ANA PAOLA VILLALVA BRAGA

ANÁLISE DE LIGAS DE ALUMÍNIO AERONÁUTICAS
CONFORMADAS POR JATEAMENTO COM GRANALHAS –
CARACTERIZAÇÃO E PREVISÃO DE DEFORMAÇÃO

São Paulo

2011

ANA PAOLA VILLALVA BRAGA

ANÁLISE DE LIGAS DE ALUMÍNIO AERONÁUTICAS
CONFORMADAS POR JATEAMENTO COM GRANALHAS –
CARACTERIZAÇÃO E PREVISÃO DE DEFORMAÇÃO

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia

São Paulo

2011

ANA PAOLA VILLALVA BRAGA

ANÁLISE DE LIGAS DE ALUMÍNIO AERONÁUTICAS
CONFORMADAS POR JATEAMENTO COM GRANALHAS –
CARACTERIZAÇÃO E PREVISÃO DE DEFORMAÇÃO

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Engenharia
Metalúrgica e de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Fernando José
Gomes Landgraf

São Paulo

2011

Este texto foi escrito em $\text{\LaTeX}$. Conheça e divulgue!

A pesquisa só sobreviverá enquanto os sonhadores julgarem-se ignorantes.

Agradecimentos

Agradeço às pessoas responsáveis pelo meu trabalho: ao meu orientador Prof. Dr. Fernando José Gomes Landgraf, por ter-me atendido sempre com atenção, carinho e respeito, desde a Graduação, e por ser um exemplo a ser seguido; ao Marcelo Gonçalves, PhD, pelas inúmeras oportunidades de desenvolvimento profissional e pessoal que me ofereceu, por ter sido um chefe ao mesmo tempo exigente e companheiro no IPT.

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) pela estrutura de apoio técnica e administrativa para a condução deste trabalho e aos órgãos de financiamento do projeto de pesquisa (Finep e Embraer), que tornaram a sua execução possível. À Embraer, pela concessão do direito de divulgar os resultados obtidos neste trabalho, e por se mostrar parceira do IPT e da Universidade de São Paulo nos projetos de pesquisa, desenvolvimento e inovação na indústria aeronáutica.

À Companhia Brasileira do Alumínio (CBA), por compartilhar experiências e auxiliar na preparação de amostras metalográficas.

Aos pesquisadores que participaram do projeto 'Peen Forming': Agenor de T. Fleury, Dr. (FEI/EPUSP); Walter A. P. Ferreira, Dr. (IPT); Flavius P. R. Martins, Dr. (EPUSP); Gisele Szilágyi, MSc. (Mackenzie); Rynaldo Z. H. de Almeida, MSc. (EPUSP).

A Rene R. de Oliveira e Nelson B. de Lima, Dr., do Departamento de Caracterização de Materiais do IPEN, pelas medições de perfis de tensões residuais por difração de raios-X.

À Sandra da S. Munarim, pelo apoio técnico e, principalmente, pela companhia e amizade. Ao Damien A. Chaves, ex-estagiário, pela amizade e ajuda no trabalho experimental. Aos demais colegas do IPT e da Poli, que me servem de sustentação.

Impossível agradecer suficientemente aos meus pais, Malu e Edson, à minha irmã Marcela e ao restante da minha família, e ao meu marido Rafael, por fazerem a vida valer a pena.

"⁴⁵ Mas, se aquele servo disser em seu coração: 'O meu senhor tarda em vir'; e começar a espancar os criados e criadas, e a comer, e a beber, e a embriagar-se, ⁴⁶ Virá o senhor daquele servo no dia em que o não espera, e numa hora que ele não sabe, e separá-lo-á, e lhe dará a sua parte com os infieis. ⁴⁷ E o servo que soube a vontade do seu senhor, e não se aprontou, nem fez conforme a sua vontade, será castigado com muitos açoites; ⁴⁸ Mas o que a não soube, e fez coisas dignas de açoites, com poucos açoites será castigado. E, a qualquer que muito for dado, muito se lhe pedirá, e ao que muito se lhe confiou, muito mais se lhe pedirá."
(Lucas, 12)

Orgulhosos! Que éreis antes de serdes nobres e poderosos? Talvez estivésseis abaixo do último dos vossos criados. Curvai, portanto, as vossas frentes altaneiras, que Deus pode fazer se abaxem, justo no momento em que mais as elevardes. Na balança divina, são iguais todos os homens; só as virtudes os distinguem aos olhos de Deus. São da mesma essência todos os Espíritos e formados de igual massa todos os corpos. Em nada os modificam os vossos títulos e os vossos nomes. Eles permanecerão no túmulo e de modo nenhum contribuirão para que gozeis da ventura dos eleitos. Estes, na caridade e na humildade é que têm seus títulos de nobreza.
(O Evangelho Segundo o Espiritismo, cap. VII, item 11)

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 grande objetivo 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. As variáveis de processo observadas foram diâmetro de granalha, velocidade de impacto, porcentagem de cobertura e pré-tensão. No material jateado, variaram-se a liga de alumínio (7050-T7451 e 7475-T7351) e espessura. As chapas de alumínio foram caracterizadas em: raio de curvatura, microestrutura, dureza, profundidade e morfologia da camada deformada e perfis de tensões residuais. Avaliou-se o efeito do processo nas características do material. Analisando-se os dados, foi possível obter equações semi-empíricas de relação entre processo e raio de curvatura através de um novo parâmetro chamado densidade de energia cinética, que engloba os parâmetros diâmetro de granalha, velocidade de impacto e espessura da chapa. Encontrou-se ainda forte relação entre energia cinética e espessura da camada deformada e profundidade da máxima tensão residual. Os dados experimentais foram utilizados para o treinamento de uma rede neural artificial, que gerou boa previsibilidade do raio de curvatura.

Palavras chave: Jateamento. Alumínio. Ligas aeronáuticas.

Abstract

The peen forming process is the forming of metal sheet or panels through the action of a jet of hard spheres, hitting one of the surfaces, making it convex and causing residual compressive stresses on surface. Making the peen forming process reproducible and controllable is a major goal to its safe application in the aircraft industry. Aiming the study of the feasibility of peen forming and the development of its technical knowledge, a methodology for the design of experiments was created focusing on two main topics: process variables and the properties of the formed material. The process variables observed were shot diameter, impact velocity, percentage of coverage and pre-tension. With respect to the formed material, two aluminum alloys (7050-T7451 and 7475-T7351) and four different thicknesses were used. The aluminum plates were characterized by: radius of curvature, microstructure, hardness, depth and morphology of the deformed layer and profiles of residual stresses. The effect of the process on material was evaluated. Analyzing the data, semi-empirical equations were obtained for the relationship between process and radius of curvature through a new parameter called the density of kinetic energy, which includes the parameters shot diameter, impact velocity and plate thickness. It was also found a strong relationship between kinetic energy and thickness of the deformed layer and depth of maximum residual stress. Experimental data were used to train an artificial neural network, which generated a good predictability of the radius of curvature.

Keywords: Peen forming. Aluminum. Aerospace alloys.

Sumário

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

1	Introdução	31
1.1	Visão geral	32
1.2	Alumínio e Ligas de Alumínio	34
1.2.1	Introdução Geral	34
1.2.2	Ligas AA 7050-T7451 e AA 7475-T7351	39
1.3	Conformação por jateamento com granalhas	42
1.3.1	O Processo de jateamento	42
1.3.2	Tecnologia do processo	45
1.3.3	Camada deformada plasticamente	51
1.4	Difração de Elétrons Retroespalhados - EBSD	58
1.4.1	Noções básicas de EBSD	58
1.4.2	Experimentos de EBSD	61
1.4.3	Preparação da amostra	63
1.5	Medição de Tensões Residuais por Difração de Raios-X	66
1.5.1	Introdução	66
1.5.2	Perfis de Tensões Residuais	66
1.6	Previsão de deformação	71
1.6.1	Redes neurais artificiais	72
2	Resultados Esperados	77
2.1	Objetivo	78

3	Materiais e Métodos	81
3.1	Confecção dos corpos de prova	82
3.2	<i>Conformação por Jateamento com Granalhas</i>	83
3.2.1	Matriz de experimentos em JCG	85
3.3	Medição de curvatura	89
3.4	Análise microestrutural	92
3.5	Recristalização	93
3.5.1	Tratamentos térmicos	93
3.6	EBSD	95
3.7	Perfil de tensões residuais	96
3.8	Redes Neurais Artificiais	98
4	Resultados e Discussões	101
4.1	Microscopia óptica	102
4.1.1	Perfil de microdureza	108
4.2	Recristalização	112
4.2.1	Amostras com baixa intensidade de jateamento	112
4.2.2	Amostras com média intensidade de jateamento	117
4.2.3	Amostras com alta intensidade de jateamento	121
4.2.4	Discussão	125
4.2.5	Experimentos de laminação	126
4.3	EBSD	136
4.4	Deformações	139
4.5	Medição de curvatura	142
4.5.1	Efeitos dos parâmetros	142
4.5.2	Discussão	172
4.6	Perfil de tensões residuais	193
4.6.1	Discussão	195

4.7	Redes Neurais Artificiais	203
5	Conclusões	211
	Referências	215
	Apêndice A - Método de determinação de tensões residuais por difração de raios-X	221
	Apêndice B - Parâmetros de jateamento dos corpos de prova	225
	Apêndice C - Medidas do raio de curvatura dos corpos de prova	237
	Apêndice D - Perfis de Tensão Residual	251

Lista de Figuras

1.1	Microestrutura típica da liga 7050-T7451.	40
1.2	Microestrutura típica da liga 7475-T7351.	40
1.3	Efeito do impacto da granalha na distribuição de tensões: a) no momento do impacto; b) imediatamente após o impacto.	43
1.4	Diagramas de tensões indicando carregamento e tensões em chapas sem e com <i>shot peening</i> . Embaixo, o efeito do jateamento durante carregamento em flexão.	44
1.5	Distribuição de tensões residuais em um painel conformado por jateamento de granalhas.	44
1.6	Métodos de conformação por JCG.	46
1.7	O princípio do método de conformação por jateamento com granalhas.	47
1.8	Esquema do teste da tira Almen. À esquerda, a tira Almen sendo jateada. À direita, a altura do arco sendo medida. Acima, as espessuras A, N e C utilizadas nos ensaios.	48
1.9	Relações entre K_d^2 , K_h e a dureza Vickers da amostra.	52
1.10	Microestrutura da seção transversal de uma chapa de alumínio 7050 jateada por esferas S230.	54
1.11	Amostra laminada de alumínio EN AW-1200 mostrando grãos maiores próximos à superfície.	55
1.12	Resultado prévio de medição de camada deformada plasticamente através de EBSD. (a) Figura de pólo inversa (IPF); (b) Qualidade de imagem (IQ). Espessura da camada = 130 μm . . .	56
1.13	Resultado prévio de medição de camada deformada plasticamente através de EBSD. (a) Figura de pólo inversa (IPF); (b) Qualidade de imagem (IQ). Espessura da camada = 90 μm . . .	57
1.14	A montagem experimental para o EBSD.	58

1.15	Formação do padrão de difração de elétrons retroespalhados.	59
1.16	Padrão de difração de níquel coletado a uma voltagem de ace- leração de 20 kV.	60
1.17	Relações entre os padrões de difração e o cristal.	60
1.18	Coloração de mapas de orientação cristalina.	62
1.19	Mapa de qualidade de imagem mostrando contornos de grão e o contraste de IQ entre grãos de orientações cristalinas diferentes.	63
1.20	Representação esquemática dos perfis de tensões residuais que podem ser esperados após o shot peening.	67
1.21	Perfis de tensões residuais determinados por difração de raios- X para diferentes pressões de jateamento em aço AISI 4140 temperado.	68
1.22	Comparação dos perfis de tensões residuais observados por nêutrons e raios-X após remoção eletrolítica de camadas em um aço AISI 4140 jateado com granalhas, na condição tempe- rada e revenida.	69
1.23	Perfil de tensões residuais calculado pelo MEF para diferentes diâmetros de granalha.	70
1.24	Perfil de tensões residuais calculado pelo MEF para diferentes velocidades de impacto das granalhas.	70
1.25	Exemplo de rede neural do tipo <i>feedforward</i>	74
3.1	Modelos dos corpos de prova jateados.	82
3.2	Máquina utilizada para o JCG.	83
3.3	Esquema da trajetória do bocal para obtenção de cobertura ho- mogênea.	84
3.4	Esquema geométrico de imposição de carga estática aos cor- pos de prova.	85
3.5	Localização dos pontos do corpo de prova para medição de co- ordenadas.	89
3.6	Saída do software QM Data 200 para medição de coordenadas.	90
3.7	Divisões do corpo de prova para obtenção de amostras.	94

3.8	Esquema das seções longitudinal e transversal, em relação às direções de laminação e jateamento de esferas.	95
4.1	Microestrutura da amostra 006_24 (Liga 7050, sem jateamento, sem tratamento térmico). Centro da espessura (seção longitudinal).	103
4.2	Microestrutura da amostra 074_24 (Liga 7475, sem jateamento, sem tratamento térmico). Centro da espessura (seção longitudinal).	103
4.3	Microestrutura de toda a espessura da amostra 206 (7475, 5 mm, pré-tensionada, S230, 200%)	104
4.4	Microestrutura da amostra 206 (7475, 5 mm, pré-tensionada, S230, 200%), após o jateamento.	105
4.5	Microestrutura da amostra 206 (liga 7475, 5 mm, pré-tensionada, S230, 200%), após o jateamento.	105
4.6	Microestrutura da amostra 206 (liga 7475, 5 mm, pré-tensionada, S230, 200%), após o jateamento.	106
4.7	Superfície não jateada, observada após ataque Keller (seção longitudinal). Amostra 074_21 (7475, sem TT).	106
4.8	Superfície jateada, observada após ataque Keller (seção longitudinal). Amostra 074_15 (7475, 2 mm, pré-tensionada, S230, 20 psi, 66%; sem TT).	107
4.9	Superfície jateada, observada após ataque Keller (seção longitudinal). Amostra 083_14 (7475, 2 mm, pré-tensionada, S230, 60 psi, 92%; sem TT).	107
4.10	Micrografia óptica mostrando a microestrutura da liga de alumínio 7475-T7351 nas superfícies longitudinal, transversal e de topo (montagem 3D).	108
4.11	Perfil de durezas da amostra 439 (7475, espessura 15 mm, esfera 1/8", alta pressão, alta cobertura, pré-tensionada), da superfície até a metade da espessura.	109
4.12	Perfil de microdurezas em amostras como-recebidas e após o jateamento.	109

4.13 Perfil de durezas na superfície ao longo de uma direção perpendicular à junta soldada de aços <i>dual phase</i>	110
4.14 Perfil de durezas de chapa de alumínio da liga 7050, com 5 mm de espessura, após JCG.	111
4.15 Microestrutura da amostra 006_01 após o tratamento térmico (liga 7050, 2 mm, livre, S230, 20 psi, 66%; TT 300°C-30 min). . .	112
4.16 Microestrutura da amostra 006_05 após o tratamento térmico (liga 7050, 2 mm, livre, S230, 20 psi, 66%; TT 300°C-60 min). . .	113
4.17 Microestrutura da amostra 006_02 após o tratamento térmico (liga 7050, 2 mm, livre, S230, 20 psi, 66%; TT 400°C-30 min). . .	113
4.18 Microestrutura da amostra 006_06 após o tratamento térmico (liga 7050, 2 mm, livre, S230, 20 psi, 66%; TT 400°C-60 min). . .	113
4.19 Microestrutura da amostra 006_10 após o tratamento térmico (liga 7050, 2 mm, livre, S230, 20 psi, 66%; TT 400°C-120 min). .	114
4.20 Microestrutura da amostra 006_03 após o tratamento térmico (liga 7050, 2 mm, livre, S230, 20 psi, 66%; TT 500°C-15 min). . .	114
4.21 Microestrutura da amostra 006_07 após o tratamento térmico (liga 7050, 2 mm, livre, S230, 20 psi, 66%; TT 500°C-30 min). . .	114
4.22 Microestrutura da amostra 006_11 após o tratamento térmico (liga 7050, 2 mm, livre, S230, 20 psi, 66%; TT 500°C-60 min). . .	115
4.23 Microestrutura da amostra 006_16 sem tratamento térmico (liga 7050, 2 mm, livre, S230, 20 psi, 66%).	115
4.24 Microestrutura da amostra 006_20 após o tratamento térmico (liga 7050, 2 mm, sem jateamento; TT 400°C-60 min).	115
4.25 Microestrutura da amostra 006_22 após o tratamento térmico (liga 7050, 2 mm, sem jateamento; TT 500°C-60 min).	116
4.26 Microestrutura da amostra 006_24 sem tratamento térmico (liga 7050, 2 mm, sem jateamento).	116
4.27 Microestrutura da amostra 074_01 após o tratamento térmico (liga 7475, 2 mm, pré-tensionada, S230, 20 psi, 66%; TT 300°C-30 min).	117

4.28 Microestrutura da amostra 074_02 após o tratamento térmico (liga 7475, 2 mm, pré-tensionada, S230, 20 psi, 66%; TT 400°C- 30 min).	117
4.29 Microestrutura da amostra 074_06 após o tratamento térmico (liga 7475, 2 mm, pré-tensionada, S230, 20 psi, 66%; TT 400°C- 60 min).	118
4.30 Microestrutura da amostra 074_10 após o tratamento térmico (liga 7475, 2 mm, pré-tensionada, S230, 20 psi, 66%; TT 400°C- 120 min).	118
4.31 Microestrutura da amostra 074_07 após o tratamento térmico (liga 7475, 2 mm, pré-tensionada, S230, 20 psi, 66%; TT 500°C- 30 min).	118
4.32 Microestrutura da amostra 074_11 após o tratamento térmico (liga 7475, 2 mm, pré-tensionada, S230, 20 psi, 66%; TT 500°C- 60 min).	119
4.33 Microestrutura da amostra 074_16 sem tratamento térmico (liga 7475, 2 mm, pré-tensionada, S230, 20 psi, 66%).	119
4.34 Microestrutura da amostra 074_20 após o tratamento térmico (liga 7475, 2 mm, sem jateamento; TT 400°C-60 min).	119
4.35 Microestrutura da amostra 074_22 após o tratamento térmico (liga 7475, 2 mm, sem jateamento; TT 500°C-60 min).	120
4.36 Microestrutura da amostra 074_24 sem tratamento térmico (liga 7475, 2 mm, sem jateamento).	120
4.37 Microestrutura da amostra 083_01 após o tratamento térmico (liga 7475, 2 mm, pré-tensionada, S230, 60 psi, 92%; TT 300°C- 30 min).	121
4.38 Microestrutura da amostra 083_02 após o tratamento térmico (liga 7475, 2 mm, pré-tensionada, S230, 60 psi, 92%; TT 400°C- 30 min).	121
4.39 Microestrutura da amostra 083_06 após o tratamento térmico (liga 7475, 2 mm, pré-tensionada, S230, 60 psi, 92%; TT 400°C- 60 min).	122

4.40 Microestrutura da amostra 083_10 após o tratamento térmico (liga 7475, 2 mm, pré-tensionada, S230, 60 psi, 92%; TT 400°C- 120 min).	122
4.41 Microestrutura da amostra 083_03 após o tratamento térmico (liga 7475, 2 mm, pré-tensionada, S230, 60 psi, 92%; TT 500°C- 15 min).	122
4.42 Microestrutura da amostra 083_07 após o tratamento térmico (liga 7475, 2 mm, pré-tensionada, S230, 60 psi, 92%; TT 500°C- 30 min).	123
4.43 Microestrutura da amostra 083_11 após o tratamento térmico (liga 7475, 2 mm, pré-tensionada, S230, 60 psi, 92%; TT 500°C- 60 min).	123
4.44 Microestrutura da amostra 083_16 sem tratamento térmico (liga 7475, 2 mm, pré-tensionada, S230, 60 psi, 92%).	123
4.45 Microestrutura da amostra 083_20 após o tratamento térmico (liga 7475, 2 mm, sem jateamento; TT 400°C-60 min).	124
4.46 Microestrutura da amostra 083_22 após o tratamento térmico (liga 7475, 2 mm, sem jateamento; TT 500°C-60 min).	124
4.47 Microestrutura da amostra 083_24 sem tratamento térmico (liga 7475, 2 mm, sem jateamento.	124
4.48 Indicação da espessura da camada recristalizada após trata- mento térmico na amostra 083_07 (liga 7475, 2 mm, pré-tensionada, S230, 60 psi, 92%; TT 500°C-30 min).	125
4.49 Microestrutura da amostra 357A.	127
4.50 Microestrutura da amostra 369A.	127
4.51 Microestrutura da amostra 357B.	128
4.52 Microestrutura da amostra 369B.	128
4.53 Microestrutura da amostra 357C.	129
4.54 Microestrutura da amostra 369C.	129
4.55 Microestrutura da amostra 357D.	130
4.56 Microestrutura da amostra 369D.	130
4.57 Microestrutura da amostra 357E.	131

4.58 Microestrutura da amostra 369E.	131
4.59 Microestrutura da amostra 357F.	132
4.60 Microestrutura da amostra 369F.	132
4.61 Microestrutura da amostra 357G.	133
4.62 Microestrutura da amostra 369G.	133
4.63 Microestrutura da amostra 357H.	134
4.64 Microestrutura da amostra 369H.	134
4.65 Mapa de EBSD obtido da amostra 090.	136
4.66 Mapa de EBSD obtido da amostra 206.	137
4.67 Mapa de EBSD obtido da amostra 252.	137
4.68 Mapa de EBSD obtido da amostra 371.	138
4.69 Efeitos das variáveis de jateamento no empenamento de corpos de prova da liga 7050, de espessura 2 mm.	139
4.70 Esquema do dispositivo de medição de velocidade de impactos utilizado pelo IPT.	140
4.71 Efeito da cobertura sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7050, espessura 2 mm, jateadas com esfera S230.	144
4.72 Efeito da cobertura sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7475, espessura 2 mm, jateadas com esfera S230.	145
4.73 Efeito da cobertura sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7050, espessura 5 mm, jateadas com esfera S230.	145
4.74 Efeito da cobertura sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7475, espessura 5 mm, jateadas com esfera S230.	146
4.75 Efeito da cobertura sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7050, espessura 5 mm, jateadas com esfera S550.	146
4.76 Efeito da cobertura sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7475, espessura 5 mm, jateadas com esfera S550.	147
4.77 Efeito da cobertura sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7050, espessura 10 mm, jateadas com esfera S550.	147

4.78	Efeito da cobertura sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7475, espessura 10 mm, jateadas com esfera S550.	148
4.79	Efeito da cobertura sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7050, espessura 10 mm, jateadas com esfera 1/8".	148
4.80	Efeito da cobertura sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7475, espessura 10 mm, jateadas com esfera 1/8".	149
4.81	Efeito da cobertura sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7050, espessura 15 mm, jateadas com esfera 1/8".	149
4.82	Efeito da cobertura sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7475, espessura 15 mm, jateadas com esfera 1/8".	150
4.83	Efeito do diâmetro da esfera sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7050, espessura 5 mm, baixa cobertura.	150
4.84	Efeito do diâmetro da esfera sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7050, espessura 10 mm, baixa cobertura.	151
4.85	Efeito do diâmetro da esfera sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7475, espessura 5 mm, baixa cobertura.	151
4.86	Efeito do diâmetro da esfera sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7475, espessura 10 mm, baixa cobertura.	152
4.87	Efeito do diâmetro da esfera sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7050, espessura 5 mm, alta cobertura.	152
4.88	Efeito do diâmetro da esfera sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7050, espessura 10 mm, alta cobertura.	153
4.89	Efeito do diâmetro da esfera sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7475, espessura 5 mm, alta cobertura.	153
4.90	Efeito do diâmetro da esfera sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7475, espessura 10 mm, alta cobertura.	154
4.91	Efeito do diâmetro da esfera sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7050, espessura 5 mm, baixa pressão do jato.	154
4.92	Efeito do diâmetro da esfera sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7050, espessura 5 mm, média pressão do jato.	155
4.93	Efeito do diâmetro da esfera sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7050, espessura 5 mm, alta pressão do jato.	155

4.94	Efeito do diâmetro da esfera sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7475, espessura 5 mm, baixa pressão do jato.	156
4.95	Efeito do diâmetro da esfera sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7475, espessura 5 mm, média pressão do jato.	156
4.96	Efeito do diâmetro da esfera sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7475, espessura 5 mm, alta pressão do jato.	157
4.97	Efeito do diâmetro da esfera sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7050, espessura 10 mm, baixa pressão do jato.	157
4.98	Efeito do diâmetro da esfera sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7050, espessura 10 mm, média pressão do jato.	158
4.99	Efeito do diâmetro da esfera sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7050, espessura 10 mm, alta pressão do jato.	158
4.100	Efeito do diâmetro da esfera sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7475, espessura 10 mm, baixa pressão do jato.	159
4.101	Efeito do diâmetro da esfera sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7475, espessura 10 mm, média pressão do jato.	159
4.102	Efeito do diâmetro da esfera sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7475, espessura 10 mm, alta pressão do jato.	160
4.103	Efeito da velocidade de impacto sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7050, espessura 2 mm, jateadas com esfera S230. .	160
4.104	Efeito da velocidade de impacto sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7050, espessura 5 mm, jateadas com esfera S230. .	161
4.105	Efeito da velocidade de impacto sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7050, espessura 5 mm, jateadas com esfera S550. .	161
4.106	Efeito da velocidade de impacto sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7050, espessura 10 mm, jateadas com esfera S550. .	162
4.107	Efeito da velocidade de impacto sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7050, espessura 10 mm, jateadas com esfera 1/8". .	162
4.108	Efeito da velocidade de impacto sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7050, espessura 15 mm, jateadas com esfera 1/8". .	163
4.109	Efeito da velocidade de impacto sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7475, espessura 2 mm, jateadas com esfera S230. .	163

4.110	Efeito da velocidade de impacto sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7475, espessura 5 mm, jateadas com esfera S230.	. 164
4.111	Efeito da velocidade de impacto sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7475, espessura 5 mm, jateadas com esfera S550.	. 164
4.112	Efeito da velocidade de impacto sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7475, espessura 10 mm, jateadas com esfera S550.	165
4.113	Efeito da velocidade de impacto sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7475, espessura 10 mm, jateadas com esfera 1/8".	. 165
4.114	Efeito da velocidade de impacto sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7475, espessura 15 mm, jateadas com esfera 1/8".	. 166
4.115	Efeito da espessura da chapa sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7050, jateadas com esfera S230, baixa cobertura.	. . 166
4.116	Efeito da espessura da chapa sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7050, jateadas com esfera S550, baixa cobertura.	. . 167
4.117	Efeito da espessura da chapa sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7050, jateadas com esfera 1/8", baixa cobertura.	. . 167
4.118	Efeito da espessura da chapa sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7050, jateadas com esfera S230, alta cobertura.	. . . 168
4.119	Efeito da espessura da chapa sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7050, jateadas com esfera S550, alta cobertura.	. . . 168
4.120	Efeito da espessura da chapa sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7050, jateadas com esfera 1/8", alta cobertura.	. . . 169
4.121	Efeito da espessura da chapa sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7475, jateadas com esfera S230, baixa cobertura.	. . 169
4.122	Efeito da espessura da chapa sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7475, jateadas com esfera S550, baixa cobertura.	. . 170
4.123	Efeito da espessura da chapa sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7475, jateadas com esfera 1/8", baixa cobertura.	. . 170
4.124	Efeito da espessura da chapa sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7475, jateadas com esfera S230, alta cobertura.	. . . 171
4.125	Efeito da espessura da chapa sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7475, jateadas com esfera S550, alta cobertura.	. . . 171

4.126	Efeito da espessura da chapa sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7475, jateadas com esfera 1/8", alta cobertura.	172
4.127	Efeito da espessura da chapa sobre r/H^2 . Chapas da liga 7050, jateadas com esfera S230, baixa cobertura.	174
4.128	Efeito da espessura da chapa sobre r/H^2 . Chapas da liga 7475, jateadas com esfera S230, baixa cobertura.	174
4.129	Efeito da espessura da chapa sobre r/H^2 . Chapas da liga 7050, jateadas com esfera S550, baixa cobertura.	175
4.130	Efeito da espessura da chapa sobre r/H^2 . Chapas da liga 7475, jateadas com esfera S550, baixa cobertura.	175
4.131	Efeito da espessura da chapa sobre r/H^2 . Chapas da liga 7050, jateadas com esfera 1/8", baixa cobertura.	176
4.132	Efeito da espessura da chapa sobre r/H^2 . Chapas da liga 7475, jateadas com esfera 1/8", baixa cobertura.	176
4.133	Efeito da espessura da chapa sobre r/H^2 . Chapas da liga 7050, jateadas com esfera S230, alta cobertura.	177
4.134	Efeito da espessura da chapa sobre r/H^2 . Chapas da liga 7475, jateadas com esfera S230, alta cobertura.	177
4.135	Efeito da espessura da chapa sobre r/H^2 . Chapas da liga 7050, jateadas com esfera S550, alta cobertura.	178
4.136	Efeito da espessura da chapa sobre r/H^2 . Chapas da liga 7475, jateadas com esfera S550, alta cobertura.	178
4.137	Efeito da espessura da chapa sobre r/H^2 . Chapas da liga 7050, jateadas com esfera 1/8", alta cobertura.	179
4.138	Efeito da espessura da chapa sobre r/H^2 . Chapas da liga 7475, jateadas com esfera 1/8", alta cobertura.	179
4.139	Efeito da liga sobre r/H^2 . Chapas jateadas com esfera S230, baixa cobertura.	180
4.140	Efeito da liga sobre r/H^2 . Chapas jateadas com esfera S550, baixa cobertura.	180
4.141	Efeito da liga sobre r/H^2 . Chapas jateadas com esfera 1/8", baixa cobertura.	181

4.142 Efeito da liga sobre r/H^2 . Chapas jateadas com esfera S230, alta cobertura.	181
4.143 Efeito da liga sobre r/H^2 . Chapas jateadas com esfera S550, alta cobertura.	182
4.144 Efeito da liga sobre r/H^2 . Chapas jateadas com esfera 1/8", alta cobertura.	182
4.145 Efeito da cobertura sobre r/H^2 . Chapas das ligas 7050 e 7475 jateadas com esfera S230.	183
4.146 Efeito da cobertura sobre r/H^2 . Chapas das ligas 7050 e 7475 jateadas com esfera S550.	183
4.147 Efeito da cobertura sobre r/H^2 . Chapas das ligas 7050 e 7475 jateadas com esfera 1/8".	184
4.148 Efeito do diâmetro da esfera sobre r/H^2 . Chapas das ligas 7050 e 7475 jateadas com baixa cobertura.	184
4.149 Efeito do diâmetro da esfera sobre r/H^2 . Chapas das ligas 7050 e 7475 jateadas com alta cobertura.	185
4.150 Efeito do diâmetro da esfera sobre r/H^2 . Chapas das ligas 7050 e 7475 jateadas com baixa pressão.	185
4.151 Efeito do diâmetro da esfera sobre r/H^2 . Chapas das ligas 7050 e 7475 jateadas com média pressão.	186
4.152 Efeito do diâmetro da esfera sobre r/H^2 . Chapas das ligas 7050 e 7475 jateadas com alta pressão.	186
4.153 Efeito da velocidade de impacto sobre r/H^2 . Chapas das ligas 7050 e 7475 jateadas com baixa cobertura.	187
4.154 Efeito da velocidade de impacto sobre r/H^2 . Chapas das ligas 7050 e 7475 jateadas com alta cobertura.	187
4.155 Relação entre energia cinética e raio de curvatura dos corpos de prova conformados por jateamento de esferas.	189
4.156 Relação entre energia cinética e raio de curvatura normalizado dos corpos de prova conformados por jateamento de esferas. . .	190
4.157 Relação entre densidade de energia cinética e raio de curva- tura dos corpos de prova conformados por jateamento de esferas.	192

4.158 Perfil de tensões residuais após JCG em chapa da liga 7050, 2 mm de espessura, esfera S230, velocidade baixa, sem pré-tensão.	193
4.159 Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada, mostrando inflexão a 150 μm da superfície.	195
4.160 Relação entre profundidade de máxima compressão (x_{min}) e energia cinética (E_C).	197
4.161 Relação entre máxima tensão residual de compressão (y_{min}) e energia cinética (E_C).	197
4.162 Relação entre espessura da camada deformada (h) e energia cinética (E_C).	198
4.163 Relação entre profundidade de máxima compressão (x_{min}) e densidade de energia cinética (K).	198
4.164 Relação entre máxima tensão residual de compressão (y_{min}) e densidade de energia cinética (K).	199
4.165 Relação entre espessura da camada deformada (h) e densidade de energia cinética (K).	199
4.166 Relação entre profundidade de máxima compressão (x_{min}) e raio de curvatura (r).	200
4.167 Relação entre máxima tensão residual de compressão (y_{min}) e raio de curvatura (r).	200
4.168 Relação entre espessura da camada deformada (h) e raio de curvatura (r).	201
4.169 Relação entre profundidade de máxima compressão (x_{min}) e raio de curvatura normalizado (r/H^2).	201
4.170 Relação entre máxima tensão residual de compressão (y_{min}) e raio de curvatura normalizado (r/H^2).	202
4.171 Relação entre espessura da camada deformada (h) e raio de curvatura normalizado (r/H^2).	202
4.172 Aderência da rede neural artificial aos 62 testes (exemplares). .	203
4.173 Correlação entre a previsão de curvatura e os dados reais. . .	204

4.174	Efeito da velocidade de impacto sobre r/H^2 . Chapas com cobertura baixa.	206
4.175	Efeito da velocidade de impacto sobre r/H^2 . Chapas com cobertura alta.	206
4.176	Efeito da cobertura sobre r/H^2 . Granalha S230.	207
4.177	Efeito da cobertura sobre r/H^2 . Granalha S550.	208
4.178	Efeito da cobertura sobre r/H^2 . Granalha 1/8".	208
A.1	Relações angulares entre a tensão a ser medida (σ_ϕ), tensões principais (σ_1 , σ_2 e σ_3), e eixos arbitrários (x , y e z).	222
D.1	Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 2 mm, esfera S230, velocidade baixa, sem pré-tensão.	251
D.2	Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 2 mm, esfera S230, velocidade média, sem pré-tensão.	252
D.3	Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 2 mm, esfera S230, velocidade alta, sem pré-tensão.	252
D.4	Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 2 mm, esfera S230, velocidade baixa, com pré-tensão.	253
D.5	Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 2 mm, esfera S230, velocidade média, com pré-tensão.	253
D.6	Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 2 mm, esfera S230, velocidade alta, com pré-tensão.	254

D.7	Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 5 mm, esfera S230, velocidade baixa, sem pré-tensão.	254
D.8	Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 5 mm, esfera S230, velocidade média, sem pré-tensão.	255
D.9	Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 5 mm, esfera S230, velocidade alta, sem pré-tensão.	255
D.10	Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 5 mm, esfera S230, velocidade baixa, com pré-tensão.	256
D.11	Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 5 mm, esfera S230, velocidade média, com pré-tensão.	256
D.12	Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 5 mm, esfera S230, velocidade alta, com pré-tensão.	257
D.13	Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 5 mm, esfera S550, velocidade baixa, sem pré-tensão.	257
D.14	Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 5 mm, esfera S550, velocidade média, sem pré-tensão.	258

D.15 Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 5 mm, esfera S550, velocidade alta, sem pré-tensão.	258
D.16 Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 5 mm, esfera S550, velocidade baixa, com pré-tensão.	259
D.17 Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 5 mm, esfera S550, velocidade média, com pré-tensão.	259
D.18 Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 5 mm, esfera S550, velocidade alta, com pré-tensão.	260
D.19 Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 10 mm, esfera S550, velocidade baixa, sem pré-tensão.	260
D.20 Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 10 mm, esfera S550, velocidade média, sem pré-tensão.	261
D.21 Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 10 mm, esfera S550, velocidade alta, sem pré-tensão.	261
D.22 Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 10 mm, esfera S550, velocidade baixa, com pré-tensão.	262

D.23 Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 10 mm, esfera S550, velocidade média, com pré-tensão.	262
D.24 Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 10 mm, esfera S550, velocidade alta, com pré-tensão.	263
D.25 Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 10 mm, esfera 1/8", velocidade baixa, sem pré-tensão.	263
D.26 Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 10 mm, esfera 1/8", velocidade média, sem pré-tensão.	264
D.27 Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 10 mm, esfera 1/8", velocidade alta, sem pré-tensão.	264
D.28 Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 10 mm, esfera 1/8", velocidade baixa, com pré-tensão.	265
D.29 Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 10 mm, esfera 1/8", velocidade média, com pré-tensão.	265
D.30 Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 10 mm, esfera 1/8", velocidade alta, com pré-tensão.	266

D.31 Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 15 mm, esfera 1/8", velocidade baixa, sem pré-tensão.	266
D.32 Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 15 mm, esfera 1/8", velocidade média, sem pré-tensão.	267
D.33 Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 15 mm, esfera 1/8", velocidade alta, sem pré-tensão.	267
D.34 Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 15 mm, esfera 1/8", velocidade baixa, com pré-tensão.	268
D.35 Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 15 mm, esfera 1/8", velocidade média, com pré-tensão.	268
D.36 Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 15 mm, esfera 1/8", velocidade alta, com pré-tensão.	269

Lista de Tabelas

1.1	Dados de propriedades dos materiais disponíveis para as ligas de alumínio 7050 e 7475.	41
3.1	Matriz de experimentos.	87
3.2	Valores de interesse para o cálculo da curvatura da chapa medida.	90
3.3	Condições de jateamento dos CPs selecionados.	93
3.4	Temperatura e tempo de tratamento para as amostras, conforme posição no CP.	94
3.5	Corpos de prova e condições de análise por EBSD.	95
3.6	Corpos de prova selecionados para obtenções de perfis de tensões residuais por difração de raios-X.	97
4.1	Medidas de dureza das amostras dos corpos de prova 357 e 369 submetidas ao ensaio de laminação e tratamento térmico.	135
4.2	Correspondência entre valores de pressão do jato de esferas dos três tamanhos e a velocidade das esferas. Medidas experimentais.	140
4.3	Valores calculados da energia cinética de 1 esfera.	141
4.4	Números das figuras com resultados de efeitos dos parâmetros sobre o raio de curvatura.	142
4.5	Números das figuras com resultados de efeitos dos parâmetros sobre o raio de curvatura normalizado (r/H^2).	173
4.6	Equações de ajuste da relação entre densidade de energia cinética e raio de curvatura dos corpos de prova conformados por jateamento com granalhas.	191
4.7	Pontos (x_{min} , y_{min}) de máxima compressão e espessura das camadas deformadas (h).	194

4.8	Efeito qualitativo dos parâmetros de jateamento nos pontos de máxima tensão residual de compressão e na espessura da camada deformada.	196
4.9	Relatório de valores estatísticos após treinamento da RNA. . . .	203
4.10	Resultados de previsão de raio de curvatura para as chapas fictícias de 4, 7 e 12 mm de espessura.	205
B.1	Parâmetros de jateamento dos corpos de prova ensaiados. . . .	225
C.1	Curvatura dos corpos de prova de 2 mm da liga AA 7050.	238
C.2	Curvatura dos corpos de prova de 2 mm da liga AA 7475.	239
C.3	Curvaturas dos corpos de prova de 5 mm, granalhas S230, liga AA 7050.	240
C.4	Curvaturas dos corpos de prova de 5 mm, granalhas S230, liga AA 7475.	241
C.5	Curvaturas dos corpos de prova de 5 mm, granalhas S550, liga AA 7050.	242
C.6	Curvaturas dos corpos de prova de 5 mm, granalhas S550, liga AA 7475.	243
C.7	Curvaturas dos corpos de prova de 10 mm, granalhas S550, liga AL7050.	245
C.8	Curvaturas dos corpos de prova de 10 mm, granalhas S550, liga AA 7475.	246
C.9	Curvaturas dos corpos de prova de 10 mm, granalhas 1/8", liga AA 7050.	247
C.10	Curvaturas dos corpos de prova de 10 mm, granalhas 1/8", liga AA 7475.	248
C.11	Curvaturas dos corpos de prova de 15 mm, granalhas 1/8", liga AA 7050.	249
C.12	Curvaturas dos corpos de prova de 15 mm, granalhas 1/8", liga AA 7475.	250

1 Introdução

1.1 Visão geral

O alumínio é um dos metais mais abundantes na crosta terrestre e sua obtenção comercialmente viável foi desenvolvida independentemente por Heroult, na França, e por Hall, nos EUA, em 1886. Desde então, o alumínio despertou grande interesse e seu uso tem crescido sempre, devido à sua baixa densidade e ampla faixa de propriedades físicas, mecânicas, elétricas e térmicas.

Na indústria aeronáutica, o uso do alumínio começou com o surgimento na Alemanha do DURALUMIN, da série 2xxx, envelhecível naturalmente, e a busca por ligas mais resistentes e de menor densidade, que possibilitem o projeto de estruturas mais leves e com maior tolerância ao dano, tem sido o foco das atenções.

Atualmente, as ligas de alumínio mais utilizadas em aviões comerciais são as ligas Al-Cu, Al-Li e Al-Zn, das séries 2xxx, 7xxx e 8xxx. Entre elas, destacam-se as ligas 7050 e 7475, usadas no revestimento da fuselagem, painéis e armações da fuselagem, revestimento inferior da asa e empenagem (cauda)^[1].

Estruturas de aviões, como são submetidas a cargas variáveis e cíclicas por tempos prolongados, sofrem com problemas de fadiga. Como se sabe, a fratura por fadiga inicia-se na superfície do material sob tensões de tração^[2], portanto, esforços no sentido de minimizar as tensões de tração na superfície são essenciais.^[3]

Os métodos convencionais de conformação de materiais – estampagem, forjamento etc. – têm a desvantagem de deixar a peça conformada com tensões superficiais de tração, que diminuem a vida em fadiga do material. O método tradicional de fabricação de asas de aviões é a usinagem do perfil a partir de uma chapa grossa. Este método, além de demandar tempo, equipamento e mão de obra em grande quantidade, gera uma enorme quantidade de sucata (menos de 10% da chapa é aproveitada).

Nos anos 1940, trabalhando na Lockheed Aircraft Corporation, na Califórnia, o engenheiro Jim Boerger percebeu que, se uma faixa Almen – corpo de prova de aço SAE 1070 utilizado para medir a intensidade de um processo de jateamento com granalhas (*shot peening*) – curva-se após o jateamento, o mesmo princípio poderia ser utilizado para conformar um painel de asa^[4]. A esse processo de conformação por jateamento com granalhas deu-se o nome de *peen forming*.

Tornar o processo de conformação por jateamento reprodutível 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 Instituto de Pesquisas Tecnológicas uma metodologia para o projeto de experimentos focalizados nos dois tópicos principais: variáveis de processo e características do material jateado.

Neste trabalho, 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 utilizados para o treinamento de uma rede neural artificial, visando um método eficiente para previsão de deformação.

A seguir, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os principais pontos abordados neste trabalho.

1.2 Alumínio e Ligas de Alumínio

1.2.1 Introdução Geral

Alumínio é o segundo elemento metálico mais abundante na terra e tornou-se um competidor econômico em aplicações de engenharia no final do século 19. O crescimento da produção e uso do novo metal foi impulsionado pelas demandas de características e propriedades de materiais utilizados na indústria.

As primeiras aplicações comerciais do alumínio foram itens nobres, como molduras de espelhos, números de casas e bandejas. Utensílios de culinária, como panelas e assadeiras também foram um grande mercado inicial. Em tempo, o alumínio cresceu em diversidade de aplicações ao ponto que virtualmente qualquer aspecto da vida moderna possa ser direta ou indiretamente afetado pelo seu uso.

Na indústria automobilística, os componentes de alumínio representam, em média, 8,6% do peso total dos veículos ^[5]. Na indústria aeronáutica, cerca de 70% da estrutura dos aviões é composta de alumínio ^[6].

Hoje, os Estados Unidos e o Canadá são os maiores produtores mundiais de alumínio. Entretanto, nenhum deles possui jazidas de bauxita em seu território, dependendo exclusivamente da importação. O Brasil tem a terceira maior reserva do minério no mundo, localizada na região amazônica, perdendo apenas para Austrália e Guiné ^[7].

1.2.1.1 Ligas de Alumínio

É conveniente dividir as composições das ligas de alumínio em duas categorias principais, segundo sua utilização: composições para fundição e composições para ligas trabalháveis. Uma diferenciação posterior para cada categoria é baseada no mecanismo primário de desenvolvimento de propriedades.

O sistema da Aluminum Association é largamente reconhecido no Brasil e Estados Unidos, como também no restante do mundo. Esse sistema de identificação de ligas emprega nomenclaturas diferentes para ligas trabalháveis e fundidas, mas também divide as ligas em famílias, para simplificação. Para ligas trabalháveis, é usado um sistema de quatro dígitos para produzir uma lista de famílias de composições como segue ^[8]:

1xxx Alumínio comercialmente puro, usado principalmente nas indústrias elé-

trica e química.

2xxx Ligas nas quais o cobre é o principal elemento ligante, além de outros elementos, como o magnésio, principalmente. As ligas da série 2xxx são bastante usadas na aeronáutica.

3xxx Ligas nas quais o manganês é o principal elemento ligante. Usada como ligas de uso geral para aplicações arquitetônicas e vários produtos.

4xxx Ligas nas quais o silício é o principal elemento ligante. Usado em varetas de solda e folha de brasagem.

5xxx Ligas nas quais o magnésio é o principal elemento ligante. Usado em cascos de barcos, pranchas e outros produtos expostos a ambientes marítimos.

6xxx Ligas nas quais o magnésio e o silício são os principais elementos ligantes. Geralmente usadas para extrusão.

7xxx Ligas nas quais o zinco é o principal elemento ligante, mas outros elementos como cobre, magnésio, cromo e zircônio podem ser especificados. Usado em estruturas aeronáuticas e outras aplicações de alta resistência.

8xxx Ligas que incluem algumas composições com estanho e lítio, caracterizando composições diversas.

9xxx Reservado para uso futuro.

Muitas ligas respondem a tratamentos térmicos baseados em solubilidades de fases. Esses tratamentos incluem solubilização, têmpera (resfriamento rápido) e precipitação ou envelhecimento. Essas ligas são denominadas ligas de alumínio tratáveis termicamente. Algumas ligas, usualmente nas séries 2xxx, 6xxx e 7xxx, são tratáveis por solubilização - aquecimento e têmpera. Elas podem ser fortalecidas futuramente por trabalho a frio – deformação controlada a temperatura ambiente.

Ligas de alumínio não-tratáveis termicamente são endurecidas por trabalho a frio, mas não por tratamento térmico. A resistência inicial dessas ligas, geralmente nas séries 1xxx, 3xxx, 4xxx e 5xxx, é gerada pelo efeito endurecedor dos seus elementos de liga. Fortalecimento adicional pode ser criado por trabalho a frio, induzindo endurecimento por deformação, conhecido por têmpera H.

O sistema de designação de têmperas utilizado para alumínio e ligas de alumínio é usado para todas as formas de produto (tanto trabalháveis como fundidas), com a exceção de lingotes. O sistema é baseado nas sequências de tratamentos térmicos e mecânicos, ou ambos, usados para produzir as várias têmperas. A designação de tempera segue a designação da liga e é separada dela por um hífen. Designações básicas de tempera consistem em simples letras maiúsculas. Maiores subdivisões de têmperas básicas, quando requeridas, são indicadas por um ou mais dígitos seguindo a letra.

T, tratada termicamente, aplica-se a ligas cuja resistência seja estável dentro de alguns meses, se forem solubilizadas. O "T" é sempre seguido por um numeral de 1 a 10, cada um indicando uma sequência específica de tratamentos básicos.^[8, 9]

- T1 = Conformado em alta temperatura e envelhecido naturalmente.
- T2 = Conformado em alta temperatura, resfriado, deformado a frio e envelhecido naturalmente.
- T3 = solubilizado, trabalhado a frio e envelhecido naturalmente.
- T4 = solubilizado e envelhecido naturalmente.
- T5 = Conformado em alta temperatura e envelhecido artificialmente.
- T6 = Solubilizado e envelhecido artificialmente.
- T7 = Solubilizado e estabilizado.
- T8 = Solubilizado, deformado a frio e envelhecido artificialmente.
- T9 = Solubilizado, envelhecido artificialmente e trabalhado a frio.
- T10 = Conformado em alta temperatura, resfriado, trabalhado a frio e envelhecido artificialmente.

Outros algarismos diferentes de zero podem ser adicionados para indicar uma variação de tratamento que altere significativamente as propriedades do produto.^[9]

Nos aviões, as ligas tradicionais utilizadas para fabricação do revestimento das partes inferior e superior da asa, respectivamente, são 7050-T7451 e 7475-T7351. Essas têmperas significam que o material foi solubilizado, submetido a alívio de tensão por estiramento e super envelhecido.

As principais preocupações na metalurgia física das ligas de alumínio incluem os efeitos da composição, trabalho mecânico e/ou tratamento térmico nas propriedades mecânicas e físicas. Em termos de propriedades, o aumento da resistência é um objetivo principal no desenvolvimento de ligas de alumínio porque a baixa resistência do alumínio puro (cerca de 10 MPa de limite de escoamento na condição recozida) limita a sua utilidade comercial.^[8]

1.2.1.2 Fases nas Ligas de Alumínio

Os elementos que são mais comumente presentes nas ligas de alumínio comerciais para promover aumento de resistência – particularmente quando acoplados a encruamento por trabalho a frio ou tratamento térmico, ou ambos – são o cobre, magnésio, manganês, silício e zinco.

Para esses elementos, em concentrações abaixo dos limites de solubilidade, os elementos de liga estão essencialmente em solução sólida e constituem uma única fase. No entanto, não se conhece nenhum elemento que tenha completa miscibilidade com o alumínio no estado sólido.

Quando a quantidade de um elemento ligante excede o limite de solubilidade no sólido, o elemento ligante produz constituintes microestruturais de "segunda fase", que podem ser o elemento ligante puro ou uma fase de composto intermetálico.^[8]

As partículas de segunda fase são divididas em quatro classes baseadas no modo de formação e nas suas habilidades de serem dissolvidas: partículas primárias, constituintes, dispersóides e precipitados.

As partículas primárias são chamadas assim pois são as primeiras a se solidificarem, antes do alumínio. Aparecem em ligas hipereutéticas, durante a solidificação, e em ligas trabalháveis, por reações peritéticas (Al_7Cr , Al_3Ti ou Al_3Zr).

Partículas constituintes são compostos intermetálicos formados em reações eutéticas durante a solidificação e têm uma interface não coerente com a matriz. Elas podem servir como sítios de nucleação de grãos recristalizados. Não causam aumento de resistência, por não interagirem com as discordâncias, porém são geralmente prejudiciais para a resistência à fadiga e tenacidade à fratura de ligas de alta resistência. Nas ligas 7x50, as partículas constituintes mais comuns são $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$, Mg_2Si e Al_2CuMg e, nas ligas 7x75, são $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$, $\text{Al}_{12}(\text{Fe,Mn})_3\text{Si}$, $\text{Al}_6(\text{Fe,Mn})$, Mg_2Si , SiO_2 e $\text{Al}_{23}\text{CuFe}_4$. Elas são

insolúveis ou parcialmente solúveis.

Dispersóides são finas distribuições de precipitados muito pequenos, sub-micrométricas (de menos de 1 μm de tamanho), formados tanto durante a solidificação quanto durante o pré-aquecimento do lingote. Eles podem impedir ou atrasar a recristalização estática durante o processamento, por atuarem como bloqueio mecânico à movimentação dos contornos de grão. As ligas 7x50 possuem como dispersóide o Al_3Zr , que é coerente com a matriz e mais efetivo que os dispersóides incoerentes, como o $\text{Al}_{12}\text{Mg}_2\text{Cr}$, encontrado nas ligas 7x75.^[10-12]

Além das partículas de segunda fase, interferem nas propriedades físicas e mecânicas das ligas de alumínio as inclusões, porosidades, estrutura de grãos e de discordâncias e textura cristalográfica.^[10]

Consequentemente, o projeto de ligas de alumínio resistentes a danos, como são 7475 e 7050, tem sido baseado primariamente no controle da microestrutura pela composição e processo de fabricação.

1.2.1.3 Microestrutura das Ligas de Alumínio Trabalháveis

As ligas de alumínio trabalháveis são produzidas convencionalmente a partir de lingotes fundidos, e todos os processos mecânicos e térmicos subsequentes representam graus variados de mudança na estrutura bruta de fundição. As modificações são relativamente menores para formas grandes trabalhadas, como forjados, chapas grossas e extrudados pesados que são trabalhados a quente. Elas tornam-se maiores ao passo em que a redução total da área transversal aumente por trabalho a quente ou frio e enquanto é aumentada a frequência de tratamentos térmicos, como recozimento e solubilização.

Cada classe de ligas de alumínio representa um tipo diferente de microestrutura por causa das diferenças dos elementos de liga. Nas ligas 7xxx (alumínio-zinco), o zinco, sozinho, é altamente solúvel no alumínio e não exerce influência apreciável na microestrutura de uma liga simples. No entanto, a classe de ligas encontrada mais frequentemente contém magnésio e cobre, assim como aditivos como o cromo, manganês ou zircônio, e os sempre presentes ferro e silício. Na forma de lingotes, a liga 7075 forma um ou mais variantes do $(\text{Fe,Cr})_3\text{SiAl}_{12}$, Mg_2Si , e um eutético pseudobinário constituído de alumínio e MgZn_2 . Esta última fase contém alumínio + cobre como um substituto para o zinco e pode ser escrita como $\text{Mg}(\text{Zn,Cu,Al})_2$. Aque-

cimento subsequente causa a transformação das fases ricas em ferro em $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$. O Mg_2Si é relativamente insolúvel e tende um pouco a esferoidizar; o $\text{Mg}(\text{Zn},\text{Cu},\text{Al})_2$ rapidamente começa a dissolver-se, e ao mesmo tempo há precipitação de Al_2CuMg , o que requer altas temperaturas e encharque lento para dissolver-se completamente. O cromo é precipitado da solução supersaturada como um dispersóide $\text{Cr}_2\text{Mg}_3\text{Al}_{18}$, bastante concentrado nas regiões dendríticas primárias. Uma liga trabalhada bem solubilizada contém apenas $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$, $(\text{Fe},\text{Cr})_3\text{SiAl}_{12}$ e Mg_2Si junto com o dispersóide.

Grãos recristalizados são extremamente alongados ou achatados devido ao bandeamento dos dispersóides, e não raro são encontradas regiões não recristalizadas, mesmo em chapas finas. As regiões não recristalizadas são constituídas de subgrãos muito finos, nos quais os contornos são decorados por precipitados endurecedores. Isto é mais óbvio em estruturas trabalhadas a quente, especialmente nas regiões mais trabalhadas próximas à superfície, onde a deformação acima da deformação crítica pode ter causado formação de grãos recristalizados grosseiros. Os dispersóides inibem a recristalização e a formação rápida de estruturas finas de subgrãos. O ZrAl_3 é coerente com a matriz, e tem efeitos similares.

O recozimento em ligas tratáveis termicamente tem um propósito duplo: 1. A remoção do trabalho a frio residual equivalente; e 2. A precipitação de soluto da solução sólida. Este último é conseguido por um esfriamento lento controlado e resulta em uma distribuição aleatória de precipitados. A presença dessa precipitação densa torna a estrutura de grãos de ligas com tempera O difícil de revelar. Outras ligas 7xxx de alta e moderada resistência representam variantes da 7075. ^[8]

1.2.2 Ligas AA 7050-T7451 e AA 7475-T7351

A composição das ligas AA 7050 (ISO Al Zn6CuMgZr) e AA 7475 (ISO Al Zn5.5MgCu(A)), juntamente com as propriedades mecânicas, é mostrada na Tabela 1.1.

A liga 7050, com teor mais alto de cobre e zinco em relação à liga 7475, tem mais Al_2CuMg a ser dissolvido na temperatura de solubilização ^[8]. A microestrutura típica após tempera de ambas consiste de grãos alongados e achatados, alinhados na direção de laminação ^[6, 13]. Ligas mais diluídas podem facilmente dissolver todas as fases ricas em zinco. Sinais de supera-

quecimento em ligas 7xxx são geralmente relacionadas a regiões segregadas com concentrações não usuais de Al_2CuMg . No diagrama de equilíbrio de fases, a linha *solidus* – entre as fases líquida e sólida – é inferior à faixa de temperaturas de solubilização, ou seja, os precipitados são insolúveis na fase sólida.^[8, 14]

As Figuras 1.1^[15] e 1.2^[6] mostram, respectivamente, a microestrutura típica das ligas de alumínio 7050-T7451 e 7475-T7351 utilizadas neste trabalho.

Figura 1.1: Microestrutura típica da liga 7050-T7451.^[15]

Figura 1.2: Microestrutura típica da liga 7475-T7351.^[6]

O envelhecimento das ligas de alumínio 7050, 7075, 7175 e 7475 de qualquer têmpera para as séries de têmperas T73 e T76 requer controles mais apertados que o normal das variáveis como tempo, temperatura, taxa de aquecimento e assim por diante, para cada item dado. Além disso, quando o material em uma têmpera T6 é re-envelhecido para outra têmpera T73 ou T76, as condições específicas do material T6 são extremamente importantes e afetarão a capacidade do material re-envelhecido ser conformado às requisições especificadas para as têmperas T73 ou T76^[14].

A designação de têmpera Tx51 serve para alívio de tensões por estiramento e aplica-se especificamente para chapas grossas, bastões e barras laminadas e acabadas a frio, para forjados (em matriz fechada ou anel) e para anéis laminados. Esses produtos não recebem endireitamento posterior após o estiramento.^[16]

Tabela 1.1: Dados de propriedades dos materiais disponíveis para as ligas de alumínio 7050 e 7475.^[6, 17-20]

Propriedade	Liga AA7050-T7451 (ISO Zn6CuMgZr UNS A7050)		Liga AA7475-T7351 (ISO Zn5.5MgCu(A) UNS A97475)	
Especificações	AMS 4050 MEP 02-014		AMS 4202 MEP 02-013	
Composição	Alumínio	Balanco	Alumínio	Balanco
	Cobre	2 - 2,6	Cobre	1,2 - 1,9
	Cromo	0,04 max	Cromo	0,18 - 0,25
	Ferro	0,15 max	Ferro	0,12 max
	Magnésio	1,9 - 2,6	Magnésio	1,9 - 2,6
	Manganês	0,1 max	Manganês	0,06 max
	Silício	0,12 max	Silício	0,1 max
	Titânio	0,06 max	Titânio	0,06 max
	Zinco	5,7 - 6,7	Zinco	5,2 - 6,2
	Zircônio	0,08 - 0,15	Zircônio	-
Vantagens	Alta tolerância ao dano.		Alta resistência à compressão (flambagem).	
Aplicação	Comumente usada em aeronaves em painéis integrais superiores.		Comumente usada em aeronaves em painéis integrais inferiores.	
Dados Físicos	ρ (g/cm ³)	2,83	ρ (g/cm ³)	2,81
	σ_e (MPa)	469	σ_e (MPa)	421
	σ_R (MPa)	524	σ_R (MPa)	496
	ϵ (%)	11,0	ϵ (%)	13,0
	E (GPa)	71,7	E (GPa)	71,7
	T _{Fusão} (°C)	488-629	T _{Fusão} (°C)	477-635
	T _{Recoz.} (°C)	413	T _{Recoz.} (°C)	413
	T _{Solub.} (°C)	477	T _{Solub.} (°C)	516
	T _{Envelh.} (°C)	121-177	T _{Envelh.} (°C)	121-177
	Dureza	162 HV	Dureza	155 HV

ρ =Densidade; σ_e =Limite de escoamento; σ_R =Limite de resistência; ϵ =alongamento; E=módulo de elasticidade.

1.3 Conformação por jateamento com granalhas

Em poucas palavras, a 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 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*.

1.3.1 O Processo de jateamento

Shot peening pode ser definido como um tratamento superficial a frio promovido por impactos controlados de granalhas. Essas esferas são projetadas em altas velocidades a fim de trabalhar (deformar) a frio a superfície do material, com o objetivo de gerar uma camada superficial com tensões compressivas que aumente a resistência à fadiga do material. Esse tratamento pode aumentar em até 300% a vida em fadiga de um componente.^[3]

A resposta do material a múltiplos impactos por projéteis é uma função complexa das propriedades físicas do alvo e do projétil. Quando projéteis esféricos duros atingem um alvo de um material elástico/plástico (Figura 1.3a) e a velocidade de impacto é suficientemente alta, o material do alvo sofre deformação plástica local e, como repercussão (Figura 1.3b), o resto do material elástico tende a empurrar a zona plasticamente deformada, resultando em tensões de compressão paralelas à superfície. A principal preocupação no processo de jateamento é controlar a magnitude e distribuição dessas tensões residuais^[21, 22].

O impacto das granalhas causa deformação plástica com alongamento lateral e distorção de grão e, sob a recuperação elástica, o alvo adquire uma camada rasa de tensões residuais superficiais de compressão, abaixo da qual ele desenvolve tensões menores de tração de equilíbrio (Figura 1.4)^[21].

Figura 1.3: Efeito do impacto da granelha na distribuição de tensões: a) no momento do impacto; b) imediatamente após o impacto.^[22]

Chapas finas (até 20 mm) normalmente curvam para cima (face jateada convexa), mas blocos espessos são muito resilientes para mostrar qualquer curvatura detectável. Materiais duros produzem um pico de tensão residual abaixo da superfície (Figura 1.5)^[22], enquanto materiais mais moles têm a máxima tensão compressiva na superfície. No processo de *shot peening*, a magnitude das tensões residuais de compressão na camada superficial, até a profundidade em que a deformação plástica se estende, tem um papel crucial na fadiga e na corrosão sob tensão, de modo que o ajuste dos parâmetros físicos do processo deve focar-se em prever ou controlar corretamente a distribuição de tensões residuais desejada^[21].

Brown^[23] investigou as vantagens em redução de peso, em resistência mecânica e à corrosão e em custos para determinar a possibilidade de substituir o aço estrutural convencional por ligas de alumínio mais leves na indústria naval. Markovina^[22, 24] mostrou que a tecnologia da conformação por jateamento com granelhas pode ser adaptada com sucesso à produção de partes estruturais de navios, particularmente dos navios de alta e super alta velocidades, que utilizam materiais leves, similar àqueles de aeronaves.

Figura 1.4: Diagramas de tensões indicando carregamento e tensões em chapas sem (topo) e com (meio) *shot peening*. Embaixo, o efeito do jateamento durante carregamento em flexão ^[3].

Figura 1.5: Distribuição de tensões residuais em um painel conformado por jateamento de granalhas. ^[22]

1.3.1.1 Histórico

O processo de conformação por jateamento com granalhas foi patenteado pela Lockheed Aircraft Corporation, em Burbank, Califórnia no final da década de 1940. O engenheiro Jim Boerger e sua equipe, trabalhando com uma tira

Almen, supuseram que, se uma curvatura podia ser induzida em uma tira Almen, então ela poderia ser induzida em um painel de asa. Várias amostras de painel foram processadas e foi provado que, por jateamento em um dos lados, pode-se certamente induzir uma curvatura razoável.

Os primeiros painéis de asa em tamanho real foram selecionados, mas foram consideravelmente distorcidos devido à falta de conhecimento da manufatura em painéis reforçados integralmente. Felizmente, foi possível trazê-los de volta a uma forma razoavelmente plana; trabalhos subsequentes provaram que a curvatura aerodinâmica requerida poderia ser produzida.

A Lockheed Corporation garantiu uma licença livre de *royalties* para o processo e ultimamente, desde que a patente expirou, as empresas Boeing, McDonnell Douglas, British Aerospace e subsequentemente Airbus, assim como a Embraer, empregaram esse processo como a técnica de manufatura mais rentável para induzir curvaturas em painéis aerodinâmicos complexos totalmente usinados ^[4].

1.3.2 Tecnologia do processo

Desde 1968, o uso da técnica de jateamento com granalhas (JCG^[25]) para curvar asas de aeronaves tem aumentado, de modo que a maioria das aeronaves médias a grandes produzidas no mundo hoje utilizam esse processo. A conformação por JCG classifica-se como um dos maiores avanços na tecnologia de manufatura de aeronaves. Ela não apenas substitui métodos de conformação mais caros e que geram mais resíduos (p.e. usinagem, estampagem, forjamento), como também conforma mais facilmente asas cônicas e esculpidas, permitindo que o projeto de asas maximize a razão resistência por peso.

A conformação por JCG não pode formar todas as formas concebíveis; o projeto da asa da aeronave deve ser compatível com o JCG. O processo é capaz de produzir apenas curvaturas suaves com controle acurado. Ele é vantajoso quando aplicado entre os reforços principais, porque intensidades de jateamento controladas e facilmente produzidas podem formar essa combinação de partes relativamente espessas, porém levemente curvadas.^[26]

Embora o jato de granalhas possa variar em uma larga escala de intensidades (p.e. escala Almen N, A e C), a máxima espessura de alumínio que pode ser conformada com segurança é limitada pelas intensidades de jateamento.

mento que não causem dano superficial^[26], o que favoreceria a nucleação de trincas superficiais durante o trabalho. Há alguns padrões que especificam essas máximas intensidades que não prejudicam a vida em fadiga do componente^[3].

No processo de conformação por jateamento com granalhas, há três métodos usados para criar curvaturas em painéis (Figura 1.6). Primeiramente, o curvamento pode ser atingido com o jateamento em apenas uma superfície (1.6a). Neste caso, a compressão da superfície pela esfera alonga o metal, causando a mudança no formato do painel. A limitação desse método de conformação é que ele está apenas no alcance elástico que o movimento pode realizar-se, e portanto apenas pequenas curvaturas são alcançadas. Para obter maiores graus de curvatura, é usado o jateamento sob tensão, no qual o componente é mantido em uma condição pré-tensionada unidirecional e então é jateado na superfície tracionada (1.6b). Isso significa que quando o componente é liberado dessa condição tracionada após o jateamento, a tensão compressiva é maior em uma direção que na outra, e é maior na direção da curvatura formada pelo processo de pré-tensão. O terceiro método de conformação é por jateamento na periferia de ambos os lados de uma região de metal ao mesmo tempo (1.6c). Isso fornece alongamento do componente causado pelo material esticado nas duas faces, superando a resistência à deformação elástica exercida pelo núcleo.^[4]

Figura 1.6: Métodos de conformação por JCG^[4].

JCG pode ser utilizado não apenas para formar painéis com um dado formato a partir de uma peça original do material que esteja plano, mas também

pode ser usado para criar materiais planos a partir de um componente que tenha sido distorcido durante a manufatura ou tratamento térmico, esticando-se o material no lado côncavo do componente distorcido.

O processo é normalmente realizado dentro de um recinto fechado, por máquinas automáticas. Quando são requeridas tolerâncias pequenas, alguma conformação pode ser realizada manualmente por técnicos habilidosos.

São usados dois tipos básicos de máquinas, diferindo apenas em como o meio conformador é transmitido para a parte sendo formada: em máquinas do tipo bocal, usa-se ar comprimido ou a gravidade para impulsionar as granalhas sobre a peça trabalhada. Jateamento com roda centrífuga é outro método pelo qual as esferas podem ser arremessadas: essas máquinas usam controles eletrônicos para regular as velocidades de rotação de uma roda de palhetas, que acelera as esferas em direção à peça ^[4].

A Figura 1.7 resume os princípios do método de conformação por jateamento com granalhas.^[22]

Figura 1.7: O princípio do método de conformação por jateamento com granalhas^[22].

1.3.2.1 Medidas de intensidade

No tratamento de *shot peening* visa-se tanto reproduzir uma intensidade de jateamento previamente estabelecida como induzir um nível de intensidade de tensões residuais específico. É necessário considerar-se qual o real parâmetro que está envolvido no monitoramento das intensidades de jateamento.

O método da tira Almen foi patenteado^[27] por John O. Almen em 1944 e consiste em uma tira de aço SAE 1070 fixada sobre um aparato (Figura 1.8) que é submetido ao JCG. É um método semi-quantitativo largamente usado para especificar a intensidade do jateamento. Uma tira Almen desenvolve uma

camada comprimida na superfície jateada. Quando o material é esticado, a tira curva-se relativamente à direção do jateamento em um grau que varia com a intensidade do jato, tamanho de granalha utilizada e porcentagem da área superficial indentada pelas granalhas (cobertura). Consequentemente, com a conformação por JCG, o mesmo método se aplica e, com o uso de diferentes parâmetros, várias formas podem ser alcançadas. Geralmente, para fins de conformação de chapas, utilizam-se esferas de aço fundido para alcançar a alta deformação requerida, porém outros meios, como arames cortados, vidro, cerâmica etc podem ser usados para uma conformação com menor demanda [4].

As intensidades de jateamentos são classificadas em três tipos e, para cada tipo é utilizada uma espessura diferente de tira de aço para o teste Almen. O tipo "A" é predominantemente usado para jateamentos com granalhas fundidas ou arame cortado. As tiras do tipo "N" são usadas usualmente para granalhas de vidro e cerâmica e medem intensidades menores que o tipo "A". As do tipo "C" são usadas para os jateamentos mais severos. As espessuras das tiras (em polegadas) são indicadas na Figura 1.8.

Figura 1.8: Esquema do teste da tira Almen. À esquerda, a tira Almen sendo jateada. À direita, a altura do arco sendo medida. Acima, as espessuras A, N e C utilizadas nos ensaios.

Uma camada de material comprimido é induzida pelo JCG com um momento fletor correspondente que é resistido enquanto a tira jateada é mantida plana. Na liberação da tira, esse momento fletor não é mais resistido e a tira dobra em um arco para acomodar um balanceamento de momentos fletores, configurando um novo padrão de tensões residuais. Ambos os componentes

curvam a faixa na mesma direção de curvatura, então o que se tem é uma curvatura total composta de dois elementos. Essencialmente, quando a "intensidade" do jateamento aumenta, a curvatura de uma tira Almen aumenta.

A causa essencial da curvatura é o trabalho sendo realizado na faixa pelas partículas do jato que tiveram que ser aceleradas a uma velocidade alta o suficiente para causar deformação plástica na superfície da peça.

O trabalho total sobre a faixa, τ , pode ser expresso pela seguinte equação:

$$\tau = \sum_0^t p_j \cdot \frac{1}{2} \cdot m_j \cdot v_j^2 \cdot n \cdot dt \quad (1.1)$$

onde p_j = proporção de energia cinética, $\frac{1}{2} \cdot m_j \cdot v_j^2$, absorvida pela faixa quando é atingida por uma esfera individual, j , das n partículas que atingem a faixa em um intervalo de tempo, dt , dentro do tempo total de jateamento, t , e m_j é a massa da esfera j , viajando à velocidade v_j .

A Equação 1.1 resume os problemas que são associados a um controle efetivo do jateamento. A proporção da energia absorvida de 1 partícula variará de acordo com fatores como ângulo de impacto na superfície da peça e as características do material da superfície. A massa de cada partícula variará dentro de uma faixa de diâmetros permitidos para uma determinada categoria de granalhas. A norma SAE J444^[28] especifica diâmetros de granalhas em frações de polegadas (p.e. S780 = $\oslash$ = 0,0780 in = 1,9812 mm). A velocidade das esferas variará de acordo com as características físicas e mecânicas do equipamento de jateamento. Finalmente, a taxa de distribuição de partículas, (vazão de granalhas), não permanecerá constante.

A medida de intensidade Almen tem vantagens e desvantagens. A grande vantagem da medida Almen é que ela integra os fatores relevantes sobre o tempo total de jateamento. Além disso, o método de medição e o equipamento usado são claramente definidos e facilmente acessíveis. O amplo uso dos valores de intensidade Almen é outra vantagem. A maior desvantagem da medida Almen é que ela é retrospectiva, no sentido que ela olha para trás para o trabalho total que foi realizado. De um ponto de vista de pesquisa, pode ser desejável conhecer todas as variáveis separadamente. A medida de deflexões não dá indicações sobre as variações durante o jateamento e não diferencia se foram utilizadas granalhas pequenas com alta velocidade ou granalhas grandes com baixa velocidade.^[29, 30] Por esta razão, não será utilizada a medida de intensidade Almen neste trabalho, que tem a intenção

de analisar os parâmetros de jateamento e seus efeitos separadamente.

O desenvolvimento de uma intensidade total de jateamento pode apenas ser avaliado usando uma série de medidores expostos por diferentes períodos de tempo à mesma taxa de intensidade nominal. Um método interativo poderia avaliar o trabalho sendo realizado durante o processo de jateamento, o que permitiria então que os procedimentos de controle disponíveis fossem ativados durante o processo para garantir que uma intensidade de jateamento desejada seja obtida^[30].

1.3.2.2 Controle dos parâmetros

A maior desvantagem do JCG é que esse processo é muito difícil de ser controlado^[31, 32]. A razão é que muitas variáveis podem afetar a curvatura gerada pelo jateamento, como o diâmetro da gralha, a velocidade de impacto, a porcentagem de cobertura das impressões, o ângulo de impacto, o material das gralhas e das chapas. Segundo Zeng^[31], é um processo feito a esmo, devido ao impacto de um grande número de pequenas gralhas contra a superfície de um componente metálico. Em geral, a definição dos parâmetros ótimos de processo para a obtenção da forma desejada tem se baseado no método de tentativa e erro^[32]. A experiência dos operadores exerce um papel de grande importância.

Alguns esforços foram feitos no sentido de observar o efeito da intensidade (I) do jato de gralhas. Entretanto, geralmente observam-se como resultados as tensões residuais e sua distribuição em amostras submetidas a jateamento como tratamento superficial (*shot peening*) e como método de conformação (*peen forming*)^[2, 25, 33–36]. Em número menor, há também autores que investigaram o efeito de I na forma final dos componentes jateados^[34, 37–39].

Há poucas informações sobre trabalhos que investiguem especificamente um dos parâmetros de processo e seu efeito na deformação e nas tensões residuais de amostras que receberam jateamento com gralhas. Gonzales et al.^[25] fizeram uma modelagem computacional do processo de JCG empregando o método dos elementos finitos (MEF) e chegaram à conclusão, entre outras, que, com relação à variação de espessura das chapas, não houve uma diferença significativa no que se refere aos valores de tensões residuais obtidos.

Wang, Platts e Levers^[40] calcularam a forma final da curvatura através de

MEF variando a velocidade de impacto das granalhas e obtiveram boa comprovação experimental. Zeng^[31] calculou tensões residuais para diferentes diâmetros de granalha, velocidades de impacto e coberturas.

É usual envolver-se todos os elementos do jateamento, representados pela intensidade do jato, e aproximar-se o efeito do impacto de granalhas na superfície à deformação e tensão residual gerados por gradientes de temperatura, baseando-se em elementos de casca. Essa aproximação dá uma boa noção do resultado final, mas não gera bom conhecimento sobre detalhes do processo.

Não há trabalhos que observem, numérica e empiricamente, cada parâmetro de processo e seus efeitos na deformação de chapas conformadas por jateamento de granalhas.

1.3.3 Camada deformada plasticamente

O processo de JCG corresponde essencialmente a um mecanismo de endurecimento superficial por deformação plástica localizada, no qual cada esfera de material duro, arremessada sobre a superfície de uma chapa dútil, atua de forma semelhante ao impacto de um minúsculo martelo, provocando uma pequena ondulação de contorno aproximadamente circular (indentação ou endentação). Para que esta ondulação se forme, é necessário que ocorra uma deformação plástica por escoamento da superfície da chapa. Abaixo da superfície submetida a um estiramento, os grãos comprimidos tendem a restabelecer a forma original, criando uma região hemisférica de alta tensão compressiva (Figura 1.3), que é submetida a um encruamento em condições ambientais, ou seja, "a frio". Uma sequência de impactos adjacentes e sobrepostos provoca o aparecimento de um campo de tensões compressivas, atuando numa camada aproximadamente uniforme.^[34, 41]

lida^[33] estudou a formação da indentação e da camada deformada produzidas pelo jateamento com granalhas de aço (0,2 %C). Segundo seu trabalho, quando uma esfera de diâmetro D atinge uma superfície com velocidade v , a indentação formada tem um diâmetro d que pode ser calculado por

$$d = K_d \cdot D \cdot v^{1/2} \quad (1.2)$$

onde K_d é constante para a dureza do material. Similarmente, a profundidade

h da indentação deixada na superfície pode ser calculada por

$$h = K_h \cdot D \cdot v \quad (1.3)$$

onde K_h é constante para a dureza do material.

O efeito do ângulo do impacto é a diminuição do diâmetro e profundidade da indentação, porque tanto a forma quanto a intensidade do impacto são produzidos apenas pela componente da velocidade normal à superfície jateada ($v \cdot \sin \alpha$, onde α é o ângulo entre a direção de jateamento e a superfície jateada).

A partir de diversos experimentos com materiais de dureza Vickers 100-400, foram obtidos valores de K_d e K_h . K_d^2 e K_h são proporcionais à dureza Vickers (HV) da superfície, como mostra a Figura 1.9. Desse modo, podem-se obter equações para d e h de indentações produzidas por impactos de esferas duras em diversos materiais de dureza conhecida.

Figura 1.9: Relações entre K_d^2 , K_h e a dureza Vickers da amostra ^[33].

A partir das equações de diâmetro e altura da indentação, pode-se calcular o seu volume ^[33]:

$$\begin{aligned} V &= K_v \cdot D^3 \cdot v^2 \\ &= K'_v \cdot m \cdot v^2 \\ &= K''_v \cdot E_C \end{aligned} \quad (1.4)$$

onde K_v , K'_v e K''_v são constantes para a dureza do material, m é a massa e E_C é a energia cinética das esferas.

lida fez as seguintes afirmações sobre a formação da indentação e da camada deformada plasticamente:

1. Produzindo-se uma indentação por impacto de uma esfera rígida no aço, a zona abaixo dela pode ser afetada pelo fluxo plástico.
2. A camada afetada pelo impacto pode ser visualizada no aço com o reagente de Fry e tem cerca de oitenta vezes o volume da calota esférica da indentação.
3. A repetição de impactos em um mesmo local aumenta apenas ligeiramente o volume da camada deformada.
4. A camada deformada é simétrica e diminui com o aumento do ângulo de impacto, assim como a indentação.

Experimentalmente, foi possível determinar fórmulas para a espessura h' e volume V' da camada deformada:

$$h' = K_1 \cdot D \cdot (v \sin \alpha)^{2/3} \cdot N^{1/40} \quad (1.5)$$

$$V' = K_2 \cdot D^3 \cdot (v \sin \alpha)^2 \cdot N^{3/40} \quad (1.6)$$

onde N é o número de repetições de impactos no mesmo local, $v \sin \alpha$ é a componente normal da velocidade, D é o diâmetro da esfera e K_1 e K_2 são constantes para o material ^[33].

Analogamente, pode-se relacionar o volume da camada deformada com a energia cinética das esferas, para um dado valor de cobertura (% de área indentada):

$$V' = K_3 \cdot E_C \quad (1.7)$$

1.3.3.1 Medição da camada deformada

A medição da espessura da camada deformada plasticamente pelo jateamento de esferas na superfície de uma chapa curvada tem o objetivo de verificar qual é a fração da estrutura responsável pela forma assumida e que recebe a maior parte da solicitação durante o trabalho, uma vez que o momento fletor ($\bar{M}$) gerado pelas forças (F) de compressão é diretamente proporcional à espessura da camada ($\bar{M} = F \cdot h$).

Alguns métodos para a realização dessa medição são apresentados a seguir:

(a) Metalografia

No alumínio laminado, como os grãos são bastante alongados, a deformação superficial pode ser visualizada de certo modo por metalografia, porém é muito imprecisa a posição da região limite entre material deformado e não-deformado pelo impacto das esferas. A Figura 1.10 mostra a microestrutura da seção transversal de uma chapa de alumínio 7050 jateada por esferas S230 ($\phi = 0,0230 \text{ in} = 0,584 \text{ mm}$), sem pré-tensionamento. Nota-se a deformação dos grãos na superfície, acompanhando as marcas de indentação, porém não é possível saber até onde o material foi realmente afetado pelo jateamento.

Figura 1.10: Microestrutura da seção transversal de uma chapa de alumínio 7050 jateada por esferas S230 ($\phi = 0,0230 \text{ in} = 0,584 \text{ mm}$).

(b) Recristalização

Outro método possível é um tratamento térmico visando a recristalização da região deformada na superfície jateada. Como a recristalização acontece apenas em regiões com alta densidade de discordâncias, ou seja, na região encruada pela deformação plástica superficial, é possível visualizar, em algumas situações, a presença de grãos equiaxiais superficiais, diferentes do material no centro da peça, que tem grãos alongados, como é o caso da Figura 1.11 ^[42].

Essa região de grãos diferenciados pode então ser entendida como a camada deformada plasticamente. Pode ocorrer, entretanto, crescimento de grão nas demais regiões, o que pode atrapalhar as análises. Além disso, em ligas de alumínio com fina dispersão de precipitados (como é o caso das ligas estudadas neste trabalho), a mobilidade dos contornos de grão é prejudicada e a recristalização pode ser inibida.

(c) Perfil de tensões residuais

Figura 1.11: Amostra laminada de alumínio EN AW-1200 mostrando grãos maiores próximos à superfície (espessura total da amostra = 4,5 mm) ^[42].

Sabe-se, como já foi mencionado, que o material submetido ao JCG adquire uma camada superficial deformada plasticamente, a qual, após a recuperação elástica, fica permanentemente submetida a uma tensão residual de compressão.

Al-Hassani^[21] apresentou uma fórmula útil para o cálculo da espessura da zona plástica (h_p):

$$\frac{h_p}{R} = 2,57 \cdot \left(\frac{2}{3}\right)^{1/4} \cdot \left(\frac{\rho V^2}{\bar{p}}\right)^{1/4} \quad (1.8)$$

onde R é o raio da indentação, ρ é a densidade do material do componente conformado, V é a velocidade e $\bar{p} \cong 3\sigma_E$.

A partir de evidências experimentais, o formato da distribuição de tensões residuais pode ser representado por uma função cosseno. Considerando que a tensão é "elástica" – ou seja, $\sigma = -E\epsilon(Z)$, onde E é o módulo de Young – e a deformação em função da profundidade (Z), $\epsilon(Z)$, é

$$\epsilon(Z) = \epsilon_m \cos \pi \left[\frac{Z - \alpha h_p}{2(1 - \alpha)h_p} \right] \quad (1.9)$$

$0 \leq \alpha \leq 1$

A equação mostra que, quando $Z = h_p$, $\epsilon(Z) = \cos \pi/2 = 0$ e $\sigma = 0$, ou seja, a espessura da camada deformada é igual à espessura da camada submetida a tensões residuais de compressão.

Baseando-se nisso, ao se obter um perfil das tensões residuais superficiais em uma chapa submetida ao JCG, a espessura da camada deformada pode ser considerada igual à profundidade em que a tensão residual é

nula.

(d) Image Quality (IQ) em EBSD

A nitidez das linhas de Kikuchi de um ponto de análise por difração de elétrons retroespalhados (EBSD) depende, entre outros fatores, da deformação do reticulado cristalino. Mapas de EBSD podem mostrar e diferenciar regiões com baixo índice de qualidade de imagem (IQ) dentro de uma amostra com regiões deformadas e não-deformadas, como é o caso dos componentes em estudo (ver Seção 1.4.2.1).

Em estudos preliminares^[34], foi possível observar a camada deformada na superfície de duas chapas de alumínio de 3 mm submetidas ao processo de conformação por JCG através da técnica de EBSD (Figuras 1.12 e 1.13).

Figura 1.12: Resultado prévio de medição de camada deformada plasticamente através de EBSD. (a) Figura de pólo inversa (IPF); (b) Qualidade de imagem (IQ). Espessura da camada = 130 μm^[34].

Figura 1.13: Resultado prvio de medio de camada deformada plasticamente atravs de EBSD. (a) Figura de plo inversa (IPF); (b) Qualidade de imagem (IQ). Espessura da camada = 90 μm ^[34].

1.4 Difração de Elétrons Retroespalhados - EBSD

O website da Oxford Instruments ^[43] oferece um tutorial resumido mas bastante abrangente sobre a técnica de análise por difração de elétrons retroespalhados (EBSD - *Electron Backscatter Diffraction*).

1.4.1 Noções básicas de EBSD

Os principais componentes de um sistema de EBSD são (Figura 1.14):

Figura 1.14: A montagem experimental para o EBSD. **a.** Diagrama dos componentes principais de um sistema de EBSD; **b.** Uma fotografia tirada de dentro de uma câmara de MEV, mostrando o arranjo experimental típico para EBSD.

- Uma amostra inclinada de 70° em relação à horizontal.
- Uma tela de fósforo que é fluorescida por elétrons da amostra para formar padrões de difração.
- Uma câmera de vídeo CCD (*charged-couple device*) para visualização dos padrões de difração na tela de fósforo.
- Uma interface em vácuo para a montagem do fósforo e da câmera em uma câmara de microscópio eletrônico de varredura (MEV). A câmera monitora o fósforo por uma tela de vidro de chumbo na interface e o fósforo pode ser retraído para a borda do MEV quando não está em uso.
- Controles eletrônicos para o MEV, incluindo a posição do feixe, distância de trabalho, foco e aumento.

- Um computador para controlar os experimentos de EBSD, analisar os padrões de difração e processar e mostrar os resultados.
- Um detector de elétrons (opcional) montado abaixo da tela de fósforo para os elétrons espalhados pela amostra.

Para o EBSD, um feixe de elétrons é direcionado a um ponto de interesse em uma amostra cristalina inclinada no microscópio eletrônico de varredura (Figura 1.15).

Figura 1.15: Formação do padrão de difração de elétrons retroespalhados. Elétrons de uma fonte divergente incidentes em planos cristalinos no ângulo de Bragg são difratados em um par de cones para formar as bandas de Kikuchi no padrão de difração.

O mecanismo pelo qual os padrões de difração são formados é complexo, mas o modelo seguinte descreve os aspectos principais. Os átomos no material espalham inelasticamente uma fração dos elétrons com uma pequena perda de energia para formar uma fonte divergente de elétrons próxima à superfície da amostra. Alguns desses elétrons incidem em planos atômicos em ângulos que satisfazem a equação de Bragg:

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (1.10)$$

onde n é um inteiro, λ é o comprimento de onda dos elétrons, d é o espaçamento interplanar e θ é o ângulo de incidência dos elétrons no plano de difração. Esses elétrons são difratados e formam uma configuração de cones de alto ângulo pareados, correspondendo a cada plano de difração. Quando usados para formar uma imagem na tela fluorescente, as regiões de intensidade eletrônica reforçada entre os cones produzem as bandas de Kikuchi características do padrão de difração de elétrons retroespalhados (Figura 1.16).

Figura 1.16: Padrão de difração de níquel coletado a uma voltagem de aceleração de 20 kV.

As linhas centrais das bandas de Kikuchi correspondem à projeção dos planos de difração na tela de fósforo. Consequentemente, cada banda de Kikuchi pode ser indexada pelos índices de Miller do plano cristalino difratado que a formou. Cada ponto na tela de fósforo corresponde à intersecção de uma direção cristalina com a tela. Em particular, as intersecções das bandas de Kikuchi correspondem à intersecção de polos cristalinos (ou eixos de zona) com a tela de fósforo. Esses pontos podem ser rotulados pela direção cristalina do polo (Figura 1.17).

Figura 1.17: Relações entre os padrões de difração e o cristal. **a.** Mostra esquematicamente como as características do padrão de difração estão relacionadas à estrutura cristalina; **b.** A indexação dos planos cristalinos mostrados na Figura 1.16. As bandas de Kikuchi estão rotuladas com os índices de Miller dos planos cristalinos que as geraram (vermelho). Os planos projetam-se na tela no centro das bandas. Intersecções de bandas de Kikuchi estão rotuladas com a direção cristalina que encontra a tela nesses pontos (branco). Essas direções são os polos cristalinos dos planos correspondentes às bandas de Kikuchi que se interceptam.

O padrão é uma projeção gnomônica¹ dos cones de elétrons difratados na tela de fósforo. Como o padrão de difração está ligado à estrutura cristalina da amostra, quando a orientação do cristal muda, o padrão de difração resultante também muda. As posições das bandas de Kikuchi podem, portanto, ser utilizadas para calcular a orientação do cristal difratante.

1.4.2 Experimentos de EBSD

Na análise pontual por EBSD, o feixe é posicionado em um ponto de interesse na amostra, um padrão de difração é coletado e a orientação cristalina é calculada. No mapeamento de orientações cristalinas, de acordo com a identificação do padrão de difração, o sistema indexa uma orientação cristalina para o ponto analisado. Através de uma varredura ponto a ponto, com um passo determinado pelo usuário, obtém-se uma matriz com a posição e a orientação cristalina, que posteriormente será analisada pelo software para fornecer uma larga variedade de informações sobre a microestrutura da amostra.^[43, 44]

Os mapas mostrados podem ser baseados nas direções normal (ND), de laminação (RD) e transversal (TD) da amostra. Em cada ponto do mapa, a direção cristalográfica correspondente à direção da amostra em particular é calculada e uma cor é alocada de acordo com a sua posição na figura de polo inversa (Figura 1.18).

Nos mapas de orientação cristalina, um grão é definido pela coleção de *pixels* vizinhos no mapa que tenham uma desorientação menor do que um certo ângulo limite. A distribuição de tamanhos de grãos pode ser medida pelos dados coletados para o mapa. Ainda, pode-se mostrar a distribuição de ângulos de desorientação de contornos de grãos e a distribuição e posição de contornos de grãos especiais.

1.4.2.1 Mapas de qualidade de imagem - IQ

A qualidade de imagem (IQ - *Image Quality*) é uma medida que descreve a qualidade (nitidez) das linhas de um padrão de difração. Um mapa de IQ é construído através do mapeamento do valor de IQ para cada padrão de difração obtido durante uma análise de uma área.^[45]

O IQ pode ser utilizado qualitativamente para avaliar o grau de deformação

¹Projeção gnomônica ou central é a projeção de uma esfera sobre um plano tangente a partir do seu centro.

Figura 1.18: Coloração de mapas de orientação cristalina. **a.** Um ponto de referência na imagem eletrônica é circulado em vermelho; **b.** A orientação cristalina nesse ponto é $[2\bar{3}4]$ paralela à direção de laminação da amostra (DL ou RD) e o plano normal $(92\bar{3})$ à direção normal (DN ou ND); **c.** As direções cristalinas paralelas a DN, DL e DT plotadas em uma figura de polo inversa. A figura de polo inversa é colorida com uma mistura de vermelhos, verdes e azuis, dependendo da posição do triângulo estereográfico; **d.** O ponto correspondente no mapa de orientação DN colorido de acordo com a chave de cores da figura de polo inversa.

do material.^[44] O cálculo da qualidade de imagem IQ é:

$$IQ = \sum_{i=1}^3 h_i / (3\sigma_h) \quad (1.11)$$

onde h_i é a altura do pico na transformada de Hough² da i -ésima banda de Kikuchi mais intensa e σ_h é o desvio padrão da transformada de Hough.

Mapas de IQ podem ser coloridos ou em tons de cinza e geralmente revelam alguns detalhes invisíveis à imagem eletrônica, como grãos, contornos de grãos e danos superficiais, como riscos (Figura 1.19).

²A transformada de Hough é uma transformação necessária para que as linhas de difração sejam representadas como pontos, facilitando o armazenamento de dados e os cálculos necessários para construção de mapas de orientação.^[44]

Figura 1.19: Mapa de qualidade de imagem mostrando contornos de grão e o contraste de IQ entre grãos de orientações cristalinas diferentes.

A difusividade ou qualidade do padrão de difração é influenciado por um número de fatores, incluindo condições do feixe de elétrons, deformação, perfeição cristalina local, preparação da amostra, contaminação da superfície e a fase e orientação sendo analisadas. Por causa desses fatores e outros, o contraste observado em mapas construídos usando o parâmetro IQ podem surgir da deformação, contornos de grão, fase, topologia superficial e/ou outras características da microestrutura^[45].

Em um mapa de IQ realizado em amostra cuja superfície tenha sido trabalhada a frio, como no caso do JCG, as regiões de grãos deformados terão menor qualidade de imagem do que regiões com grãos recristalizados, tornando possível a visualização e medição da espessura da camada deformada plasticamente.

1.4.3 Preparação da amostra

O ponto crítico de uma análise EBSD é o polimento da amostra. Os padrões de EBSD são formados em uma profundidade de 10-50 nm, e qualquer deformação superficial residual introduzida durante a preparação deve ser minimizada nessa região, para maximizar a qualidade do padrão.^[46] Além disso, a superfície deve estar livre de filmes óxidos, manchas e outras contaminações superficiais. Embora a uma análise por microscopia óptica ou microscopia eletrônica com elétrons secundários a superfície pareça estar perfeitamente polida, o EBSD detecta riscos, deformações, principalmente em materiais de preparação difícil, como alumínio, magnésio e algumas substâncias cerâmicas.

Há diversas referências que citam inúmeras maneiras de preparar uma amostra de alumínio para observação em EBSD:

1. Polimento mecânico

A descrição do preparo inclui, quando necessário: método de corte, material de embutimento, lixamento e polimento.

- (a)
 - Embutimento em baquelite
 - Corte com disco diamantado
 - Polimento com pasta de diamante até 1 μm
 - Sílica coloidal^[47]
- (b)
 - Embutimento em baquelite
 - Lixamento com SiC #100, #220, #320, #400 e #600
 - Polimento com pasta de diamante 6 μm , 3 μm e 1 μm
 - Sílica coloidal 1 μm por 2 horas.
- (c)
 - Corte com disco diamantado
 - Embutimento em resina de cura a frio Struers EPOFIX[®]
 - Lixamento com SiC #180, #220, #400 e #600
 - Polimento com líquido para polimento de não ferrosos, de marca comercial Brasso^{®3} em pano para polimento típico para abrasivos de 3 μm
 - Polimento com diamante em suspensão de 1 μm
 - Sílica coloidal^[48]
- (d)
 - Corte com disco abrasivo
 - Embutimento em baquelite
 - Lixamento com SiC #220, #400 e #800 (Struers)[®]
 - Polimento com Pasta de Polir nº2, sem lubrificação, em pano DPmol, da Struers[®].
 - Polimento com sílica coloidal azul, da Struers[®], em Minimet, por 10 minutos.

2. Polimento Eletroquímico

A descrição do preparo inclui, quando necessário: composição da solução, temperatura da solução, voltagem aplicada e tempo de exposição.

³O mesmo produto pode ser encontrado sob as marcas Brasso[®], Silvo[®], Kaol[®] e Polibril[®].
Composição: querosene, álcool, oleína, bentonita, sílica e amônia

- (a)
 - $\frac{1}{3}$ HNO_3
 - $\frac{2}{3}$ metanol
 - 25 V
 - $-30\text{ }^\circ\text{C}$ ^[49]
- (b)
 - 5% HClO_4
 - 95% metanol
 - 10 V
 - $-20\text{ }^\circ\text{C}$ ^[50]
- (c)
 - 80% etanol
 - 14% água destilada
 - 6% HClO_4
 - 16-20 V
 - 20-30 s ^[51]
- (d)
 - 700 mL etanol
 - 120 mL água destilada
 - 100 mL butil glicol
 - 68 mL HClO_4
 - 40 V
 - 10 s ^[52]
- (e)
 - 6 mL HClO_4
 - 35 mL 2-butoxietanol (Butil Celossolve) ou etilenoglicol mono-butílic éter ($\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}_2$)
 - 59 mL metanol
 - $1,2\text{ A/cm}^2$
 - 40 s ^[53]

1.5 Medição de Tensões Residuais por Difração de Raios-X

1.5.1 Introdução

O conhecimento da distribuição de tensões residuais na região próxima à superfície de um componente submetido a carregamentos cíclicos, como asas de aviões, é crítico para uma estimativa correta da sua vida em serviço. O dano por fadiga origina-se tipicamente na superfície, onde normalmente são alcançadas as maiores tensões de tração ^[2]. Em componentes submetidos a tratamentos superficiais, as tensões residuais na superfície interferem na vida em fadiga, suavizando ou acentuando as tensões durante o carregamento (Seção 1.3.2).

O processo de jateamento com granalhas – e a conformação por jateamento com granalhas – foi desenvolvido com a função de induzir na superfície tensões residuais de compressão, devido ao esforço exercido pelo material abaixo da superfície deformada plasticamente pelos impactos das esferas em recuperar a posição inicial antes da conformação ^[21]. Tais tensões causam uma alteração no espaçamento interplanar dos grãos do material constituinte, do seu valor livre de tensões para um novo valor correspondente à magnitude da tensão aplicada, assumindo-se uma distorção linear elástica do reticulado cristalino ^[54, 55].

A análise de tensões residuais por difração de raios-X é uma técnica não-destrutiva baseada na avaliação das distâncias interplanares em amostras deformadas ao longo de diferentes orientações ^[2]. O tipo de análise tratada aqui é a macroscópica, ou medição de macrotensões, a qual é realizada sobre regiões grandes, relativamente ao tamanho dos grãos do material. No caso de microtensões, as alterações observadas são alargamento dos picos de difração, devido a defeitos cristalinos gerados pela deformação ^[55].

O Apêndice A descreve o método de cálculo das tensões residuais através da análise por difração de raios-X.

1.5.2 Perfis de Tensões Residuais

Devido à penetração limitada dos raios-X em materiais metálicos, a técnica é bem-sucedida para avaliações de tensões residuais na região superficial,

tipicamente de 10-40 μm (dependendo da absorção do material e do comprimento de onda do raio-X). A avaliação de tensões em profundidade não é simples, mas pode ser obtida pelo desbaste progressivo da amostra (a técnica torna-se destrutiva) e coleta de padrões de difração após cada passo de remoção de material. Os dados coletados devem ser corrigidos, por algoritmos numéricos, para contabilizar o relaxamento de tensões devido à remoção de camadas^[2].

As tensões residuais de compressão na região próxima à superfície devem ser balanceadas por tensões residuais de tração no volume do componente. No entanto, há ainda um debate sobre se as tensões residuais são constantes na região do núcleo (linha cheia na figura 1.20) ou estão concentradas em uma camada relativamente fina adjacente à camada diretamente influenciada pelo procedimento de shot peening (linha tracejada na figura 1.20)^[36].

Figura 1.20: Representação esquemática dos perfis de tensões residuais que podem ser esperados após o shot peening; x_0 denota a profundidade da camada que está diretamente afetada pelo procedimento de shot peening^[36].

Segundo H. Wohlfahrt^[35], em materiais de baixa dureza, a máxima magnitude de tensão residual fica localizada na superfície, enquanto em materiais de média dureza o maior valor de tensão localiza-se abaixo da superfície jateada.

Em 1958, Moore e Evans^[56] propuseram uma equação para a correção matemática de tensões em remoção de camadas em análise por difração de raios-X que é utilizada até hoje^[57]:

$$\sigma(z_i) = \sigma_m(z_i) + 2 \int_{z_i}^H \frac{\sigma_m(z) dz}{z} - 6z_i \int_{z_i}^H \frac{\sigma_m(z) dz}{z^2} \quad (1.12)$$

onde:

- $\sigma(z_i)$ é a tensão corrigida na profundidade z_i ;
- $\sigma_m(z_i)$ é a tensão medida na profundidade z_i ;
- $\sigma_m(z)$ é a função de ajuste dos pontos medidos;
- H é a espessura inicial da chapa.

1.5.2.1 Perfis de Tensões Residuais após JCG

Wick et al.^[58] estudaram o efeito dos parâmetros de jateamento (pressão do jato, fluxo de massa, dureza e tamanho das esferas) nas características superficiais em amostras de 2 mm de espessura do aço AISI 4140 com diferentes tratamentos térmicos, com dureza entre HV 230 e HV 660. As camadas superficiais foram caracterizadas em termos da distribuição de tensões residuais determinadas por difração de raios-X. A Figura 1.21 mostra três perfis de tensões residuais no aço na condição temperada, para diferentes pressões de jato.

Figura 1.21: Perfis de tensões residuais determinados por difração de raios-X para diferentes pressões de jateamento em aço AISI 4140 temperado. (Extraído de Wick et al., 1999^[58])

Menig et al.^[36] utilizaram as mesmas amostras que Wick et al. para determinar os perfis de tensões residuais por difração de nêutrons. A Figura 1.22 mostra uma comparação entre os perfis obtidos por difração de raios-X e por

difração de nêutrons, nas direções σ_{11} e σ_{33} , em uma amostra temperada e revenida.

Figura 1.22: Comparação dos perfis de tensões residuais observados por nêutrons e raios-X após remoção eletrolítica de camadas em um aço AISI 4140 jateado com granalhas, na condição temperada e revenida. (Extraído de Menig et al., 2001^[36])

Wohlfahrt^[35] revisou diversos trabalhos sobre perfis de tensões residuais em diferentes materiais e comparou o efeito das condições de jateamento e das características do material na distribuição e magnitude das tensões. Chegou à conclusão que, comparando-se materiais de maior dureza com materiais menos duros, a profundidade e diâmetro das indentações tornam-se menores e, portanto, como a força de impacto é a mesma, a pressão (força/área) devida ao impacto das granalhas, bem como a tensão de cisalhamento máxima, tornam-se maiores. Em outras palavras, com uma dureza maior, menos energia é consumida para a deformação plástica das camadas superficiais do material jateado, e mais energia está disponível para deformação plástica nas camadas mais profundas. Portanto, maior deformação plástica pode ocorrer em camadas mais profundas e um máximo de tensões residuais compressivas de magnitude superior pode ser produzido – mesmo com uma pressão de jato menor.

Zeng^[31] utilizou a simulação pelo método de elementos finitos (MEF) para calcular a deformação, o perfil de tensões residuais e a camada deformada plasticamente, variando-se a velocidade de impacto (Figura 1.23) e o diâmetro das granalhas (Figura 1.24).

Figura 1.23: Perfil de tensões residuais calculado pelo MEF para diferentes diâmetros de granalha (velocidade=60 m/s). (Extraído de Zeng, 2002^[31])

Figura 1.24: Perfil de tensões residuais calculado pelo MEF para diferentes velocidades de impacto das granalhas ($d=1,2\text{mm}$). (Extraído de Zeng, 2002^[31])

1.6 Previsão de deformação

A conformação por jateamento com granalhas (JCG) é um processo comercial viável, apesar do fato de ser pouco entendido e ser comumente citado como "*black art*", pois a geração de uma rotina de jateamentos envolve a mistura (às vezes considerável) de experiências com componentes similares e então um pouco de tentativa e erro.

Grasty e Andrew^[37] buscaram, através de simulações com elementos finitos, fornecer entendimento e, conseqüentemente, previsibilidade para o processo, para melhorar a prática nas aplicações atuais e estender a variedade de aplicações potenciais. Algumas afirmações foram admitidas:

- Na prática, os parâmetros tamanho, densidade, velocidade e cobertura não são definidos separadamente com absoluta precisão;
- A velocidade é difícil de ser definida *ab initio* em uma máquina de jato de ar, porque depende do design do bocal e varia com o fluxo de massa;
- A ordem e o padrão de formação da cobertura também têm um efeito significativo na forma final.

Após os cálculos, foram feitos experimentos em condições similares às simulações, para comparação dos resultados. A correspondência da previsão com os experimentos trouxe confiança de que o modelo utilizado e a análise por EF associada são representações razoáveis da prática.

Han, Owen e Peric^[38], por causa da demanda irrealista de recursos em termos de memória e tempos de processamento para as simulações numéricas diretas de processos práticos de JCG, propuseram uma estratégia de dois estágios combinados de elementos finitos/discretos e solução explícita/implícita. Um perfil de tensões residuais/deformação é inicialmente identificado simulando o jateamento de uma pequena região da peça com análise dinâmica explícita. A deformação final e a distribuição de tensões da peça inteira são então obtidos introduzindo os perfis de tensões residuais como condições iniciais na subsequente solução implícita estática.

A aplicabilidade da metodologia foi ilustrada através do ensaio de JCG de uma tira de teste e os resultados numéricos tiveram boa acórdância com os resultados experimentais. Os benefícios diretos da estratégia proposta são que ela resulta em modelos de elementos finitos/discretos de tamanho aceitável,

o que permite que problemas práticos de JCG sejam simulados com custos computacionais razoáveis. Além disso, o procedimento de solução não recai em nenhum empiricismo, com todos os dados fornecidos sendo baseados em quantidades fisicamente relacionadas.

Kittel et al.^[39] apresentaram uma ferramenta de jateamento e medição em tempo real e seu sistema de controle que calcula os parâmetros reais, juntamente com resultados das primeiras aplicações. Eles descreveram como é possível obter componentes com curvaturas convexas exatas com medidas em tempo real do contorno e adaptação assistida por computador das operações de jateamento subsequentes. No entanto, para estimar quais parâmetros de jateamento teriam um efeito ótimo na conformação, algumas pequenas amostras de teste foram jateadas antes da série de testes reais com diferentes combinações de fluxo de massa, velocidade de impacto e massa por unidade de área. Os resultados – curvatura em função dos parâmetros de jateamento – desses pré-testes foram alimentados no banco de dados dos experimentos seguintes. Após os experimentos com o novo equipamento, foram obtidas tolerâncias dimensionais de 0,2 mm.

1.6.1 Redes neurais artificiais

Uma Rede Neural Artificial (RNA) – *Artificial Neural Network (ANN)* – é um modelo de processamento de informações inspirado na maneira com que os sistemas nervosos biológicos, como o cérebro, processam informações. O elemento chave desse modelo é a curiosa estrutura do sistema de processamento de informações, que é composta de um grande número de elementos de processamento (neurônios) altamente interconectados e trabalhando em uníssono para resolver problemas específicos^[59].

Esse campo amplo e multidisciplinar tem três bases de interesse de trabalho:

Biologia A tarefa de entender como o cérebro funciona é um dos grandes problemas não-solucionados pela ciência. Alguns modelos de redes neurais têm a motivação de iluminar o modo com que cálculos e a memória são realizados pelo cérebro.

Engenharia Muitos pesquisadores gostariam de criar máquinas que pudessem 'aprender', realizar 'reconhecimento de padrões' ou 'descobrir padrões em dados'.

Sistemas complexos Uma terceira motivação para se estudar redes neurais é que elas são sistemas adaptativos complexos cujas propriedades são interessantes por si mesmas.^[60]

RNAs, como as pessoas, aprendem por exemplos. Uma RNA é configurada para uma aplicação específica, como um reconhecimento de padrões ou classificação de dados, através de um processo de aprendizagem. A aprendizagem, tanto nos sistemas biológicos como nas redes neurais artificiais, envolve ajustes nas conexões sinápticas que existem entre os neurônios^[59].

Os algoritmos de redes neurais podem ser grosseiramente divididos em duas classes: **supervisionadas** e **não-supervisionadas**. Neste trabalho, utilizou-se uma rede neural supervisionada, onde os dados são dados na forma de *inputs* e *targets* ou alvos, que são como uma especificação de um professor sobre qual a resposta que a rede neural deve dar aos *inputs*.

A ideia central das redes neurais supervisionadas é a seguinte: Dados exemplos de uma relação entre um vetor de entrada (*input*) $\mathbf{x}$, e um alvo (*target*) t , espera-se fazer com que a rede neural 'aprenda' um modelo de relação entre $\mathbf{x}$ e t . Uma rede neural com treinamento bem-sucedido dará, para qualquer dado $\mathbf{x}$, um valor de saída (*output*) y que é próximo ao alvo t . Treinamento de uma rede envolve buscar no espaço de pesos sinápticos de uma rede um valor de peso $\mathbf{w}$ que produza uma função tal que ajuste bem os dados do treino.^[60]

Um exemplo simples de rede neural é a rede do tipo *feedforward* representada na Figura 1.25. Nesse tipo de rede, cada unidade de processamento recebe certos *inputs*, os agrega e retorna um *output* do tipo:

$$y = \phi \left(\sum_i w_i x_i \right).$$

Os números w_i , denominados pesos sinápticos, são adaptados no processo de aprendizado. A função $\phi(x)$, denominada função de ativação, determina o tipo de unidade de processamento ou "neurônio". A função de ativação pode ser de vários tipos, a depender do objetivo da rede neural. Alguns tipos são: função sigmoideal, função linear, etc. O *output* de cada neurônio é direcionado como *input* aos que estão diretamente ligados a ele como nós filhos na rede. O aprendizado se dá através de exemplos de *inputs* com seus respectivos *outputs* corretos, adaptando-se os pesos sinápticos para que os exemplos sejam reproduzidos com o menor erro possível.

Figura 1.25: Exemplo de rede neural do tipo *feedforward*. Cada seta representa uma conexão sináptica com um certo peso e cada nó da rede representa um elemento de processamento que agrega os valores que recebe e produz um valor de saída, que é enviado para o próximo nó. O aprendizado se dá pelo ajuste dos pesos sinápticos para que um certo conjunto de exemplos de pares (*input*, *output*) seja reproduzido com o mínimo erro possível.

A RNA da Figura 1.25 pode ser descrita como uma rede de três camadas totalmente conectadas, perfazendo $(4 * 5) + (5 * 1) = 25$ conexões e contendo: uma camada de entrada com quatro elementos de processamento; uma camada oculta, com cinco elementos de processamento; e uma camada de saída, com 1 elemento de processamento.

Resumindo, as RNA podem ser categorizadas por sua topologia, isto é, pelo número de camadas, de elementos de processamento e de conexões; pelas características de seus elementos de processamento; e pelas leis de aprendizagem a que foram submetidas.^[61]

1.6.1.1 Aplicações na indústria

Redes neurais artificiais são das mais atrativas técnicas de inteligência artificial, principalmente por se tratar de uma técnica de fácil manuseio para modelamento, estimativa, previsão, diagnóstico e controle adaptativo em sistemas complexos não lineares.

Campana e Plaut empregaram o conceito das RNAs ao processo de extrusão de alumínio para prever a temperatura emergente do perfil extrudado a partir dos parâmetros de processo. A conclusão foi que a RNA possibilita prever resultados com erro menor que 1%, viabilizando assim a sua utilização em ambiente industrial^[62, 63].

A vantagem de se utilizar redes neurais adaptativas na indústria é a possibilidade de utilizar um processo auto-ajustável, capaz de obter os exemplos para treinamento durante o próprio processo industrial.

Através de sensores que meçam os resultados obtidos durante a realização do processo com certos parâmetros, similar à simulação feita por Kittel et al.^[39], porém em maior escala, usa-se os próprios resultados como exemplos e, com o passar do tempo, a rede aprende a determinar, com grande precisão, os parâmetros necessários para obter um certo resultado desejado, eliminando o fator humano, o tempo de ajuste de máquinas e cálculos de processo. Esse aprendizado pode ser feito de forma online e automatizada, com poucos exemplos de calibração, uma vez que durante o próprio processo a rede aprenderá a obter o resultado desejado.

2 Resultados Esperados

Tornar o processo de conformação por jateamento com granalhas (JCG) reproduzível e controlável é, sem dúvida, o grande objetivo a ser alcançado para que o mesmo possa ser aplicado de forma segura na indústria aeronáutica. Para tanto, é essencial: 1) desenvolver planos de fabricação baseados em modelos matemáticos capazes de prever deflexões permanentes e tensões residuais elásticas; 2) dispor de instrumentação adequada para monitorar em tempo real as variáveis do processo; 3) dispor de equipamento de jateamento com granalhas que seja capaz de aplicar o plano de fabricação desenvolvido previamente.

Embora tal objetivo venha sendo buscado por diversas instituições usuárias de processos de JCG, observa-se que, a despeito de utilizarem equipamentos CNC, muitas vezes bastante avançados, em geral, os planos de fabricação são desenvolvidos a partir de conhecimentos puramente empíricos, o que os faz assemelharem-se a processos artesanais.

Em setembro de 2008, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) emitiu um relatório^[34] tratando de progressos alcançados em projeto apoiado pelo CTAero/FINEP e desenvolvido por equipes de diversas especialidades do IPT, da Unicamp e da EMBRAER, com apoio também de pesquisadores do Centro Universitário da FEI e da Escola Politécnica da USP. No relatório expõem-se os resultados obtidos pela equipe do IPT durante a realização de bateladas de ensaios de conformação de corpos de prova de ligas de alumínio, bem como modelos de elementos finitos desenvolvidos pela Unicamp para a descrição fenomenológica do referido processo. O conjunto de resultados experimentais obtidos, relacionando as principais variáveis do processo – velocidade de impacto, diâmetro das granalhas, cobertura, pré-tensionamento, curvatura e perfil de tensões residuais – desenvolvidos nos corpos de provas, compõe uma base de informações que permitirão verificar se uma determinada chapa de liga de Al pode ou não ser conformada por meio de jateamento com granalhas, de maneira a apresentar uma dada curvatura estabelecida *a priori*.

2.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é caracterizar amostras de duas ligas de alumínio aeronáuticas que foram jateadas em diferentes condições de processamento, visando a busca de um método eficiente de controle do processo de conformação por jateamento com granalhas (*peen forming*).

Serão observados:

1. Deformação ou encurvamento;
2. Microestrutura das amostras jateadas (microscopia óptica);
3. Perfil de durezas;
4. Recristalização da camada deformada plasticamente;
5. Camada deformada (morfologia e espessura), por EBSD;
6. Tensão residual, por difração de raios-X, em função da profundidade (perfil de tensões residuais) – espessura da camada deformada;
7. Correlação entre o encurvamento e o perfil de tensões residuais;
8. Correlação entre encurvamento, perfil de tensões ou camada deformada e condições de processo;
9. Correlação empírica ou semi-empírica entre variáveis do processo e encurvamento;
10. Previsão de curvatura através de redes neurais artificiais.

3 Materiais e Métodos

3.1 Confecção dos corpos de prova

Os corpos de prova utilizados nos experimentos consistem de placas planas sem reforçadores, usinadas a partir de blocos de ligas Al 7050-T7451 e Al 7475-T7351. As duas ligas são comumente utilizadas para a fabricação de painéis integrais de asas de aviões superiores e inferiores, respectivamente, e são, em alguns casos, empregadas em processos de conformação por jateamento com granalhas.

Com o propósito de se abranger toda a gama de espessuras típicas de painéis submetidos a esse processo, foram confeccionados corpos de prova com largura de 50 mm, comprimento de 400 mm e espessuras de 2 mm, 5 mm, 10 mm e 15 mm (Figura 3.1). Em aviões, a máxima espessura de uma chapa de alumínio que se utiliza é de 6 mm.

Figura 3.1: Modelos dos corpos de prova jateados. Comprimento: 400 mm; Largura: 50 mm; Espessuras: 2 mm, 5 mm, 10 mm e 15 mm.

3.2 *Conformação por Jateamento com Granalhas*

Os jateamentos foram feitos em uma máquina (Figura 3.2) projetada e construída pela empresa Brasibrás Tratamento de Metais Ltda., a partir de especificação técnica fornecida pela equipe do IPT, com as seguintes características:

(a) Vista exterior, mostrando o gabinete com reservatório e o compressor.

(b) Vista interior, mostrando bocal de jateamento e sistema de fixação da chapa.

Figura 3.2: Máquina utilizada para o JCG.

- Gabinete em chapa de aço carbono, dentro do qual se localiza uma base rotativa acionada manualmente e que serve de suporte a uma mesa XY (cursos $X = Y = 700\text{mm}$) acionada por dois servomotores;
- Sistema contínuo de reciclagem do abrasivo¹;
- Sistema pneumático de emissão do jato de granalhas composto por filtro separador de umidade, válvula reguladora de pressão, manômetro de 0 a 200 psi, mangueira de 1/2", válvula dosadora de abrasivo, bocal modelo venturi de 3/8" fabricado em carboneto de tungstênio, válvulas de pressurização e despressurização de 1", válvulas de segurança, válvula silenciadora pneumática e filtro de granalha;
- Compressor volumétrico de parafusos (fabricado pela MPL Marlins Ltda.)

¹As granalhas são coletadas após o jateamento em um reservatório e ficam disponíveis para a continuação do processo, sem peneiramento ou seleção de granalhas fraturadas. Para evitar utilização de granalhas deterioradas pelo uso, estas foram trocadas periodicamente.

conectado a uma câmara reguladora de pressão para controle da velocidade do jato de granalhas;

- Vaso pressurizado com reservatório de 100 litros;
- *Driver* programável para controle de servomotor;
- Controlador multi-eixo, composto por *hub* para comunicação com até 4 *drivers* controladores dos servomotores e *software* para comando simultâneo desses *drivers*.

Almeida, Martins e Fleury^[64], a partir dos parâmetros das distribuições de impactos, dos diâmetros de impressão e do modelo de cálculo de cobertura baseado na equação de Avrami², definiram as trajetórias necessárias à obtenção de coberturas aproximadamente homogêneas requeridas em cada experimento. Devido à facilidade de geração, utilizou-se sequência de trajetórias restritas a linhas retas paralelas, como mostra a Figura 3.3.^[34]

Figura 3.3: Esquema da trajetória do bocal para obtenção de cobertura homogênea. (Extraído de Almeida, Martins e Fleury, 2008^[64])

Um dispositivo para aplicação de carga estática distribuída uniformemente sobre a superfície dos corpos de prova submetidos aos ensaios de peen forming foi projetado e construído no IPT, de forma a atender às especificações básicas apresentadas na Figura 3.4.^[34]

A partir do esquema geométrico simplificado dos ensaios, determinaram-se as formas de 4 cabeçotes de aplicação de carga requeridos para a aplicação de carga aproximadamente uniforme sobre os corpos de prova de espessuras 2 mm, 5 mm, 10 mm e 15 mm fabricados nas ligas Al 7050-T7451

²Equação de Avrami: $y = 1 - \exp(k \cdot t^n)$, k e n constantes.

Figura 3.4: Esquema geométrico de imposição de carga estática aos corpos de prova. (Extraído do relatório do projeto IPT/Unicamp/Embraer/FINEP^[34])

e Al 7475-T7351. Para tanto, adotou-se um modelo de viga bi-apoiado sujeita a carregamento distribuído segundo forma trapezoidal, tal que no centro da placa a tensão fosse da ordem de 90% da tensão de escoamento do material.

Feitas as considerações anteriores, calcularam-se os esforços solicitantes sobre a “viga” e, em decorrência, determinaram-se as curvas elásticas para cada um dos 4 casos. Uma vez que os cabeçotes impõem o pré-carregamento aos corpos de prova por meio de força de contacto, utilizaram-se as coordenadas definidoras das linhas elásticas calculadas como referência para a fabricação dos perfis dos 4 cabeçotes utilizados nos ensaios de peen forming, associando-os, cada qual, a seu respectivo tipo de corpo de prova. A Figura 3.2b mostra um corpo de prova de 2 mm carregado no dispositivo de pré-tensão dentro da máquina de ensaios.^[34]

3.2.1 Matriz de experimentos em JCG

Para que o processo de conformação de chapas de alumínio por JCG seja controlável e reproduzível, promovendo a deformação requerida em um dado ponto da estrutura, é necessário haver uma base de dados experimentais que englobe todas as variáveis significativas de projeto^[34].

A metodologia para o projeto dos experimentos focalizou os dois agentes principais do experimento: processo e corpo de prova. O primeiro deles é influenciado pelas variáveis associadas às características físicas do jato de granalhas e à estratégia de aplicação espaço-temporal do jato à superfície do corpo de prova. O segundo, para que possam ser avaliadas as alterações sofridas, é necessário que se façam medições das variáveis observáveis associadas às deformações permanentes e às tensões residuais, ao mesmo tempo que se controlem as variáveis de controle associadas às características geométricas e de rigidez, às condições de contorno e à distribuição do pré-carregamento estático.

Deste modo, as variáveis observadas foram:

- Variáveis associadas ao corpo de prova:

Liga de alumínio: Duas ligas de alumínio aeronáuticas: 7050-T7451 e 7475-T7351.

Espessura: Quatro espessuras: 2 mm, 5 mm, 10 mm e 15 mm.

- Variáveis associadas ao processo:

Diâmetro de granalhas: Três tipos de granalhas de aço (não especificado) foram utilizadas, com dureza média em torno de 43 HR_C: S230 ($\varnothing \approx 0,0230$ in $\approx 0,584$ mm), S550 ($\varnothing \approx 0,0550$ in $\approx 1,397$ mm) e 1/8" ($\varnothing \approx 0,125$ in $\approx 3,175$ mm).³

Pressão do jato (velocidade de impacto): A vazão em massa de granalha fornecida pelo equipamento de JCG é função da pressão na seção de entrada do bocal. A pressão de ar é controlável por meio de uma válvula reguladora de pressão e, para cada tamanho de granalha, foram utilizadas três valores de pressão (baixa, média e alta): 20, 40 e 60 psi (138, 276 e 414 kPa), para a esfera pequena; 10, 20 e 30 psi (69, 138 e 209 kPa), para a esfera média; 10, 20 e 25 psi (69, 138 e 172 kPa), para a esfera grande.

Pré-tensão: Considerando-se que a aplicação de pré-tensão elástica ao corpo de prova exerce expressiva influência sobre o perfil de tensões residuais resultante da aplicação do jateamento, foram estabelecidas duas condições de pré-carregamento estático do corpo

³Os diâmetros de granalha são especificações de uma média de diâmetros permitidos, selecionados por peneiramentos em malhas de aberturas decrescentes, até uma tolerância especificada pela norma SAE J444^[28, 65].

de prova: livre (carga estática externa nula) e pré-tensionado (conforme descrito anteriormente).

Cobertura: Foram testadas as condições de saturação (200% de cobertura) e não-saturação (60% de cobertura). Por limitações da regulagem do fluxo de granalhas na máquina de jateamento para as esferas pequenas nas pressões escolhidas (uma vez que os testes iniciais foram feitos na condição de saturação), a mínima cobertura possível era maior que 60%. Portanto, foram utilizadas coberturas de 66%, 85% e 92% para as pressões 20 psi, 40 psi e 60 psi, respectivamente.

Para que se obtivesse máxima eficiência no processo de conformação, estabeleceu-se em 90 mm a menor distância entre o bocal e o corpo de prova, para minimizar a variação de ângulos de impacto por volta de 90°.

Para a elaboração da matriz de experimentos, foram considerados todos os fatores citados anteriormente, com a limitação de que a espessura das chapas limita inferior ou superiormente o diâmetro das granalhas. A Tabela 3.1 apresenta as combinações de variáveis requeridas:

Tabela 3.1: Matriz de experimentos.

Espessura CDP	Liga de Al	Diâmetro	Pressão (psi)	Cobertura	Pré-tensão	N° de condições
2mm	7050-T7451 7475-T7351	S230	20	66-85-92%	0	24
			40	200%	90%LE	
			60			
5mm	7050-T7451 7475-T7351	S230 / S550	20 / 10	66-85-92% /	0	48
			40 / 20	60%	90%LE	
			60 / 30	200%		
10mm	7050-T7451 7475-T7351	S550 / 1/8"	10	60%	0	48
			20	200%	90%LE	
			30 / 25			
15mm	7050-T7451 7475-T7351	1/8"	10	60%	0	24
			20	200%	90%LE	
			25			
Total de combinações						144

Para que se possa aferir as incertezas das medições, é necessário que, para cada condição de jateamento, se realize ao menos 3 experimentos, o que gera um número mínimo de 432 ensaios de JCG. Durante a execução

dos ensaios, alguns corpos de prova foram rejeitados e outros foram repetidos mais de 3 vezes, por motivos diversos. O número final de corpos de prova foi 429.

O Apêndice B contém os parâmetros de jateamento de todos os 429 corpos de prova ensaiados.

3.3 Medição de curvatura

Para realizar o levantamento das deflexões das placas conformadas adotou-se o equipamento QM353 acompanhado do software QM Data 200, ambos fornecidos pela Mitutoyo Sul Americana Ltda. Trata-se de uma máquina de medição com movimentação manual que, em virtude de utilizar uma ponta de toque de alta sensibilidade, permite determinar as coordenadas tridimensionais de um ponto com elevada precisão e repetitividade^[34].

O software QM Data 200 permite a programação de rotinas de medições para diversas geometrias de corpos de prova. A rotina que foi utilizada para a medição da curvatura interna⁴ (face não-jateada) dos corpos de prova, após a indicação do plano de referência e as extremidades do CP, calcula a linha central ($Y = 0$ mm) e armazena 9 medições ao longo desta linha, na região central (-100 mm $< X < 100$ mm) (Figura 3.5).

Figura 3.5: Localização dos pontos do corpo de prova para medição de coordenadas.

A saída no computador é semelhante à Figura 3.6 e estes dados foram utilizados para o cálculo do raio de curvatura, r , da seguinte forma:

Os pontos de interesse para o cálculo de curvatura são os que contêm os valores de X e Z , onde X é a distância do ponto ao centro da chapa e Z é a cota. A Tabela 3.2 mostra os valores de interesse para o cálculo.

⁴O fato de a medição ter sido feita na parte interna da chapa não altera os resultados de maneira significativa, pois a espessura da chapa é algumas ordens de grandeza menor do que os raios de curvatura medidos. De fato, a medição da curvatura interna é apenas vantajosa, porque diminui as imprecisões que seriam causadas pela rugosidade da face jateada.

AMOSTRA	338	18-04-08	17:09	
0125	Difer, :	YD	-49,9875	
0126	Difer, :	XD	401,6493	
0127	Coord:	X	-99,9996	
0127	Coord:	Y	0,0019	
0127	Coord:	Z	12,6944	
0128	Coord:	X	-75,0000	
0128	Coord:	Y	-0,0142	
0128	Coord:	Z	11,6487	
0129	Coord:	X	-49,9965	
0129	Coord:	Y	-0,0072	
0129	Coord:	Z	10,8516	
0130	Coord:	X	-24,9865	
0130	Coord:	Y	-0,0196	
0130	Coord:	Z	10,3129	
0131	Coord:	X	0,0111	
0131	Coord:	Y	0,0044	
0131	Coord:	Z	10,0467	
0132	Coord:	X	25,0106	
0132	Coord:	Y	-0,0135	
0132	Coord:	Z	10,0516	
0133	Coord:	X	50,0136	
0133	Coord:	Y	-0,0104	
0133	Coord:	Z	10,3324	
0134	Coord:	X	75,0020	
0134	Coord:	Y	-0,0023	
0134	Coord:	Z	10,8838	
0135	Coord:	X	100,0115	
0135	Coord:	Y	-0,0122	
0135	Coord:	Z	11,6686	

Figura 3.6: Saída do software QM Data 200 para medição de coordenadas.

Tabela 3.2: Valores de interesse para o cálculo da curvatura da chapa medida.

X	Z
-99,9996	12,6944
-75,0000	11,6487
-49,9965	10,8516
-24,9865	10,3129
0,0111	10,0467
25,0106	10,0516
50,0136	10,3324
75,0020	10,8838
100,0115	11,6686

A parábola $X = a + bZ + cZ^2$ de melhor ajuste dos pontos é obtida através do método dos mínimos quadrados, em que se resolve um sistema do tipo

$$\begin{bmatrix} N & SZ & SZ^2 \\ SZ & SZ^2 & SZ^3 \\ SZ^2 & SZ^3 & SZ^4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} SX \\ SZX \\ SZ^2X \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

onde N = número de termos da matriz dos coeficientes (9 pontos); SZ^i = Soma dos valores Z elevados à potência i ; SZ^jX = Soma dos produtos dos valores X e dos valores Z elevados à potência j .

O raio de curvatura r de uma parábola é definido como o raio da circunferência que melhor se ajusta à parábola no seu vértice e é calculado por:

$$r = \frac{(1 + b^2)^{3/2}}{2c} \quad (3.2)$$

Assim, ajustando-se a parábolas todas as coordenadas medidas na máquina, pode-se calcular o raio de curvatura dos corpos de prova.

3.4 Análise microestrutural

As análises microestruturais foram feitas nas amostras embutidas em baquelite, de maneira a se observar a seção longitudinal das chapas. A preparação metalográfica foi feita através de lixamento em lixas d'água de granulometrias 180#, 240#, 360#, 400# e 600#, nesta ordem. O polimento subsequente foi realizado com pastas diamantadas de granulometria 6 μm , 3 μm e 1 μm , nesta ordem, usando-se álcool etílico como lubrificante, e sílica coloidal 1 μm , quando necessário.

Para visualização de precipitados, após o polimento foi utilizado ataque com reagente Keller⁵. Para visualização de estrutura de grãos, após o polimento foi utilizado ataque eletroquímico com reagente de Barker⁶. A diferença de potencial aplicada ao circuito amostra (ânodo) / placa de aço inoxidável (cátodo) manteve-se constante em 20 V. O tempo de permanência no eletrólito foi de 2 minutos.

As microestruturas foram observadas em microscópios ópticos Neophot 30, da Carl Zeiss Jena, um deles equipado com luz polarizada para visualização da estrutura de grãos.

Uma amostra do corpo de prova 206⁷ foi preparada e fotografada no laboratório de metalografia da CBA – Companhia Brasileira do Alumínio, em ocasião em que se trocavam informações a respeito da preparação utilizada por eles para análise por EBSD.

As medidas de microdureza Vickers foram feitas no durômetro de marca Buehler, modelo Micromet 5104, com carga de 200 gf.

A preparação de amostras para EBSD é detalhada na Seção 1.4.3.

⁵2 mL HF (48%), 3 mL HCl (conc), 5 mL HNO₃ (conc), 190 mL H₂O.

⁶4 to 5 mL HBF₄ (48%), 200 mL H₂O.

⁷Condições de jateamento descritas na Tabela B.1.

3.5 Recristalização

Como é dito na Seção 1.3.3.1, é possível em alguns casos visualizar a camada deformada através do tratamento térmico de recristalização.

O primeiro passo desta etapa foi determinar experimentalmente a condição de tratamento térmico (temperatura e tempo de tratamento) ideal para se observar a camada recristalizada superficial.

3.5.1 Tratamentos térmicos

Após as medições de curvatura e deflexão vertical (flecha) dos corpos de prova jateados, confirmou-se que as maiores deformações ocorreram em chapas de 2 mm de espessura, que foram todas jateadas com esferas S230. Dentre esses, foram selecionados 3 CPs com baixa, média e alta deformação, cujas condições são mostradas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Condições de jateamento dos CPs selecionados.

Nº.CP	Liga	Pressão	Pré-tensão	Cobertura	R_{curv}
006	7050	20 psi	Não	66%	927,7 mm
074	7475	20 psi	Sim	66%	450,2 mm
083	7475	60 psi	Sim	92%	261,5 mm

O tempo de tratamento deve envolver a nucleação e o crescimento dos grãos recristalizados. Três possíveis temperaturas foram estimadas para os tratamentos térmicos: 300, 400 e 500°C. Para tentar determinar essas etapas da transformação, para cada temperatura foram definidos tempos diferentes de tratamento, porém de modo que houvesse sempre uma amostra de cada temperatura que permanecesse aquecida por 1 hora, para comparação.

Como controle, foram retiradas amostras das extremidades não jateadas do corpo de prova para que fossem submetidas aos mesmos tratamentos térmicos das amostras retiradas da região jateada, pelo tempo mais longo. Essa precaução é necessária para se verificar se não há possibilidade de haver uma superfície previamente encruada, antes do jateamento, devido à laminação das chapas, o que é muito comum. Extraíu-se também, de cada região, uma amostra que não foi submetida a nenhum tratamento térmico.

A Tabela 3.4 mostra as condições de tratamento térmico e a nomenclatura

utilizada para as amostras, em correspondência com a numeração utilizada para a retirada de amostras do corpo de prova, como mostra a Figura 3.7.

Tabela 3.4: Temperatura e tempo de tratamento para as amostras, conforme posição no CP.

Amostra*	Posição no CP	Temperatura	Tempo (min)
XXX_01	01	300°C	30
XXX_05	05	300°C	60
XXX_09	09	300°C	120
XXX_13	13	300°C	180
XXX_02	02	400°C	30
XXX_06	06	400°C	60
XXX_10	10	400°C	120
XXX_03	03	500°C	15
XXX_07	07	500°C	30
XXX_11	11	500°C	60
XXX_16	16	-	-
XXX_18	18	300°C	60
XXX_20	20	400°C	60
XXX_22	22	500°C	60
XXX_24	24	-	-

* Nomenclatura das amostras: XXX = número do corpo de prova (006, 074 ou 083).

Figura 3.7: Divisões do corpo de prova para obtenção de amostras.

Os tratamentos foram feitos em um forno mufla⁸ e o resfriamento foi feito em água.

⁸Marca EDG, modelo EDG3P-S, com capacidade de 3 L

3.6 EBSD

Como foi dito anteriormente (Seção 1.4.3), o ponto crítico de uma análise EBSD é a preparação da superfície da amostra. Das opções de polimento apresentadas, foram feitas tentativas de obtenção de padrão com as opções 1.a, 1.b, 1.d, 2.a e 2.b. As seções observadas foram as seções longitudinais, conforme o esquema da Figura 3.8.

Figura 3.8: Esquema das seções longitudinal e transversal, em relação às direções de laminação e jateamento de esferas.

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®.

Os corpos de prova que foram analisados (todos com cobertura 200%) e as condições de análise são mostradas na Tabela 3.5:

Tabela 3.5: Corpos de prova e condições de análise por EBSD.

CP	liga	espessura	granalha	velocidade	pré-tensão	posição	passo
090	7050	5 mm	S230	média	não	vertical	1 μm
206	7475	5 mm	S550	alta	sim	horiozntal	1 μm
252	7050	10 mm	S550	alta	sim	vertical	4 μm
371	7050	10 mm	1/8"	média	não	vertical	4 μm

3.7 Perfil de tensões residuais

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 até a saturação – alta cobertura –, nas diversas condições de jateamento, para observação dos efeitos de todas as demais variáveis de processo – espessura da chapa, diâmetro da esfera, pressão ou velocidade de impacto e pré-tensionamento.

A Tabela 3.6 mostra os corpos de prova selecionados e as condições de jateamento a que foram submetidos.

Para as medições de tensões residuais, foi utilizado um difratômetro de raios-X RIGAKU Rint 2000 disponível no Departamento de Caracterização de Materiais do IPEN, com radiação $\text{Cr } K_\alpha$ ($\lambda = 2,291 \text{ \AA}$). O plano cristalográfico do alumínio observado foi (311) ($2\theta = 139,49^\circ$). Nesse plano, o módulo de Young é $E = 70,3 \text{ GPa}$ e o coeficiente de Poisson é $\nu = 0,345$.

A remoção de camadas foi feita com ácido clorídrico concentrado, que proporciona uma taxa de remoção de $10 \text{ }\mu\text{m}$ a cada 20 segundos.

Os perfis foram obtidos até valores de compressão próximos de zero e a equação 1.12 foi usada para corrigir os valores medidos devido ao relaxamento de tensões por remoção de camadas.^[66]

Tabela 3.6: Corpos de prova selecionados para obtenções de perfis de tensões residuais por difração de raios-X.

CP nº	H (mm)	Esfera	Velocidade	Pré-tensão	r (m)
009	2	S230	baixa	não	0,732
008	2	S230	média	não	0,556
100	2	S230	alta	não	0,597
092	5	S230	baixa	não	4,610
090	5	S230	média	não	3,193
038	5	S230	alta	não	2,832
187	5	S550	baixa	não	3,158
179	5	S550	média	não	2,317
193	5	S550	alta	não	2,075
314	10	S550	baixa	não	16,463
286	10	S550	média	não	12,351
255	10	S550	alta	não	13,070
376	10	1/8"	baixa	não	8,298
371	10	1/8"	média	não	5,103
365	10	1/8"	alta	não	4,137
432	15	1/8"	baixa	não	24,136
423	15	1/8"	média	não	13,785
418	15	1/8"	alta	não	14,871
062	2	S230	baixa	sim	0,312
024	2	S230	média	sim	0,257
015	2	S230	alta	sim	0,238
144	5	S230	baixa	sim	2,005
137	5	S230	média	sim	1,526
133	5	S230	alta	sim	1,528
185	5	S550	baixa	sim	1,440
182	5	S550	média	sim	1,092
171	5	S550	alta	sim	0,844
292	10	S550	baixa	sim	5,434
263	10	S550	média	sim	4,822
252	10	S550	alta	sim	5,343
378	10	1/8"	baixa	sim	3,297
370	10	1/8"	média	sim	2,218
364	10	1/8"	alta	sim	1,935
431	15	1/8"	baixa	sim	7,421
420	15	1/8"	média	sim	4,963
413	15	1/8"	alta	sim	5,574

3.8 Redes Neurais Artificiais

Os parâmetros de processo e os valores de curvatura medidos foram utilizados para treinar uma rede neural utilizando o software NeuroSolutions for Excel (Evaluation Mode). 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*).

O software NeuroSolutions possui dois assistentes que ajudam a criar redes neurais baseadas nos dados e especificações fornecidos. Um desses assistentes, o NeuralBuilder (*builder* = construtor), centraliza as especificações de design da rede acerca das arquiteturas de redes neurais específicas que se deseja criar. Algumas das arquiteturas de redes neurais mais comuns incluem:

- MLP – *Multilayer Perceptron* (Perceptron multicamada)
- *Generalized Feedforward* (Pré-alimentação generalizada)
- Modular
- Jordan/Elman
- PCA – *Principal Component Analysis* (Análise de Componente Principal)
- RBF – *Radial Basis Function* (Função Radial de Base)
- GRNN – *General Regression Neural Network* (Rede Neural de Regressão Genérica)
- PNN – *Probabilistic Neural Network* (Rede Neural Probabilística)
- SOM – *Self-Organizing Map* (Mapa Auto-Organizado)
- TLRN – *Time-Lag Recurrent Network* (Rede Recorrente com Atraso)
- *Recurrent Network* (Rede Recorrente)
- *CANFIS Network - Fuzzy Logic* (Rede CANFIS - Lógica difusa)
- SVM – *Support Vector Machine* (Máquina a Vetor de Suporte)

O segundo assistente de construção de redes é chamado NeuralExpert. Ele centraliza a especificação do design acerca do tipo de problema que se

deseja solucionar com a rede neural (Classificação, Previsão, Aproximação de Função ou *Clustering*). Dado o tipo de problema e o tamanho do conjunto de dados, o NeuralExpert seleciona inteligentemente o tamanho e arquitetura da rede neural que vai provavelmente produzir a melhor solução. ^[67]

Esse assistente é ideal para usuários iniciantes e/ou com pouco conhecimento a respeito de RNAs, com interesse basicamente na saída da rede, como é o caso deste trabalho, que não tem a intenção de se aprofundar sobre o assunto. É por isso que ele foi utilizado, com a opção de Aproximação de Função.

Os 429 dados de parâmetros e raio de curvatura passaram por uma seleção prévia para excluir os dados de corpos de prova que tiveram resultado muito diferente dos outros 2 CPs de mesma condição de jateamento⁹. Esses dados destoantes seriam prejudiciais à RNA, pois não são verdadeiros e gerariam um aprendizado equivocado.

Durante o treinamento, notou-se que os corpos de prova com raio de curvatura superiores a 20 m geravam confusão na RNA, que não conseguia lidar com esses valores e acabava diminuindo a qualidade da previsão em CPs com raio de curvatura pequeno. Por esse motivo e, considerando-se também que os aviões não utilizam chapas de alumínio de espessuras de 10 e 15 mm, os CPs com raio de curvatura maior que 20 m foram excluídos.

Os 402 dados restantes foram embaralhados e divididos em três conjuntos:

1. 280 linhas para treinamento da RNA;
2. 60 linhas para validação cruzada durante o treinamento;
3. 62 linhas para teste de aderência do modelo gerado.

Para testar a qualidade da previsão de raio de curvatura gerada pela rede, foram calculados valores para corpos de prova fictícios da liga 7050, de espessura 12 mm, da liga 7475, de espessura 7 mm, e de ambas as ligas, de espessura 4 mm, como se fossem jateados, respectivamente, nas mesmas condições dos corpos de prova de 10 mm, com esferas grandes (1/8"), de 5 mm, com esferas médias (S550), e de 2 mm, com esferas pequenas (S230).

⁹Cada condição de jateamento foi realizada com 3 repetições.

4 Resultados e Discussões

4.1 Microscopia óptica

As Figuras 4.1 e 4.2 mostram a microestrutura de grãos das amostras 006_24 (liga 7050) e 074_24 (liga 7475)¹, que não sofreram jateamento nem tratamento térmico. Os grãos estão bastante alongados devido à laminação das placas e são maiores na amostra da liga 7475.

A microestrutura das amostras possui grãos alongados em toda a espessura da chapa. Nas amostras da região jateada, próximo à superfície notam-se grãos deformados acompanhando as marcas de indentação. Não é possível notar, no entanto, uma região específica que possa ser chamada de "camada deformada". A Figura 4.3 apresenta toda a espessura da amostra 206 (Liga 7475, espessura 5 mm, esfera S550, alta pressão, cobertura 200%, pré-tensionada)², mostrando a face jateada na parte superior e a zona de grãos recristalizados na parte inferior. A Figura 4.4 mostra a seção longitudinal da amostra 206 na borda da face oposta ao jateamento, toda composta de grãos recristalizados. As Figuras 4.5 e 4.6 mostram a mesma amostra, na borda da face jateada, apresentando alguns grãos recristalizados e outros grãos alongados, deformados pela indentação. Não é possível medir a espessura da camada deformada.

O ataque Keller revela apenas os precipitados grosseiros da microestrutura e alguns contornos de grãos. Como é o ataque químico mais simples de ser feito, seria extremamente útil se a camada deformada pudesse ser visualizada e caracterizada através de microscopia óptica com ataque Keller.

A Figura 4.7 mostra a estrutura de precipitados da amostra 074_21, que não sofreu jateamento. Podem-se notar precipitados muito pequenos e alinhados e outros grandes, da ordem de 20 μm . As Figuras 4.8 e 4.9 mostram regiões jateadas, nas amostras 074_15 e 083_14, com deformações superficiais causadas pelas indentações das esferas. É possível verificar, através da disposição dos precipitados finos, que há uma região de 70 a 150 μm abaixo da superfície que acompanha as marcas das indentações, porém não é nítida a divisão entre o que se chamaria de "camada deformada" e o restante da microestrutura.

¹Nomenclatura de amostras na Seção 3.5, pág. 93.

²Parâmetros de jateamento no Apêndice A.

Figura 4.1: Microestrutura da amostra 006_24 (Liga 7050, sem jateamento, sem tratamento térmico). Centro da espessura (seção longitudinal).

Figura 4.2: Microestrutura da amostra 074_24 (Liga 7475, sem jateamento, sem tratamento térmico). Centro da espessura (seção longitudinal).

Figura 4.3: Microestrutura de toda a espessura da amostra 206 (liga 7475, 5 mm, pré-tensionada, S230, 200%) (seção longitudinal). (Cortesia CBA)

Figura 4.4: Microestrutura da amostra 206 (liga 7475, 5 mm, pré-tensionada, S230, 200%), após o jateamento. Superfície não jateada, recristalizada (seção longitudinal). (Cortesia CBA)

Figura 4.5: Microestrutura da amostra 206 (liga 7475, 5 mm, pré-tensionada, S230, 200%), após o jateamento. Superfície jateada, mostrando grãos deformados pelo jateamento (seção longitudinal). (Cortesia CBA)

Figura 4.6: Microestrutura da amostra 206 (liga 7475, 5 mm, pré-tensionada, S230, 200%), após o jateamento. Superfície jateada, mostrando grãos deformados pelo jateamento (seção longitudinal). (Cortesia CBA)

Figura 4.7: Superfície não jateada, observada após ataque Keller (seção longitudinal). Amostra 074_21 (7475, sem TT).

Figura 4.8: Superfície jateada, observada após ataque Keller (seção longitudinal). Amostra 074_15 (7475, 2 mm, pré-tensionada, S230, 20 psi, 66%; sem TT).

Figura 4.9: Superfície jateada, observada após ataque Keller (seção longitudinal). Amostra 083_14 (7475, 2 mm, pré-tensionada, S230, 60 psi, 92%; sem TT).

Em comparação com a microestrutura mostrada na literatura^[68, 69], para as ligas 7050 e 7475, os corpos de prova ensaiados estão dentro da normalidade, em relação ao tamanho dos grãos e à quantidade e distribuição de precipitados. Isso significa que as propriedades mecânicas (dureza, limite de escoamento, fadiga etc) determinadas pela literatura podem ser aplicadas às amostras utilizadas neste trabalho.

A estrutura de precipitados mostrada nas Figuras 4.7, 4.8 e 4.9 coincide com a estrutura apresentada por Ruckert et al.^[69] para a liga 7475, mostrada na Figura 4.10. Os precipitados grosseiros mais comumente encontrados nesta liga são $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$, $\text{Al}_{12}(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{Si}$, $\text{Al}_6(\text{Fe},\text{Mn})$, Mg_2Si , SiO_2 e

Figura 4.10: Micrografia óptica mostrando a microestrutura da liga de alumínio 7475-T7351 nas superfícies longitudinal, transversal e de topo (montagem 3D). (Adaptado de Ruckert et al.^[69])

4.1.1 Perfil de microdureza

Não foi observada variação significativa de microdureza Vickers ao longo da espessura dos corpos de prova jateados, considerando-se a incerteza das medidas. O valor mais baixo de microdureza, com carga de 200 gf, foi 164 ± 5 HV e o valor mais alto foi 198 ± 5 HV, mas não se pode inferir uma relação com a profundidade abaixo da superfície jateada.

A Figura 4.11 mostra o perfil de durezas da superfície até a metade da espessura da amostra 439 (15 mm), submetida ao jateamento de maior intensidade (maior esfera, alta pressão, alta cobertura, pré-tensionada):

Figura 4.11: Perfil de durezas da amostra 439 (7475, espessura 15 mm, esfera 1/8", alta pressão, alta cobertura, pré-tensionada), da superfície até a metade da espessura.

Asquith et al.^[70] realizaram o tratamento de jateamento com granalhas em amostras da liga de alumínio 2024-T7351 com granalhas de tamanho S110, 200% de cobertura e intensidade de 20 AlmenC. A Figura 4.12 mostra o perfil de microdurezas Knoop obtido em amostras como-recebidas (*as-received* – AR) e após o jateamento (*as-received, shot-peened* – AR-SP).

Figura 4.12: Perfil de microdurezas em amostras como-recebidas (*as-received* – AR) e após o jateamento (*as-received, shot-peened* – AR-SP).^[70]

O tratamento de JCG quase dobrou o valor de microdureza Knoop logo abaixo da superfície e manteve-se acima da dureza do material sem jateamento.

mento até cerca de 170 μm de profundidade.

Lee et al.^[71] utilizaram o jateamento com granalhas para aumentar a dureza de zonas afetadas termicamente (ZAT) por soldagem GMAW³ em aços *dual phase* (martensítico-ferrítico). As ZATs são regiões em que o aquecimento gerado pelo processo de soldagem gera alterações, geralmente causando perdas de propriedades mecânicas. A Figura 4.13 mostra o perfil de durezas na superfície jateada, ao longo de uma linha que passa pelo metal de base, pela ZAT e pelo metal de adição. O tratamento de jateamento com granalhas causou uma sensível melhoria na dureza do material, e diminuiu a variação de durezas ao longo da faixa afetada pelo calor.

Figura 4.13: Perfil de durezas na superfície ao longo de uma direção perpendicular à junta soldada de aços *dual phase*.^[71]

No trabalho desenvolvido no IPT^[34], no entanto, não houve sucesso na observação da camada deformada por JCG por perfis de microdureza Vickers, como mostra a Figura 4.14. A amostra analisada foi uma chapa de 5 mm de espessura, da liga 7050-T7451, jateada com granalhas de tamanho S230.

³GMAW = *Gas Metal Arc Welding* (Soldagem por arco elétrico com gás de proteção) - MIG/MAG

Figura 4.14: Perfil de durezas de chapa de alumínio da liga 7050, com 5 mm de espessura, após JCG.^[34]

Esses resultados assemelham-se bastante aos resultados obtidos neste trabalho, levando à conclusão que as características da liga 7050-T7451 tornam mais difícil a obtenção de um perfil de durezas.

Novas medições de durezas e considerações a respeito da sua variação são feitas na Seção 4.2.5, pág. 126.

4.2 Recristalização

Das 45 amostras, entre elas 39 submetidas a aquecimento, 12 apresentaram certa resistência ao ataque eletrolítico com reagente de Barker (estrutura muito deformada), gerando uma camada oxidada sem o contraste necessário para a análise da microestrutura.

As Figuras 4.15 a 4.47 mostram as microestruturas da superfície jateada nas amostras retiradas dos corpos de prova 006 (AA7050, baixa intensidade de jateamento), 074 (AA7475, média intensidade de jateamento) e 083 (AA7475, alta intensidade de jateamento), respectivamente.

A nomenclatura utilizada para as amostras é mostrada na Seção 3.5.

4.2.1 Amostras com baixa intensidade de jateamento

Figura 4.15: Microestrutura da amostra 006_01 após o tratamento térmico (liga 7050, 2 mm, livre, S230, 20 psi, 66%; TT 300°C-30 min).

Figura 4.16: Microestrutura da amostra 006_05 após o tratamento térmico (liga 7050, 2 mm, livre, S230, 20 psi, 66%; TT 300°C-60 min).

Figura 4.17: Microestrutura da amostra 006_02 após o tratamento térmico (liga 7050, 2 mm, livre, S230, 20 psi, 66%; TT 400°C-30 min).

Figura 4.18: Microestrutura da amostra 006_06 após o tratamento térmico (liga 7050, 2 mm, livre, S230, 20 psi, 66%; TT 400°C-60 min).

Figura 4.19: Microestrutura da amostra 006_10 após o tratamento térmico (liga 7050, 2 mm, livre, S230, 20 psi, 66%; TT 400°C-120 min).

Figura 4.20: Microestrutura da amostra 006_03 após o tratamento térmico (liga 7050, 2 mm, livre, S230, 20 psi, 66%; TT 500°C-15 min).

Figura 4.21: Microestrutura da amostra 006_07 após o tratamento térmico (liga 7050, 2 mm, livre, S230, 20 psi, 66%; TT 500°C-30 min).

Figura 4.22: Microestrutura da amostra 006_11 após o tratamento térmico (liga 7050, 2 mm, livre, S230, 20 psi, 66%; TT 500°C-60 min).

Figura 4.23: Microestrutura da amostra 006_16 sem tratamento térmico (liga 7050, 2 mm, livre, S230, 20 psi, 66%).

Figura 4.24: Microestrutura da amostra 006_20 após o tratamento térmico (liga 7050, 2 mm, sem jateamento; TT 400°C-60 min).

Figura 4.25: Microestrutura da amostra 006_22 após o tratamento térmico (liga 7050, 2 mm, sem jateamento; TT 500°C-60 min).

Figura 4.26: Microestrutura da amostra 006_24 sem tratamento térmico (liga 7050, 2 mm, sem jateamento).

4.2.2 Amostras com média intensidade de jateamento

Figura 4.27: Microestrutura da amostra 074_01 após o tratamento térmico (liga 7475, 2 mm, pré-tensionada, S230, 20 psi, 66%; TT 300°C-30 min).

Figura 4.28: Microestrutura da amostra 074_02 após o tratamento térmico (liga 7475, 2 mm, pré-tensionada, S230, 20 psi, 66%; TT 400°C-30 min).

Figura 4.29: Microestrutura da amostra 074_06 após o tratamento térmico (liga 7475, 2 mm, pré-tensionada, S230, 20 psi, 66%; TT 400°C-60 min).

Figura 4.30: Microestrutura da amostra 074_10 após o tratamento térmico (liga 7475, 2 mm, pré-tensionada, S230, 20 psi, 66%; TT 400°C-120 min).

Figura 4.31: Microestrutura da amostra 074_07 após o tratamento térmico (liga 7475, 2 mm, pré-tensionada, S230, 20 psi, 66%; TT 500°C-30 min).

Figura 4.32: Microestrutura da amostra 074_11 após o tratamento térmico (liga 7475, 2 mm, pré-tensionada, S230, 20 psi, 66%; TT 500°C-60 min).

Figura 4.33: Microestrutura da amostra 074_16 sem tratamento térmico (liga 7475, 2 mm, pré-tensionada, S230, 20 psi, 66%).

Figura 4.34: Microestrutura da amostra 074_20 após o tratamento térmico (liga 7475, 2 mm, sem jateamento; TT 400°C-60 min).

Figura 4.35: Microestrutura da amostra 074_22 após o tratamento térmico (liga 7475, 2 mm, sem jateamento; TT 500°C-60 min).

Figura 4.36: Microestrutura da amostra 074_24 sem tratamento térmico (liga 7475, 2 mm, sem jateamento).

4.2.3 Amostras com alta intensidade de jateamento

Figura 4.37: Microestrutura da amostra 083_01 após o tratamento térmico (liga 7475, 2 mm, pré-tensionada, S230, 60 psi, 92%; TT 300°C-30 min).

Figura 4.38: Microestrutura da amostra 083_02 após o tratamento térmico (liga 7475, 2 mm, pré-tensionada, S230, 60 psi, 92%; TT 400°C-30 min).

Figura 4.39: Microestrutura da amostra 083_06 após o tratamento térmico (liga 7475, 2 mm, pré-tensionada, S230, 60 psi, 92%; TT 400°C-60 min).

Figura 4.40: Microestrutura da amostra 083_10 após o tratamento térmico (liga 7475, 2 mm, pré-tensionada, S230, 60 psi, 92%; TT 400°C-120 min).

Figura 4.41: Microestrutura da amostra 083_03 após o tratamento térmico (liga 7475, 2 mm, pré-tensionada, S230, 60 psi, 92%; TT 500°C-15 min).

Figura 4.42: Microestrutura da amostra 083_07 após o tratamento térmico (liga 7475, 2 mm, pré-tensionada, S230, 60 psi, 92%; TT 500°C-30 min).

Figura 4.43: Microestrutura da amostra 083_11 após o tratamento térmico (liga 7475, 2 mm, pré-tensionada, S230, 60 psi, 92%; TT 500°C-60 min).

Figura 4.44: Microestrutura da amostra 083_16 sem tratamento térmico (liga 7475, 2 mm, pré-tensionada, S230, 60 psi, 92%).

Figura 4.45: Microestrutura da amostra 083_20 após o tratamento térmico (liga 7475, 2 mm, sem jateamento; TT 400°C-60 min).

Figura 4.46: Microestrutura da amostra 083_22 após o tratamento térmico (liga 7475, 2 mm, sem jateamento; TT 500°C-60 min).

Figura 4.47: Microestrutura da amostra 083_24 sem tratamento térmico (liga 7475, 2 mm, sem jateamento).

4.2.4 Discussão

Não foram todas as amostras submetidas a tratamentos térmicos que sofreram recristalização na borda. A camada de grãos diferenciados é visível apenas nas chapas da liga 7475 jateadas com maior intensidade, recozidas à temperatura mais alta.

Nessas amostras, a camada que se apresenta com grãos menores e menos alongados não é facilmente diferenciável do restante da espessura, mas a sua espessura é de aproximadamente $65\text{ }\mu\text{m}$ (Figura 4.48), cerca de 1/7 do valor medido pelo perfil de tensões residuais.

Figura 4.48: Indicação da espessura da camada recristalizada após tratamento térmico na amostra 083_07 (liga 7475, 2 mm, pré-tensionada, S230, 60 psi, 92%; TT 500°C-30 min).

As amostras sem jateamento não sofreram alterações microestruturais significativas, o que indica que os corpos de prova não são suscetíveis a recristalização de borda devido à laminação das chapas.

De fato, a recristalização das amostras da liga 7050 não era esperada, uma vez que a adição de Zr gera a precipitação de dispersóides de Al_3Zr , que podem não gerar grande endurecimento por precipitação (devido à baixa fração volumétrica), mas funcionam como inibidores da recuperação e da recristalização^[10, 14].

O baixo número de amostras da liga 7475 em que houve recristalização pode também ser explicado pela presença de dispersóides insolúveis nas temperaturas de tratamento térmico utilizadas, e também pela baixa densidade de discordâncias na superfície das chapas gerada pelas indentações.

4.2.5 Experimentos de laminação

Englobando os dois problemas apresentados nas últimas sessões – dificuldade de obtenção de perfil de durezas (pág. 108) e ausência de recristalização –, foram feitos experimentos visando submeter corpos de prova das duas ligas estudadas a situações extremas, para verificar se as ligas sofrem alterações observáveis.

Para isso, foram selecionados os seguintes corpos de prova:

- 369** Liga 7050, espessura 10 mm, jateado com granalhas 1/8", com velocidade média (20 psi), sem pré-tensão, com cobertura 200%;
- 357** Liga 7475, espessura 10 mm, jateado com granalhas 1/8", com velocidade média (20 psi), sem pré-tensão, com cobertura 200%.

Foram retiradas 8 amostras de cada corpo de prova. Destas, 4 amostras da região não jateada (amostras A, B, C e D) e 4 da região jateada. (amostras E, F, G e H). O planejamento dos experimentos segue abaixo:

- Amostras A e E: Laminadas e tratadas termicamente;
- Amostras B e F: Laminadas;
- Amostras C e G: Tratadas termicamente;
- Amostras D e H: Controle.

A laminação foi feita a frio, na mesma direção da laminação anterior das chapas, em 5 passes de 1 mm, totalizando uma redução de 50%. O tratamento térmico foi feito em forno mufla, a 500 °C, por 30 minutos, com resfriamento em água.

Todas as amostras foram embutidas de modo a se visualizar a direção longitudinal e preparadas conforme o item 1.d da Seção 1.4.3, pág. 63. O ataque eletrolítico foi feito com reagente Barker, para visualização da estrutura de grãos. As medidas de dureza Vickers foram feitas com carga de 1000 gf.

As Figuras 4.49 a 4.64 mostram a região próxima à superfície das amostras citadas anteriormente.

Figura 4.49: Microestrutura da amostra 357A (região não jateada, 7475, laminada e tratada termicamente).

Figura 4.50: Microestrutura da amostra 369A (região não jateada, 7050, laminada e tratada termicamente).

Figura 4.51: Microestrutura da amostra 357B (região não jateada, 7475, apenas laminada).

Figura 4.52: Microestrutura da amostra 369B (região não jateada, 7050, apenas laminada).

Figura 4.53: Microestrutura da amostra 357C (região não jateada, 7475, apenas tratada termicamente).

Figura 4.54: Microestrutura da amostra 369C (região não jateada, 7050, apenas tratada termicamente).

Figura 4.55: Microestrutura da amostra 357D (região não jateada, 7475, não-transformada).

Figura 4.56: Microestrutura da amostra 369D (região não jateada, 7050, não-transformada).

Figura 4.57: Microestrutura da amostra 357E (região jateada, 7475, laminada e tratada termicamente).

Figura 4.58: Microestrutura da amostra 369E (região jateada, 7050, laminada e tratada termicamente).

Figura 4.59: Microestrutura da amostra 357F (região jateada, 7475, apenas laminada).

Figura 4.60: Microestrutura da amostra 369F (região jateada, 7050, apenas laminada).

Figura 4.61: Microestrutura da amostra 357G (região jateada, 7475, apenas tratada termicamente).

Figura 4.62: Microestrutura da amostra 369G (região jateada, 7050, apenas tratada termicamente).

Figura 4.63: Microestrutura da amostra 357H (região jateada, 7475, não-transformada).

Figura 4.64: Microestrutura da amostra 369H (região jateada, 7050, não-transformada).

Pode-se observar que, em todas as amostras submetidas ao tratamento térmico a 500°C por 30 minutos, houve mudanças na estrutura de grãos. A liga 7475 manteve a estrutura de grãos alongados, enquanto a liga 7050 formou grãos mais arredondados. Não houve, entretanto, diferenciação na forma e tamanho dos grãos entre a superfície jateada e o centro da chapa. Nas amostras submetidas apenas ao tratamento térmico, sem laminação prévia,

o tamanho dos grãos é maior, pois houve mais tempo para o crescimento de grão⁴.

As medidas de dureza são mostradas na Tabela 4.1. Novamente, não foi possível observar variação de dureza ao se comparar as amostras de controle com as amostras laminadas, recozidas e com as laminadas e recozidas, pois estão todos os valores dentro da mesma faixa (entre 149 HV e 165 HV para a liga 7475 e entre 152 HV e 183HV para a liga 7050).

Tabela 4.1: Medidas de dureza das amostras dos corpos de prova 357 e 369 submetidas ao ensaio de laminação e tratamento térmico.

Amostra	Dureza (HV)	Amostra	Dureza (HV)
357A	154±6	369A	167±6
357B	154±8	369B	169±6
357C	153±8	369C	159±4
357D	156±7	369D	177±6
357E	158±6	369E	155±3
357F	152±3	369F	170±8
357G	154±8	369G	161±10
357H	162±3	369H	169±11

Percebe-se, então, que a deformação causada pelos impactos do jato de granalhas sobre a superfície das chapas ensaiadas não causa o encruamento que antes se esperava observar. Como a fina camada de grãos deformados é responsável pelo encurvamento de toda a chapa, havia uma expectativa de encontrar grande encruamento, facilmente detectável. O que se pode dizer agora é que o encruamento da superfície é desprezível em relação à deformação prévia causada pela laminação das placas de onde as chapas foram usinadas, embora não haja diferença de durezas entre as amostras laminadas e as recozidas. Provavelmente, se o jateamento fosse realizado sobre amostras recozidas, a camada deformada seria melhor e mais facilmente caracterizada visualmente, mas as medições de dureza estão descartadas como método de caracterização dessas ligas.

⁴Lembrando que o recozimento dos metais pode ser dividido nas etapas: recuperação, recristalização e crescimento de grão. As duas primeiras ocorrem apenas em materiais encruados, com alta densidade de discordâncias.^[72]

4.3 EBSD

Entre os diferentes métodos de polimento mostrados na Seção 1.4.3, foram feitas diversas tentativas de obtenção de um mapa de EBSD. Apenas o polimento 1.d foi suficiente para conseguir um resultado razoável, ou seja, para gerar EBSPs nítidos e identificáveis na amostra toda. A grande deformação dos grãos laminados é um dos fatores que dificulta a identificação dos EBSPs e o mapeamento de grãos na região.

Foram obtidos mapas de EBSD das amostras 090, 206, 252 e 371 (conforme descritas na Seção 3.6). As Figuras 4.65 a 4.68 mostram (a) Mapas de orientação (IPF-Z) e (b) Mapas de qualidade de imagem (IQ).

Figura 4.65: Mapa de EBSD obtido da amostra 090 (Liga 7050, espessura 5 mm, granalha S230, velocidade média, sem pré-tensão, 200% cobertura), próximo à superfície jateada. (a) Mapa de orientação (IPF-Z); (b) Mapa de qualidade de imagem (IQ).

Figura 4.66: Mapa de EBSD obtido da amostra 206 (liga 7475, espessura 5 mm, granalha S550, velocidade alta, pré-tensionada, 200% cobertura), próximo à superfície jateada. (a) Mapa de orientação (IPF-Z); (b) Mapa de qualidade de imagem (IQ).

Figura 4.67: Mapa de EBSD obtido da amostra 252 (Liga 7050, espessura 10 mm, granalha S550, velocidade alta, pré-tensionada, 200% cobertura), próximo à superfície jateada. (a) Mapa de orientação (IPF-Z); (b) Mapa de qualidade de imagem (IQ).

Figura 4.68: Mapa de EBSD obtido da amostra 371 (Liga 7050, espessura 10 mm, granalha 1/8", velocidade média, sem pré-tensão, 200% cobertura), próximo à superfície jateada. (a) Mapa de orientação (IPF-Z); (b) Mapa de qualidade de imagem (IQ).

Nas proximidades da superfície jateada, a IQ é menor e há menor número de pontos com identificação positiva do padrão do alumínio. No entanto, não é possível se distinguir uma camada em que o sinal seja nitidamente pior que no restante da amostra, como foi mostrada nas Figuras 1.12 e 1.13 (pág. 56). Logo, não foi possível utilizar a técnica de EBSD para caracterização da camada deformada plasticamente.

Esses resultados mostram apenas o quanto de *know how* é necessário para este tipo de análise, que não é feita com facilidade e depende tanto do corpo de prova, quanto da experiência do preparador da amostra e do operador do microscópio eletrônico. Diversos trabalhos são publicados mostrando análises de EBSD em alumínio^[13, 34], provando que não é um método impossível, embora seja improdutivo devido ao grande tempo de obtenção de uma imagem.

Conclui-se que, para este material, o mapa de IQ obtido por EBSD não é o melhor método de análise a ser utilizado para a medição da camada deformada plasticamente.

4.4 Deformações

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.

Figura 4.69: Efeitos das variáveis de jateamento no empenamento de corpos de prova da liga 7050, de espessura 2 mm. (a) Diferentes coberturas (66% e 200%); (b) Diferentes pré-tensionamentos (0 e 90% do limite de escoamento); (c) Diferentes pressões (20, 40 e 60 psi).

Uma análise visual pode dar noção do grau de influência de alguns parâmetros, como mostra a Figura 4.69. 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.

4.4.0.1 Mudanças de parâmetros

Outra forma de apresentar as variáveis de processo é através da velocidade média das esferas e da sua energia cinética, que está diretamente ligada ao

encurvamento final da chapa jateada, conforme foi dito anteriormente (Seção 1.3.3, página 51) e será comprovado neste trabalho.

As velocidades das esferas correspondentes às pressões do jato e aos tamanhos de esferas foram medidas experimentalmente pelo IPT^[34] através de um dispositivo eletromecânico criado por Clausen e Stangenberg^[73] para medição de velocidade média de granalhas baseado no Método dos Dois Discos (Figura 4.70) e são mostradas na Tabela 4.2.

Figura 4.70: Esquema do dispositivo de medição de velocidade de impactos utilizado pelo IPT.^[34]

Sendo conhecidas a distância d entre os discos, sua velocidade de rotação ω e a defasagem angular φ , a velocidade média das granalhas é dada por $v = \frac{d \cdot \omega}{\varphi}$.

Tabela 4.2: Correspondência entre valores de pressão do jato de esferas dos três tamanhos e a velocidade das esferas. Medidas experimentais ^[34].

Esfera	Pressão (psi)	Velocidade (m/s)
S230	20	50,2
	40	61,2
	60	72,2
S550	10	16,2
	20	22,4
	30	28,6
1/8"	10	12,5
	20	16,9
	25	18,5

Há na literatura trabalhos que se utilizam do valor da energia cinética das granalhas como variável importante ou principal na avaliação da deformação

plástica superficial gerada pelo jateamento.^[22, 30, 33, 35]

A energia cinética (E_C) é calculada pela Equação 4.1:

$$\begin{aligned}
 E_C &= \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \\
 &= \frac{1}{2} \cdot (\rho \cdot V_{esf}) \cdot v^2 \\
 &= \frac{1}{2} \cdot \left[\rho \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \left(\frac{D_{esf}}{2} \right)^3 \right] \cdot v^2 \\
 &= \frac{\pi}{12} \cdot D_{esf}^3 \cdot \rho \cdot v^2
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

onde m é massa da granalha (g) de volume V_{esf} , D_{esf} é o diâmetro nominal da esfera (mm), ρ é a densidade típica dos aços-carbono (7,86 g/cm³) e v é a velocidade com que a esfera atinge a chapa (m/s).

Dessa forma, pode-se completar os dados da Tabela 4.2 com os valores calculados pela Equação 4.1 na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Valores calculados da energia cinética de 1 esfera.

Esfera	D_{esf} (mm)	P (psi)	v (m/s)	E_C (mJ)
S230	0,584	20	50,2	1,0
		40	61,2	1,5
		60	72,2	2,1
S550	1,397	10	16,2	1,5
		20	22,4	2,8
		30	28,6	4,6
1/8"	3,175	10	12,5	10,3
		20	16,9	18,8
		25	18,5	22,5

4.5 Medição de curvatura

O valor que se tomou como resultado da curvatura foi o raio de curvatura da parábola de ajuste dos pontos de medições de coordenadas feitos nos 20 centímetros centrais da chapa. Esse valor foi calculado pelo método apresentado na Seção 3.3.

O Anexo C contém as tabelas de parâmetros de processo e valores de raio de curvatura medidos de todos os corpos de prova ensaiados.

4.5.1 Efeitos dos parâmetros

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 seguir, são mostrados os gráficos dos efeitos da cobertura (C), diâmetro da esfera (D)⁵, velocidade de impacto e espessura (H). As chapas com pré-tensão e sem pré-tensão (livres) são analisadas separadamente, em todos os gráficos.

Estes gráficos serão apresentados para fins de documentação e para futuras consultas sobre o efeito separado de cada parâmetro referente aos corpos de prova e ao processo de jateamento. Entretanto, para uma leitura mais leve do capítulo, sugere-se seguir direto para o item 4.5.2, pág. 172 e então para a pág. 187.

A Tabela 4.4 relaciona os gráficos que apresentam as comparações citadas anteriormente.

Tabela 4.4: Números das figuras com resultados de efeitos dos parâmetros sobre o raio de curvatura.

Figura	Parâmetro	Liga	H (mm)	D_{medio} (mm)	Pressão	C
4.71	Cobertura	7050	2	0,58	var	var
4.72	Cobertura	7475	2	0,58	var	var
4.73	Cobertura	7050	5	0,58	var	var
4.74	Cobertura	7475	5	0,58	var	var

Continua na próxima página.

⁵O efeito do diâmetro da esfera é aplicável apenas às chapas de 5 mm e 10 mm, que foram jateadas com duas esferas diferentes.

Tabela 4.4 – Continuação da página anterior.

Figura	Parâmetro	Liga	H (mm)	D_{medio} (mm)	Pressão	C
4.75	Cobertura	7050	5	1,40	var	var
4.76	Cobertura	7475	5	1,40	var	var
4.77	Cobertura	7050	10	1,40	var	var
4.78	Cobertura	7475	10	1,40	var	var
4.79	Cobertura	7050	10	3,18	var	var
4.80	Cobertura	7475	10	3,18	var	var
4.81	Cobertura	7050	15	3,18	var	var
4.82	Cobertura	7475	15	3,18	var	var
4.83	Esfera	7050	5	var	var	baixa
4.84	Esfera	7050	10	var	var	média
4.85	Esfera	7475	5	var	var	alta
4.86	Esfera	7475	10	var	var	baixa
4.87	Esfera	7050	5	var	var	alta
4.88	Esfera	7050	10	var	var	baixa
4.89	Esfera	7475	5	var	var	média
4.90	Esfera	7475	10	var	var	alta
4.91	Esfera	7050	5	var	baixa	var
4.92	Esfera	7050	5	var	média	var
4.93	Esfera	7050	5	var	alta	var
4.94	Esfera	7475	5	var	baixa	var
4.95	Esfera	7475	5	var	média	var
4.96	Esfera	7475	5	var	alta	var
4.97	Esfera	7050	10	var	baixa	var
4.98	Esfera	7050	10	var	média	var
4.99	Esfera	7050	10	var	alta	var
4.100	Esfera	7475	10	var	baixa	var
4.101	Esfera	7475	10	var	média	var
4.102	Esfera	7475	10	var	alta	var
4.103	Velocidade	7050	2	0,58	var	var
4.104	Velocidade	7050	5	0,58	var	var
4.105	Velocidade	7050	5	1,40	var	var
4.106	Velocidade	7050	10	1,40	var	var
4.107	Velocidade	7050	10	3,18	var	var
4.108	Velocidade	7050	15	3,18	var	var
4.109	Velocidade	7475	2	0,58	var	var
4.110	Velocidade	7475	5	0,58	var	var
4.111	Velocidade	7475	5	1,40	var	var
4.112	Velocidade	7475	10	1,40	var	var

Continua na próxima página.

Tabela 4.4 – Concluído da página anterior.

Figura	Parâmetro	Liga	H (mm)	D_{medio} (mm)	Pressão	C
4.113	Velocidade	7475	10	3,18	var	var
4.114	Velocidade	7475	15	3,18	var	var
4.115	Espessura	7050	var	0,58	var	baixa
4.116	Espessura	7050	var	1,40	var	média
4.117	Espessura	7050	var	3,18	var	alta
4.118	Espessura	7050	var	0,58	var	alta
4.119	Espessura	7050	var	1,40	var	baixa
4.120	Espessura	7050	var	3,18	var	média
4.121	Espessura	7475	var	0,58	var	baixa
4.122	Espessura	7475	var	1,40	var	média
4.123	Espessura	7475	var	3,18	var	alta
4.124	Espessura	7475	var	0,58	var	alta
4.125	Espessura	7475	var	1,40	var	baixa
4.126	Espessura	7475	var	3,18	var	média

Figura 4.71: Efeito da cobertura sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7050, espessura 2 mm, jateadas com esfera S230.

Figura 4.72: Efeito da cobertura sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7475, espessura 2 mm, jateadas com esfera S230.

Figura 4.73: Efeito da cobertura sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7050, espessura 5 mm, jateadas com esfera S230.

Figura 4.74: Efeito da cobertura sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7475, espessura 5 mm, jateadas com esfera S230.

Figura 4.75: Efeito da cobertura sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7050, espessura 5 mm, jateadas com esfera S550.

Figura 4.76: Efeito da cobertura sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7475, espessura 5 mm, jateadas com esfera S550.

Figura 4.77: Efeito da cobertura sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7050, espessura 10 mm, jateadas com esfera S550.

Figura 4.78: Efeito da cobertura sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7475, espessura 10 mm, jateadas com esfera S550.

Figura 4.79: Efeito da cobertura sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7050, espessura 10 mm, jateadas com esfera 1/8".

Figura 4.80: Efeito da cobertura sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7475, espessura 10 mm, jateadas com esfera 1/8".

Figura 4.81: Efeito da cobertura sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7050, espessura 15 mm, jateadas com esfera 1/8".

Figura 4.82: Efeito da cobertura sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7475, espessura 15 mm, jateadas com esfera 1/8".

Figura 4.83: Efeito do diâmetro da esfera sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7050, espessura 5 mm, baixa cobertura.

Figura 4.84: Efeito do diâmetro da esfera sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7050, espessura 10 mm, baixa cobertura.

Figura 4.85: Efeito do diâmetro da esfera sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7475, espessura 5 mm, baixa cobertura.

Figura 4.86: Efeito do diâmetro da esfera sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7475, espessura 10 mm, baixa cobertura.

Figura 4.87: Efeito do diâmetro da esfera sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7050, espessura 5 mm, alta cobertura.

Figura 4.88: Efeito do diâmetro da esfera sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7050, espessura 10 mm, alta cobertura.

Figura 4.89: Efeito do diâmetro da esfera sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7475, espessura 5 mm, alta cobertura.

Figura 4.90: Efeito do diâmetro da esfera sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7475, espessura 10 mm, alta cobertura.

Figura 4.91: Efeito do diâmetro da esfera sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7050, espessura 5 mm, baixa pressão do jato.

Figura 4.92: Efeito do diâmetro da esfera sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7050, espessura 5 mm, média pressão do jato.

Figura 4.93: Efeito do diâmetro da esfera sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7050, espessura 5 mm, alta pressão do jato.

Figura 4.94: Efeito do diâmetro da esfera sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7475, espessura 5 mm, baixa pressão do jato.

Figura 4.95: Efeito do diâmetro da esfera sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7475, espessura 5 mm, média pressão do jato.

Figura 4.96: Efeito do diâmetro da esfera sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7475, espessura 5 mm, alta pressão do jato.

Figura 4.97: Efeito do diâmetro da esfera sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7050, espessura 10 mm, baixa pressão do jato.

Figura 4.98: Efeito do diâmetro da esfera sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7050, espessura 10 mm, média pressão do jato.

Figura 4.99: Efeito do diâmetro da esfera sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7050, espessura 10 mm, alta pressão do jato.

Figura 4.100: Efeito do diâmetro da esfera sobre o raio de curvatura.
Chapas da liga 7475, espessura 10 mm, baixa pressão do jato.

Figura 4.101: Efeito do diâmetro da esfera sobre o raio de curvatura.
Chapas da liga 7475, espessura 10 mm, média pressão do jato.

Figura 4.102: Efeito do diâmetro da esfera sobre o raio de curvatura.
Chapas da liga 7475, espessura 10 mm, alta pressão do jato.

Figura 4.103: Efeito da velocidade de impacto sobre o raio de curvatura.
Chapas da liga 7050, espessura 2 mm, jateadas com esfera S230.

Figura 4.104: Efeito da velocidade de impacto sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7050, espessura 5 mm, jateadas com esfera S230.

Figura 4.105: Efeito da velocidade de impacto sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7050, espessura 5 mm, jateadas com esfera S550.

Figura 4.106: Efeito da velocidade de impacto sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7050, espessura 10 mm, jateadas com esfera S550.

Figura 4.107: Efeito da velocidade de impacto sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7050, espessura 10 mm, jateadas com esfera 1/8".

Figura 4.108: Efeito da velocidade de impacto sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7050, espessura 15 mm, jateadas com esfera 1/8".

Figura 4.109: Efeito da velocidade de impacto sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7475, espessura 2 mm, jateadas com esfera S230.

Figura 4.110: Efeito da velocidade de impacto sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7475, espessura 5 mm, jateadas com esfera S230.

Figura 4.111: Efeito da velocidade de impacto sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7475, espessura 5 mm, jateadas com esfera S550.

Figura 4.112: Efeito da velocidade de impacto sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7475, espessura 10 mm, jateadas com esfera S550.

Figura 4.113: Efeito da velocidade de impacto sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7475, espessura 10 mm, jateadas com esfera 1/8".

Figura 4.114: Efeito da velocidade de impacto sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7475, espessura 15 mm, jateadas com esfera 1/8".

Figura 4.115: Efeito da espessura da chapa sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7050, jateadas com esfera S230, baixa cobertura.

Figura 4.116: Efeito da espessura da chapa sobre o raio de curvatura.
Chapas da liga 7050, jateadas com esfera S550, baixa cobertura.

Figura 4.117: Efeito da espessura da chapa sobre o raio de curvatura.
Chapas da liga 7050, jateadas com esfera 1/8", baixa cobertura.

Figura 4.118: Efeito da espessura da chapa sobre o raio de curvatura.
Chapas da liga 7050, jateadas com esfera S230, alta cobertura.

Figura 4.119: Efeito da espessura da chapa sobre o raio de curvatura.
Chapas da liga 7050, jateadas com esfera S550, alta cobertura.

Figura 4.120: Efeito da espessura da chapa sobre o raio de curvatura.
Chapas da liga 7050, jateadas com esfera 1/8", alta cobertura.

Figura 4.121: Efeito da espessura da chapa sobre o raio de curvatura.
Chapas da liga 7475, jateadas com esfera S230, baixa cobertura.

Figura 4.122: Efeito da espessura da chapa sobre o raio de curvatura.
Chapas da liga 7475, jateadas com esfera S550, baixa cobertura.

Figura 4.123: Efeito da espessura da chapa sobre o raio de curvatura.
Chapas da liga 7475, jateadas com esfera 1/8", baixa cobertura.

Figura 4.124: Efeito da espessura da chapa sobre o raio de curvatura.
Chapas da liga 7475, jateadas com esfera S230, alta cobertura.

Figura 4.125: Efeito da espessura da chapa sobre o raio de curvatura.
Chapas da liga 7475, jateadas com esfera S550, alta cobertura.

Figura 4.126: Efeito da espessura da chapa sobre o raio de curvatura. Chapas da liga 7475, jateadas com esfera 1/8", alta cobertura.

4.5.2 Discussão

Na Figura 4.76 pode-se analisar o efeito da cobertura em chapas da liga 7475, com espessura 5 mm, jateadas com esferas S550. No mesmo gráfico, podem-se comparar as 3 pressões (baixa, média e alta – 10, 20 e 30 psi), com e sem pré-tensão. Na Figura 4.78, a espessura das chapas é 10 mm.

Há grande dificuldade em avaliar, no entanto, se há diferenças no efeito de um parâmetro qualquer em relação a chapas de espessuras diferentes, porque o efeito da espessura sobressai a todos os demais, como se pode ver na Figura 4.125, que mostra os valores das chapas anteriores, fixando-se desta vez a cobertura em 200% e observando-se o efeito da espessura.

Para contornar esse problema, uma normalização das medidas seria de grande auxílio.

Uma forma utilizada na Resistência dos Materiais é dividir os valores de raio de curvatura pelo módulo resistente, W , que é dado por:

$$W = \frac{I}{c} = \frac{\frac{bH^3}{12}}{\frac{H}{2}} = \frac{b}{6}H^2 \quad (4.2)$$

onde I é o momento de inércia, c é a metade da espessura, H , e b é a largura.

Como, em todos os corpos de prova, $b/6$ é constante, basta dividir os raios de curvatura por H^2 . Assim, os gráficos citados anteriormente poderiam ser sintetizados em um só, pois os valores de r/H^2 são equivalentes, como mostram as Figuras 4.127 a 4.138, relacionadas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Números das figuras com resultados de efeitos dos parâmetros sobre o raio de curvatura normalizado (r/H^2).

Figura	Parâmetro	Liga	D_{medio} (mm)	Pressão	C
4.127	Espessura	7050	0,58	var	baixa
4.128	Espessura	7475	0,58	var	baixa
4.129	Espessura	7050	1,40	var	baixa
4.130	Espessura	7475	1,40	var	baixa
4.131	Espessura	7050	3,40	var	baixa
4.132	Espessura	7475	3,40	var	baixa
4.133	Espessura	7050	0,58	var	alta
4.134	Espessura	7475	0,58	var	alta
4.135	Espessura	7050	1,40	var	alta
4.136	Espessura	7475	1,40	var	alta
4.137	Espessura	7050	3,18	var	alta
4.138	Espessura	7475	3,18	var	alta
4.139	Liga	var	0,58	var	baixa
4.140	Liga	var	1,40	var	baixa
4.141	Liga	var	3,18	var	baixa
4.142	Liga	var	0,58	var	alta
4.143	Liga	var	1,40	var	alta
4.144	Liga	var	3,18	var	alta
4.145	Cobertura	ambas	0,58	var	var
4.146	Cobertura	ambas	1,40	var	var
4.147	Cobertura	ambas	3,18	var	var
4.148	Esfera	ambas	var	var	baixa
4.149	Esfera	ambas	var	var	alta
4.150	Esfera	ambas	var	baixa	var
4.151	Esfera	ambas	var	média	var
4.152	Esfera	ambas	var	alta	var
4.153	Velocidade	ambas	var	var	baixa
4.154	Velocidade	ambas	var	var	alta

Figura 4.127: Efeito da espessura da chapa sobre r/H^2 . Chapas da liga 7050, jateadas com esfera S230, baixa cobertura.

Figura 4.128: Efeito da espessura da chapa sobre r/H^2 . Chapas da liga 7475, jateadas com esfera S230, baixa cobertura.

Figura 4.129: Efeito da espessura da chapa sobre r/H^2 . Chapas da liga 7050, jateadas com esfera S550, baixa cobertura.

Figura 4.130: Efeito da espessura da chapa sobre r/H^2 . Chapas da liga 7475, jateadas com esfera S550, baixa cobertura.

Figura 4.131: Efeito da espessura da chapa sobre r/H^2 . Chapas da liga 7050, jateadas com esfera 1/8", baixa cobertura.

Figura 4.132: Efeito da espessura da chapa sobre r/H^2 . Chapas da liga 7475, jateadas com esfera 1/8", baixa cobertura.

Figura 4.133: Efeito da espessura da chapa sobre r/H^2 . Chapas da liga 7050, jateadas com esfera S230, alta cobertura.

Figura 4.134: Efeito da espessura da chapa sobre r/H^2 . Chapas da liga 7475, jateadas com esfera S230, alta cobertura.

Figura 4.135: Efeito da espessura da chapa sobre r/H^2 . Chapas da liga 7050, jateadas com esfera S550, alta cobertura.

Figura 4.136: Efeito da espessura da chapa sobre r/H^2 . Chapas da liga 7475, jateadas com esfera S550, alta cobertura.

Figura 4.137: Efeito da espessura da chapa sobre r/H^2 . Chapas da liga 7050, jateadas com esfera 1/8", alta cobertura.

Figura 4.138: Efeito da espessura da chapa sobre r/H^2 . Chapas da liga 7475, jateadas com esfera 1/8", alta cobertura.

Vale ressaltar que o método da normalização pelo módulo resistente não elimina os problemas de comparação dos efeitos dos parâmetros de jateamento sobre chapas de espessuras diferentes. Há ainda muita dispersão nos valores de r/H^2 e em alguns casos, como, por exemplo, da Figura 4.136, 'média pressão, livre', o raio de curvatura de chapas mais grossas varia 40%.

Mesmo assim, a normalização facilita bastante a análise de valores tão diferentes.

As Figuras 4.139 a 4.144 (Tabela 4.5) mostram os efeitos da mudança de liga sobre a curvatura obtida, observando-se, a partir de agora, os valores de r/H^2 .

Figura 4.139: Efeito da liga sobre r/H^2 . Chapas jateadas com esfera S230, baixa cobertura.

Figura 4.140: Efeito da liga sobre r/H^2 . Chapas jateadas com esfera S550, baixa cobertura.

Figura 4.141: Efeito da liga sobre r/H^2 . Chapas jateadas com esfera 1/8", baixa cobertura.

Figura 4.142: Efeito da liga sobre r/H^2 . Chapas jateadas com esfera S230, alta cobertura.

Figura 4.143: Efeito da liga sobre r/H^2 . Chapas jateadas com esfera S550, alta cobertura.

Figura 4.144: Efeito da liga sobre r/H^2 . Chapas jateadas com esfera 1/8", alta cobertura.

Nota-se que a liga não exerce influência notável na deformação das chapas. Portanto, a partir de agora serão analisadas juntas as duas ligas, para observação dos demais parâmetros.

Figura 4.145: Efeito da cobertura sobre r/H^2 . Chapas das ligas 7050 e 7475 jateadas com esfera S230.

Figura 4.146: Efeito da cobertura sobre r/H^2 . Chapas das ligas 7050 e 7475 jateadas com esfera S550.

Figura 4.147: Efeito da cobertura sobre r/H^2 . Chapas das ligas 7050 e 7475 jateadas com esfera 1/8".

Figura 4.148: Efeito do diâmetro da esfera sobre r/H^2 . Chapas das ligas 7050 e 7475 jateadas com baixa cobertura.

Figura 4.149: Efeito do diâmetro da esfera sobre r/H^2 . Chapas das ligas 7050 e 7475 jateadas com alta cobertura.

Figura 4.150: Efeito do diâmetro da esfera sobre r/H^2 . Chapas das ligas 7050 e 7475 jateadas com baixa pressão.

Figura 4.151: Efeito do diâmetro da esfera sobre r/H^2 . Chapas das ligas 7050 e 7475 jateadas com média pressão.

Figura 4.152: Efeito do diâmetro da esfera sobre r/H^2 . Chapas das ligas 7050 e 7475 jateadas com alta pressão.

Figura 4.153: Efeito da velocidade de impacto sobre r/H^2 . Chapas das ligas 7050 e 7475 jateadas com baixa cobertura.

Figura 4.154: Efeito da velocidade de impacto sobre r/H^2 . Chapas das ligas 7050 e 7475 jateadas com alta cobertura.

A partir da observação dos gráficos, pode-se afirmar que, entre os principais parâmetros observados (cobertura, diâmetro da esfera, velocidade de impacto e pré-tensão), a pré-tensão é o maior influente na curvatura final obtida após o jateamento das esferas sobre as chapas. Em segundo lugar, o mais influente é o tamanho da esfera. A velocidade de impacto e a cobertura

são as menos influentes na deformação da chapa.

A utilização da normalização do raio de curvatura, dividindo-o pelo módulo resistente, W , ou simplesmente por H^2 , reduziu significativamente o número de gráficos a serem analisados para observação dos parâmetros mas, ainda assim, é muito grande para a previsão da curvatura final em um processo de muitas variáveis. Deste modo, investigou-se qual a relação entre a energia cinética das esferas e a curvatura da chapa.

A Figura 4.155 mostra todos os dados experimentais coletados, relacionando a energia cinética (E_C) e o raio de curvatura (r) dos corpos de prova jateados em todas as condições possíveis, separados em:

- cobertura baixa, sem pré-tensão (BX Livre);
- cobertura alta, sem pré-tensão (AL Livre);
- cobertura baixa, com pré-tensão (BX Pré-tensionado);
- cobertura alta, com pré-tensão (AL Pré-tensionado).

A Figura 4.156 mostra o efeito da energia cinética sobre o raio de curvatura normalizado por H^2 , nas mesmas condições do gráfico anterior.

Obs: Foram excluídos três pontos (CPs 188, 253 e 391) com raios de curvatura muito diferentes dos demais com mesma condição de jateamento, para evitar distorções nas análises dos demais dados.

É notável a qualidade do ajuste dos pontos de raio de curvatura normalizados (r/H^2) em função da energia cinética (E_C), enquanto a medição da energia cinética parece não dizer nada a respeito do raio de curvatura, independentemente da espessura da chapa.

Agora, busca-se o método que seja mais eficaz para a previsão do raio de curvatura, utilizando-se apenas um parâmetro de medição que englobe todas as variáveis atuantes no processo de JCG.

Pode-se chamar de densidade de energia cinética (K) a quantidade de energia cinética (E_C) que 1 esfera transfere para o volume abaixo da indentação (V_{ind}) produzida por ela, após o impacto. K pode ser calculada pela Equação 4.3:

$$K = \frac{E_C}{V_{ind}} = \frac{\frac{1}{2}m \cdot v_{imp}^2}{\left(\pi \frac{d_{ind}^2}{4}\right) \cdot H} \quad (4.3)$$

Figura 4.155: Relação entre energia cinética e raio de curvatura dos corpos de prova conformados por jateamento de esferas.

Figura 4.156: Relação entre energia cinética e raio de curvatura normalizado dos corpos de prova conformados por jateamento de esferas.

onde m é a massa de 1 esfera, v_{imp} é a velocidade de impacto, d_{ind} é o diâmetro da indentação e H é a espessura total da chapa.

No relatório do projeto IPT/Unicamp/Embraer^[34], baseado na norma EN-40-100 da Embraer^[74] adotou-se como diâmetro de indentação (d_{ind}) o valor médio de todas as medidas para uma mesma condição, totalizando assim 20 medições de diâmetro para cada cálculo de média (duas ligas, duas amostras, cinco impressões por amostra).

A Figura 4.157 mostra todos os dados experimentais coletados, relacionando a densidade de energia cinética (K) e o raio de curvatura (r). Sem dúvidas, a utilização da densidade de energia cinética K como método de previsão do raio de curvatura é a melhor opção entre as que foram estudadas.

A Tabela 4.6 apresenta os resultados da relação entre K e r na forma $r = A \cdot K^n$ e os valores de R^2 dos ajustes:

Tabela 4.6: Equações de ajuste da relação entre densidade de energia cinética e raio de curvatura dos corpos de prova conformados por jateamento com granalhas.

	Cobertura	Pré-tensão	Equação	R^2 do ajuste
1.	Baixa	Não	$r = 2,60 \cdot 10^{12} \cdot K^{-1,78}$	0,956
2.	Alta	Não	$r = 2,27 \cdot 10^{12} \cdot K^{-1,79}$	0,955
3.	Baixa	Sim	$r = 3,26 \cdot 10^{11} \cdot K^{-1,70}$	0,950
4.	Alta	Sim	$r = 1,67 \cdot 10^{11} \cdot K^{-1,67}$	0,952

As equações acima são de grande importância, pois permitem uma previsão razoável da curvatura final de chapas de alumínio das ligas 7050 e 7475 em todas as condições de jateamento estudadas.

Nota-se consistência entre as condições de jateamento com pré-tensão e livres. O expoente de K 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 fator pré-exponencial das amostras livres também é maior, pois a deformação obtida após o jateamento sob tensão é maior.

Considerando-se que a variação dos valores é grande, dado ao caráter experimental e ao às vezes fraco controle dos parâmetros de processo, pode-se dizer que são iguais os expoentes das equações 1 e 2 e das equações 3 e 4, caracterizando uma constante dependente do processo.

Relação entre Raio de curvatura e Densidade de Energia cinética

Figura 4.157: Relação entre densidade de energia cinética e raio de curvatura dos corpos de prova conformados por jateamento de esferas.

4.6 Perfil de tensões residuais

A Figura 4.158 mostra o perfil de tensões residuais a partir da superfície jateada de uma chapa da liga 7050, com 2 mm de espessura, jateada com esfera S230, baixa velocidade (50,2 m/s), sem pré-tensão.

Figura 4.158: Perfil de tensões residuais após JCG em chapa da liga 7050, 2 mm de espessura, esfera S230, velocidade baixa, sem pré-tensão.

A equação da função de ajuste dos pontos experimentais (linha verde) é um polinômio de grau 3 e está indicada na figura. Pode-se ver que a correção matemática (equação 1.12) para o relaxamento de tensões devido à remoção de camadas sugerida por Moore e Evans^[56] (linha vermelha) foi desprezível nos pontos experimentais obtidos e será, doravante, desconsiderada. Os pontos indicados por • são o ponto de máxima tensão residual de compressão (calculada pela equação de ajuste) e o ponto onde a tensão residual é nula.

Os valores calculados para os pontos de mínimo (x_{min}, y_{min}) e de zero $(h, 0)$ são mostrados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Pontos (x_{min} , y_{min}) de máxima compressão e espessura das camadas deformadas (h).

CP nº	Espessura (mm)	Esfera	Velocidade	Pré-tensão	x_{min} (μm)	y_{min} (MPa)	h (μm)
009	2	S230	baixa	não	149	-252	380
008	2	S230	média	não	119	-254	526
100	2	S230	alta	não	132	-250	488
092	5	S230	baixa	não	80	-238	333
090	5	S230	média	não	75	-230	339
038	5	S230	alta	não	101	-234	362
187	5	S550	baixa	não	116	-156	480
179	5	S550	média	não	200	-164	515
193	5	S550	alta	não	216	-158	539
314	10	S550	baixa	não	159	-288	537
286	10	S550	média	não	219	-299	567
255	10	S550	alta	não	215	-315	723
376	10	1/8"	baixa	não	285	-278	709
371	10	1/8"	média	não	458	-266	1143
365	10	1/8"	alta	não	729	-295	1360
432	15	1/8"	baixa	não	418	-205	770
423	15	1/8"	média	não	588	-261	1057
418	15	1/8"	alta	não	430	-336	1323
062	2	S230	baixa	sim	98	-241	391
024	2	S230	média	sim	124	-243	427
015	2	S230	alta	sim	126	-253	428
144	5	S230	baixa	sim	34	-234	386
137	5	S230	média	sim	135	-232	559
133	5	S230	alta	sim	125	-258	430
185	5	S550	baixa	sim	101	-183	506
182	5	S550	média	sim	290	-346	715
171	5	S550	alta	sim	333	-375	874
292	10	S550	baixa	sim	173	-329	645
263	10	S550	média	sim	237	-383	874
252	10	S550	alta	sim	283	-382	956
378	10	1/8"	baixa	sim	371	-357	840
370	10	1/8"	média	sim	514	-370	1267
364	10	1/8"	alta	sim	448	-368	1639
431	15	1/8"	baixa	sim	347	-376	1119
420	15	1/8"	média	sim	447	-421	1406
413	15	1/8"	alta	sim	578	-396	1433

O Apêndice D mostra os ajustes dos valores experimentais, obtidos pela equipe do IPEN^[66], e os pontos (x_{min} , y_{min}) de máxima compressão e espes-

sura das camadas deformadas (h) das chapas jateadas com esferas S230, S550 e 1/8", nas três velocidades, com e sem pré-tensão.

4.6.1 Discussão

Em diversos casos, como no da amostra de espessura 10 mm, jateada com granalha 1/8", velocidade média, com pré-tensão (Figura 4.159), há uma inflexão no comportamento dos valores de tensões residuais, em geral em profundidades entre 50 e 150 μm , ou seja, logo nos primeiros pontos abaixo da superfície. Ainda é desconhecida a causa deste comportamento e não há relatos na literatura de casos semelhantes, porém algumas hipóteses são levantadas:

Figura 4.159: Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada, mostrando inflexão a 150 μm da superfície. Chapa da liga 7050, espessura 10 mm, esfera 1/8", velocidade média, com pré-tensão.

- Há uma região de tensões residuais causadas pela deformação plástica e outra região de tensões causadas pela deformação elástica, que não se sobrepõem totalmente nesses casos;
- Houve alteração na microestrutura causada pelo ataque químico com HCl ou por aquecimento da superfície;

- O relaxamento das tensões causado pela remoção de camadas é mais significativo na região mais próxima à superfície.

Oliveira^[66], do IPEN, em seu trabalho de mestrado, fez análises mais profundas sobre os dados obtidos.

4.6.1.1 Correlação com os parâmetros de processo

A partir de observações de corpos de prova com condições de jateamento semelhantes senão por 1 dos parâmetros, é possível avaliar qualitativamente o efeito de cada parâmetro na profundidade do ponto (x_{min} , y_{min}) de máxima compressão e na espessura (h) da camada deformada. O resultado que foi considerado foi a tendência predominante de aumento ou diminuição do valor, em módulo. Nos casos em que não é possível definir qual tendência acontece no maior número de amostras, o parâmetro foi considerado "não influente". A Tabela 4.8 mostra o resultado das avaliações.

Tabela 4.8: Efeito qualitativo dos parâmetros de jateamento nos pontos de máxima tensão residual de compressão e na espessura da camada deformada.

Parâmetro	x_{min} (μm)	$ y_{min} $ (MPa)	h (μm)
Espessura	diminui	aumenta	aumenta
Esfera	aumenta	diminui	aumenta
Velocidade	aumenta	aumenta	aumenta
Pré-tensão	não influente	aumenta	aumenta

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).

Conforme o item 7 da seção 2.1 (pág. 78), deseja-se correlacionar o encurvamento com o perfil de tensões residuais. Para isso, cruzando dados das Tabelas 3.6 (pág. 97) e 4.7 (pág. 194), pode-se analisar a relação existente entre a espessura da camada deformada (h) e a deformação das chapas.

Seria interessante, nesse momento, buscar uma relação direta entre a energia cinética, E_C , ou a densidade de energia cinética, K , e os valores medidos de x_{min} , y_{min} e h . Assim, seria possível unir-se a previsão de deformação através de um único parâmetro de processo (Figura 4.157) e a previsão da espessura da camada superficial que é afetada pelo processo.

As Figuras 4.160 a 4.165 mostram o efeito da E_C e K nesses valores mencionados:

Figura 4.160: Relação entre profundidade de máxima compressão (x_{min}) e energia cinética (E_C).

Figura 4.161: Relação entre máxima tensão residual de compressão (y_{min}) e energia cinética (E_C).

Figura 4.162: Relação entre espessura da camada deformada (h) e energia cinética (E_c).

Figura 4.163: Relação entre profundidade de máxima compressão (x_{min}) e densidade de energia cinética (K).

Figura 4.164: Relação entre máxima tensão residual de compressão (y_{min}) e densidade de energia cinética (K).

Figura 4.165: Relação entre espessura da camada deformada (h) e densidade de energia cinética (K).

Aparentemente, é possível estabelecer relações apenas entre a energia cinética e os valores de x_{min} e h que seguem uma lei de potência. Os demais gráficos mostram apenas tendências, porém não é possível ajustar equações razoáveis para previsão.

De acordo com a equação 1.7 mostrada na página 53, pode-se relacionar o volume da camada deformada com a energia cinética das esferas:

$$V' = K_3 \cdot E_C$$

Porém, os dados mostrados na Figura 4.160 indicam que esta equação seria melhor escrita na forma:

$$V' = K_3 \cdot E_C^n \quad (4.4)$$

$$0 < n \leq 1$$

As Figuras 4.166 a 4.171 mostram, respectivamente, o efeito em x_{min} , y_{min} e h do raio de curvatura como medido (r) e normalizado (r/H^2) (seção 4.5).

Figura 4.166: Relação entre profundidade de máxima compressão (x_{min}) e raio de curvatura (r).

Figura 4.167: Relação entre máxima tensão residual de compressão (y_{min}) e raio de curvatura (r).

Figura 4.168: Relação entre espessura da camada deformada (h) e raio de curvatura (r).

Figura 4.169: Relação entre profundidade de máxima compressão ($x_{\min}$) e raio de curvatura normalizado (r/H^2).

Figura 4.170: Relação entre máxima tensão residual de compressão (y_{min}) e raio de curvatura normalizado (r/H^2).

Figura 4.171: Relação entre espessura da camada deformada (h) e raio de curvatura normalizado (r/H^2).

Nota-se que r/H^2 têm uma boa correlação com os três valores medidos: maiores deformações das chapas são relacionadas a maior espessura da camada deformada, maior tensão residual (compressão) e maior distância do ponto de máxima tensão à superfície. Isso vem ao encontro da suposição de que o momento fletor gerado pela camada deformada é o principal agente no encurvamento da chapa. Entretanto, as relações que puderam ser observadas não são suficientes, *per se*, para uma boa previsão de deformação durante o projeto de experimentos de conformação por jateamento com granalhas.

4.7 Redes Neurais Artificiais

Após o treinamento e o teste da RNA, o software NeuroSolutions for Excel® apresenta um relatório que contém um gráfico mostrando a aderência da RNA aos dados experimentais das linhas designadas como teste, e uma tabela com os valores dos erros. Ambos são mostrados na Figura 4.172 e na Tabela 4.9:

Figura 4.172: Aderência da rede neural artificial aos 62 testes (exemplares).

Tabela 4.9: Relatório de valores estatísticos após treinamento da RNA.

Performance	Raio de curvatura (m)
Erro quadrático médio (MSE)	0,457
Erro quadrático médio normalizado (NMSE)	0,022
Erro absoluto médio (MAE)	0,438
Mínimo erro absoluto (Min Abs Error)	0,003
Máximo erro absoluto (Max Abs Error)	2,680
Coeficiente de correlação linear (r)	0,990

Para melhor observar a qualidade da previsão da RNA gerada, pode-se observar em um gráfico a relação entre o raio de curvatura real e o raio de curvatura calculado para todos os 402 dados utilizados no treinamento, validação cruzada e teste (Figura 4.173).

Figura 4.173: Correlação entre a previsão de curvatura e os dados reais.

O coeficiente angular do ajuste linear é 0,98, o que significa que os valores calculados estão muito próximos dos valores reais.

A Tabela 4.10 mostra os resultados de previsão de raio de curvatura para as chapas fictícias de 4, 7 e 12 mm de espessura, das ligas 7050 e 7475, com esferas pequenas, médias e grandes, respectivamente. Os parâmetros de jateamento foram os mesmos utilizados para as granalhas S230, S550 e 1/8".

Tabela 4.10: Resultados de previsão de raio de curvatura para as chapas fictícias de 4, 7 e 12 mm de espessura.

Liga	Espessura (mm)	Diâmetro da esfera (mm)	Velocidade (m/s)	Pré-tensão	Cobertura	Raio de curvatura (m)
7050	4	0,584	50,2	não	66%	2,988
7475	4	0,584	61,2	não	85%	2,362
7050	4	0,584	72,2	não	92%	2,191
7475	4	0,584	50,2	não	200%	2,383
7050	4	0,584	61,2	não	200%	2,294
7475	4	0,584	72,2	não	200%	2,259
7050	4	0,584	50,2	sim	66%	1,740
7475	4	0,584	61,2	sim	85%	1,852
7050	4	0,584	72,2	sim	92%	1,368
7475	4	0,584	50,2	sim	200%	1,337
7050	4	0,584	61,2	sim	200%	1,472
7475	4	0,584	72,2	sim	200%	0,957
7475	7	1,397	16,2	não	60%	10,785
7475	7	1,397	22,4	não	60%	8,680
7475	7	1,397	28,6	não	60%	6,841
7475	7	1,397	16,2	não	200%	7,528
7475	7	1,397	22,4	não	200%	5,721
7475	7	1,397	28,6	não	200%	4,220
7475	7	1,397	16,2	sim	60%	3,229
7475	7	1,397	22,4	sim	60%	2,739
7475	7	1,397	28,6	sim	60%	2,356
7475	7	1,397	16,2	sim	200%	2,507
7475	7	1,397	22,4	sim	200%	2,195
7475	7	1,397	28,6	sim	200%	1,909
7050	12	3,175	12,5	não	60%	16,222
7050	12	3,175	16,9	não	60%	12,627
7050	12	3,175	18,5	não	60%	11,288
7050	12	3,175	12,5	não	200%	12,386
7050	12	3,175	16,9	não	200%	9,020
7050	12	3,175	18,5	não	200%	7,790
7050	12	3,175	12,5	sim	60%	6,115
7050	12	3,175	16,9	sim	60%	4,436
7050	12	3,175	18,5	sim	60%	3,836
7050	12	3,175	12,5	sim	200%	4,257
7050	12	3,175	16,9	sim	200%	3,078
7050	12	3,175	18,5	sim	200%	2,652

A fim de avaliar a qualidade dessas previsões, podem-se comparar os gráficos de efeito da velocidade de impacto e da cobertura (Figuras 4.174 a

4.178) com os gráficos dos valores reais, para observar se os dados previstos seguem a mesma tendência.

Figura 4.174: Efeito da velocidade de impacto sobre r/H^2 . Chapas com cobertura baixa (60 a 92%). Em preto: dados fictícios calculados.

Figura 4.175: Efeito da velocidade de impacto sobre r/H^2 . Chapas com cobertura alta (200%). Em preto: dados fictícios calculados.

Há uma aparente anormalidade no comportamento das chapas fictícias de 4 mm pré-tensionadas (série '**S230, pré-tensionado**'), facilmente observável

nas duas figuras anteriores. O raio de curvatura calculada para a velocidade de impacto média é maior (menor deformação) que as chapas simuladas com velocidades baixa e alta. Isto se justifica, porque, para as chapas de 4 mm, foram simuladas as duas ligas ao mesmo tempo, alternadamente, como pode ser visto na Tabela 4.10. Fica claro, a partir de então, que a diferença de comportamento das duas ligas não é tão desprezível como suposto anteriormente, apesar de se mesclar às incertezas de medições das 3 repetições de ensaio para cada condição de jateamento (Figura 4.139, pág. 180). A liga 7050, por ter maior resistência mecânica, deforma menos que a liga 7475, que desenvolve raios de curvatura menores.

Figura 4.176: Efeito da cobertura sobre r/H^2 . Chapas jateadas com granalha S230. Em preto: dados fictícios calculados.

Figura 4.177: Efeito da cobertura sobre r/H^2 . Chapas jateadas com granalha S550. Em preto: dados fictícios calculados.

Figura 4.178: Efeito da cobertura sobre r/H^2 . Chapas jateadas com granalha 1/8". Em preto: dados fictícios calculados.

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 con-

trole 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 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.

5 Conclusões

Após análise dos resultados obtidos, pode-se observar que:

- O processo de conformação por jateamento com granalhas no alumínio possibilitou a obtenção de diversos níveis de deformação (curvaturas), tornando viável a conformação de formas complexas.
- A visualização e caracterização da camada deformada plasticamente não pode ser feita satisfatoriamente através de microscopia óptica.
- Não foi possível caracterizar as amostras com medidas de dureza, mesmo comparando-se amostras recozidas e encruadas.
- Tratamentos térmicos de recristalização não são eficazes para revelar a camada deformada devido ao encruamento pré-existente nas chapas devido à laminação.
- Apesar de resultados anteriores serem satisfatórios, a técnica de EBSD não é prática o suficiente para ser realizada em grandes quantidades de amostras e os resultados obtidos não possibilitam a caracterização da camada deformada.
- As ligas 7050-T7451 e 7475-T7351 mostraram o mesmo comportamento em parâmetros de processo semelhantes.
 - As chapas que sofrem o maior encurvamento são as mais finas.
 - Os efeitos do tamanho da esfera e da velocidade de impacto são os mais significativos.
 - O efeito da porcentagem de cobertura é o mais indicado para pequenas correções durante o jateamento de formas complexas.
 - A pré-tensão do componente é muito influente na deformação final e no perfil de tensões residuais.
 - A liga 7050 tem resistência mecânica pouco maior que a liga 7475. Embora não seja relevante para a maioria das análises, a rede neural se mostrou sensível a esta diferença, prevendo raios de curvatura menores para a liga mais resistente.
- Há correlação entre a espessura da camada deformada e a profundidade de máxima compressão, medidas através dos perfis de tensões residuais, e a energia cinética das granalhas.

- Foi possível obter equações semi-empíricas de relação entre processo e encurvamento através do valor de densidade de energia cinética (K). O raio de curvatura, r , é proporcional a K , valor que engloba os parâmetros diâmetro de granalha, velocidade de impacto e espessura da chapa, segundo uma lei de potência.
- A previsão do valor de raio de curvatura através de redes neurais artificiais mostrou-se o método mais eficaz para controle rápido do processo. Sugere-se a investigação dessa ferramenta em trabalhos futuros, em diferentes grupos de dados, ou com novas arquiteturas, ou observando-se outros valores de saída, como os dados de tensão residual.

Em resumo, conclui-se que há pouca possibilidade de se caracterizar a camada deformada plasticamente pelo processo de conformação por jateamento com granalhas através de técnicas envolvendo microscopia, porém o melhor método para medição da sua espessura é por obtenção de perfis de tensões residuais. Foi possível obter um eficiente método de previsão de raio de curvatura através de valores empíricos de corpo de prova e processo. O método mais prático e preciso de previsão de curvatura e controle do processo parece ser o uso de redes neurais artificiais.

Referências

- 1 GONÇALVES, M. Desenvolvimentos recentes no segmento de ligas de alumínio aeronáuticas. In: ABAL. *IV Congresso Internacional do Alumínio*. São Paulo, 2010.
- 2 FONTANARI, V. et al. Comparison of the hole-drilling and x-ray diffraction methods for measuring the residual stresses in shot-peened aluminum alloys. *Journal of Strain Analysis*, v. 40, n. 2, p. 199–209, set. 2005.
- 3 YOSHIKATO, A. *Shot Peening - Training: Concepts and technology*. São José dos Campos, SP, jun. 2004.
- 4 O'HARA, P. Peen forming - a developing technique. In: _____. *Shot Peening*. Alemanha: DGM, 2002. p. 217–226.
- 5 DUCKER WORLDWIDE. *Executive Summary*. EUA, dec. 2009.
- 6 VIANA, T. G. et al. Caracterização do fechamento de trinca de fadiga numa liga Al 7475 pré-deformada e com shot peening. *Revista Matéria*, v. 10, n. 3, p. 454–462, 2005. ISSN 1517-7076. Disponível em: <<http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10683>>.
- 7 ABAL – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. *Aplicações*. Disponível em: <<http://abal.org.br>>. Acesso em: ago. 2009.
- 8 DAVIS, J. (Ed.). *ASM Specialty Handbook: Aluminum and aluminum alloys*. OH, EUA, jan. 1993. 784 p.
- 9 CONSERVA, M.; DONZELLI, G.; TRIPPODO, R. Classification of aluminum alloys and their tempers. In: _____. *Aluminum and its applications*. IT: Edimet, 1992. p. 76–77.
- 10 TOTTEN, G. E.; MACKENZIE, D. S. (Ed.). *Handbook of Aluminum: Physical metallurgy and processes*. Nova Iorque, EUA, 2003. v. 1.
- 11 ROBSON, J. D. A new model for prediction of dispersoid precipitation in aluminium alloys containing zirconium and scandium. *Acta Materialia*, v. 52, p. 1409–1421, nov. 2003.
- 12 Starke Jr., E. A.; STALEY, J. T. Application of modern aluminum alloys to aircraft. *Progress in Aerospace Sciences*, v. 32, p. 131–172, fev. 1996.
- 13 HU, H. E. et al. Microstructure characterization of 7050 aluminum alloy during dynamic recrystallization and dynamic recovery. *Materials Characterization*, v. 59, p. 1185–1189, 2008.
- 14 AMERICAN SOCIETY FOR METALS. *ASM Metals Handbook: Volume 2, properties and selection: Nonferrous alloys and special-purpose materials*. OH, EUA, 1992.

- 15 LIU, J. hua et al. Effect of the microstructure of al 7050-t7451 on anodic oxide formation in sulfuric acid. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, v. 16, n. 4, p. 432–439, 2009.
- 16 AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. *ANSI H35.1/H35.1M*: Standard alloy and temper designation systems for aluminum. [S.I.], 2009.
- 17 METAL SUPPLIERS ONLINE. *7050 Aluminum Material Property Data Sheet*. Disponível em: <<http://www.suppliersonline.com/propertypages/7050.asp>>. Acesso em: jun. 2008.
- 18 METAL SUPPLIERS ONLINE. *7475 Aluminum Material Property Data Sheet*. Disponível em: <<http://www.suppliersonline.com/propertypages/7475.asp>>. Acesso em: jun. 2008.
- 19 MatWeb - MATERIAL PROPERTY DATA. *The Online Materials Information Resource*: Aluminum 7050-T7451 (7050-T73651). Disponível em: <<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=142262cf7fbc4c83917ca5c3d17df1ed>>. Acesso em: ago. 2009.
- 20 MatWeb - MATERIAL PROPERTY DATA. *The Online Materials Information Resource*: Aluminum 7475-T7351. Disponível em: <<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=92620a0b7b9a44fcb34799eda01d2b18>>. Acesso em: ago. 2009.
- 21 AL-HASSANI, S. T. S. Mechanical aspects of residual stress development in shot peening. In: ICSP, 1. *International Conference on Shot Peening*. França, 1981. p. 583–602.
- 22 MARKOVINA, R.; BLAGOJEVIC, B.; BAN, D. Peen-forming - the possibility of technology transfer from aircraft industry to the production of high-speed ships. *BrodoGradnja*, Croácia, v. 59, p. 35–43, 2008.
- 23 BROWN, S. *Feasibility of Replacing Structural Steel with Aluminum Alloys in the Shipbuilding Industry*. Disponível em: <<http://tc.engr.wisc.edu/uer/uer99/author1/content.html>>. Acesso em: abr. 2011.
- 24 MARKOVINA, R. The main principles of using integral panels (skins) in modern shipbuilding industry. In: *Proceedings of the Sixth International Conference on Advanced Manufacturing Systems and Technology*. Austria: [s.n.], 2002.
- 25 GONZALES, M. A. C. et al. Modelagem computacional da influência da espessura da peça e a velocidade de impacto do jato no processo de jateamento com granalha. In: PUCP. *8º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica*. Cusco, Peru, 2007.
- 26 BAUGHMAN, D. L. An overview of peen forming technology. In: ICSP, 2. *International Conference on Shot Peening*. Chicago, U.S.A., 1984. p. 28–32.
- 27 ALMEN, J. O. *Shot blasting test*. [S.I.], jun. 1944. Disponível em: <<http://www.freepatentsonline.com/2350440.html>>.
- 28 SAE INTERNATIONAL. *SAE J 444*: Cast shot and grit size specifications. [S.I.], 1993.

- 29 FUCHS, H. O. Defects and virtues of the almen intensity scale. In: ICSP, 2. *International Conference on Shot Peening*. USA, 1984. p. 74–78.
- 30 KIRK, D. Interactive shot peening control. In: ICSP, 5. *International Conference on Shot Peening*. U.K., 1993. p. 10–15.
- 31 ZENG, Y. Finite element simulation of shot peen forming. In: _____. *Shot Peening*. Alemanha: DGM, 2002. p. 555–561.
- 32 SILVA, E. C. da; BUTTON, S. T.; PAVANELLO, R. Estado atual da conformação pelo processo "peen forming". *Revista UNIVILLE*, Joinville, SC, v. 11, n. 2, 2006.
- 33 IIDA, K. Dent and affected layer produced by shot peening. In: ICSP, 2. *International Conference on Shot Peening*. USA, 1984. p. 283–292.
- 34 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.
- 35 WOHLFAHRT, H. The influence of peening conditions on the resulting distribution of residual stress. In: ICSP, 2. *International Conference on Shot Peening*. Chicago, USA, 1984. p. 316–331.
- 36 MENIG, R. Depth profiles of macro residual stresses in thin shot peened steel plates determined by X-ray and neutron diffraction. *Scripta Materialia*, v. 45, p. 977–983, outubro 2001. ISSN 13596462. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359646201010636>>.
- 37 GRASTY, L. V.; ANDREW, C. Shot peen forming sheet metal: finite element prediction of deformed shape. *Proc Instn Mech Engrs*, v. 210, p. 361–366, 1996.
- 38 HAN, K.; OWEN, D. R. J.; PERIC, D. Combined finite/discrete element and explicit/implicit simulations of peen forming process. *Engineering Computations*, v. 19, n. 1, p. 92–118, 2002. Disponível em: <<http://www.emeraldinsight.com/0264-4401.htm>>.
- 39 KITTEL, S. et al. Tight tolerance peen forming with on-line shape control. In: ICSP. *International Conference on Shot Peening*. Poland, 1999. p. 301–307.
- 40 WANG, T.; PLATTS, J.; LEVERS, A. Finite element impact modeling for shot peen forming. In: ICSP, 8. *International Conference on Shot Peening*. Alemanha, 2002. p. 541–546.
- 41 AL-OBAID, Y. F. Shot peening mechanics: experimental and theoretical analysis. *Mechanics of Materials*, v. 19, n. 2-3, p. 251–260, 1995. ISSN 0167-6636. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6TX6-3YB571C-N/2/965035ae028bf7aacff08c497cfc6070>>.
- 42 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>>.

- 43 OXFORD INSTRUMENTS. *Electron Backscatter Diffraction*. Disponível em: <<http://www.ebsd.com/ebsdexplained.htm>>. Acesso em: fev. 2009.
- 44 CASTRO, N. A. *Controle da textura e da microtextura durante o processo de fabricação de aços elétricos semiprocessados*. Tese (Doutorado) — Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2008.
- 45 WRIGHT, S. I.; NOWELL, M. M. EBSD image quality mapping. *Microscopy and Analysis*, v. 12, p. 72–84, 2006.
- 46 NOWELL, M. M.; WITT, R. A.; TRUE, B. EBSD sample preparation: Techniques, tips and tricks. *Microsc. Microanal.*, v. 11(Supp 2), p. 504–505, 2005.
- 47 WUHRER, R. et al. EBSD and XRM of phases in vacuum cast composite alloys. *Microsc. Microanal.*, v. 11(Supp 2), p. 1678–1679, 2005.
- 48 POETSCHER, F. *Efeito do número de passes e do tratamento térmico pós-soldagem de liga de alumínio AA 6063 soldada por atrito linear com mistura (FSW)*. Tese (Doutorado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2009.
- 49 GAO, N. et al. A comparison of grain size determination by light microscopy and EBSD analysis. *Journal of Materials Science*, v. 40, n. 18, p. 4971–4974, set. 2005.
- 50 FONDA, R.; BINGERT, J. Texture variations in an aluminum friction stir weld. *Scripta Materialia*, v. 57, n. 11, p. 1052–1055, 2007. ISSN 1359-6462. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6TY2-4PKP4K2-1/2/57079dc03763437b70b1363be7b8021b>>.
- 51 IMS. *SlipLines*: The international metallographic society newsletter. jun. 2007. 8 p. Disponível em: <<http://www.internationalmetallographicsociety.org/sliplines/june07.pdf>>.
- 52 MARTINS, J. de P.; PADILHA, A. F. Caracterização da liga comercial de alumínio 3003 produzida por fundição contínua de chapas (“twin roll caster”) - textura cristalográfica. *R. Esc. Minas*, v. 60(3), p. 565–569, jul. set. 2007. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rem/v60n3/v60n3a19.pdf>>.
- 53 FONSECA, G. S. da. *Preparo para EBSD*. [mensagem pessoal] Mensagem recebida por: <anapaola@ipt.br> em 7 de abril de 2009.
- 54 CULLITY, B. D. Stress measurement. In: _____. *Elements of X-ray diffraction*. University of Notre Dame: ADDISON-WESLEY PUBLISHING COMPANY, 2001. cap. 17, p. 431–453.
- 55 PREVEY, P. S. *ASM Metals Handbook*: Volume 10, materials characterization. OH, EUA.
- 56 MOORE, M. G.; EVANS, W. P. Mathematical correction for stress in removed layers in x-ray diffraction residual stress analysis. *SAE Transactions*, v. 66, p. 340–345, 1958.
- 57 HILLEY, M. E. (Ed.). *SAE J 784-A: Residual stress measurement by x-ray diffraction*. [S.l.], 1971.

- 58 WICK, A. et al. Effect of shot peening parameters on the surface characteristics of differently heat treated aisi 4140. In: ICSP, 7. *International Conference on Shot Peening*. Warsaw, Polônia, 1999. p. 42–53.
- 59 STERGIOU, C.; SIGANOS, D. *Neural Networks*. London, UK, 1996. Disponível em: <http://www.doc.ic.ac.uk/~nd/surprise_96/journal/vol4/cs11/report.html>.
- 60 MACKAY, D. J. C. *Information Theory, Inference, and Learning Algorithms*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2003.
- 61 MEDEIROS, J. S. de. *Bancos de Dados Geográficos e Redes Neurais Artificiais: Tecnologias de Apoio à Gestão de Território*. Tese (Doutorado) — FFLCH-USP, São Paulo, ago. 1999. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/teses/simeao>>.
- 62 CAMPANA, R. C.; PLAUT, R. L. Aplicabilidade de redes neurais adaptativas (RNA) na extrusão de ligas de alumínio. In: III CONGRESSO INTERNACIONAL DO ALUMÍNIO. São Paulo, 2007. p. 460–468.
- 63 CAMPANA, R. C.; PLAUT, R. L. Use of adaptive neural networks (ANN) in the aluminum extrusion process control. In: NINTH INTERNATIONAL ALUMINUM EXTRUSION SEMINAR ET'08. Orlando, Florida USA, 2008.
- 64 ALMEIDA, R. Z. H.; MARTINS, F. P. R.; FLEURY, A. T. Planejamento de trajetória de jateamento para obtenção de cobertura uniforme em processos de peen forming. In: ABCM. *V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*. Salvador, 2008.
- 65 KIRK, D. Size and variability of cast steel shot particles. *The Shot Peener*, v. 23, p. 24–32, 2009.
- 66 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.
- 67 NEURODIMENSION INC. *NeuroSolutions Frequently Asked Questions (FAQ)*. Disponível em: <<http://www.neurosolutions.com/products/ns/faq.html>>. Acesso em: mai. 2011.
- 68 SCHUBBE, J. J. Fatigue crack propagation in 7050-t7451 plate alloy. *Engineering Fracture Mechanics*, v. 76, p. 1037–1048, mai. 2009.
- 69 RUCKERT, C. O. F. T. et al. On the relation between micro- and macroscopic fatigue crack growth rates in aluminum alloy AMS 7475-t7351. *International Journal of Fracture*, v. 142, n. 3-4, dez. 2006.
- 70 EFFECT of combined shot-peening and PEO treatment on fatigue life of 2024 Al alloy. *Thin Solid Films*, v. 515, p. 1187–1191, 2006.
- 71 LEE, W. B. et al. Strengthening dual phase steel welds by shot peening. *ISIJ International*, v. 49, n. 12, p. 1972–1974, 2009.
- 72 PADILHA, A. F. *Encruamento, Recristalização e Crescimento de Grão*. São Paulo: ABM, 2005.

73 CLAUSEN, R.; STANGENBERG, J. Device for the determination of impact velocities in shot peening. In: ICSP, 8. *International Conference on Shot Peening*. Alemanha, 2002. p. 89–95.

74 EMBRAER. *NE40-100*: Shot peening - Rev. Q. [S.l.], 2006. 18 p.

75 KLUG, H. P.; ALEXANDER, L. Stress measurement in metals. In: _____. *X-ray diffraction procedures*. [S.l.]: John Wiley & Sons Inc., 1954. cap. 11, p. 755–790.

Apêndice A – Método de determinação de tensões residuais por difração de raios-X

A teoria clássica da elasticidade admite os materiais como perfeitamente elásticos, homogêneos e isotrópicos. Ainda é admitido que as constantes elásticas sejam as mesmas em compressão e sistemas combinados de tensões, como em tração, e que elas aderem fielmente à lei de Hooke^[75]:

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (\text{A.1})$$

onde E é o módulo de Young ou módulo de elasticidade e

$$\epsilon_{\phi\psi} = \frac{\Delta d}{d_0} = \frac{d_{\phi\psi} - d_0}{d_0} \quad (\text{A.2})$$

onde $d_{\phi\psi}$ é o espaçamento entre os planos medido em qualquer direção definida pelos ângulos ϕ e ψ e d_0 é o espaçamento no estado livre de tensões, que pode ser previamente medido, calculado ou consultado em um banco de dados.

Normalmente, deseja-se medir a tensão σ_ϕ em uma direção específica, como por exemplo a direção OB da Figura A.1, onde OB faz um ângulo ϕ com a direção principal 1 e um ângulo β com o eixo x.

De acordo com a norma SAE J 784a (1971), supõe-se um estado plano de tensões, ou seja, que a tensão fora do plano da superfície, $\sigma_z = \sigma_3$, é zero e que o estado de tensões no volume amostral analisado é homogêneo^[57]. No entanto, existe uma componente de deformação, $\epsilon_z = \epsilon_3$, perpendicular à superfície, como resultante da contração dada pelo coeficiente de Poisson ν :

Figura A.1: Relações angulares entre a tensão a ser medida (σ_ϕ), tensões principais (σ_1 , σ_2 e σ_3), e eixos arbitrários (x , y e z)^[54].

$$\begin{aligned}\epsilon_x &= \frac{1}{E}[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \\ \epsilon_y &= \frac{1}{E}[\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] \\ \epsilon_z &= \frac{1}{E}[\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \Rightarrow \epsilon_3 = -\frac{\nu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2)^{[54]}\end{aligned}\quad (\text{A.3})$$

A deformação, $\epsilon_{\phi\psi}$, na direção definida pelos ângulos ϕ e ψ é:

$$\epsilon_{\phi\psi} = \left[\frac{1+\nu}{E}(\sigma_1 \cos^2 \phi + \sigma_2 \sin^2 \phi) \sin^2 \psi \right] - \left[\frac{\nu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2) \right] \quad (\text{A.4})$$

Substituindo-se a equação A.2 na equação A.4, obtém-se o espaçamento interplanar para qualquer orientação:

$$d_{\phi\psi} = \left[\left(\frac{1+\nu}{E} \right)_{(hkl)} \sigma_\phi d_0 \right] \sin^2 \psi - \left[\left(\frac{\nu}{E} \right)_{(hkl)} d_0(\sigma_1 + \sigma_2) + d_0 \right] \quad (\text{A.5})$$

O subscrito (hkl) significa que as constantes elásticas E e ν não são os valores do *bulk*, mas de uma direção cristalográfica especificada pelos índices de Miller (hkl) ^[55].

Na prática, usa-se o método chamado $\sin^2 \psi$ para determinar a tensão a partir do valor experimental de deformação. De acordo com o método $\sin^2 \psi$, o espaçamento cristalino $d_{\phi\psi}$ é uma função linear de $\sin^2 \psi$ e a tensão pode ser

determinada medindo-se o espaçamento cristalino para múltiplas inclinações ψ ($0^\circ \leq |\psi| \leq 45^\circ$) e ajustando-se uma reta. A tensão é, então, calculada pela inclinação da reta, usando a equação A.6:

$$\sigma_\phi = \left(\frac{E}{1 + \nu} \right)_{(hkl)} \frac{1}{d_0} \left(\frac{\partial d_{\phi\psi}}{\partial \sin^2 \psi} \right) \quad (\text{A.6})$$

Utilizando a lei de Bragg:

$$n\lambda = 2d \sin \theta \Leftrightarrow d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta} \Leftrightarrow 2\theta = 2 \sin^{-1} \left(\frac{n\lambda}{2d} \right) \quad (\text{A.7})$$

onde λ é o comprimento de onda do raio-X incidente, n é um inteiro e θ é o ângulo de incidência do feixe, pode-se rearranjar as equações A.5 e A.6 para facilitar a análise repetitiva, plotando-se os valores de 2θ em função de $\sin^2 \psi$.

Apêndice B – Parâmetros de jateamento dos corpos de prova

Tabela B.1: Parâmetros de jateamento dos corpos de prova ensaiados.

CP nº	Liga	H (mm)	D (mm)	P (psi)	P-tens	Cobertura
6	7050	2	0,584	20	não	66%
7	7050	2	0,584	40	não	85%
8	7050	2	0,584	40	não	200%
9	7050	2	0,584	20	não	200%
10	7050	2	0,584	20	não	66%
11	7050	2	0,584	40	não	85%
12	7050	2	0,584	40	não	200%
13	7050	2	0,584	20	não	200%
14	7050	2	0,584	20	sim	66%
15	7050	2	0,584	60	sim	200%
17	7050	2	0,584	40	sim	85%
18	7050	2	0,584	40	sim	200%
20	7050	2	0,584	60	sim	200%
22	7050	2	0,584	20	sim	200%
23	7050	2	0,584	40	sim	85%
24	7050	2	0,584	40	sim	200%
27	7050	5	0,584	20	não	66%
28	7050	5	0,584	20	não	66%
29	7050	5	0,584	20	não	66%
30	7050	5	0,584	40	não	85%
31	7050	5	0,584	40	não	85%
32	7050	5	0,584	40	não	85%
34	7050	5	0,584	60	não	92%

Continua na próxima página

Tabela B.1 – Continuação da página anterior.

CP nº	Liga	H (mm)	D (mm)	P (psi)	P-tens	Cobertura
35	7050	5	0,584	60	não	92%
36	7050	5	0,584	60	não	200%
37	7050	5	0,584	60	não	200%
38	7050	5	0,584	60	não	200%
40	7475	5	0,584	20	não	66%
41	7475	5	0,584	20	não	66%
42	7475	5	0,584	20	não	66%
43	7475	5	0,584	40	não	85%
44	7475	5	0,584	40	não	85%
45	7475	5	0,584	40	não	85%
46	7475	5	0,584	60	não	92%
47	7475	5	0,584	60	não	92%
48	7475	5	0,584	60	não	92%
49	7475	5	0,584	60	não	200%
50	7475	5	0,584	60	não	200%
51	7475	5	0,584	60	não	200%
52	7050	2	0,584	60	sim	92%
53	7050	2	0,584	60	sim	200%
54	7050	2	0,584	40	sim	85%
55	7050	2	0,584	40	sim	200%
56	7050	2	0,584	20	sim	66%
57	7050	2	0,584	20	sim	200%
58	7050	2	0,584	20	sim	66%
59	7050	2	0,584	20	sim	200%
60	7050	2	0,584	20	sim	66%
61	7050	2	0,584	20	sim	200%
62	7050	2	0,584	20	sim	200%
63	7050	2	0,584	60	sim	92%
64	7050	2	0,584	40	sim	85%
65	7050	2	0,584	40	sim	200%
66	7050	2	0,584	20	não	200%
67	7475	2	0,584	60	sim	92%
68	7475	2	0,584	60	sim	200%
70	7475	2	0,584	40	sim	85%
71	7475	2	0,584	40	sim	200%
72	7475	2	0,584	20	sim	66%
73	7475	2	0,584	20	sim	200%
74	7475	2	0,584	20	sim	66%

Continua na próxima página

Tabela B.1 – Continuação da página anterior.

CP nº	Liga	H (mm)	D (mm)	P (psi)	P-tens	Cobertura
75	7475	2	0,584	20	sim	200%
76	7475	2	0,584	20	sim	66%
77	7475	2	0,584	20	sim	200%
78	7475	2	0,584	40	sim	200%
79	7475	2	0,584	40	sim	85%
80	7475	2	0,584	40	sim	200%
81	7475	2	0,584	40	sim	85%
82	7475	2	0,584	60	sim	200%
83	7475	2	0,584	60	sim	92%
84	7475	2	0,584	60	sim	200%
87	7050	5	0,584	60	não	92%
88	7050	5	0,584	40	não	200%
89	7050	5	0,584	40	não	200%
90	7050	5	0,584	40	não	200%
91	7050	5	0,584	20	não	200%
92	7050	5	0,584	20	não	200%
94	7050	5	0,584	60	sim	92%
95	7050	5	0,584	60	sim	92%
96	7050	5	0,584	60	sim	92%
97	7050	2	0,584	20	não	66%
98	7050	2	0,584	40	não	200%
99	7050	2	0,584	40	não	85%
100	7050	2	0,584	60	não	200%
101	7050	2	0,584	60	não	92%
106	7475	2	0,584	20	sim	200%
107	7475	2	0,584	20	sim	200%
108	7475	2	0,584	60	sim	200%
109	7475	2	0,584	60	sim	200%
110	7475	2	0,584	20	não	66%
111	7475	2	0,584	20	não	66%
112	7475	2	0,584	20	não	200%
113	7475	2	0,584	20	não	200%
114	7475	2	0,584	40	não	200%
115	7475	2	0,584	40	não	200%
116	7475	2	0,584	40	não	85%
117	7475	2	0,584	40	não	85%
118	7475	2	0,584	60	não	200%
119	7475	2	0,584	60	não	200%

Continua na próxima página

Tabela B.1 – Continuação da página anterior.

CP nº	Liga	H (mm)	D (mm)	P (psi)	P-tens	Cobertura
120	7475	2	0,584	60	não	92%
121	7475	2	0,584	60	não	92%
125	7475	5	0,584	40	não	200%
126	7475	5	0,584	40	não	200%
127	7475	5	0,584	40	não	200%
128	7475	5	0,584	20	não	200%
129	7475	5	0,584	20	não	200%
130	7475	5	0,584	20	não	200%
131	7050	5	0,584	60	sim	200%
132	7050	5	0,584	60	sim	200%
133	7050	5	0,584	60	sim	200%
134	7050	5	0,584	40	sim	85%
135	7050	5	0,584	40	sim	200%
136	7050	5	0,584	40	sim	200%
137	7050	5	0,584	40	sim	200%
138	7050	5	0,584	40	sim	85%
139	7050	5	0,584	40	sim	85%
140	7050	5	0,584	20	sim	66%
142	7050	5	0,584	20	sim	66%
143	7050	5	0,584	20	sim	200%
144	7050	5	0,584	20	sim	200%
145	7050	5	0,584	20	sim	200%
146	7475	5	0,584	60	sim	92%
147	7475	5	0,584	60	sim	92%
148	7475	5	0,584	60	sim	92%
149	7475	5	0,584	60	sim	200%
150	7475	5	0,584	60	sim	200%
151	7475	5	0,584	60	sim	200%
152	7475	5	0,584	40	sim	85%
153	7475	5	0,584	40	sim	200%
154	7475	5	0,584	40	sim	200%
155	7475	5	0,584	40	sim	200%
156	7475	5	0,584	40	sim	85%
157	7475	5	0,584	40	sim	85%
158	7475	5	0,584	20	sim	66%
159	7475	5	0,584	20	sim	66%
160	7475	5	0,584	20	sim	66%
161	7475	5	0,584	20	sim	200%

Continua na próxima página

Tabela B.1 – Continuação da página anterior.

CP nº	Liga	H (mm)	D (mm)	P (psi)	P-tens	Cobertura
162	7475	5	0,584	20	sim	200%
163	7475	5	0,584	20	sim	200%
164	7050	5	1,397	30	sim	60%
165	7050	5	1,397	30	sim	200%
166	7050	5	1,397	20	sim	60%
167	7050	5	1,397	20	sim	200%
168	7050	5	1,397	10	sim	60%
169	7050	5	1,397	10	sim	200%
170	7050	5	1,397	30	sim	60%
171	7050	5	1,397	30	sim	200%
172	7050	5	1,397	20	sim	60%
173	7050	5	1,397	20	sim	200%
174	7050	5	1,397	10	sim	60%
175	7050	5	1,397	10	sim	200%
176	7050	5	1,397	30	não	60%
177	7050	5	1,397	30	não	200%
178	7050	5	1,397	20	não	60%
179	7050	5	1,397	20	não	200%
180	7050	5	1,397	30	sim	200%
181	7050	5	1,397	30	sim	60%
182	7050	5	1,397	20	sim	200%
183	7050	5	1,397	20	sim	60%
184	7050	5	1,397	10	sim	60%
185	7050	5	1,397	10	sim	200%
186	7050	5	1,397	10	não	60%
187	7050	5	1,397	10	não	200%
188	7050	5	1,397	10	não	60%
189	7050	5	1,397	10	não	200%
190	7050	5	1,397	20	não	60%
191	7050	5	1,397	20	não	200%
192	7050	5	1,397	30	não	60%
193	7050	5	1,397	30	não	200%
194	7050	5	1,397	10	não	60%
195	7050	5	1,397	10	não	200%
196	7050	5	1,397	20	não	60%
197	7050	5	1,397	20	não	200%
198	7050	5	1,397	30	não	60%
199	7050	5	1,397	30	não	200%

Continua na próxima página

Tabela B.1 – Continuação da página anterior.

CP nº	Liga	H (mm)	D (mm)	P (psi)	P-tens	Cobertura
200	7475	5	1,397	10	não	60%
201	7475	5	1,397	10	não	200%
202	7475	5	1,397	20	não	60%
203	7475	5	1,397	20	não	200%
204	7475	5	1,397	30	não	60%
205	7475	5	1,397	30	sim	60%
206	7475	5	1,397	30	sim	200%
207	7475	5	1,397	20	sim	60%
208	7475	5	1,397	20	sim	200%
209	7475	5	1,397	10	sim	60%
210	7475	5	1,397	10	sim	200%
211	7475	5	1,397	30	sim	60%
212	7475	5	1,397	30	sim	200%
213	7475	5	1,397	20	sim	60%
214	7475	5	1,397	20	sim	200%
215	7475	5	1,397	10	sim	60%
216	7475	5	1,397	10	sim	200%
217	7475	5	1,397	30	não	60%
218	7475	5	1,397	30	não	200%
219	7475	5	1,397	20	não	60%
220	7475	5	1,397	20	não	200%
221	7475	5	1,397	30	sim	200%
222	7475	5	1,397	30	sim	60%
223	7475	5	1,397	20	sim	200%
224	7475	5	1,397	20	sim	60%
225	7475	5	1,397	10	sim	60%
226	7475	5	1,397	10	sim	200%
227	7475	5	1,397	10	não	60%
228	7475	5	1,397	10	não	200%
229	7475	5	1,397	30	não	200%
230	7475	5	1,397	10	não	60%
231	7475	5	1,397	10	não	200%
232	7475	5	1,397	20	não	60%
233	7475	5	1,397	20	não	200%
234	7475	5	1,397	30	não	60%
235	7475	5	1,397	30	não	200%
236	7475	10	1,397	30	não	60%
237	7475	10	1,397	30	sim	60%

Continua na próxima página

Tabela B.1 – Continuação da página anterior.

CP nº	Liga	H (mm)	D (mm)	P (psi)	P-tens	Cobertura
238	7475	10	1,397	30	não	200%
239	7475	10	1,397	30	sim	200%
240	7475	10	1,397	30	não	60%
241	7475	10	1,397	30	sim	60%
242	7475	10	1,397	30	não	200%
243	7475	10	1,397	30	sim	200%
244	7475	10	1,397	30	não	60%
245	7475	10	1,397	30	sim	60%
246	7475	10	1,397	30	não	200%
247	7475	10	1,397	30	sim	200%
248	7475	10	1,397	20	sim	60%
249	7050	10	1,397	30	não	60%
250	7050	10	1,397	30	sim	60%
251	7050	10	1,397	30	não	200%
252	7050	10	1,397	30	sim	200%
253	7050	10	1,397	30	não	60%
254	7050	10	1,397	30	sim	60%
255	7050	10	1,397	30	não	200%
256	7050	10	1,397	30	sim	200%
257	7050	10	1,397	30	não	60%
258	7050	10	1,397	30	sim	60%
259	7050	10	1,397	30	não	200%
260	7050	10	1,397	30	sim	200%
261	7050	10	1,397	20	sim	60%
262	7050	10	1,397	20	não	60%
263	7050	10	1,397	20	sim	200%
264	7475	10	1,397	20	não	60%
265	7050	10	1,397	20	não	200%
266	7475	10	1,397	20	sim	200%
267	7475	10	1,397	20	não	200%
268	7475	10	1,397	20	sim	60%
269	7475	10	1,397	20	não	60%
270	7475	10	1,397	20	sim	200%
271	7475	10	1,397	20	não	200%
272	7475	10	1,397	20	sim	60%
273	7475	10	1,397	20	não	60%
274	7475	10	1,397	20	sim	200%
275	7475	10	1,397	20	não	200%

Continua na próxima página

Tabela B.1 – Continuação da página anterior.

CP nº	Liga	H (mm)	D (mm)	P (psi)	P-tens	Cobertura
276	7475	10	1,397	10	sim	60%
277	7475	10	1,397	10	sim	60%
278	7475	10	1,397	10	sim	60%
279	7050	10	1,397	20	sim	60%
280	7050	10	1,397	20	não	60%
281	7050	10	1,397	20	sim	200%
282	7050	10	1,397	20	não	200%
283	7050	10	1,397	20	sim	60%
284	7050	10	1,397	20	não	60%
285	7050	10	1,397	20	sim	200%
286	7050	10	1,397	20	não	200%
287	7050	10	1,397	10	sim	60%
288	7050	10	1,397	10	sim	60%
289	7050	10	1,397	10	sim	60%
290	7050	10	1,397	10	sim	200%
291	7050	10	1,397	10	sim	200%
292	7050	10	1,397	10	sim	200%
293	7050	10	1,397	10	não	60%
294	7475	10	1,397	10	sim	200%
295	7475	10	1,397	10	sim	200%
296	7475	10	1,397	10	sim	200%
297	7475	10	1,397	10	não	60%
298	7475	10	1,397	10	não	200%
299	7475	10	1,397	10	não	60%
301	7475	10	1,397	10	não	60%
302	7475	10	1,397	10	não	200%
303	7475	10	3,175	25	sim	60%
304	7475	10	3,175	25	não	60%
305	7475	10	3,175	20	sim	60%
306	7475	10	3,175	20	não	60%
307	7475	10	3,175	25	sim	60%
308	7475	10	3,175	25	não	60%
309	7050	10	3,175	25	sim	60%
310	7050	10	3,175	25	não	60%
311	7050	10	3,175	20	sim	60%
312	7050	10	1,397	10	não	200%
313	7050	10	1,397	10	não	60%
314	7050	10	1,397	10	não	200%

Continua na próxima página

Tabela B.1 – Continuação da página anterior.

CP nº	Liga	H (mm)	D (mm)	P (psi)	P-tens	Cobertura
315	7050	10	1,397	10	não	60%
316	7050	10	1,397	10	não	200%
317	7050	10	3,175	20	não	60%
318	7050	10	3,175	25	sim	60%
319	7050	10	3,175	25	não	60%
320	7050	10	3,175	20	sim	60%
321	7050	10	3,175	20	não	60%
322	7050	10	3,175	25	não	60%
323	7050	10	3,175	20	sim	60%
324	7050	10	3,175	25	sim	60%
325	7050	10	3,175	20	não	60%
326	7050	10	3,175	10	sim	60%
327	7050	10	3,175	10	não	60%
328	7050	10	3,175	10	sim	60%
329	7050	10	3,175	10	não	60%
330	7050	10	3,175	10	sim	60%
331	7050	10	3,175	10	não	60%
332	7050	10	3,175	25	sim	200%
333	7050	10	3,175	25	não	200%
334	7050	10	3,175	25	sim	200%
335	7050	10	3,175	25	não	200%
336	7475	10	3,175	20	sim	60%
337	7475	10	3,175	20	não	60%
338	7475	10	3,175	25	sim	60%
339	7475	10	3,175	25	não	60%
340	7475	10	3,175	20	sim	60%
341	7475	10	3,175	20	não	60%
342	7475	10	3,175	10	sim	60%
343	7475	10	3,175	10	não	60%
344	7475	10	3,175	10	sim	60%
345	7475	10	3,175	10	não	60%
346	7475	10	3,175	10	sim	60%
347	7475	10	3,175	10	não	60%
348	7475	10	3,175	25	sim	200%
349	7475	10	3,175	25	não	200%
350	7475	10	3,175	25	sim	200%
351	7475	10	3,175	25	não	200%
352	7475	10	3,175	25	sim	200%

Continua na próxima página

Tabela B.1 – Continuação da página anterior.

CP nº	Liga	H (mm)	D (mm)	P (psi)	P-tens	Cobertura
353	7475	10	3,175	25	não	200%
354	7475	10	3,175	20	sim	200%
355	7475	10	3,175	20	não	200%
356	7475	10	3,175	20	sim	200%
357	7475	10	3,175	20	não	200%
358	7475	10	3,175	20	sim	200%
359	7475	10	3,175	20	não	200%
360	7475	10	3,175	10	sim	200%
361	7475	10	3,175	10	não	200%
362	7475	10	3,175	10	não	200%
363	7475	10	3,175	10	não	200%
364	7050	10	3,175	25	sim	200%
365	7050	10	3,175	25	não	200%
366	7050	10	3,175	20	sim	200%
367	7050	10	3,175	20	não	200%
368	7050	10	3,175	20	sim	200%
369	7050	10	3,175	20	não	200%
370	7050	10	3,175	20	sim	200%
371	7050	10	3,175	20	não	200%
372	7050	10	3,175	10	sim	200%
373	7050	10	3,175	10	não	200%
375	7050	10	3,175	10	não	200%
376	7050	10	3,175	10	não	200%
377	7050	10	3,175	10	sim	200%
378	7050	10	3,175	10	sim	200%
380	7050	10	3,175	25	sim	60%
381	7475	10	3,175	10	sim	200%
382	7475	10	3,175	10	sim	200%
384	7475	10	3,175	25	sim	200%
385	7475	10	3,175	25	sim	200%
386	7475	15	3,175	25	sim	60%
387	7475	15	3,175	25	não	60%
388	7475	15	3,175	20	sim	60%
389	7475	15	3,175	20	não	60%
390	7475	15	3,175	25	sim	60%
391	7475	15	3,175	25	não	60%
392	7475	15	3,175	20	sim	60%
393	7475	15	3,175	20	não	60%

Continua na próxima página

Tabela B.1 – Continuação da página anterior.

CP nº	Liga	H (mm)	D (mm)	P (psi)	P-tens	Cobertura
394	7475	15	3,175	25	não	60%
395	7475	15	3,175	25	sim	60%
396	7475	15	3,175	20	sim	60%
397	7475	15	3,175	20	não	60%
398	7475	15	3,175	25	sim	200%
399	7475	15	3,175	25	sim	200%
400	7050	15	3,175	25	sim	60%
401	7050	15	3,175	25	não	60%
402	7050	15	3,175	20	sim	60%
403	7050	15	3,175	20	não	60%
404	7050	15	3,175	25	sim	60%
405	7050	15	3,175	25	não	60%
406	7050	15	3,175	20	sim	60%
407	7050	15	3,175	20	não	60%
408	7050	15	3,175	25	sim	60%
409	7050	15	3,175	25	não	60%
410	7050	15	3,175	20	sim	60%
411	7050	15	3,175	20	não	60%
412	7050	15	3,175	25	sim	200%
413	7050	15	3,175	25	sim	200%
414	7050	15	3,175	25	sim	200%
415	7050	15	3,175	20	sim	200%
416	7050	15	3,175	25	não	200%
417	7050	15	3,175	25	não	200%
418	7050	15	3,175	25	não	200%
419	7050	15	3,175	20	sim	200%
420	7050	15	3,175	20	sim	200%
421	7050	15	3,175	20	não	200%
422	7050	15	3,175	20	não	200%
423	7050	15	3,175	20	não	200%
424	7050	15	3,175	10	sim	60%
425	7050	15	3,175	10	sim	60%
426	7050	15	3,175	10	sim	60%
427	7050	15	3,175	10	não	60%
428	7050	15	3,175	10	não	60%
429	7050	15	3,175	10	não	60%
430	7050	15	3,175	10	sim	200%
431	7050	15	3,175	10	sim	200%

Continua na próxima página

Tabela B.1 – Concluído da página anterior.

CP nº	Liga	H (mm)	D (mm)	P (psi)	P-tens	Cobertura
432	7050	15	3,175	10	não	200%
433	7050	15	3,175	10	sim	200%
434	7050	15	3,175	10	não	200%
435	7050	15	3,175	10	não	200%
439	7475	15	3,175	25	sim	200%
440	7475	15	3,175	25	não	200%
441	7475	15	3,175	25	não	200%
442	7475	15	3,175	25	não	200%
443	7475	15	3,175	20	sim	200%
444	7475	15	3,175	20	sim	200%
445	7475	15	3,175	20	sim	200%
446	7475	15	3,175	20	não	200%
447	7475	15	3,175	20	não	200%
448	7475	15	3,175	20	não	200%
449	7475	15	3,175	10	sim	60%
450	7475	15	3,175	10	sim	60%
451	7475	15	3,175	10	sim	60%
452	7475	15	3,175	10	não	60%
453	7475	15	3,175	10	não	60%
454	7475	15	3,175	10	não	60%
455	7475	15	3,175	10	sim	200%
456	7475	15	3,175	10	sim	200%
457	7475	15	3,175	10	sim	200%
458	7475	15	3,175	10	não	200%
459	7475	15	3,175	10	não	200%
460	7475	15	3,175	10	não	200%

Apêndice C – Medidas do raio de curvatura dos corpos de prova

Curvatura dos corpos de prova de 2mm nas ligas AA 7050 e AA 7475

Conforme indicado na matriz de experimentos, esses corpos de prova foram submetidos a ensaios de JCG utilizando granalhas S230. As medidas de curvatura obtidas, para as diferentes condições experimentais, são apresentadas nas tabelas C.1 e C.2 a seguir.

Tabela C.1: Curvatura dos corpos de prova de 2 mm da liga AA 7050.

Liga	Pressão (psi)	Cobertura	Pré-tensão	CP nº	Raio de Curvatura (mm)
7050	20	66%	N	006	927,76
				010	898,10
				097	1318,90
			S	014	446,66
				056	408,15
				058	437,98
		200%	N	009	732,48
				013	774,49
				066	674,74
			S	022	304,77
				059	293,09
				062	311,84
	40	85%	N	007	640,02
				011	730,59
				099	764,85
			S	017	286,93
				054	295,51
				064	291,29
		200%	N	008	556,26
				012	649,90
				098	628,94
			S	018	260,06
				024	256,48
				064	254,03
	60	92%	N	101	740,49
			S	052	260,05
				063	277,83
		200%	N	100	596,79
			S	015	237,97
				020	241,22
				053	244,06

Tabela C.2: Curvatura dos corpos de prova de 2 mm da liga AA 7475.

Liga	Pressão (psi)	Cobertura	Pré-tensão	CP nº	Raio de Curvatura (mm)
7475	20	66%	N	110 111	1257,75 1251,26
			S	072 074	433,96 450,24
		200%	N	112 113	734,89 754,73
			S	075 106 107	284,08 309,15 315,39
		85%	N	116 117	746,91 740,09
			S	070 079 081	289,14 288,85 279,63
	40	200%	N	114 115	588,43 598,83
			S	071 078 080	243,01 235,90 233,53
		92%	N	120 121	677,70 677,06
			S	067 083	257,68 261,46
	60	200%	N	118 119	500,05 577,97
			S	082 108 109	227,83 235,83 235,33

Curvatura dos corpos de prova de 5 mm nas ligas AA 7050 e AA 7475

Conforme indicado na matriz de experimentos, esses corpos de prova foram submetidos a ensaios de JCG utilizando-se gralhas S230 e S550. As medidas de curvatura obtidas para as diferentes condições experimentais, referentes, respectivamente, a esses dois tipos de gralhas, são apresentadas nas Tabelas C.3, C.4, C.5 e C.6 a seguir.

Tabela C.3: Curvaturas dos corpos de prova de 5 mm, gralhas S230, liga AA 7050.

Liga	Pressão (psi)	Cobertura	Pré-tensão	CP nº	Raio de Curvatura (mm)
7050	20	66%	N	027	4294,59
				028	4327,59
				029	4091,61
			S	140	2387,29
				142	2556,54
		200%	N	091	4263,60
				092	4610,31
			S	143	1943,48
				144	2004,64
				145	2024,40
	40	85%	N	030	3496,75
				031	3330,68
				032	3287,37
			S	134	1859,59
				138	1795,06
				139	1998,03
		200%	N	088	3272,00
				089	3269,16
				090	3192,92
			S	135	1622,56
				136	1603,41
				137	1526,20
	60	92%	N	034	3311,95
				035	3142,11
				087	3304,84
			S	094	1781,40
				095	1748,32
				096	1720,33
		200%	N	036	3034,84
				037	2823,41
				038	2831,71
			S	131	1474,60
				132	1480,30
				133	1527,98

Tabela C.4: Curvaturas dos corpos de prova de 5 mm, granalhas S230, liga AA 7475.

Liga	Pressão (psi)	Cobertura	Pré-tensão	CP nº	Raio de Curvatura (mm)
7475	20	66%	N	040	4305,72
				041	4426,35
				042	4327,17
			S	158	2389,93
				159	2474,51
				160	2341,63
		200%	N	128	3656,10
				129	3562,84
				130	3609,77
			S	161	2000,04
				162	2012,40
				163	1853,21
	40	85%	N	043	3457,24
				044	3653,98
				045	3904,08
			S	152	1782,31
				156	1743,40
				157	1825,44
		200%	N	125	2823,90
				126	2710,52
				127	3016,12
			S	153	1642,67
				154	1575,23
				155	1600,17
	60	92%	N	046	3535,76
				047	3322,42
				048	3391,87
			S	146	1696,89
				147	1673,80
				148	1576,44
		200%	N	049	3006,83
				050	2951,79
				051	3228,74
			S	149	1507,47
				150	1492,36
				151	1533,28

Tabela C.5: Curvaturas dos corpos de prova de 5 mm, granalhas S550, liga AA 7050.

Liga	Pressão (psi)	Cobertura	Pré-tensão	CP nº	Raio de Curvatura (mm)
7050	10	60%	N	186	5369,71
				188	8219,34
				194	4981,71
			S	168	1773,04
				174	1638,73
				184	1837,51
		200%	N	187	3157,78
				189	3018,60
				195	3353,40
			S	169	1308,57
				175	1094,57
				185	1440,01
	20	60%	N	178	3058,09
				190	3570,58
				196	3978,37
			S	166	1340,85
				172	1227,01
				183	1379,45
		200%	N	179	2316,81
				191	2570,48
				197	2505,70
			S	167	993,71
				173	944,02
				182	1092,39
	30	60%	N	176	3072,10
				192	3155,61
				198	3004,16
			S	164	1235,57
				170	1167,82
				181	1267,34
		200%	N	177	1816,12
				193	2074,81
				199	1810,53
			S	165	905,28
				171	844,30
				180	905,81

Tabela C.6: Curvaturas dos corpos de prova de 5 mm, granalhas S550, liga AA 7475.

Liga	Pressão (psi)	Cobertura	Pré-tensão	CP nº	Raio de Curvatura (mm)
7475	10	60%	N	200	4548,86
				227	5213,33
				230	4901,46
			S	209	1741,03
				215	1533,28
				225	1825,78
		200%	N	201	3170,14
				228	3475,62
				231	3044,96
			S	210	1317,45
				216	1242,62
				226	1427,80
	20	60%	N	202	3720,28
				219	3032,12
				232	3795,49
			S	207	1375,34
				213	1261,63
				224	1338,38
		200%	N	203	2462,94
				220	2048,26
				233	2386,48
			S	208	975,20
				214	956,57
				223	971,15
	30	60%	N	204	3342,27
				217	2876,90
				234	3062,15
			S	205	1180,84
				211	1120,32
				222	1188,39
		200%	N	218	1841,25
				229	2225,51
				235	1847,09
			S	206	850,99
				212	785,20
				221	883,44

Curvatura dos corpos de prova de 10 mm nas ligas AA 7050 e AA 7475.

Conforme indicado na matriz de experimentos, esses corpos de prova foram submetidos a ensaios de JCG utilizando-se granalhas S550 e 1/8". As medidas de curvatura obtidas para as diferentes condições experimentais, referentes, respectivamente, a esses dois tipos de granalhas e aos dois tipos de ligas, são apresentadas nas Tabelas C.7, C.8, C.9 e C.10 a seguir.

Tabela C.7: Curvaturas dos corpos de prova de 10 mm, granalhas S550, liga AL7050.

Liga	Pressão (psi)	Cobertura	Pré-tensão	CP nº	Raio de Curvatura (mm)
7050	10	60%	N	293	18021,66
				313	16563,61
				315	21296,75
			S	287	7225,84
				288	7048,94
				289	6932,85
		200%	N	312	15806,55
				314	16462,86
				316	19421,45
			S	290	9660,79
				291	5676,13
				292	5434,13
	20	60%	N	262	23424,07
				280	19399,66
				284	15914,24
			S	261	6306,63
				279	6377,64
				283	6488,22
		200%	N	265	12222,90
				282	10562,72
				286	12350,52
			S	263	4821,73
				281	4883,70
				285	4909,30
	30	60%	N	249	11438,36
				253	26875,55
				257	15712,41
			S	250	5774,35
				254	5712,19
				258	6745,18
		200%	N	251	8720,49
				255	13070,33
				259	7713,17
			S	252	5342,48
				256	4551,76
				260	4092,28

Tabela C.8: Curvaturas dos corpos de prova de 10 mm, granalhas S550, liga AA 7475.

Liga	Pressão (psi)	Cobertura	Pré-tensão	CP nº	Raio de Curvatura (mm)
7475	10	60%	N	297	22562,87
				299	18951,44
				301	19081,01
			S	276	6979,24
				277	7343,49
				278	7221,14
		200%	N	298	15368,49
				300	36600,51
				302	15706,27
			S	294	5179,62
				295	5172,07
				296	5625,70
	20	60%	N	264	17468,71
				269	18226,79
				273	16938,36
			S	248	5487,92
				268	5857,11
				272	5865,61
		200%	N	267	11148,15
				271	11652,41
				275	11065,16
			S	266	4125,44
				270	4427,58
				274	4903,06
	30	60%	N	236	14286,98
				240	14169,28
				244	13700,10
			S	237	5185,36
				241	5018,17
				245	5061,30
		200%	N	238	9733,71
				242	9794,84
				246	10376,31
			S	239	4020,32
				243	3765,61
				247	3815,07

Tabela C.9: Curvaturas dos corpos de prova de 10 mm, granalhas 1/8", liga AA 7050.

Liga	Pressão (psi)	Cobertura	Pré-tensão	CP nº	Raio de Curvatura (mm)
7050	10	60%	N	327	12857,55
				329	15725,11
				331	9329,11
			S	326	3927,46
				328	4169,61
				330	4008,19
		200%	N	373	9662,05
				375	8288,86
				376	8298,32
			S	372	3223,31
				377	3352,78
				378	3297,44
	20	60%	N	317	8470,30
				321	7271,42
				325	9275,74
			S	311	2912,37
				320	2754,96
				323	2920,87
		200%	N	367	4784,22
				369	4564,01
				371	5102,87
			S	366	2234,78
				368	2232,66
				370	2217,50
	25	60%	N	310	7942,69
				319	6983,86
				322	5939,76
			S	309	2802,60
				318	2575,73
				324	2688,60
		200%	N	380	2516,67
				333	5592,14
				335	4684,05
				365	4137,11
			S	332	2020,00
				334	1983,46
				364	1935,16

Tabela C.10: Curvaturas dos corpos de prova de 10 mm, granalhas 1/8", liga AA 7475.

Liga	Pressão (psi)	Cobertura	Pré-tensão	CP nº	Raio de Curvatura (mm)
7475	10	60%	N	343	12310,34
				345	10224,68
				347	12925,33
			S	342	4158,16
				344	3695,41
				346	3617,62
		200%	N	361	8462,43
				362	8078,08
				363	8292,07
			S	360	3245,82
				381	3141,21
				382	3236,84
	20	60%	N	306	6863,02
				337	7006,27
				341	7244,51
			S	305	2715,37
				336	2859,68
				340	2747,38
		200%	N	355	4501,02
				357	5227,31
				359	5361,92
			S	354	2069,04
				356	2027,42
				358	2151,30
	25	60%	N	304	6231,59
				308	5821,26
				339	5932,28
			S	303	2529,36
				307	2419,69
				338	2342,43
		200%	N	349	4305,66
				351	4111,65
				353	3947,91
			S	348	1896,28
				350	1793,77
				352	1882,21
				385	2038,81
				384	1846,91

Curvatura dos corpos de prova de 15 mm nas ligas AA 7050 e AA 7475.

Conforme indicado na matriz de experimentos, esses corpos de prova foram submetidos a ensaios de JCG utilizando-se granalhas 1/8". As medidas de curvatura obtidas para as diferentes condições experimentais são apresentadas nas Tabelas C.11 e C.12 a seguir.

Tabela C.11: Curvaturas dos corpos de prova de 15 mm, granalhas 1/8", liga AA 7050.

Liga	Pressão (psi)	Cobertura	Pré-tensão	CP nº	Raio de Curvatura (mm)
7050	10	60%	N	427	28394,59
				428	22681,00
				429	28040,61
			S	424	11402,16
				425	12469,97
				426	8548,79
		200%	N	432	24136,33
				434	19926,72
				435	25257,14
			S	430	7856,59
				431	7421,19
				433	7518,04
	20	60%	N	403	20524,14
				407	17530,84
				411	20681,34
			S	402	7113,97
				406	6992,26
				410	6127,62
		200%	N	421	12578,45
				422	15685,19
				423	13784,66
			S	415	5654,65
				419	5469,91
				420	4963,43
	25	60%	N	401	15097,88
				405	17728,34
				409	15456,68
			S	400	9265,85
				404	7041,78
				408	6508,66
		200%	N	416	11968,49
				417	17809,34
				418	14871,01
			S	412	5718,24
				413	5574,16
				414	5135,81

Tabela C.12: Curvaturas dos corpos de prova de 15 mm, granalhas 1/8", liga AA 7475.

Liga	Pressão (psi)	Cobertura	Pré-tensão	CP nº	Raio de Curvatura (mm)
7475	10	60%	N	452	26551,85
				453	24852,44
				454	25780,54
			S	449	9562,51
				450	10443,83
				451	9922,09
		200%	N	458	18894,92
				459	23821,80
				460	22293,34
			S	455	7527,61
				456	7842,01
				457	7813,56
	20	60%	N	389	22062,80
				393	21092,32
				397	19261,62
			S	388	7080,90
				392	6724,81
				396	7436,98
		200%	N	446	16208,63
				447	12018,66
				448	17404,36
			S	443	5317,53
				444	5315,84
				445	5714,68
	25	60%	N	387	15233,39
				391	25088,74
				394	16385,34
			S	386	6211,81
				390	8257,05
				395	7392,18
		200%	N	440	10531,23
				441	10245,77
				442	10965,14
			S	398	6251,75
				399	5081,06
				439	4708,22

Apêndice D – Perfis de Tensão Residual

As Figuras D.1 a D.36 mostram os valores experimentais corrigidos, obtidos pela equipe do IPEN^[66], e os pontos (x_{min}, y_{min}) de máxima compressão e espessura das camadas deformadas (h) das chapas jateadas com esferas S230, S550 e 1/8”, nas três velocidades, com e sem pré-tensão.

Figura D.1: Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 2 mm, esfera S230, velocidade baixa, sem pré-tensão.

Figura D.2: Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 2 mm, esfera S230, velocidade média, sem pré-tensão.

Figura D.3: Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 2 mm, esfera S230, velocidade alta, sem pré-tensão.

Figura D.4: Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 2 mm, esfera S230, velocidade baixa, com pré-tensão.

Figura D.5: Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 2 mm, esfera S230, velocidade média, com pré-tensão.

Figura D.6: Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 2 mm, esfera S230, velocidade alta, com pré-tensão.

Figura D.7: Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 5 mm, esfera S230, velocidade baixa, sem pré-tensão.

Figura D.8: Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 5 mm, esfera S230, velocidade média, sem pré-tensão.

Figura D.9: Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 5 mm, esfera S230, velocidade alta, sem pré-tensão.

Figura D.10: Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 5 mm, esfera S230, velocidade baixa, com pré-tensão.

Figura D.11: Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 5 mm, esfera S230, velocidade média, com pré-tensão.

Figura D.12: Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 5 mm, esfera S230, velocidade alta, com pré-tensão.

Figura D.13: Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 5 mm, esfera S550, velocidade baixa, sem pré-tensão.

Figura D.14: Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 5 mm, esfera S550, velocidade média, sem pré-tensão.

Figura D.15: Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 5 mm, esfera S550, velocidade alta, sem pré-tensão.

Figura D.16: Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 5 mm, esfera S550, velocidade baixa, com pré-tensão.

Figura D.17: Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 5 mm, esfera S550, velocidade média, com pré-tensão.

Figura D.18: Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 5 mm, esfera S550, velocidade alta, com pré-tensão.

Figura D.19: Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 10 mm, esfera S550, velocidade baixa, sem pré-tensão.

Figura D.20: Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 10 mm, esfera S550, velocidade média, sem pré-tensão.

Figura D.21: Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 10 mm, esfera S550, velocidade alta, sem pré-tensão.

Figura D.22: Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 10 mm, esfera S550, velocidade baixa, com pré-tensão.

Figura D.23: Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 10 mm, esfera S550, velocidade média, com pré-tensão.

Figura D.24: Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 10 mm, esfera S550, velocidade alta, com pré-tensão.

Figura D.25: Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 10 mm, esfera 1/8", velocidade baixa, sem pré-tensão.

Figura D.26: Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 10 mm, esfera 1/8", velocidade média, sem pré-tensão.

Figura D.27: Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 10 mm, esfera 1/8", velocidade alta, sem pré-tensão.

Figura D.28: Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 10 mm, esfera 1/8", velocidade baixa, com pré-tensão.

Figura D.29: Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 10 mm, esfera 1/8", velocidade média, com pré-tensão.

Figura D.30: Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 10 mm, esfera 1/8", velocidade alta, com pré-tensão.

Figura D.31: Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 15 mm, esfera 1/8", velocidade baixa, sem pré-tensão.

Figura D.32: Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 15 mm, esfera 1/8", velocidade média, sem pré-tensão.

Figura D.33: Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 15 mm, esfera 1/8", velocidade alta, sem pré-tensão.

Figura D.34: Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 15 mm, esfera 1/8", velocidade baixa, com pré-tensão.

Figura D.35: Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 15 mm, esfera 1/8", velocidade média, com pré-tensão.

Figura D.36: Perfil de tensões residuais, com valores de máxima tensão de compressão e espessura da camada deformada. Chapa da liga 7050, espessura 15 mm, esfera 1/8", velocidade alta, com pré-tensão.