

ANÁLISE DE LIGAS DE ALUMÍNIO AERONÁUTICAS CONFORMADAS POR JATEAMENTO COM GRANALHAS: CARACTERIZAÇÃO E PREVISÃO DE DEFORMAÇÃO¹

Ana Paola Villalva Braga²
Rene Ramos de Oliveira³
Fernando José Gomes Landgraf⁴
Marcelo Gonçalves⁵

Resumo

O processo de conformação por jateamento com granalhas (*peen forming*) trata da conformação de chapas ou painéis através da ação de um jato de esferas de aço que, atingindo uma de suas superfícies, torna-a convexa na face de recepção do jato e gera tensões residuais superficiais de compressão. Tornar o processo de jateamento com granalhas reproduzível e controlável é um objetivo importante a ser alcançado para que o mesmo possa ser aplicado de forma segura na indústria aeronáutica. Buscando-se estudar a viabilidade e o desenvolvimento de conhecimento da técnica de jateamento de esferas, definiu-se uma metodologia para o projeto de experimentos focalizados nos dois tópicos principais: variáveis de processo e características do material jateado. Chapas de alumínio foram caracterizadas em: deformação ou encurvamento, microestrutura das amostras jateadas, microdureza, profundidade e morfologia da camada deformada e perfis de tensões residuais. Analisando-se os dados, foi possível obter uma correlação semi-empírica entre processo e encurvamento e entre o encurvamento e o perfil de tensões residuais. Os dados experimentais foram utilizados para o treinamento de uma rede neural artificial, a qual gerou boa previsibilidade de deformação das chapas.

Palavras-chave: Jateamento com granalhas; Alumínio; Ligas aeronáuticas; Previsão de deformação.

ANALYSIS OF PEEN FORMED AIRCRAFT ALUMINUM ALLOYS: CHARACTERIZATION AND PREDICTION OF DEFORMATION

Abstract

The peen forming process is the forming of plate, sheet or panels through the action of a steel balls jet (shot peening) which, when reaching one of the surfaces, makes it convex on the face receiving the shots thus generating residual compressive stresses on panel's surface. Making the peen forming process reproducible and controllable is the major objective to be achieved so that it can be safely applied in the aerospace industry. Aiming at studying the technical feasibility of the peen forming process a methodology was defined for the design of experiments focused on both main topics: peen forming process variables and the characteristics of formed material. The aluminum plates were characterized as follows: bending or deformation, microstructure, hardness, depth and morphology of the deformed layer and profiles of residual stresses. Analyzing the data, it was possible to obtain a semi-empirical correlation between process variables, deformation and profile of residual stresses on the plate material studied. Experimental data were used to train an artificial neural network. This procedure showed a good predictability of deformation.

Key words: Peen forming; Aluminum; Aircraft alloys; Prediction of deformation.

¹ Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.

² Engenheira de Materiais, Mestre (Instituto de Pesquisas Tecnológicas de SP).

³ Técnico em Cerâmica, Mestre (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares).

⁴ Engenheiro Metalurgista, Prof. Dr. (Escola Politécnica da USP; Instituto de Pesquisas Tecnológicas de SP).

⁵ Engenheiro Metalurgista, PhD (Escola Superior de Engenharia e Gestão).

1 INTRODUÇÃO

Conformação por jateamento com granalhas (JCG ou *peen forming*) consiste no método de conformação de chapas e painéis através de um jato de granalhas de alta energia que deforma plasticamente a superfície do material, fazendo-o curvar. É um método de conformação derivado do tratamento de superfície utilizado para aumentar a vida em fadiga de materiais conhecido como *shot peening*.

Desde seu surgimento, em 1968, o uso da técnica para curvar asas de aeronaves tem aumentado, substituindo métodos de conformação (p.e. usinagem, estampagem, forjamento) que são mais caros, geram mais resíduos e ainda têm a desvantagem de deixar a peça com tensões superficiais de tração, que prejudicam a vida em fadiga do material.⁽¹⁾

Tornar o processo de conformação por jateamento reproduzível e controlável é um objetivo importante a ser alcançado para que o mesmo possa ser aplicado de forma segura na indústria aeronáutica. Buscando-se estudar a viabilidade e o desenvolvimento de conhecimento da técnica de conformação por jateamento, definiu-se em um projeto realizado no IPT⁽²⁾ uma metodologia para o projeto de experimentos focalizados nos dois tópicos principais: variáveis de processo e características do material jateado.

Neste trabalho,⁽³⁾ tais chapas de alumínio foram caracterizadas em: deformação ou encurvamento, microestrutura das amostras jateadas, dureza, profundidade e morfologia da camada deformada e perfis de tensões residuais. Os dados experimentais foram ajustados matematicamente para previsão semi-empírica do encurvamento e depois foi realizado o treinamento de uma rede neural artificial, visando um método eficiente para previsão de deformação durante o processo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Jateamentos

Os corpos-de-prova utilizados nos experimentos consistem de placas planas sem reforçadores, usinadas a partir de blocos de ligas de Al 7050-T7451 e 7475-T7351. As placas têm 400 mm comprimento, 50 mm largura e espessuras 2 mm, 5 mm, 10 mm e 15 mm. As duas ligas são comumente utilizadas para a fabricação de painéis integrais de asas de aviões superiores e inferiores, respectivamente.

A metodologia para o projeto dos experimentos focalizou os dois agentes principais do experimento: processo e corpo de prova. A Tabela 1 mostra as 144 condições de jateamento utilizadas, com três repetições para cada condição, gerando 429 corpos-de-prova.

As granalhas S230, S550 e 1/8" têm, respectivamente, 0,023 polegada, 0,055 polegada e 0,125 polegada. As condições de cobertura referem-se à porcentagem da área superficial que sofreu endentação das granalhas. Os corpos-de-prova com cobertura 200% foram jateados duas vezes a superfície total, para garantir a saturação do jateamento. As condições de pré-tensão foram projetadas⁽²⁾ para manter as superfícies das chapas sem tensionamento ou com pré-tensionamento de 90% do limite de escoamento do material.

Tabela 1. Matriz de experimentos de jateamento

Espessura CP	Liga de Al	Tamanho de granalha	Pressão do jato (psi) [kPa]	Cobertura	Pré-tensão	Nº de condições
2 mm	7050 7475	S230	(20) [138] (40) [276] (60) [414]	66-85-92% 200%	0 90% σ_E	24
5 mm	7050 7475	S230 / S550	(20) [138] / (10) [69] (40) [276] / (20) [138] (60) [414] / (30) [209]	66-85-92% / 60% 200%	0 90% σ_E	48
10 mm	7050 7475	S550 / 1/8"	10 20 30 / 25	60% 200%	0 90% σ_E	48
15 mm	7050 7475	1/8"	10 20 25	60% 200%	0 90% σ_E	24

2.2 Caracterização da Superfície Deformada

As análises microestruturais foram feitas nas amostras embutidas de maneira a se observar a seção longitudinal das chapas. Para visualização de precipitados e da estrutura de grãos, após o polimento foram utilizados os reagentes Keller e Barker, respectivamente. As medidas de dureza Vickers foram feitas com carga de 200 gf.

Supondo que a camada superficial deformada plasticamente pelos impactos das granalhas sofra recristalização após aquecimento em certa temperatura, foram testadas as temperaturas de 300°C, 400°C e 500°C em três corpos-de-prova de 2 mm de espessura, com a intenção de medir a espessura da camada recristalizada. Os tratamentos foram feitos em um forno mufla e o resfriamento, em água.

Foram utilizados mapas de EBSD, que podem mostrar e diferenciar regiões com baixo índice de qualidade de imagem (IQ) dentro de uma amostra com regiões deformadas e não-deformadas. As análises foram feitas em um microscópio eletrônico de varredura (MEV) Jeol JSM6300 equipado com o detector HKL NordlysS, que utiliza o software HKL CHANNEL5, ambos da Oxford Instruments®. Foram selecionados quatro corpos-de-prova jateados com granalhas média e grande, com alta cobertura, para mapeamento da região próxima à superfície jateada.

Para as medições de tensões residuais, foi utilizado um difratômetro de raios-X RIGAKU Rint 2000 disponível no IPEN,⁽⁴⁾ com radiação Cr K α ($\lambda = 2,291 \text{ \AA}$). O plano cristalográfico do alumínio observado foi (311) ($2\theta = 139, 49^\circ$). Para a obtenção dos perfis de tensões residuais por difração de raios-X, pelo método do $\sin^2 \psi$, foram selecionados corpos de prova da liga 7050, jateados com 200% de cobertura, nas diversas condições de jateamento, para observação dos efeitos de todas as demais variáveis de processo. A remoção de camadas foi feita com ácido clorídrico concentrado, que proporciona uma taxa de remoção de 10 μm a cada 20 segundos. Os perfis foram obtidos até valores de compressão próximos de zero, onde se admite que seja a espessura da camada deformada (h).

2.3 Previsão de Deformação

Os parâmetros de processo e os valores de curvatura medidos foram utilizados para treinar uma rede neural artificial (RNA) utilizando o software NeuroSolutions for Excel. Os parâmetros Liga, Espessura, Diâmetro de esfera, Velocidade de impacto, Pré-tensão e Cobertura foram utilizados como entrada (*input*) e o raio de curvatura foi a saída desejada (*output*). Os 429 dados de parâmetros e raio de curvatura passaram por uma seleção prévia para excluir os dados muito diferentes¹ das outras repetições de ensaio e foram também excluídos os valores de raios de curvatura superiores a 20 m. Isso resulta num total de 402 pontos experimentais para treinamento da RNA.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Jateamentos

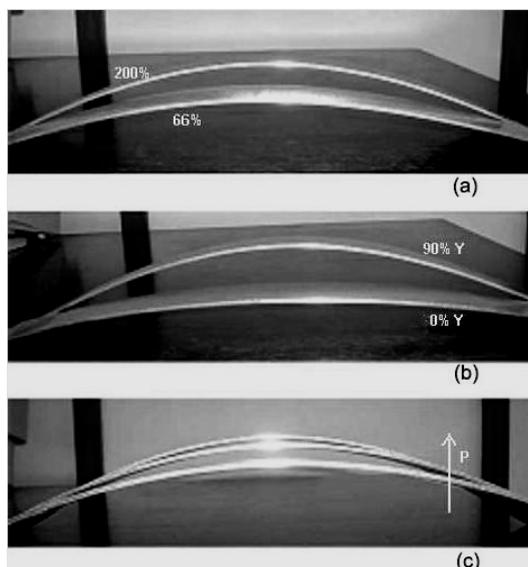


Figura 1. Efeitos das variáveis de jateamento no empenamento dos corpos de prova da liga 7050, espessura 2 mm. (a) Diferentes coberturas (66% e 200%); (b) Diferentes pré-tensioamentos (0 e 90% do limite de escoamento); (c) Diferentes pressões do jato (20 psi, 40 psi e 60 psi).

As variações nos parâmetros de jateamento surtiram efeitos visíveis no encurvamento das chapas de alumínio. Todos os parâmetros (cobertura, diâmetro da granalha, pressão – velocidade de impacto –, pré-tensão, espessura e liga) foram influentes no grau de deformação. Uma análise visual pode dar noção do grau de influência de alguns parâmetros, como mostra a Figura 1. Os corpos de prova reunidos em cada fotografia têm todos os demais parâmetros mantidos iguais, exceto o que se deseja observar. Nota-se que a aplicação de pré-tensão gera maior encurvamento do que o aumento da pressão do jato e da cobertura. Nas chapas de 2 mm, foram obtidos raios de curvatura de 0,2 m a 1,3 m; nas de 5 mm, os valores variaram entre 0,8 m e 5,4 m; de 10 mm, de 1,8 m a 23,4 m; e, de 15 mm, de 4,7 m a 28,4 m.

¹ No início dos ensaios de jateamento, alguns erros podem ter sido cometidos no ajuste da máquina.

3.1 Caracterização da Superfície Deformada

As diversas tentativas de visualização da camada deformada plasticamente foram frustradas pelo pequeno contraste entre a superfície conformada pelas granalhas e o restante do material, como pode ser visto na Figura 2. Na liga 7050, pode-se ver a estrutura de grãos levemente deformada próxima à superfície. Na Liga 7475, é visível o alinhamento dos precipitados na direção da endentação. Entretanto, não se pode afirmar a extensão dessa região deformada com clareza.

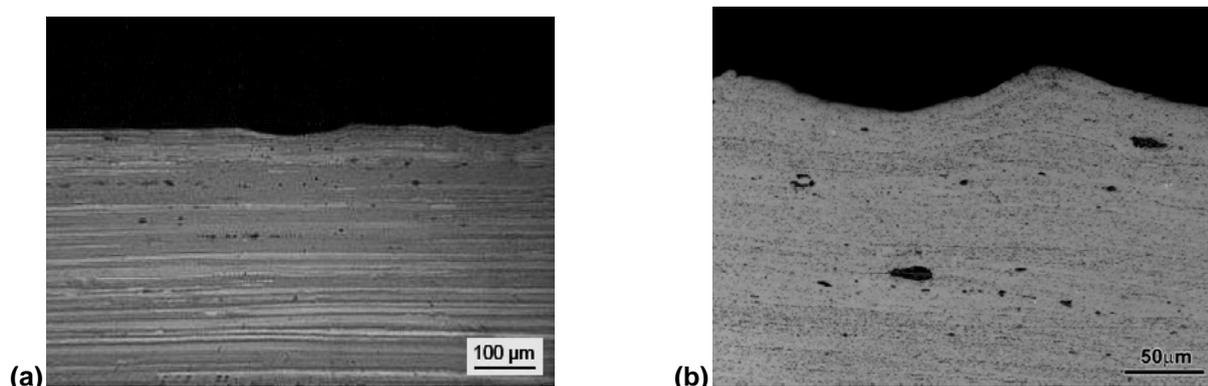


Figura 2. Microestrutura das amostras jateadas, próximas às endentações na superfície. (a) Liga 7050, ataque Barker; (b) Liga 7475, ataque Keller.

Após os testes, apenas o tratamento térmico na liga 7475, à temperatura 500°C, após 30 minutos, gerou uma camada de grãos recristalizados na superfície jateada, como pode ser visto na Figura 3. A amostra da liga 7050 não sofreu recristalização, como era esperado, devido à presença de dispersóides de zircônio que inibem este fenômeno na liga. A camada recristalizada na liga 7475 tem aproximadamente 75 μm de espessura, valor abaixo do esperado, com base na literatura⁽⁵⁾ e nos demais experimentos neste trabalho.^(2,3)

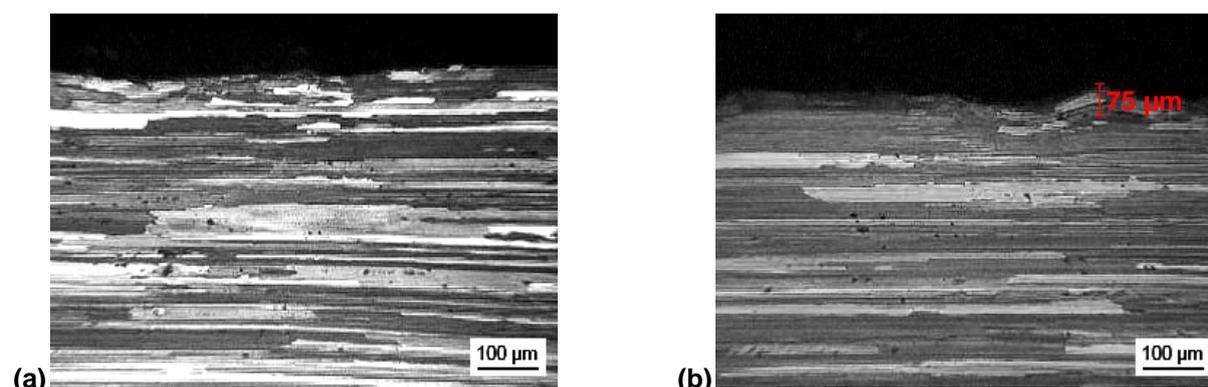


Figura 3. Camada de grãos recristalizados na liga 7475. (a) Após 30 min; (b) Após 60 min.

Também por EBSD, a camada deformada é de difícil visualização. A Figura 4 mostra os mapas de qualidade de imagem de 2 amostras da liga 7050, espessuras 5 mm e 10 mm, jateadas, respectivamente, com granalha pequena e grande, com velocidade média, 200% de cobertura, sem pré-tensão.

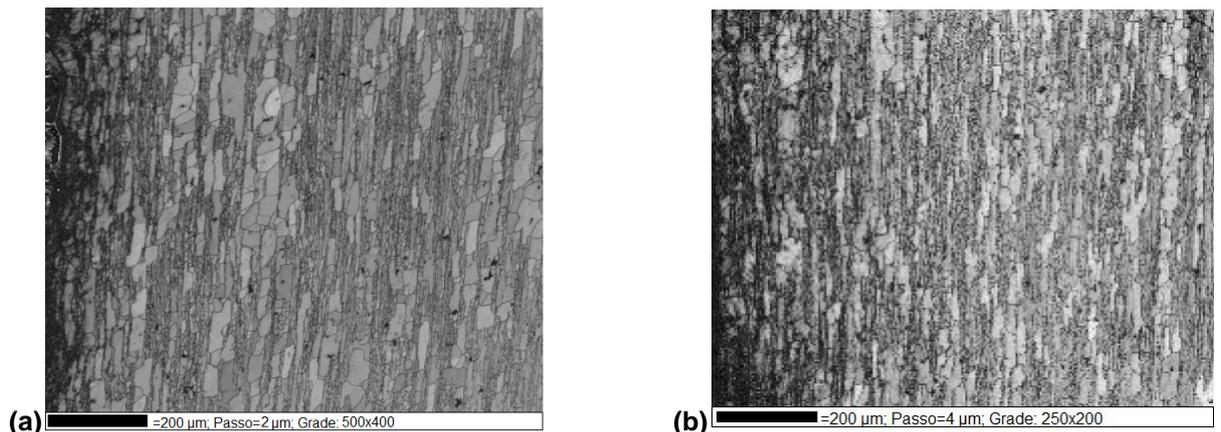


Figura 4. Mapas de IQ de EBSD. (a) Amostra de 5 mm, granalha pequena. (b) Amostra de 10 mm, granalha grande.

A diferença de qualidade de imagem entre a zona jateada e o restante do material é muito pequena, mesmo com grandes intensidades de jateamento. Acrescenta-se ainda o fato de que o mapeamento por EBSD é um método demorado e de preparação de amostras bastante exigente.

Durante o projeto realizado no IPT,⁽²⁾ diversas tentativas de obtenção de perfil de microdurezas também foram frustradas e o método de análise foi descartado. O valor mais baixo de microdureza, da superfície ao centro da espessura, foi 164 ± 5 HV e o valor mais alto foi 198 ± 5 HV, mas não se pode inferir uma relação com a profundidade ou com a deformação causada pelo jateamento.

Assim, descartou-se a utilização de metalografia, microdurezas, dos tratamentos térmicos e do EBSD para a medição da camada deformada plasticamente, pois os resultados são inconclusivos.

A Figura 5 mostra o perfil de tensões residuais a partir da superfície jateada de uma chapa da liga 7050, espessura 2 mm, jateada com granalha S230, 20 psi (velocidade baixa), sem pré-tensão. O ajuste dos pontos foi feito por uma função polinomial.

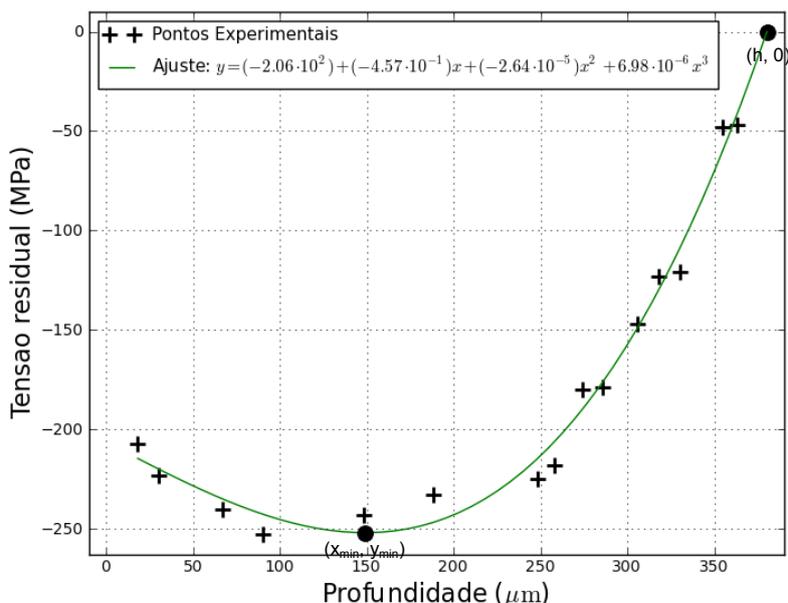


Figura 5. Perfil de tensões residuais após JCG em chapa da liga 7050, 2 mm de espessura, granalha S230, velocidade baixa, sem pré-tensão.

Os pontos em destaque indicam os valores calculados para a máxima compressão (x_{min} , y_{min}) e espessura da camada deformada (h), onde a tensão se anula. De modo geral, a tendência, quando a intensidade do jateamento aumenta, é aumentar as tensões residuais de compressão, aumentar a espessura da camada deformada (h) e distanciar da superfície o ponto de máxima compressão (x_{min} , y_{min}). Deve-se notar, por outro lado, que os valores de tensões residuais medidos são muitas vezes bastante próximos ao limite de escoamento do material (469 MPa).

3.2 Previsão de Deformação

O efeito de cada parâmetro relativo ao processo (diâmetro da esfera, pressão, cobertura e pré-tensão) ou ao corpo-de-prova (liga de alumínio e espessura) deve ser analisado independentemente, com os demais parâmetros fixos. A Figura 6.a mostra o efeito da cobertura sobre o raio de curvatura de chapas de espessura 5 mm e 10 mm das ligas 7050 e 7475, jateadas com esfera S550, na pressão mais alta (30 psi).

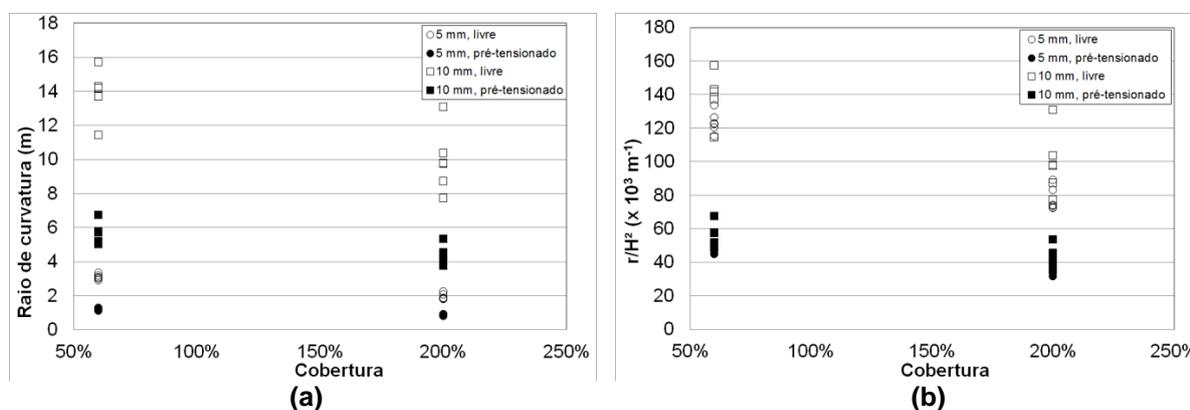


Figura 6. Efeito da cobertura em chapas de 5 mm e 10 mm, jateadas com granalha S550, 30 psi, sobre: (a) Raio de curvatura (r); (b) Raio de curvatura normalizado (r/H^2).

Como se nota, é difícil comparar dois pares de condições similares em chapas de espessuras diferentes, devido à resiliência maior da chapa mais espessa. Uma forma de normalização utilizada na Resistência de Materiais é dividir os valores de raio de curvatura pelo módulo resistente, W , que é dado por:

$$W = \frac{I}{c} = \frac{bH^3/12}{H/2} = \frac{b}{6} H^2 \text{ [m}^3\text{]} \quad (1)$$

onde I é o momento de inércia, c é a metade da espessura, H , e b é a largura dos CPs. Como todos os corpos de prova têm a mesma largura, basta dividir os raios de curvatura por H^2 . A Figura 6.b apresenta os mesmos dados da Figura 6.a, mostrando o efeito sobre r/H^2 ao invés de r . Os valores de r/H^2 referentes às duas espessuras são equivalentes e podem ser analisados ao mesmo tempo.

Ainda se faz necessário um parâmetro que englobe o maior número de variáveis atuantes no processo de jateamento com granalhas, para utilização no projeto de conformação de peças complexas.

Segundo Kirk,⁽⁶⁾ o trabalho total τ realizado pelo jato de granalhas sobre a superfície pode ser expresso pela equação:

$$\tau = \sum_0^t p_i \cdot \frac{1}{2} m_i v_i^2 \cdot n \cdot dt \quad [J] \quad (2)$$

Onde p_i é a proporção de energia cinética, $(m_i v_i^2)/2$, absorvida pela chapa quando é atingida por uma esfera individual, i , das n partículas que atingem a chapa em um intervalo de tempo, dt , dentro do tempo total de jateamento, t , e m_i é a massa da esfera i , viajando à velocidade v_i .

Se tomarmos a energia cinética de 1 esfera de massa m , à velocidade de impacto v_{imp} , que cause uma endentação de diâmetro d_{ent} na superfície da chapa, e dividirmos pela área da endentação (A_{ent}) e pela espessura da chapa, H , temos o parâmetro desejado, que denominamos densidade de energia cinética, K :

$$K = \frac{E_C}{A_{ent} \cdot H} = \frac{\frac{1}{2} m \cdot v_{imp}^2}{\left(\pi \frac{d_{ent}^2}{4}\right) \cdot H} \quad [J/m^3] \quad (3)$$

Através do Método dos Dois Discos desenvolvido por Clausen e Stangenberg⁽⁷⁾ para medição da velocidade das granalhas no jato, da medição dos diâmetros de endentação médios⁽²⁾ e do cálculo da massa das granalhas através do diâmetro nominal e da densidade do aço, foi possível obter uma relação semi-empírica entre K e r para todas as condições de jateamento, conforme mostra a Figura 7. As equações de ajuste são mostradas na Tabela 2.

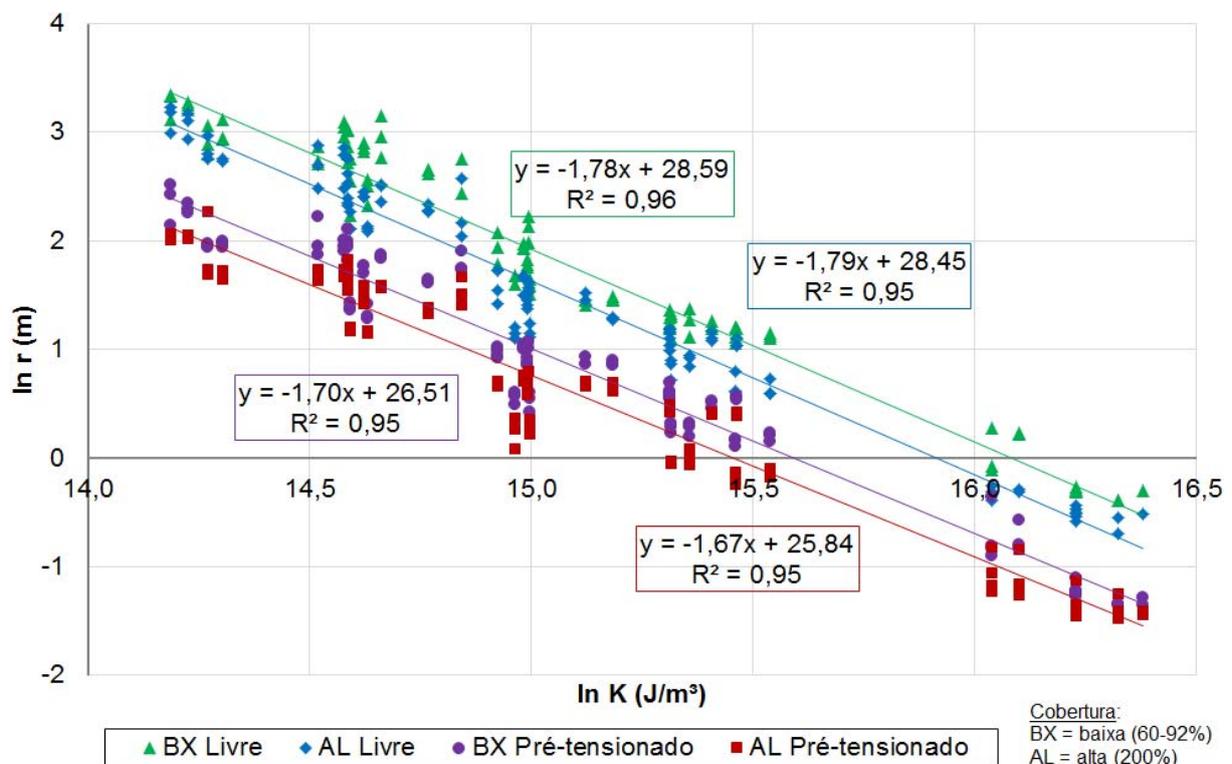


Figura 7. Relação semi-empírica entre densidade de energia cinética e raio de curvatura dos CPs conformados por jateamento com granalhas.

Tabela 2. Ajustes ($\ln r \times \ln K$) das relações entre densidade de energia cinética e raios de curvatura dos CPs conformados por jateamento com granalhas

Cobertura	Pré-tensão	Equação de ajuste	R ² do ajuste
Baixa	Não	$\ln r = -1,777 \cdot \ln K + 28,587$	0,956
Alta	Não	$\ln r = -1,788 \cdot \ln K + 28,445$	0,955
Baixa	Sim	$\ln r = -1,700 \cdot \ln K + 26,511$	0,950
Alta	Sim	$\ln r = -1,672 \cdot \ln K + 25,843$	0,952

Nota-se consistência entre as condições de jateamento com pré-tensão e livres. O coeficiente angular das retas de ajuste é maior para os pontos referentes às amostras jateadas sem pré-tensão, o que significa que o aumento da intensidade do jateamento é menos pronunciado quando a chapa já está submetida a uma pré-tensão. Além disso, o coeficiente linear das amostras livres também é maior, pois a deformação obtida após o jateamento sob tensão é maior.

Com os dados das medições de perfis de tensões residuais, buscou-se uma relação entre os pontos de mínimo da curva, ou máxima compressão, (x_{\min} , y_{\min}) e a espessura da camada deformada (h), e os valores de energia cinética e raio de curvatura. Os valores de x_{\min} e de h têm boa relação com a energia cinética e podem ser ajustados por uma função de potência (Figura 8a). Os valores de y_{\min} têm alguma relação com o raio de curvatura normalizado (Figura 8b), porém não é possível bom ajuste de nenhuma função.

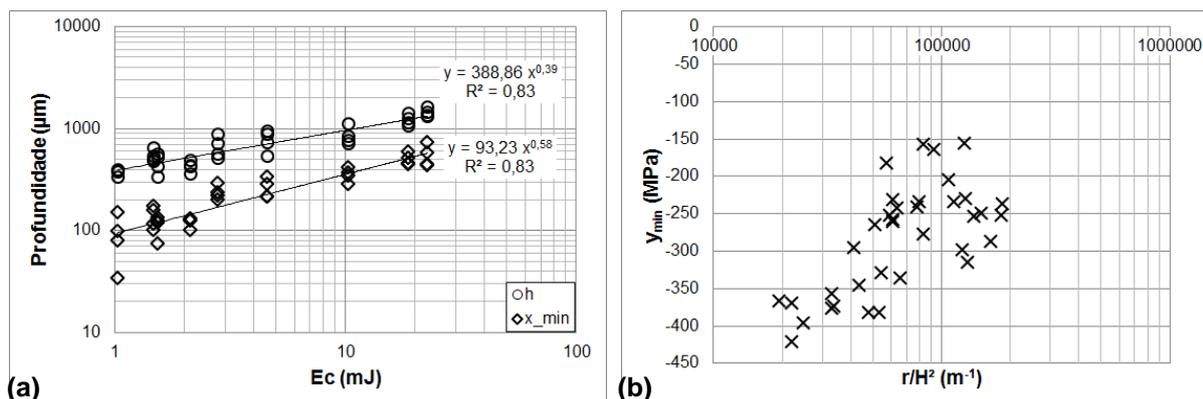


Figura 8. Relações entre (a) profundidade da máxima compressão e da espessura da camada deformada e a energia cinética das granalhas; (b) máxima compressão e o raio de curvatura normalizado.

As relações que puderam ser observadas entre os perfis de tensões residuais e os parâmetros e demais resultados do jateamento não são suficientes, *per se*, para uma boa previsão de deformação durante o projeto de experimentos.

O treinamento da rede neural artificial (RNA) gerou uma rede com erro absoluto médio de 0,438 m, variando entre 0,003 m e 2,680 m. O coeficiente de correlação linear (r) foi de 0,990, o melhor coeficiente encontrado entre os ajustes de funções feitos no restante do trabalho.

Para verificar se a RNA gera boa previsão de valores de raio de curvatura mesmo sobre valores de *input* diferentes dos utilizados nos experimentos de JCG, calculou-se o raio de curvatura para chapas fictícias de 7 mm de espessura, jateadas com granalhas S550, nas mesmas condições em que foram jateadas as chapas de 5 e 10 mm. A Figura 9 mostra o comportamento das chapas de todas as espessuras, com destaque para as fictícias (pontos pretos).

O comportamento das chapas de 7 mm é igual ao comportamento das chapas de 5 e 10 mm, pois os pontos em destaque estão exatamente no meio das faixas de valores medidos para os pontos verdadeiros.

Isto mostra que o uso de redes neurais artificiais seria de grande utilidade na previsão de deformação de chapas de diferentes espessuras e poderia ser utilizado para controle do processo, por automação do equipamento. No caso do processo de conformação por jateamento com granalhas, uma solução tecnologicamente viável seria o acoplamento de um sistema de medição de curvaturas a um computador com uma rede neural que ajusta um ou mais parâmetros (p.e. pressão do jato), de acordo com o resultado desejado. Desta forma, grandes peças, como asas de avião, poderiam ser fabricadas com maior precisão e com necessidades de correções e ajustes cada vez menores, uma vez que a rede neural aprende com cada experiência de jateamento e melhora a sua previsão.

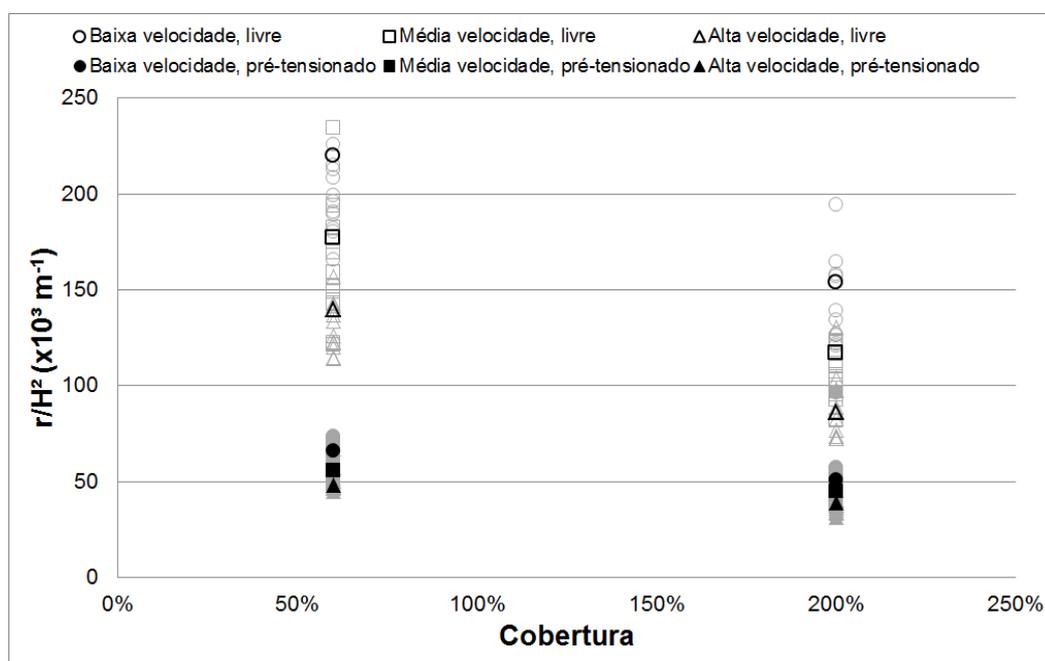


Figura 9. Efeito da cobertura sobre r/H^2 . Chapas jateadas com granalha S550. Em destaque: dados fictícios calculados para chapa de 7mm.

5 CONCLUSÕES

Após análise dos resultados obtidos por metalografia, tratamentos térmicos, medições de microdureza e EBSD, pode-se observar que a visualização e caracterização da camada deformada plasticamente não podem ser feitas satisfatoriamente através desses métodos, e que a melhor forma de se realizar a medida de espessura são os perfis de tensões residuais. As ligas 7050-T7451 e 7475-T7351 mostraram o mesmo comportamento em parâmetros de processo semelhantes, ou seja, as chapas que sofrem o maior encurvamento são as mais finas e os parâmetros de jateamento mais significativos para o aumento da deformação são: tamanho de granalha, velocidade de impacto e pré-tensionamento. O efeito da porcentagem de cobertura é suave e ideal para pequenas correções durante o jateamento de formas complexas. Foi possível obter uma correlação semi-empírica entre processo e encurvamento através do valor de densidade de energia cinética. Há correlação entre a espessura da camada deformada medida através dos perfis de tensão residual e a energia cinética das granalhas. A previsão do raio de

curvatura através de redes neurais artificiais mostrou-se o método mais eficaz para controle do processo.

Em resumo, conclui-se que a melhor técnica de medição da camada deformada pelo jateamento é por obtenção de perfis de tensões residuais, e que o método mais prático e preciso de previsão de curvatura e controle do processo é o uso de redes neurais artificiais.

Agradecimentos

Os autores agradecem a todos os institutos, empresas, universidades e seus colaboradores que participaram, em algum momento, deste projeto: IPT, IPEN, EPUSP, FEI, CBA, FINEP e Embraer.

REFERÊNCIAS

- 1 YOSHIZATO, A. Shot Peening – Training: Concepts and technology. São José dos Campos, SP, jun. 2004.
- 2 CINTEQ/IPT, CTPP/IPT, UNICAMP, EMBRAER. RELATÓRIO TÉCNICO No 102200-205: Análise experimental e modelagem numérica do processo de conformação de placas de ligas de alumínio por jateamento de esferas. São Paulo, set. 2008.
- 3 BRAGA, A. P. V. Análise de ligas de alumínio aeronáuticas conformadas por jateamento com granalhas – Caracterização e Previsão de Deformação. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da USP, São Paulo, fev. 2011.
- 4 OLIVEIRA, R. R. Avaliação da tensão residual em Alumínio 7050 conformado pelo processo peen forming. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN, São Paulo, mar. 2011.
- 5 CAMA, H. et al. Effect of Strain on Recovery. Disponível em: <<http://aluminium.matter.org.uk/content/html/ENG/default.asp?catid=67&pageid=1247713831>>
- 6 KIRK, D. Interactive shot peening control. In: ICSP, 5. International Conference on Shot Peening. U.K., 1993. p. 10.
- 7 CLAUSEN, R.; STANGENGERG, J. Device for the determination of impact velocities in shot peening. In: ICSP, 8. International Conference on Shot Peening. Alemanha, 2002. P. 89-95.