, aplicados em seções planas(MIL-Handbook-5J, 2003).

Para ligas 7050, as especificações dos materiais estão correlacionadas com o método de conformação pelas normas da Aerospace Materials Standards (SAE International-MAS), como exemplo, para a confecção de chapas sem revestimento utiliza-se a liga 7050 AMS4050 e AMS4201, para perfis extrudados a AMS4340, AMS4341 e AMS4342 e para forjados AMS4108, AMS-A-22771 e para forjados em matriz a AMS4107 e AMS4333 (MILHandbook – 5J, 2003).

A liga AA7050-T7451 é definida pela composição AlZn6CuMgZr sendo em %Wt, o Al de 87,3 a 90,3%, o Zn de 5,7 a 6,7%, o Cu de 2 a 2,6%, o Fe no máximo de 0,15%, o Si no máximo de 0,12%, o Zr entre 0,08 e 0,15%, o Mn no máximo 0,1%, Ti no máximo de 0,06%, e o Cr no máximo de 0,04%. A densidade é de 2,83 g/cm³ , a dureza Brinell é de 132 em carga de 500 kg e esfera de 10mm; resistência à tração de 524MPa, módulo de elasticidade de 71,7GPa e resistência ao cisalhamento de 303MPa (SAE International-MAS).

A avaliação precisa do perfil de tensão residual é essencial para uma correta apreciação do desempenho na aplicação de um componente, sendo que o método proposto de difração de raios-X é o mais utilizado.

A análise de tensão residual por raios-X (Noyan e Cohen, 1987) é uma técnica não destrutiva baseada na medição da variação a tensões no regime elástico.

A deformação da rede cristalográfica atua como "strain gauge" natural, porém, devido à penetração limitada da radiação de raios-X em materiais metálicos, a técnica

é aplicada na avaliação da tensão residual da região superficial, tipicamente entre 5 e 20 μm , dependendo da absorção do material e o comprimento de ondas dos raios-X.

As análises de tensão residual por raios-X pelo método do $\text{sen}^2 \psi$ foram baseadas de acordo com a norma SAE J784a (SAE, 1971), assumindo que o tensor σ_{33} é zero e que a tensão relativa ao volume analisado próximo a superfície é homogênea.

Este trabalho se concentra na avaliação da tensão residual induzida pelo processo shot peening em componentes estruturais da liga Al7050, observando os efeitos microestruturais, relacionados com a camada de tensão residual compressiva na superfície de peça e a eliminação de microfissuras. O estudo foi conduzido avaliando-se a influência do diâmetro da granalha de aço, pressão de jateamento e espessura de placas pré-tensionadas no perfil de tensão residual em profundidade.

MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado neste experimento foi um bloco laminado da liga de alumínio da série 7050, cujo elemento de liga principal é o zinco, sendo o mesmo usinado em placas de dimensões de 50mm de largura, 400mm de comprimento e espessura de 10mm. A aplicação do shot peening foi realizado em um equipamento produzido pela Brasibrás Tratamento de Metais Ltda aplicando-se granalhas de aço na dureza de 43HR_c com as especificações S550($\varnothing \approx 0.055$ in) e 1/8"(0.125 in), a pressão de jateamento em 10, 20 e 30 psi para as esferas S550 e 10, 20 e 25 psi para as esferas de 1/8". A distância entre o bocal e o corpo de prova foi de 90mm e a cobertura em 200%. A liga AA7050 foi jateada na condição pré-tensionada em flexão, cuja carga distribuída externa induziu tensões elásticas na ordem de 90% do valor da tensão de escoamento do material. A tabela 1 apresenta as combinações de variáveis aplicadas.

Tabela1 – Variáveis aplicadas as condições do jateamento.

Espessura CDP	Granalha	Pressão (psi)	Carregamento (Pré-tensão)	Nº de condições
10mm	S550	10/20/30	90% em Y	06
	1/8"	10/20/25		

A preparação das amostras para a análise de tensão residual iniciou-se com o corte, adequando às dimensões dos porta-amostras do difratômetro. A remoção das camadas para análise de tensão residual foi realizada por ataque químico utilizando-se HCl concentrado sendo observados os parâmetros de tempo e volume de ácido. Para cada 10µm removidos de material em um diâmetro de 25mm são aplicados 5ml de HCl concentrado em tempo de 30 segundos

Para a realização das análises de tensão residual foi utilizada um difratômetro da marca Rigaku, modelo Rint 2000 com tubo de anodo de Cr. As condições aplicadas ao método de $\text{sen}^2\psi$ foram de 50° para $+\psi$ e 50° para $-\psi$ com intervalos de 10° . O ângulo 2θ foi fixado ao redor de $139,49^\circ$ (para anodo de Cr) referente as planos (311).

A caracterização da amostra recebida tem por objetivo certificar os resultados posteriores, dando confiabilidade em todo processo de análise obtida por dados experimentais ao decorrer deste trabalho.

A tabela 2 mostra o resultado da análise de espectrometria por fluorescência de raios-X.

Tabela 2 – Análise química obtida por fluorescência de raios-X

Elemento	Al	Zn	Cu	Mg	Si	Fe	S	Zr
%	88,6±0,1	6,6±0,1	2,4±0,1	2,1±0,1	0,15±0,05	0,13±0,05	0,03±0,01	0,03±0,01

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das análises dos perfis de tensão residual das amostras estão descritas nos gráficos a seguir:

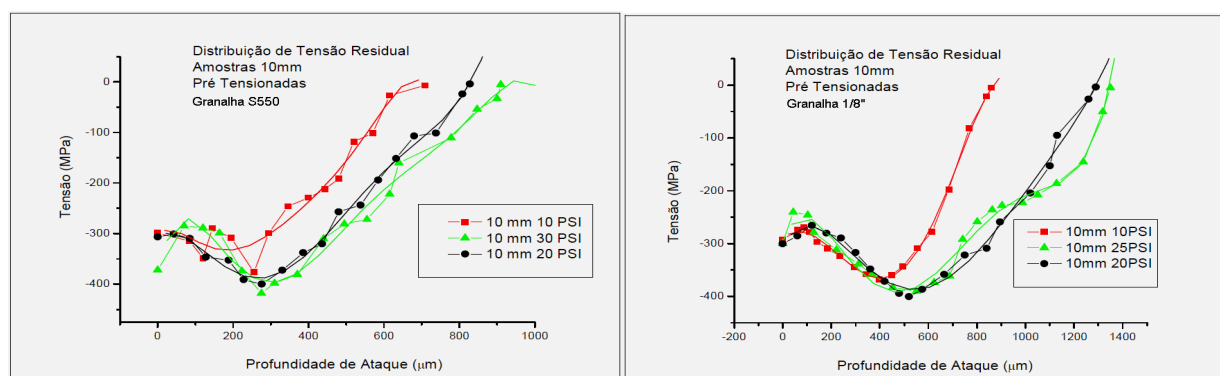


Figura 1a e 1b: Distribuição de tensão residual em amostras com a aplicação do pré tensionamento em granalha S550 e 1/8", respectivamente.

As figuras 1a e 1b apresentam o comportamento das curvas de tensão residual em amostras de 10mm de espessura, pré tensionadas, com a aplicação do shot peening em granalhas S550 e 1/8", variando a pressão em 10, 20 e 30 psi e 10, 20 e 25 psi, respectivamente. Os dados de tensão foram ajustados com função polinomial de grau 3.

A tabela 3 apresenta os valores de profundidade em máxima tensão residual compressiva ($\mu\sigma_{\text{Max}}$), a máxima tensão residual compressiva ($\sigma_{\text{máx}}$), a tensão residual na superfície da amostra (σ_{sup}) e a profundidade máxima onde ocorre a tensão residual compressiva ($\mu\sigma_{\text{tot}}$).

Tabela 3: Relação entre pressão, tensão e profundidade para amostras 10 mm de espessura jateadas com granalhas S550 e 1/8".

	Pressão(Psi)	$\mu\sigma_{\text{máx}}$ (μm)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	σ_{sup} (MPa)	$\mu\sigma_{\text{tot}}$(μm)
S550	10	198	-332	-298	679
	20	283	-387	-317	827
	30	311	-396	-372	940
1/8"	10	402	-366	-292	871
	20	492	-387	-300	1288
	25	491	-391	-300	1342

A tabela 4 mostra os resultados em energia cinética e momento linear obtidos pelos valores da velocidade média da projeção das granalhas sobre a superfície do material e pela massa unitária da esfera fornecida pelo fabricante.

tabela 4: Relação das granalhas e pressão de jateamento para cálculo de energia cinética e momento linear

Granalhas	Pressão de jateamento (psi)	Velocidade média (m/s)	Energia cinética (J)	Momento linear (kg.m/s)
S550	10	16,2	$1,311 \cdot 10^{-3}$	$1,619 \cdot 10^{-4}$
	20	22,4	$2,507 \cdot 10^{-3}$	$2,238 \cdot 10^{-4}$
	30	28,6	$4,087 \cdot 10^{-3}$	$2,858 \cdot 10^{-4}$
1/8"	10	12,5	$8,196 \cdot 10^{-3}$	$1,311 \cdot 10^{-3}$
	20	16,9	$1,498 \cdot 10^{-2}$	$1,773 \cdot 10^{-3}$
	25	18,5	$1,795 \cdot 10^{-2}$	$1,941 \cdot 10^{-3}$

Analisando os gráficos da figura 1 e a tabela 3, podemos afirmar em linhas gerais que a profundidade máxima ($\mu\sigma_{Max}$) aumenta conforme são aplicadas maiores pressões de jateamento, observando que nas pressões entre 20 e 25 psi para as granalhas 1/8" torna-se indiferente a esta variação, pois os valores em tensão residual compressiva não avança em relação a profundidade, indicando que existe um limite para o aumento da profundidade.

A tensão residual máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$) e a tensão residual superficial (σ_{sup}), apresentam pouca variação em função dos parâmetros de granalhas e pressão, mostrando que com as variáveis utilizadas já se obtém os valores limites de tensão residual suportadas pelo material.

Observamos que profundidade máxima em tensão compressiva ($\mu\sigma_{tot}$) alterou-se conforme o aumento de pressão e tamanho de granalhas, o que demonstra que a variação destes parâmetros influencia muito na propagação de tensão residual no material e se utilizarmos partículas com energia cinética superior ao mínimo necessário para induzir a tensão residual máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$) suportada pelo material, ocorre um relaxamento da tensão residual próxima à superfície, que denominamos comportamento anômalo.

Com a figura 1 obtemos informações importantes nas características das curvas de tensão residual, onde foi observado o comportamento anômalo, apresentado pelo decréscimo na tensão residual compressiva nas camadas iniciais do material (próximas a 100 μm) e posteriormente assumindo o perfil de uma curva típica em distribuição de tensão residual.

Notamos que o comportamento anômalo é dependente das características das esferas utilizadas no jateamento em relação do material com a energia cinética nele

imposta, sendo assim, quanto maior a energia, maior o relaxamento da tensão residual compressiva.

Observamos na figura 1a, utilizando as granalhas S550, com o jateamento a pressão de 10 psi, que a característica da curva se encontra dentro do esperado em distribuição de tensão residual em amostras tratadas pelo shot peening. O comportamento característico começa a se alterar em regimes de pressão maiores, tanto que , com a aplicação da pressão de 20 psi ocorre um decréscimo em tensão residual compressiva até a profundidade de 105 μm e, após este ponto, assumindo a curva característica. Esta anomalia aumenta quando aplicada 30 psi de pressão no jateamento, e para as granalhas 1/8" todas as curvas apresentam o mesmo comportamento.

Sendo assim, vemos que o limiar entre o comportamento normal e o anômalo em distribuição de tensão residual está na faixa entre $1,619 \cdot 10^{-4} \text{ kg.m/s}$ ($1,311 \cdot 10^{-3} \text{ J}$) a $2,238 \cdot 10^{-4} \text{ kg.m/s}$ ($2,507 \cdot 10^{-3} \text{ J}$).

Meguid et al (1998) utilizando simulação e modelamento pelo método de elementos finitos estudaram a tensão residual induzida pelo jateamento de granalhas de aço em aço, considerando o efeito de duas granalhas encostadas uma na outra, mostrada na figura 2.

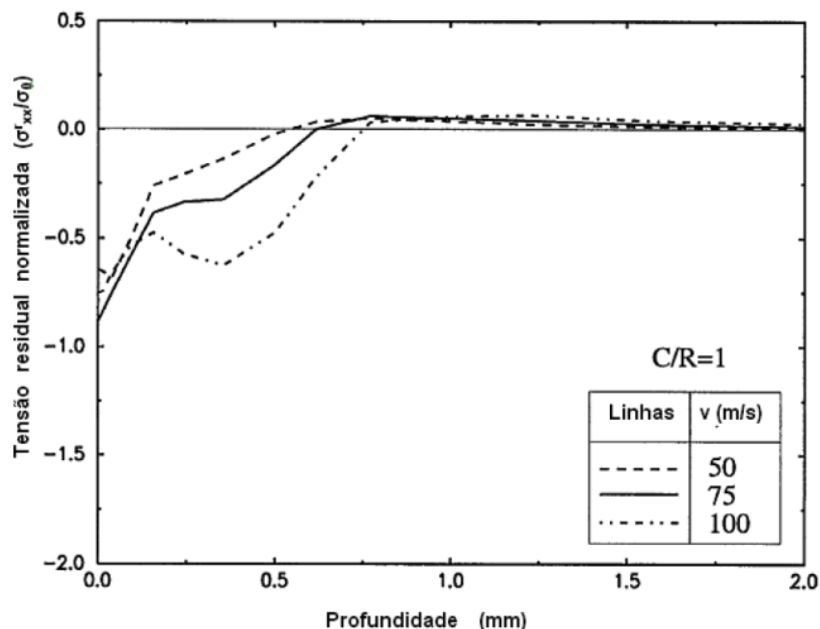


Figura 2: Resultado obtido por modelamento em jateamento com esferas de aço (Meguid et al, 1998)

Nesta caso, o aumento da velocidade da projeção das esferas sobre o material e consequentemente a energia imposta ao material leva o perfil da distribuição de tensão residual a um comportamento semelhante as curvas apresentadas no jateamento das granalhas S550 e 1/8" na liga de alumínio utilizada neste trabalho.

O modelamento conduzido considera o efeito de duas granalhas na relação $C/R=1$ (encostadas uma na outra), atingindo o alvo simultaneamente e a tensão residual em profundidade foi calculada na linha de centro de uma esfera e a linha de centro entre as duas esferas, vista na figura 3:

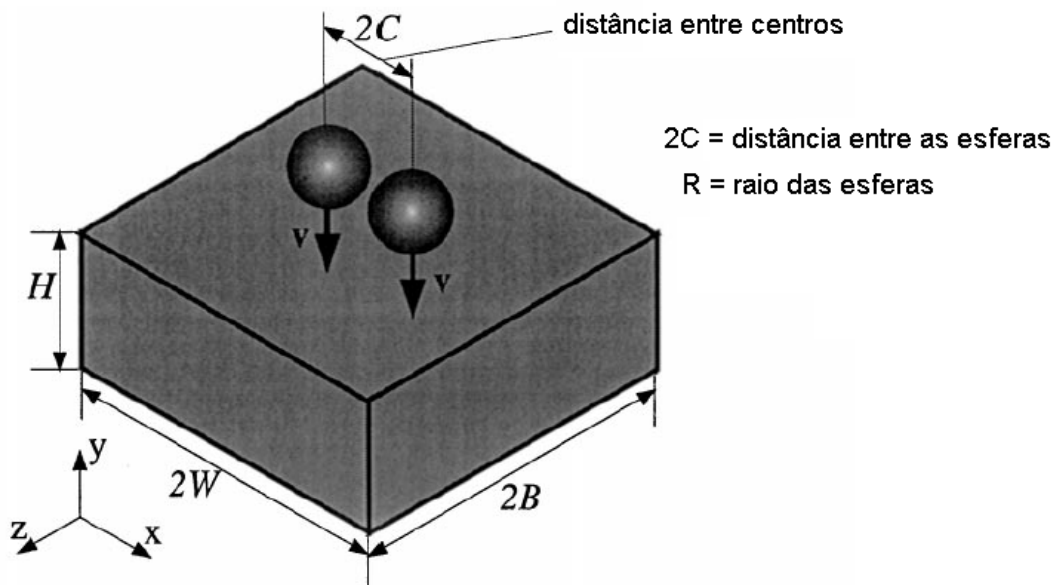


Figura 3: Modelo geométrico utilizado no estudo da co-indentação dinâmica (Meguid et al, 1998)

A tensão residual medida por raios-X é realizada em uma região contínua que engloba todos os pontos de centro das granalhas e isto sugere que estas medições formam a composição das linhas correspondentes a diversas relações em C/R e que dependendo da energia (e momento linear) imposto pelas granalhas favorecem a ocorrência do comportamento anômalo apresentado nas curvas de distribuição de tensão residual.

CONCLUSÕES

- i - A tensão residual máxima compressiva não aumenta significativamente conforme o tamanho das granalhas.
- ii - A tensão residual máxima compressiva aumenta quanto maior a pressão de jateamento para granalhas S550 e se mantém pra as granalhas 1/8".
- iii - A profundidade onde ocorre a tensão residual compressiva aumenta quanto maior a pressão e o tamanho das granalhas.
- iv - O comportamento anômalo apresentados nas curvas de distribuição de tensão residual estão ligadas a energia cinética e ao momento linear imposta pelas granalhas e a relação entre as distâncias entre as esferas.

BIBLIOGRAFIA

BUSH, G. F.; ALMEN, J. O.; DANSE, L. A.; HEISE, J. P. **How, when and by who was mechanical prestressing discovered**: Society of Automotive Engineers ISTC, Div. 20 meeting, SAE, Colorado Springs, Colorado, 1962, 14p.

CURTIS, S.; de los Rios, E.R.; RODOPOULOS, C.A. and LEVERS, A.; 2003. Analysis of the effects of controlled shot peening on fatigue damage of high strength aluminum alloys, **International Journal of Fatigue**, 25, 59-66.

MEGUID, S.A.; SHAGAL, G.; STRANART, J.C.; DALY, J. **Three-dimensional dynamic finite element analysis of shot peening induced residual stresses**. Finite Element in Analysis and Design 31. p 179-191, 1999.

MIC; **Shot peening applications**. Metal Improvement Company – 9ª ed., 62p. Disponível em: <http://www.metalimprovement.com/premium/PDF/greenbook_v9/english/MIC%20Green%20Book%20-%209th%20edition%20-%20Complete%20Book.pdf> Acesso em: 15 mai. 2006.

MIL-Handbook 5J. **Metallic materials and elements for aerospace vehicle structures**. Department of Defense of United States of America. Cap 3, 2003

NOYAN, I. C.; COHEN, J. B.; **Residual Stress Measurement by X-Ray Diffraction and Interpretation**. Springer - New York, 1987.

SAE (Ed) Residual Stress Measurement by X-Ray Diffraction. J784a; Warrendale - USA, 1971.

SAE INTERNATIONAL. Standards. Disponível em <http://standards.sae.org/materials/materials-properties/> acesso em 25 jul 2012.

SCHULZE, V. ***Modern mechanical surface treatment: states, stability, effects:*** Weinheim: Wiley-VCH, 2006, cap. 1-3.

YPSILANTS, D.; MAS, C.; CASTEX, L.; ***Shot Peening Influence on Endurance Limit of Fatigue of the SAE 9254 Steel.*** Conf. Groupement Français Pour la Analyse des Contraintes par Diffractometrie X, 1984. p. 159-183