

AVALIAÇÃO DA TENSÃO RESIDUAL EM ALUMÍNIO 7050 CONFORMADAS PELO PROCESSO PEEN FORMING

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

A.P.V Braga

anapaola@ipt.br

Instituto de Pesquisas Tecnológicas

M.Gonçalves

mgoncalves@ipt.br

Instituto de Pesquisas Tecnológicas

RESUMO.

O tratamento superficial de shot peening tem por objetivo aumentar a resistência à fadiga sendo comprovada através de medidas de tensão residual. O processo peen forming é uma variante do processo shot peening onde se obtém uma curvatura na placa produzida pelo jateamento das esferas através da compressão dos grãos localizados próximos à superfície. Foi estudado neste trabalho a influência dos parâmetros pressão e tamanho de granalha, utilizado no processo de peen forming, no perfil de tensão residual e no arco de curvatura em amostras de alumínio 7050. A avaliação do perfil de tensão residual foi efetuada por difração de raios-x utilizando o método de $\sin^2 \psi$.

Palavras Chave: shot peening; peen forming; difração de raios-X; tensão residual

INTRODUÇÃO

O shot peening é um método empregado para aumentar a resistência à fadiga e de muito usado na indústria aeronáutica para produção de componentes de formas complexas, envolvendo dupla curvatura tais como revestimento de asa. Este método consiste basicamente no lançamento em alta velocidade de esferas de aço, cerâmica ou vidro sobre a superfície da peça a ser tratada. O impacto das esferas sobre a superfície da peça age analogamente ao martelamento.

O resultado deste processo é o encruamento da superfície do material, aumentando assim a tensão de compressão e conseqüentemente o limite de resistência à fadiga [7]. É inegável que a topologia superficial tem forte influência sobre a resistência à fadiga. Quanto pior for o acabamento superficial maior será a concentração de tensões e conseqüentemente menor será a resistência à fadiga.

A tensão superficial compressiva é considerada um dos principais fatores para o aumento da resistência a fadiga. Em geral, a máxima tensão residual compressiva possível 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.

Curtis et Al (2003)^[3] concluiu 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 maléficos, principalmente relacionados à rugosidade da superfície.

O processo peen forming é ideal para a conformação de placas de grandes dimensões, onde a curvatura radial é razoavelmente grande e sem abruptas alterações no contorno. Este método é especialmente utilizado na conformação das placas das asas das aeronaves através de parâmetros determinados como o tamanho da granalha, a pressão do jato e a pressão de curvatura da placa e de fácil reprodutibilidade^[8].

A maioria dos trabalhos de peen forming é baseada em trabalhos experimentais de tentativa e erros e os poucos trabalhos de investigação da relação entre tensões residuais e peen forming são efetuados tentando relacionar pretensões ou forças atuantes com as formas finais resultantes. Li^[5] apresentou resultados experimentais de tensão induzidas por peen forming com diferentes valores de pré-tensão. Baunghman^[1] introduziu os princípios das tensões elásticas para peen forming em materiais pré-tensionados. Barret e Todd^[2] mostraram que pré-tensões no regime elástico aumentavam a tensão residual de compressão máxima quando comparada com processos convencionais de peen forming. Miao et al^[6] avaliaram quantitativamente a relação entre saturação de shot peening, cobertura e rugosidade com tempo de peening em alumínio Al2024. Seus resultados mostram que o aumento na pré-tensão aumenta quase linearmente o raio de curvatura da chapa conformada por peening. As variáveis que levam à curvatura final dos materiais, a tensão residual e a rugosidade durante o processo de peen forming, tais como: pré-tensão, sem pré-tensão, tamanho de granalhas, velocidade

das partículas, espessura da peça a ser conformada, são dependentes do tipo da liga e deve ser estudada

O material em estudo, a liga 7050, composta de AlZnMgCuZr foi desenvolvida como propósito de combinar propriedades de resistência a fratura e aumento na dureza devido ao uso do Zr no lugar do Cr anteriormente utilizado [MIL-Handbook-5J]^[4] aplicados em seções planas.

Para ligas 7050, as especificações dos materiais estão correlacionadas com o método de conformação pelas normas da Aerospace Materials Standards – SAE International^[10], 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]^[4]

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-AMS]^[10]

Para 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 é a da Difração de Raios-X.

A análise de Tensão Residual por raios-X^[7] é uma técnica não destrutiva baseada na avaliação das distâncias interplanares ao longo das orientações cristalográficas em comparação às deformações ocorridas.

Os dados cristalográficos obtidos são utilizados como forma de medida, 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 40 µm, dependendo da absorção do material e o comprimento de ondas dos raios-X. O método de DRX obtém resultados precisos, embora requerer equipamentos de alto custo e procedimentos analíticos relativamente longos.

As análises de tensão residual por raios-X pelo método do $\text{sen}^2 \psi$ foram baseadas de acordo com a norma SAE J 784a^[9], assumindo que o tensor normal

fora do plano σ_{33} é zero e que a tensão relativa ao volume analisado próximo a superfície é homogênea.

Este trabalho se concentra no estudo da tensão residual induzida pelo processo de conformação Peen Forming em componentes estruturais da liga Al7050 à base de alumínio. Este processo provoca efeitos microestruturais, como uma profunda camada de tensão residual compressiva na superfície de peça e a eliminação de microfissuras, fornecendo soluções para os seguintes problemas: fadiga do material causada por carregamentos cíclicos, micro fissuras causadas pela alteração na seção transversal, tensões causadas por carregamentos externos como montagem dos componentes e deformações superficiais causadas por atrito. O estudo foi conduzido avaliando-se a influência do diâmetro da granalha de aço, pressão de jateamento e espessura de placas pré-tensionadas e livres de pré-tensão no perfil de tensão residual em profundidade e a curvatura resultante do processo de peen forming.

MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado neste experimento foi a liga de alumínio identificado pelo sistema de classificação da Aluminum Association (AA) como da série 7050, cujo elemento de liga principal é o zinco. O material foi usinado em placas de dimensões de 50 mm de largura, 400 mm de comprimento e espessuras de 2 mm e 5mm.

Os materiais dimensionados foram encaminhados ao IPT para a aplicação do Peen Forming. Tal procedimento se fez em um equipamento produzido pela Brasibrás Tratamento de Metais Ltda.

Os tipos de granalhas utilizados tem por dureza média em torno de 43 HR_c de especificações S230 ($\varnothing \approx 0.023\text{in}$) e S550 ($\varnothing \approx 0.055\text{in}$). A pressão de ar, controlada por meio de uma válvula reguladora variou entre 20, 40 e 60 psi para as esferas menores (S230) e 10, 20 e 30 psi para as esferas médias (S550). A distância entre o bocal e o corpo de prova foi de 90 mm e a cobertura em 200%.

A liga AA7050 com espessuras de usinagem de 2 e 5 mm foram jateadas em duas condições: livre de pré-tensão e 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.

Espessura CDP	Granalha	Pressão (psi)	Carregamento (Pré-tensão)	Nº de condições
2mm	S230	20 40 60	0 90% em Y	6
5mm	S230 S550	20 / 10 40 / 20 60 / 30	0 90% em Y	12

Tabela1 – Variáveis aplicadas as condições do jateamento.

A preparação das amostras para a análise de tensão residual iniciou-se com o corte, adequando às dimensões dos porta amostras do difratômetro. Em seguida, a amostra foi atacada por HCl concentrado observando os parâmetros de tempo e volume de ácido. Para cada 10µm removidos de material são aplicados: 5ml de HCl concentrado em tempo de 30 segundos.

Para a realização das análises de tensão residual foi utilizada um equipamento da marca Rigaku, modelo Rint 2000 com tubo de anodo de Cr. As condições aplicadas ao método se $\text{sen}\psi^2$ foram de 50° para + ψ e 50° para – ψ com intervalos de 10°. O ângulo 2 θ foi fixado em 139,49° (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.

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

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

A medida da curvatura possibilita avaliar a deflexão resultante da aplicação do shot peening nas amostras. O levantamento das deflexões das placas conformadas foi realizado pelo IPT com a utilização do equipamento da Mitutoyo, modelo QM353, acompanhado do software QM Data 200

RESULTADO E DISCUSSÕES

A figura 1 apresenta o resultado de altura do arco da amostra de alumínio de 2 mm de espessura com e sem pré tensão submetidas a diferentes pressões de jateamento. Percebe-se para ambas as amostras que o aumento da pressão de jateamento aumenta a altura do arco e, a taxa de aumento do tamanho do arco decresce com a taxa de aumento de pressão. Conforme aumenta a pressão de

jateamento, a altura do arco aumenta de maneira linear ate atingir uma região intermediaria, onde a taxa de crescimento torna-se decrescente ate atingir o ponto de saturação de modo que o aumento da pressão não causa mais aumento na altura do arco [6]. Para a amostra de 2 mm sem pré tensão o regime de saturação foi obtido em 60 PSI e para a amostra com pré tensão o arco de curvatura foi maior.

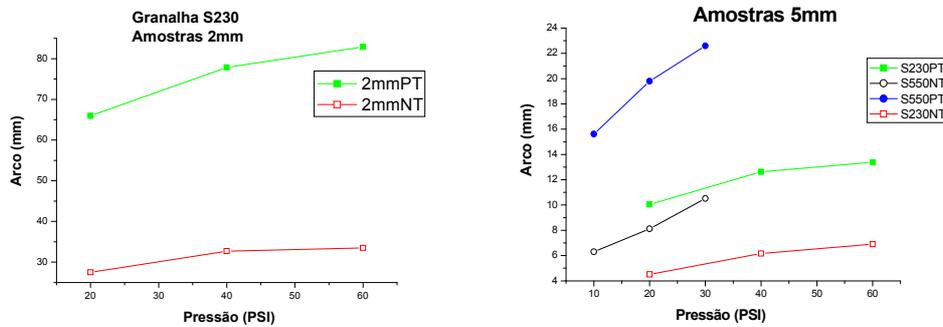
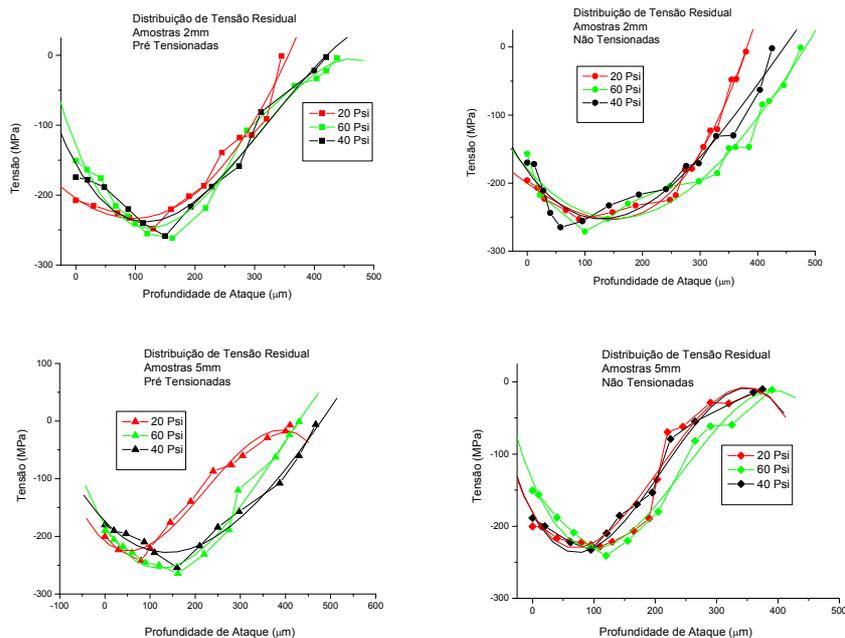


Figura 1 e 2 – Curvas pressão por altura do arco formado pela aplicação do peen forming

A figura 2 apresenta a altura do arco em função da pressão para amostra de 5 mm para granalhas S230 e S550 para as amostras não tensionadas e pré tensionadas. As amostras de 5 mm pré tensionadas apresentam maior altura de arco do que as não pré tensionadas, comportamento semelhante as amostras de 2 mm. As amostras jateadas com granalhas de tamanho maior (S550) apresentam comportamento linear na faixa de pressões pesquisadas (10 a 30 PSI). A pressão de 60 PSI parece estar na região intermediaria da curva de saturação para as amostras jateadas com granalha menor (S230).



Figuras 3, 4, 5 e 6- Altura do arco em função da pressão

As figuras 3 e 4 apresentam as medidas do perfil de tensão residual em profundidade para a amostra de 2mm, jateadas com granalha S230 com pressão de 20, 40 e 60 PSI para as amostras pré tensionadas e não pré tensionadas respectivamente. As figuras 5 e 6 apresentam as medidas do perfil de tensão residual em profundidade para a amostra de 5mm, jateadas com granalha S230 com pressão de 20, 40 e 60 PSI para as amostras pré tensionada e não pré tensionadas respectivamente. Todos os dados de tensão foram ajustados com função polinomial de grau 3.

A tabela 6 apresenta os valores de tensão residual máxima, tensão residual na superfície, profundidade onde ocorre tensão máxima e extensão da tensão residual de compressão.

Analisando o gráfico e as tabelas, podemos afirmar em linhas gerais que a profundidade máxima ocorre quando utilizamos a maior pressão embora as variações na tensão residual máxima não sejam muito significativas, variando entre -224 MPa a -254 MPa. A tensão residual na superfície é menor quanto maior a pressão, mostrando que ocorre relaxamento da rede devido ao alto impacto. Quanto maior a pressão, maior a profundidade de tensão residual de compressão, variando de 355 μm para o caso da amostra de 2 mm com pré tensão e pressão de jateamento de 20 PSI e 481 μm para a amostra de 2 mm sem pré tensão com pressão de jateamento de 60 PSI. Para as condições efetuadas neste estudo o aumento de pressão não altera de maneira significativa a tensão residual, mas por outro lado induz curvaturas maiores no processo de peen forming.

	Pressão(Psi)	$\mu\sigma_{\text{máx}}$ (mm)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	σ_{sup} (MPa)	$\mu\sigma_{\text{tot}}$ (mm)
2mm NT	20	152	-253	-200	443
	40	122	-252	-179	383
	60	163	-251	-156	481
2mm PT	20	94	-234	-203	355
	40	116	-238	-153	418
	60	126	-247	-126	439
5mm NT	20	76	-228	-181	355
	40	78	-236	-181	355
	60	106	-231	-135	389
5mm PT	20	54	-224	-207	410
	40	139	-227	-175	477
	60	123	-254	-179	432

Tabela 3 – Relação tensão residual pela profundidade

CONCLUSÕES

Para as condições utilizadas de granalha, pressão e espessura das chapas podemos concluir que:

- i - A tensão residual compressiva máxima não se altera de maneira significativa.
- ii - A profundidade máxima de tensão residual aumenta com o aumento da pressão de jateamento.
- iii - A tensão residual na superfície decresce com o aumento da pressão de jateamento.
- iv - Pré tensionamento provoca maior curvatura no processo de peen formig.
- v - A curvatura tem comportamento linear para pressões ate 30PSI.
- vi - A curvatura tem comportamento não linear para pressões entre 40 e 60 PSI.

BIBLIOGRAFIA

- 1- Baughman, D.L., 1984. An overview of peen forming technology, **Proceedings of the 2nd International Conference on Shot Peening**, 28-33.
- 2- Barrett, C.F., Todd, R., 1984. Investigation of the Effects of Elastic Pres-Stressing Technique on Magnitude of Compressive Residual Stress Induced by Shot Peen Forming of Thick Aluminum Plates, **Proceedings of the 2nd International Conference on Shot Peening**, 15-21.
- 3- 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.
- 4- **Handbook of Metallic Materials and Elements for Aerospace Vehicle Structures- MIL-HDBK-5J** – Department of Defense –USA, 2003.
- 5- Li, K., 1981. Using stress peen forming process for integrally stiffened wing panels, **Proceedings of the 1st International Conference on Shot Peening**, 555-564.
- 6- Miao, H.Y., Demers, D., Larose, S., Perron, C., L'évesque, M., Experimental study of shot peening and stress peen forming, **Journal of Materials Processing Technology** (2010), doi:10.1016/j.jmatprotec.2010.07.016
- 7- Noyan, I. C., Cohen, J.B. **Residual Stress Measurement by Diffraction and Interpretation**. Springer – New York, 1987.
- 8- Almeida, R.Z.H. **Relatório Técnico do Contrato Peen Forming número VDT0058-07** Embraer – UNIEMP.
- 9- SAE (Ed): **Residual Stresses, Measurement by X-Ray Diffraction**. J784a; Warrendale – USA, 1971.
- 10- SAE International Standards- Aerospace Materials Standards. disponível em: <http://www.sae.org/standardsdev/devprocess.htm>

RESIDUAL STRESS EVALUATION AND CURVATURE BEHAVIOR OF ALUMINUM 7050 PEEN FORMING PROCESSED

ABSTRACT

Shot peening is a superficial cold work process used to increase the fatigue life evaluated by residual stress measurements. The peen forming process is a variant of the shot peening process, where a curvature in the plate is obtained by the compression of the grains near to the surface. In this paper, the influence of the parameters such as: pressure of shot, ball shot size and thickness of aluminum 7050 samples with respect to residual stress profile and resulting arc height was studied. The evaluation of the residual stress profile was obtained by $\sin^2 \psi$ method.

Keywords: shot peening; peen forming; x-ray diffraction, residual stress.