



**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**  
Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

**CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DA LIGA DE ALUMÍNIO 2024 APÓS  
SHOT PEENING**

**BIANCA SANCHES SANTOS**

Dissertação apresentada como parte dos  
requisitos para obtenção do Grau de  
Mestre em Ciências na Área  
de Tecnologia Nuclear - Materiais

**Orientador:**  
**Prof. Dr. Rene Ramos de Oliveira**

**São Paulo**  
**2023**

**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**  
**Autarquia Associada à Universidade de São Paulo**

**Caracterização microestrutural da liga de alumínio 2024**  
**após shot peening**

Versão Corrigida

Versão Original disponível no IPEN

**BIANCA SANCHES SANTOS**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais

**Orientador:**

**Prof. Dr. Rene Ramos de Oliveira**

São Paulo

2023

Fonte de Financiamento: CAPES

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Como citar:

SANTOS, B. S. *Caracterização microestrutural da liga de alumínio 2024 após shot peening*. 2023. 73 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN, São Paulo. Disponível em: <<http://repositorio.ipen.br/>> (data de consulta no formato: dd/mm/aaaa)

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de geração automática da Biblioteca IPEN, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

|   |
|---|
| <p>Santos, Bianca Sanches<br/>Caracterização microestrutural da liga de alumínio 2024 após shot peening / Bianca Sanches Santos; orientador Rene Ramos de Oliveira. -- São Paulo, 2023.<br/>73 f.</p> <p>Dissertação (Mestrado Profissional) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear (Materiais) -- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2023.</p> <p>1. Shot peening. 2. Difração de raios X. 3. Tensão residual. 4. Alumínio. I. Ramos de Oliveira, Rene, orient.<br/>II. Título.</p> |
|---|

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. Rene Ramos de Oliveira, por acreditar em meu potencial e me auxiliar em todo o processo.

Ao Prof. Dr. Antônio Augusto Couto por ceder o material de estudo e direcionar o desenvolvimento do trabalho.

Ao Evandro Alves de Oliveira Lemes, da empresa Sinto Brasil, pela excelente execução do processo de shot peening.

As empresas Termomecânica e Companhia Brasileira de Alumínio pelas micrografias do alumínio.

As minhas amigas Mariana Lellis Aurichio e Ana Carolina Santos Alvino de Souza, por todo o apoio e motivação.

Em especial a minha família:

A minha mãe Simone Sanches Alves;

Ao meu pai Edvaldo Francisco dos Santos;

Aos meus irmãos Isaque Demian Almeida Santos e Sophia Guedes Santos.

## RESUMO

SANTOS, B.S. ***Caracterização microestrutural da liga de alumínio 2024 após shot peening***. 2023. 73p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

O desenvolvimento de novos materiais juntamente à necessidade de preservação de recursos naturais tem tido um grande destaque na ciência nas últimas décadas. Neste contexto, o uso consciente de recursos se torna essencial e estudos que contribuem com a redução do consumo de matéria prima mantendo a qualidade em suas propriedades têm ganhado cada vez mais espaço nas pesquisas, devido a sua diversidade de aplicação e plausíveis decréscimos de gastos. Como o alumínio é o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre e o Brasil possui uma das maiores reservas do mundo com minério de qualidade, seu estudo é economicamente viável além de ser um excelente investimento no desenvolvimento de tecnologia nacional. No presente trabalho foram estudados os efeitos causados pelo shot peening no alumínio 2024, processo mecânico que tem por objetivo aumentar a resistência à fadiga e, conseqüentemente a vida útil dos equipamentos. Uma das características esperadas no processo de shot peening é o aumento da tensão residual compressiva do material, propriedade aqui caracterizada por difração de raios X pelo método  $\text{sen}^2\Psi$ , com o propósito de conjugar os efeitos que a microtensão (microdeformação) influenciam na macrotensão (tensão residual). Foram utilizadas quatro diferentes granalhas no processo de shot peening, a AC20, AC40, AC60 e AC100. Dentre estas a AC20 apresentou melhor tensão residual compressiva superficial, -284 MPa, e melhor desempenho em profundidade. Os resultados encontrados indicam que o processo de tratamento mecânico escolhido proporciona a otimização do uso do material mantendo a eficiência exigida em suas aplicações. Dentro das variáveis escolhidas a utilização da granalha AC20 se mostrou mais eficaz quanto aos valores de tensão residual compressiva.

Palavras chave: shot peening, difração de raios X, tensão residual, alumínio

## ABSTRACT

SANTOS, B.S. *Microstructural characterization of 2024 aluminum alloy after shot peening*. 2023. 73p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

The development of new materials allied with the need to preserve natural resources has had a great prominence in science in recent decades. In this context, the conscious use of resources becomes essential and studies that contribute to the reduction of raw material consumption while maintaining the quality of its properties have gained more and more space in research, due to its diversity of application and plausible cost reductions. As aluminum is the third most abundant element in the earth's crust and Brazil has one of the largest reserves in the world with quality ore, its study is economically viable, besides being an excellent investment in the development of national technology. In the present work, the effects caused by shot peening on aluminum 2024 were studied, a mechanical process that aims to increase the fatigue resistance and, consequently, the useful life of the equipment. One of the expected characteristics in the shot peening process is the increase in the compressive residual stress of the material, a property here characterized by X-ray diffraction by the  $\text{sen}^2\Psi$  method, with the purpose of conjugating the effects that the micro stress (micro deformation) influence on the macro stress (residual stress). Four different shots were used in the shot peening process, AC20, AC40, AC60 and AC100. Among these, AC20 showed the best surface compressive residual stress, -284 MPa, and the best performance in depth. The results found indicate that the mechanical treatment process chosen provides optimization in the use of the material while maintaining the efficiency required in its applications. Within the variables chosen, the use of AC20 shot was shown to be more effective regarding the values of compressive residual stress.

Keywords: shot peening, x-ray diffraction, residual stress, aluminum

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Características químicas e físicas do alumínio.....  | 17 |
| Tabela 2 – Comparativo de propriedades entre alumínio, aço e cobre.....                                 | 19 |
| Tabela 3 – Nomenclatura das ligas em alumínio.....  | 21 |
| Tabela 4 – Composição das granalhas.....  | 42 |
| Tabela 5 – Dados técnicos das granalhas.....  | 42 |
| Tabela 6 – Resultado quantitativo da análise química do alumínio 2024 por fluorescência de raios X..... | 52 |
| Tabela 7 – Resultado em porcentagem da microdeformação na rede cristalina.....                          | 63 |
| Tabela 8 – Resultado do ensaio de rugosidade em $\mu\text{m}$ .....                                     | 65 |
| Tabela 9 – Resultado do fator de concentração de tensão ( $K_t$ ) .....                                 | 66 |
| Tabela 10 – Tensão residual de superfície.....  | 67 |
| Tabela 11 – Resultado do ensaio de Dureza.....  | 69 |

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Produção mundial de alumínio primário.....                                   | 17 |
| Figura 2 – Demonstração do impacto da esfera sob a superfície do material.....          | 24 |
| Figura 3 – Distribuição de tensões após a aplicação do shot peening.....                | 25 |
| Figura 4 – Perfil típico do campo de tensões criado pelo shot peening.....              | 25 |
| Figura 5 – Representação da equação Rz.....   | 27 |
| Figura 6 – Representação de um pico sem deformações (a) com deformação (b).....         | 33 |
| Figura 7 – Metodologia para determinação da microdeformação.....                        | 34 |
| Figura 8 – Espaçamento interplanar do.....  | 36 |
| Figura 9 – Variação do espaçamento interplanar mediante tensão.....                     | 36 |
| Figura 10 – Direções principais de tensão e deformação.....                             | 38 |
| Figura 11 – Equipamento Shimadzu EDX-720.....   | 41 |
| Figura 12 – Equipamento para jateamento de granalhas e seu interior (Sinto Brasil)..... | 43 |
| Figura 13 – Equipamento Hitachi TM 3000.....  | 44 |
| Figura 14 – Equipamento Empyrean.....   | 46 |
| Figura 15 – Porta amostra para metais.....  | 46 |
| Figura 16 – Equipamento Mitutoyo .....  | 48 |
| Figura 17 – Equipamento Automate II.....  | 50 |
| Figura 18 – Equipamento Wolpert Testor.....   | 51 |
| Figura 19 – Micrografia com luz polarizada aumento de 20x.....                          | 53 |
| Figura 20 – Micrografia com luz polarizada aumento de 50x.....                          | 54 |
| Figura 21 – Micrografia com luz polarizada aumento de 100x.....                         | 54 |
| Figura 22 – Micrografia em superfície amostra sem jateamento.....                       | 55 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 23 – Micrografia em superfície amostra AC20 .....          | 56 |
| Figura 24 – Micrografia em superfície amostra AC40.....           | 56 |
| Figura 25 – Micrografia em superfície amostra AC60.....           | 57 |
| Figura 26 – Micrografia em superfície amostra AC100 .....         | 57 |
| Figura 27 – Micrografia em profundidade AC20.....                 | 58 |
| Figura 28 – Micrografia em profundidade AC40 .....                | 59 |
| Figura 29 – Micrografia em profundidade AC60 .....                | 59 |
| Figura 30 – Micrografia em profundidade AC100.....                | 60 |
| Figura 31 – Difratoograma do alumínio sem e com jateamento.....   | 61 |
| Figura 32 – Distribuição da tensão residual em profundidade ..... | 68 |

## SUMÁRIO

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | INTRODUÇÃO.....  | 10 |
| 2     | OBJETIVO.....  | 14 |
| 3     | REVISÃO DA LITERATURA.....                                   | 15 |
| 3.1   | Alumínio.....  | 15 |
| 3.1.1 | Histórico.....   | 15 |
| 3.1.2 | Propriedades.....  | 17 |
| 3.1.3 | Especificação.....   | 19 |
| 3.1.4 | Liga 2024.....   | 22 |
| 3.2   | Shot Peening.....  | 23 |
| 3.3   | Tensão Residual.....   | 29 |
| 3.4   | Difração de raios X.....                                     | 32 |
| 3.4.1 | Microdeformação na rede cristalina.....                      | 32 |
| 3.4.2 | Tensão Residual por difração de raios X.....                 | 35 |
| 4     | MATERIAIS E MÉTODOS.....                                     | 40 |
| 4.1   | Material.....  | 40 |
| 4.2   | Métodos.....   | 40 |
| 4.2.1 | Fluorescência de Raios X.....                                | 40 |
| 4.2.2 | Shot Peening.....  | 41 |
| 4.2.3 | Análise Microestrutural.....                                 | 43 |
| 4.2.4 | Fator de Concentração de Tensão.....                         | 47 |
| 4.2.5 | Tensão Residual por Difração de Raios X.....                 | 48 |
| 4.2.6 | Dureza.....  | 50 |
| 5     | RESULTADOS E DISCUSSÃO.....                                  | 52 |
| 5.1.  | Análise Elementar.....                                       | 52 |
| 5.2   | Análise Microestrutural.....                                 | 53 |
| 5.2.1 | Microscopia.....   | 53 |
| 5.2.2 | Difração de raios X.....                                     | 61 |
| 5.2.3 | Microdeformação na rede cristalina.....                      | 62 |
| 5.3   | Fator de Concentração de Tensão.....                         | 64 |
| 5.4   | Distribuição de Tensão Residual por Difração de Raios X..... | 66 |

|     |                   |    |
|-----|-------------------|----|
| 5.5 | Dureza.....       | 69 |
| 6   | CONCLUSÃO.....    | 70 |
| 7   | BIBLIOGRAFIA..... | 71 |

## 1 INTRODUÇÃO

A busca contínua por materiais mais resistentes, leves e versáteis tem impulsionado o estudo e a caracterização de ligas metálicas, como a liga de alumínio 2024. Com suas propriedades únicas, o alumínio se destaca como um dos metais mais utilizados na indústria, desde utensílios domésticos até aplicações em engenharia e arquitetura. Nesse contexto, a liga de alumínio 2024 ganha relevância ao apresentar cobre e magnésio como principais elementos ligantes, conferindo-lhe propriedades específicas altamente valorizadas em diversas aplicações industriais.<sup>[1,2]</sup>

A história do alumínio remonta à antiguidade, com seu uso em artefatos artesanais, remédios e cosméticos, revelando-se como um metal moderno e sofisticado em civilizações ancestrais. Ao longo dos séculos, pesquisadores e cientistas se dedicaram a aprimorar as propriedades do alumínio, culminando no desenvolvimento das ligas metálicas que desempenham papel fundamental na indústria contemporânea.<sup>[1]</sup>

Apesar de ser o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre, o alumínio foi comercialmente produzido há apenas cerca de 150 anos. Sua obtenção envolve mineração de bauxita, que é amplamente encontrada em terras de clima tropical, subtropical e mediterrâneo, sendo o Brasil um dos principais produtores desse minério.<sup>[1,2]</sup>

As propriedades químicas e físicas do alumínio tornam-no um dos metais mais utilizados na indústria. Sua baixa densidade, resistência à corrosão, boa condutividade elétrica e térmica, além da facilidade de processamento, contribui para sua ampla gama de aplicações.<sup>[3,4]</sup>

A liga de alumínio 2024, objeto central deste estudo, é amplamente utilizada em aplicações que exigem alta relação resistência/peso, como peças de avião, rodas de caminhões, fuselagem de aviões, peças estruturais, entre outras. Através de tratamentos térmicos adequados, como a solubilização e o envelhecimento, é possível otimizar suas propriedades mecânicas, atendendo às

demandas específicas de cada aplicação. Por meio de técnicas de laminação a quente e extrusão, essa liga tem sido moldada de acordo com as necessidades específicas de cada aplicação, garantindo seu amplo uso em inúmeras indústrias ao redor do mundo.<sup>[5,6]</sup>

O processo de Shot Peening é amplamente aceito e aplicado como uma técnica de tratamento superficial em peças metálicas. Trata-se de um método de trabalho a frio, altamente controlável e de baixo custo, que utiliza o jateamento repetitivo de pequenas esferas, geralmente de aço, sobre a superfície da peça a ser tratada, que resulta em uma série de modificações superficiais benéficas, como a geração de tensões residuais compressivas que melhoram as propriedades mecânicas e a resistência à fadiga dos materiais.<sup>[7,8,9]</sup>

Este processo resulta na formação de pequenas cavidades ou reentrâncias na superfície do metal, devido à deformação plástica causada pelo impacto das esferas. Essas cavidades geram tensões de compressão nas camadas superficiais do material, enquanto a parte inferior se deforma elasticamente, criando um perfil característico de tensões.<sup>[7,9]</sup>

O processo de Shot Peening depende de vários parâmetros, incluindo as propriedades do material, as características das esferas (tipo, tamanho, material), a velocidade de impacto, o ângulo de impacto, a duração do jateamento e a distância entre o bico ejetor e a superfície da peça. Esses parâmetros influenciam a intensidade e a cobertura do tratamento, bem como a formação do perfil de tensões residuais.<sup>[7,10]</sup>

Os benefícios do shot peening incluem a ativação de superfície para pintura, limpeza e acabamento de utensílios, obtenção de rugosidades controladas, fixação de desmoldantes, uniformização de tensões superficiais, compactação da estrutura cristalina, aumento da resistência à fadiga e reforço de superfície de peças metálicas. Além disso, o shot peening retarda o crescimento de trincas de fadiga, devido ao aumento do perfil de tensão residual compressiva, proporcionando uma vida útil prolongada do material.<sup>[7,8,9,10]</sup>

Um fenômeno de grande interesse para materiais de engenharia é o fechamento de trincas, que está relacionado ao comportamento de fadiga. Embora

a superfície rugosa acelere a nucleação e propagação de trincas, o shot peening retarda o crescimento dessas fissuras.<sup>[7,8,9]</sup>

A presença de tensões residuais em materiais é um fenômeno comum e dentre as técnicas utilizadas para avaliar e compreender as tensões residuais, destaca-se a difração de raios X, uma abordagem não destrutiva amplamente empregada em materiais metálicos. Neste estudo, a difração de raios X foi utilizada para calcular a microdeformação na rede cristalina através do método Williamson-Hall e medir a distribuição de tensão residual.<sup>[11,12]</sup>

Diante da importância das tensões residuais na determinação das propriedades mecânicas do material e seu impacto em projetos mecânicos e estruturais, a utilização da difração de raios X como ferramenta para a medição e análise dessas tensões é indispensável.<sup>[12]</sup>

A análise de tensão residual por difração de raios X é um método baseado na observação das alterações nas distâncias interplanares do material cristalino causadas pela aplicação de tensões mecânicas. Quando o material é submetido a tensões, ocorre uma deformação na estrutura cristalina e nas suas componentes elásticas e plásticas, que resultam em uma variação nas posições dos picos de difração. Através dessa mudança nas posições dos picos, é possível calcular a tensão residual em diversas direções do material.<sup>[13]</sup>

Este trabalho concentra-se na caracterização microestrutural da liga de alumínio 2024 após shot peening. Durante o jateamento, foram utilizadas quatro diferentes granalhas de aço: AC20, AC40, AC60 e AC100.

A distribuição da tensão residual compressiva foi analisada por difração de raios X pelo método do  $\text{sen}^2\Psi$ , correlacionando os efeitos das microtensões provocadas pelo jateamento com a macrotensão dos corpos de prova do alumínio 2024.

Por meio dessas análises, espera-se contribuir para o avanço do conhecimento sobre o comportamento mecânico do alumínio 2024 submetido ao shot peening, fornecendo subsídios para melhorar a eficiência e a qualidade do tratamento superficial em aplicações industriais. Além disso, os resultados obtidos poderão auxiliar na seleção adequada das granalhas utilizadas no processo de shot

peening, permitindo obter os melhores benefícios das tensões residuais compressivas, como o aumento da resistência à fadiga e à corrosão, contribuindo para a vida útil prolongada e desempenho aprimorado das peças metálicas tratadas.

## **2 OBJETIVO**

Determinar o efeito do shot peening na microestrutura da liga de alumínio 2024.

### **Objetivos específicos:**

Avaliar as alterações microestruturais;

Determinar a tensão residual em profundidade por meio da difração de raios X;

Comparar o desempenho das granalhas AC20, AC40 AC60 e AC100.

### 3 REVISÃO DA LITERATURA

Para o desenvolvimento do estudo de caracterização da liga de alumínio 2024, fez-se necessário uma abordagem teórica sobre o alumínio, suas ligas e propriedades, envelhecimento natural, shot peening e tensão residual, presumindo a melhora do comportamento mecânico da liga proveniente dos tratamentos indicados.

#### 3.1 Alumínio

##### 3.1.1 Histórico

O alumínio é o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre, ele é encontrado no estado sólido em temperatura ambiente e apesar de sua abundância é o metal mais novo a ser utilizado em escala industrial, comercialmente produzido a cerca de 150 anos.<sup>[1]</sup>

Sua obtenção parte da mineração de bauxita, já que este não é encontrado diretamente no estado metálico, e segue pelas etapas de refinaria e redução. Para que a produção seja rentável a bauxita deve apresentar o mínimo de 30% de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).<sup>[2]</sup>

O minério é comumente encontrado em terras de clima tropical, subtropical e mediterrâneo. E o Brasil conta com uma das maiores reservas do mundo com ótima qualidade deste minério.<sup>[2]</sup>

Desde a antiguidade nota-se o uso do alumínio em diversas civilizações que utilizavam metais, não da forma comercializada nos dias de hoje, mas em uma grande variedade de produtos artesanais, remédios e cosméticos. Sempre trazendo um ar de modernidade e sofisticação aos mais diversos artefatos que continham o metal.<sup>[1]</sup>

Data-se de 6000 a.C. o primeiro uso, que é conhecido, do minério na fabricação de vasos e recipientes de argila que continham óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), pelos povos Pérsas. Seguindo para 3000 a.C., há relatos dos povos do

Egito e da Babilônia que usavam argila com alumina em cosméticos, medicamentos e corantes de tecidos.<sup>[1]</sup>

Anos mais tarde em 1809 a partir da fundição de ferro na presença de alumina, Humphrey Davy obteve pela primeira vez o que mais se aproxima do alumínio que se conhece atualmente.<sup>[1]</sup>

Doze anos depois, em 1821 foi descoberto a bauxita, minério mais comum de alumínio, pelo francês P.Berthier que constatou um minério de cor avermelhada que continha 52% de óxido de alumínio no sul de seu país na aldeia de Lês Baux. Já em 1825 Hans Christian Oersted, um físico dinamarquês continuou os progressos isolando o alumínio de outro modo, partindo do cloreto de alumínio na forma como é usada nos dias atuais.<sup>[1]</sup>

Em 1855 numa exposição em Paris foi apresentado por Deville o primeiro lingote metálico muito mais leve que o ferro. Pouco tempo depois, mas ainda no mesmo ano o processo de obtenção do alumínio torna-se público, fato que permitiu o estabelecimento da indústria global do alumínio, pelos cientistas Charles Martin Hall, norte americano e Paul Louis Toussaint Héroult, francês, que descobriram e patentearam quase que ao mesmo tempo a obtenção de alumínio por meio da redução eletrolítica da alumina dissolvida em banho fundido de criolita. Devido a isso o método ficou conhecido como Hall-Héroult.<sup>[1]</sup>

E em 1945 é produzido no Hemisfério Sul, Brasil, o primeiro lingote de alumínio na fábrica da Elquisa em Minas Gerais, na cidade de Ouro Preto.<sup>[1]</sup>

Já no momento atual, países do mundo todo trabalham na produção desse metal tão versátil. Na imagem a seguir é ilustrado a estatística da produção mundial de alumínio primário segundo o *International Aluminium Institute* (IAI), que teve como base para seus cálculos os relatórios voluntários de empresas membros e não membros do IAI, incluindo também valores estimados de produções não declaradas. Os dados foram emitidos em 20 de março de 2023 e totalizam 5.273mil toneladas métricas de alumínio referente a produção do mês de fevereiro de 2023.<sup>[14]</sup>

Figura 1: Produção mundial de alumínio primário

| Período           | África | América do Norte | América do Sul | Ásia (ex China) | Europa Ocidental e Central | Rússia e Europa Oriental | Oceânia | Conselho de Cooperação do Golfo | China (estimado) | Estimativa não reportada ao IAI | Total | Média diária |
|-------------------|--------|------------------|----------------|-----------------|----------------------------|--------------------------|---------|---------------------------------|------------------|---------------------------------|-------|--------------|
| fevereiro de 2023 | 130    | 292              | 111            | 359             | 209                        | 310                      | 144     | 469                             | 3.107            | 142                             | 5.273 | 188,3        |

Fonte: INTERNATIONAL ALUMINIUM, 2023<sup>[14]</sup>

### 3.1.2 Propriedades

O alumínio é um dos metais mais utilizados na indústria, sua utilização vai de utensílios domésticos como painéis até materiais para engenharia e arquitetura, uma justificativa para tal variedade de aplicação é a sua excelente combinação de propriedades e facilidade de processamento.<sup>[3]</sup>

Na tabela a seguir, baseada nas informações publicadas pela Abal, temos as características químicas e físicas do alumínio e algumas aplicações.<sup>[3,4]</sup>

Tabela 1: Características químicas e físicas do alumínio

|                          |  |
|--------------------------|--|
| Ponto de Fusão           | 660°C  |
| Peso específico          | 2,70 g/cm <sup>3</sup>   |
| Resistência à corrosão   | Elevada resistência à corrosão devido a sua auto-proteção (fina e invisível camada de óxido que impede futuras oxidações)                              |
| Condutibilidade elétrica | 62% da IACS (International Annealed Copper Standard), que associado a sua baixa densidade tem tanta capacidade de condução quanto um condutor de cobre |
| Condutibilidade térmica  | 4,5 vezes maior que a do aço   |

|                            |   |
|----------------------------|---|
| Refletividade              | acima de 80%, permitindo utilização em luminárias   |
| Propriedade antimagnética  | Permite a utilização como proteção em equipamentos eletrônicos.<br>Não produz faíscas permitindo a utilização na estocagem de substâncias inflamáveis ou explosivas, ex: caminhões-tanque de transporte de combustíveis |
| Característica de barreira | Possui barreira à luz, umidade e oxigênio, fazendo com que a folha de alumínio seja um dos materiais mais versáteis no mercado de embalagens  |
| Reciclagem                 | Infinitamente reciclável, sem perda de propriedades, tornando-o sustentável em termos econômicos, sociais e ambientais  |

Fonte: Autora<sup>[3,4]</sup>

A tabela a seguir compara as características físicas dos três metais mais utilizados pela sociedade contemporânea, onde faz-se notável a versatilidade das propriedades do alumínio.

Tabela 2: Comparativo de propriedades entre alumínio, aço e cobre

| <b>Propriedades físicas</b>                | <b>Alumínio</b> | <b>Aço</b> | <b>Cobre</b> |
|--|-----------------|------------|--------------|
| Densidade (g/cm <sup>3</sup> )             | 2,70            | 7,86       | 8,96         |
| Temperatura de fusão (°C)                  | 660             | 1500       | 1083         |
| Módulo de elasticidade (MPa)               | 70.000          | 205.000    | 110.000      |
| Coeficiente de dilatação térmica (L/°C)    | 23.10-6         | 11,7.10-6  | 16,5.10-6    |
| Condutibilidade térmica a 25°C (Cal/cm/°C) | 0,53            | 0,12       | 0,94         |
| Condutibilidade elétrica (%IACS)           | 61              | 14,5       | 100          |

Fonte: Autora<sup>[3]</sup>

Já para determinação das propriedades mecânicas como alongamento e limite de fadiga é necessário ensaios de amostras selecionadas corriqueiramente, para gerar representatividade do produto em questão.<sup>[15]</sup>

Essas propriedades mecânicas do alumínio podem mudar de acordo com a matéria prima, alumínio puro ou em ligas, e pelos processos de fabricação do material, que podem atribuir a peça melhora na propriedade desejada.<sup>[15]</sup>

Têm-se dois grupos de valores das propriedades mecânicas, os valores típicos que são analisados nas indústrias que através de seus ensaios rotineiros confirmam a qualidade estabelecida pelas especificações; e os valores garantidos que são os valores determinados pelas especificações.<sup>[15]</sup>

### 3.1.3 Especificação

Tendo em vista as excelentes propriedades do alumínio, seu estudo foi amplamente almejado por pesquisadores de diversos setores, que se uniam em único interesse, deixar o material mais lucrativo e propício para cada aplicação singular. E esse propósito desencadeou a produção de ligas de alumínio com propriedades distintas entre si, onde cada uma tem sua especificação e seu próprio elemento secundário.<sup>[16]</sup>

Quando o alumínio é fundido e entra em contato com outros metais ou substâncias metalóides ele muitas vezes consegue dissolvê-los, e quando volta se solidificar, constituintes desta liga recém-formada são retidos em precipitados maiores, os compostos intermetálicos, como por exemplo o  $\text{CuAl}_2$  que traz ao metal mais rigidez.<sup>[16]</sup>

Esses novos precipitados podem ser visualizados através de um microscópio, e são reagrupados em uma rede cristalina regular, mas com tamanho diferente do elemento de liga principal, normalmente os compostos intermetálicos são maiores que o seu substrato. Por conseguinte, as ligas de alumínio têm como função principal o aumento de sua resistência mecânica sem prejudicar as demais propriedades, além de conceder a liga outras qualidades, que mudam de acordo com cada elemento ligante. Assim as ligas de alumínio são estudadas, desenvolvidas e adequadas a cada necessidade.<sup>[16]</sup>

É comum dividir as ligas de alumínio em dois grandes grupos que se distinguem pelo processo de produção, o das ligas fundidas e o das ligas forjadas.<sup>[5]</sup>

Ambas as ligas são tratáveis por calor, ou seja, tem sua solubilização de fases por meio de tratamentos térmicos, como têmpera, precipitação, solução, envelhecimento e endurecimento. Por outro lado, existem ligas forjadas que dependem de ação mecânica e procedimentos de recozimento para a melhoria das propriedades, sendo conhecidas como ligas endurecidas por trabalho. E existem ligas de fundição que não são essencialmente tratáveis por calor, estas são utilizadas logo após fundidas.<sup>[5]</sup>

A fim de facilitar a comunicação e diferenciação entres as ligas, foi criado um sistema de identificação para cada tipo de liga, de maneira que as ligas forjadas tem um sistema de 4 dígitos e a fundida de 3 dígitos, ambas dividem as ligas em famílias para simplificação.<sup>[5]</sup>

Esse sistema foi desenvolvido pela *Aluminum Association* e é amplamente reconhecido nos Estados Unidos. A seguir temos uma tabela com as famílias das ligas forjadas, grupo do qual o material em estudo pertence.<sup>[5]</sup>

Tabela 3: Nomenclatura das ligas em alumínio

|      |  |
|------|--|
| 1xxx | Alumínio comercial puro  |
| 2xxx | Cobre como principal elemento ligante, além do magnésio  |
| 3xxx | Manganês como principal elemento ligante   |
| 4xxx | Silício como principal elemento ligante  |
| 5xxx | Magnésio como principal elemento ligante   |
| 6xxx | Magnésio e Silício como principal elemento ligante   |
| 7xxx | Zinco como principal elemento ligante, mas podem ser especificados outros elementos como Cobre, Magnésio, Cromo e Zircônia |
| 8xxx | Composições diversas com Estanho e Lítio   |
| 9xxx | Reservado para uso futuro  |

Fonte: Autora<sup>[5]</sup>

No grupo 1xxx a série 10xx é destinada ao alumínio sem elemento ligante, com grau de pureza natural, onde seus últimos 2 dígitos representam a porcentagem desta pureza. Séries com o segundo dígito diferente de 0, variando em números inteiros de 1 a 9 indicam o controle especial de uma ou mais impurezas individuais.<sup>[5]</sup>

Nas séries 2xxx a 8xxx, o primeiro dígito representa o elemento ligante de maior porcentagem média, com exceção das ligas da série 6xxx e 8xxx onde temos 2 elementos ligantes em preponderância. O segundo dígito corresponde a modificação da liga, ou seja, quando 0 a liga é original e quando o dígito varia de 1 a 9 a liga é modificada. Já os últimos 2 dígitos são uma combinação única para cada tipo de liga que tem como objetivo diferenciar e identificar as diversas ligas de alumínio do mesmo grupo.<sup>[5]</sup>

E a série 9xxx é reservada para outros elementos em uso futuro.<sup>[5]</sup>

### 3.1.4 Liga 2024

A série 2xxx tem o cobre, elemento de símbolo químico Cu, como seu principal elemento ligante, e o magnésio, elemento de símbolo químico Mg, como elemento secundário que pode ou não fazer parte da liga.<sup>[5]</sup>

As peças produzidas por essa série, muitas vezes são apropriadas para situações que exijam elevada relação resistência/peso, como por exemplo peças de avião, rodas de caminhões, peças de suspensão de caminhões, peças estruturais, fuselagem de aviões e peças que necessitem resistência a temperaturas de até 150°C. Com exclusão da liga 2219, da qual possui soldabilidade limitada.<sup>[5]</sup>

Em relação a propriedade de resistência à corrosão a série 2xxx fica em desvantagem quando comparada as demais ligas, e em certas situações está propensa à corrosão intergranular. Deste modo as ligas dessa série que são produzidas em formato de folha são revestidas com uma liga da série 6xxx ou com um alumínio de alta pureza, o que garantirá a proteção do material.<sup>[5]</sup>

De acordo com a Associação Internacional de Alumínio juntamente com a ISO, a liga 2024 é representada pela fórmula química  $AlCu_4Mg_1$ .<sup>[8]</sup> Esta liga, de maneira geral apresenta 4,5% de Cu, e 1,5% de Mg, além de outros possíveis elementos com teor residual, como no caso o manganês e o ferro.<sup>[6]</sup>

O método de produção mais utilizado para esta liga é a laminação a quente e a extrusão, dentre suas propriedades destaca-se a baixa densidade e a possível melhoria de suas propriedades mecânicas através do endurecimento.<sup>[17]</sup>

Existem dois tipos de endurecimento, a solubilização e o envelhecimento, métodos sequencialmente complementares.<sup>[6]</sup>

O tratamento térmico em solução (solubilização), é técnica que consiste no aquecimento do material até próximo de seu ponto de fusão, de maneira que, com o passar do tempo seja possível a dissolução dos elementos de liga, já que o coeficiente de difusão dos mesmos também está aumentado. Está técnica quando aplicada, torna as propriedades da liga semelhantes ou até superiores as de um aço com baixo teor de carbono, além de ser fundamental para casos em que se deseja um envelhecimento controlado.<sup>[5,6]</sup>

E o tratamento térmico por precipitação (envelhecimento), é utilizado quando se deseja um aumento ainda maior das propriedades mecânicas, ele também melhora a resistência ao escoamento e diminui as propriedades de alongamento, já em consideração a resistência a tração, não são notadas grandes mudanças.<sup>[5,6]</sup>

O envelhecimento, mecanismo mais utilizado, pode ser dar de maneira natural ou artificial, após solubilização, e nele ocorre a precipitação de compostos de alumínio com o elemento de liga, neste caso, do cobre na própria matriz de alumínio.<sup>[6,18]</sup> O tamanho de grão da matriz juntamente com o tamanho das partículas de segunda fase é considerado como as mais influentes características microestruturais nas propriedades mecânicas da liga.<sup>[6,19]</sup>

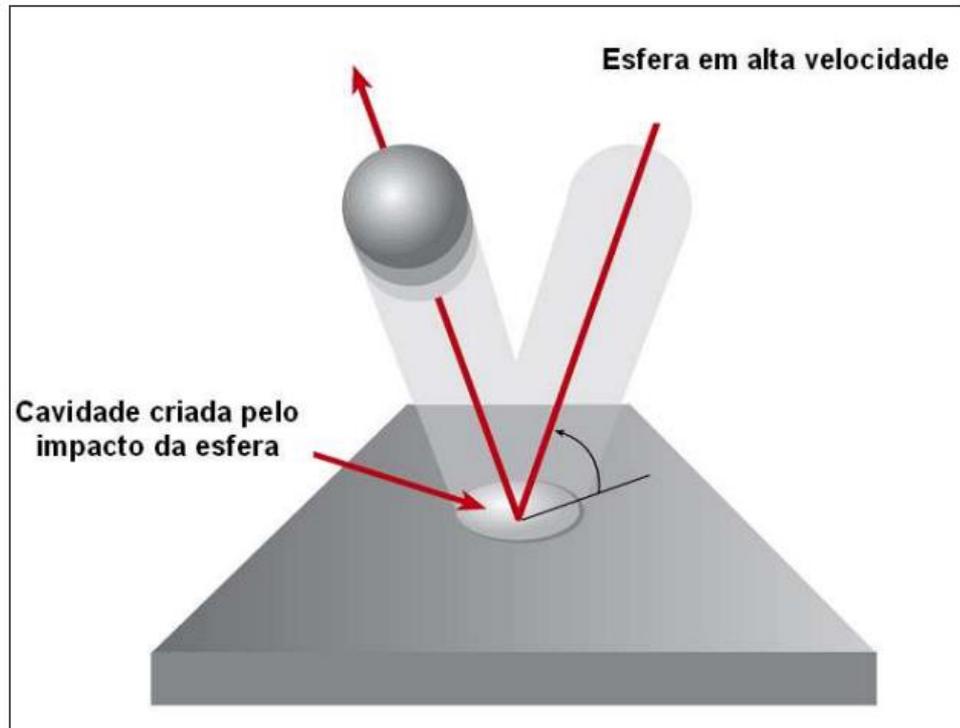
Todavia o uso de outros tratamentos termomecânicos e a diminuição do teor de impurezas da liga, aprimoramento da composição química, também evidenciam grande melhoria nas propriedades.<sup>[6]</sup>

### **3.2 Shot Peening**

Shot Peening é um termo universalmente aceito para caracterizar um processo de trabalho de alta eficiência e baixo custo que envolve ferramentas de precisão decorrente de uma série de fatores, tornando-o rigorosamente controlável.<sup>[7,8]</sup>

É um processo de trabalho a frio que consiste no jateamento repetitivo de pequenas esferas sob a superfície de uma peça, essas esferas comumente são de aço, mas podem ser de vidro ou cerâmica. Cada parte do metal atingida pelas esferas se molda à sua circunferência, formando pequenas cavidades ou reentrâncias na superfície, como ilustrado na figura a seguir.<sup>[9]</sup>

Figura 2: Demonstração do impacto da esfera sob a superfície do material.



Fonte: Adaptado de METAL IMPROVEMENT COMPANY, 2005<sup>[9]</sup>

Para a cavidade ser criada é necessário que o metal ceda em tensão. Para isso, após o impacto, há uma deformação plástica na região superficial, tendendo a alongar-se. Esta tendência é dificultada pela parte inferior do material que se deforma exclusivamente elasticamente, gerando tensões de compressão nas camadas superiores, aquelas afetadas plasticamente.<sup>[7,9]</sup>

Na figura 3 temos uma exemplificação de como as camadas inferiores geram tensões nas camadas superficiais alongadas pela deformação plástica.

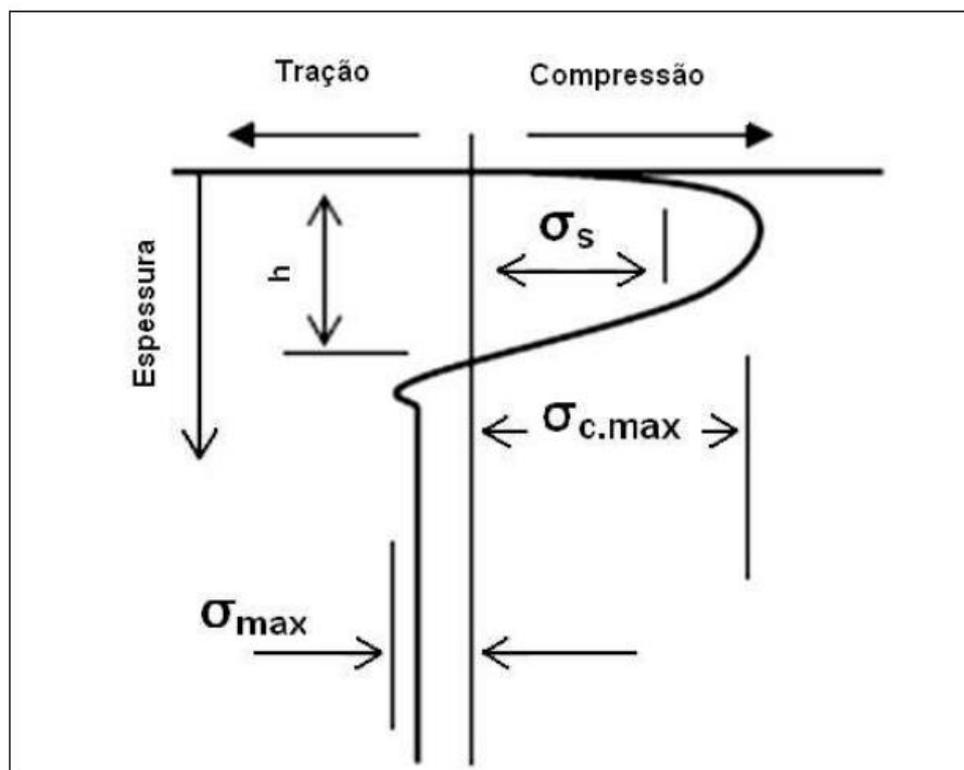
Figura 3: Distribuição de tensões após a aplicação do shot peening



Fonte: Adaptado de METAL IMPROVEMENT COMPANY, 2005<sup>[9]</sup>

O processo de shot peening gera um perfil característico de tensões ilustrado na figura a seguir, que pode variar com a profundidade da peça.<sup>[7]</sup>

Figura 4: Perfil típico do campo de tensões criado pelo shot peening



Fonte: CAMARGO, 2007 <sup>[7]</sup>

Onde:

$\sigma_s$  = tensão superficial;

$\sigma_{m\acute{a}x}$  = tensão máxima de tração;

$\sigma_{c.m\acute{a}x}$  = tensão máxima de compressão;

$h$  = profundidade de inversão de tensão (compressão-tração).<sup>[7]</sup>

Além disso, o processo de shot peening dá ao material tensão residual compressiva e conseqüentemente melhora nas propriedades de fadiga. É possível analisar a resposta do material, seu desempenho, em relação ao processo por uma simples conta, que relaciona os efeitos benéficos da tensão residual compressiva com os efeitos deletérios da rugosidade superficial, resultando em uma análise dos pontos de concentração de tensão na superfície do material.<sup>[20]</sup>

A relação aplicada às medidas de fator de concentração de tensão ( $K_t$ ), é descrita por:

$$k_t = 1 + 2.1 \left( \frac{R_t}{S} \right) \quad (1)$$

Onde:

$R_t$  = medida pico-a-vale, sendo a rugosidade média dos 10 maiores valores obtidos pelo rugosímetro ( $R_z$ ).

$S$  = medida entre os picos, que é o diâmetro de indentação da granalha sobre a amostra.<sup>[20]</sup>

Seguindo a ISO1997, vigente até o momento,  $R_z$  é a média aritmética da altura máxima (pico-base) dos segmentos do perfil de comprimento de avaliação da amostra.<sup>[21]</sup>

$$R_z = \frac{Z1 + Z2 + Z3 + Z4 + Z5}{5} \quad (2)$$

Onde  $n$  é o número de segmento.

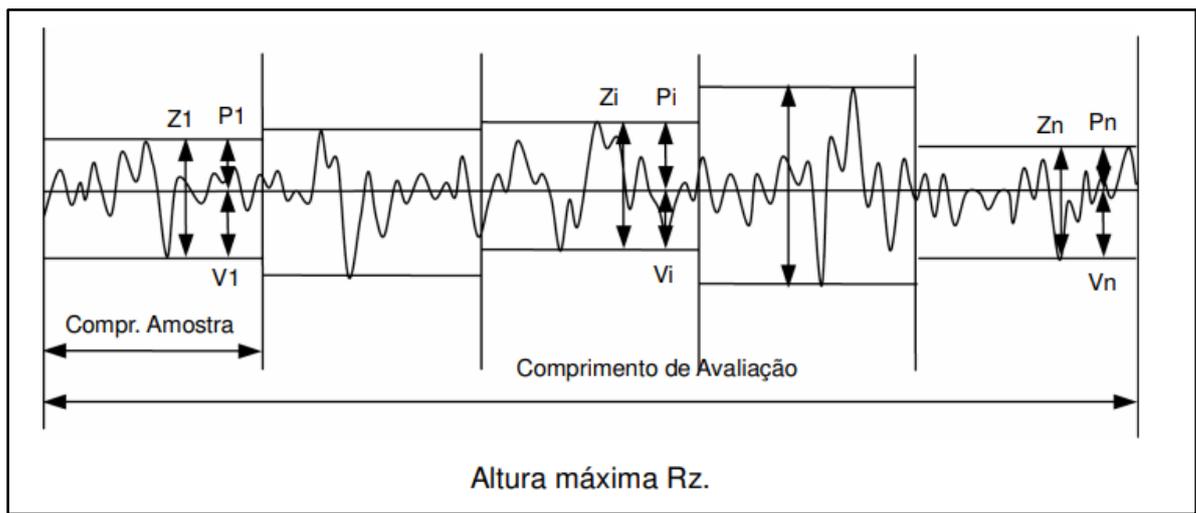
Conforme imagem X, temos:

$Z_i$  = altura máxima;

$P_i$  = ponto mais alto em relação a linha média;

$V_i$  = ponto mais baixo em relação a linha média.

Figura 5: Representação da equação Rz



Fonte: MITUTOYO CORPORATION, 2009<sup>[21]</sup>

Os resultados do processo de shot peening depende majoritariamente de 3 parâmetros, o do material, o de fluxo e o de contato.

Dentre os parâmetros do material temos a geometria, espessura e as propriedades mecânicas.<sup>[7,10]</sup>

Nos parâmetros de fluxo temos as propriedades da esfera (tipo, tamanho, material, massa específica, dureza), velocidade, ângulo de impacto, duração e distância do jateamento ao material tratado.<sup>[7,10]</sup>

Quanto as esferas, estas podem ser de ferro (dureza entre 58 a 68 HRC), aço fundido (dureza entre 40 HRC a 50 HRC), vidro (dureza entre 46HRC a 50HRC) e cerâmica (dureza entre 58HRC a 63HRC), desde que a dureza do material que receberá o tratamento seja menor do que a da esfera. No caso das esferas de vidro e cerâmica, estas têm a preferência quando há a possibilidade de contaminação do material pelo jateamento de partículas esféricas de aço e/ou ferro fundido. E apesar da diferença de dureza seus diâmetros variam de 0.18 mm a 2,4 mm.<sup>[7]</sup>

Outro parâmetro a ser destacado é o da velocidade da esfera pois interfere direta e proporcionalmente a intensidade do shot peening, lembrando que num sistema de produção o ideal é manter as mesmas condições de trabalho para assegurar a qualidade dos produtos, evitar o desgaste e/ou a quebra das esferas usadas no processo, e garantir o padrão de superfície das amostras.<sup>[10]</sup>

Já o ângulo de impacto é definido em 90°, ou menor, entre a rajada e a superfície da peça. E quanto menor o ângulo, menor a intensidade do shot peening. Contudo em peças que não permitem o ângulo adequado, faz-se necessário uma compensação por variação de velocidade ou tamanho da esfera para atingir a intensidade desejada.

A distância do jateamento ao material tratado, ou seja, distância do bico ejetor à superfície da peça exerce também grande influência na intensidade do tratamento, quanto maior a distância menor a intensidade e a cobertura da peça.<sup>[10]</sup>

A cobertura da peça tem relação com a porcentagem de uma determinada área atingida pelas esferas, e é calculada com base no número de ciclos de exposição segundo a equação a seguir:

$$C_n = 1 - (1 - C_1)^n \quad (3)$$

Onde:

$C_1$  = porcentagem de cobertura (decimal) após o 1° ciclo (passe);

$C_n$  = porcentagem de cobertura (decimal) após n ciclos, onde n é o número de ciclos do tratamento.

Ainda que a cobertura máxima seja de 100%, na prática é adotado 98% como cobertura total devido as dificuldades de mensuração do processo.<sup>[10]</sup>

E por fim os parâmetros de contato: coeficiente de fricção e o coeficiente de restituição, que dependem da razão entre a dureza do material tratado e da esfera usada.<sup>[7,10]</sup>

As modificações superficiais geradas no material pelo processo de shot peening como a rugosidade, aumento de dureza nas camadas superficiais e o perfil

característico de tensão residual estão associadas aos benefícios trazidos pelo processo e conseqüentemente a finalidade da técnica.

Dentre os muitos objetivos amplamente utilizados pelo shot peening temos: ativação de superfície para pintura; acabamento e limpeza de utensílios; obtenção de rugosidades controladas para reter lubrificação; fixação de desmoldantes; uniformização de tensões nas camadas superficiais; compactação da estrutura cristalina para aumentar a resistência à oxidação, ao atrito e eliminar porosidades; aumento da resistência à fadiga e reforço de superfície de peças metálicas como por exemplo engrenagens.<sup>[7,8,9,10]</sup>

Outro ponto a ser estudado que é de grande interesse para o desempenho dos materiais de engenharia é o fenômeno de fechamento de trincas que está diretamente relacionado ao comportamento de fadiga dos mesmos.

De início sabe-se que a superfície rugosa acelera o processo de nucleação e propagação das trincas, contudo, a resposta primária do material ao processo de trabalho do shot peening é justamente o retardo no crescimento dessas fissuras.

Esse atraso se deve ao aumento da dureza (propriedade mecânica que avalia a resistência de um material à deformação plástica, onde materiais duros são mais difíceis de deformar) e do perfil de tensão residual compressiva, produzindo uma tensão de fechamento da trinca, impedindo a abertura e o avanço das trincas de fadiga, que muitas vezes são deslocadas para baixo da superfície, proporcionando um aumento significativo na vida do material, de forma prática e econômica.<sup>[7,8,9]</sup>

### **3.3 Tensão residual**

De maneira simples, tensões residuais são aquelas que permanecem nos materiais mesmo após o fim da força externa aplicada sobre eles.<sup>[22]</sup>

Comumente, materiais de engenharia tendem a apresentar tensões residuais de origem microscópicas, advindas de seu processamento original, que lhe atribuiu qualidades microestruturais e suas características mecânicas. Já as tensões residuais macroscópicas, habitualmente aparecem durante os processos de fabricação, que darão ao material sua forma final.<sup>[11]</sup>

A presença de tensões residuais é capaz de alterar significativamente as propriedades do material, como resistência à fratura e sua vida em fadiga. Estas podem ser induzidas conscientemente ou de forma acidental, durante os processos de fabricação como laminação, soldagem, tratamentos térmicos, conformação mecânica, jateamento de partículas e processos mecânicos de usinagem.<sup>[11]</sup>

Existem três tipos principais de tensões: as macroscópicas ou macrotensões residuais, as tensões microestruturais e tensões microlocalizadas.<sup>[11]</sup>

As macrotensões tem origem em deformações plásticas macroscópicas advindas de fontes mecânicas, térmicas ou químicas que atingem grande volume do material, estendendo-se ao longo do componente por vários grãos. Essas tensões permanecem equilibrada por todo o corpo.<sup>[11,23,24]</sup>

As microtensões, composta pelas tensões microestruturais e microlocalizadas, são comuns quando se tratam dos materiais policristalinos, elas podem ter sua origem em mudanças de volume produzidas por transformação de fases de tratamentos térmicos; pela diferença entre os coeficientes de expansão térmica em reações de precipitação, como por exemplo, durante o resfriamento entre uma matriz metálica e uma partícula não metálica; e na diferença de tempo de contração entre camadas superficiais e internas de um componente durante a soldagem.<sup>[11]</sup>

As tensões microestruturais tem sua origem em deformações plásticas microscópicas e estão presentes em 1 grão ou parte deste. Essa tensão tem seu equilíbrio em alguns grãos vizinhos.

Por fim, as tensões microlocalizadas tem sua origem em defeitos cristalinos, como discordâncias, elas estendem-se por pequenas distâncias interatômicas, dentro de uma pequena porção de grãos.<sup>[11,23,25]</sup>

O efeito dessas tensões nos materiais pode ser benéfico ou prejudicial, dependendo da intensidade, sentido e da distribuição das tensões residuais, sendo fundamentais no estudo do comportamento microestrutural do material.<sup>[11,26]</sup>

São prejudiciais quando auxiliam no surgimento e crescimento de trincas de fadiga (falha estrutural), isso acontece quando as tensões residuais trativas são somadas as tensões trativas aplicadas no componente. E são benéficas quando

inibem a iniciação e propagação de trincas, quando as tensões residuais compressivas se opõem a direção de carregamento trativo, aumentando a vida em fadiga do material.<sup>[11,26]</sup>

Sua natureza benéfica ou deletéria pode estar associada a três fatores:

Ao material e seu comportamento durante a deformação plástica, ou seja, se ele amolece ou encrua;

Ao tipo carregamento que o material será submetido durante sua utilização;

Ao perfil de tensões residuais introduzidas no material durante o processamento e a redistribuição das tensões que ocorre durante a deformação.<sup>[11,23,24,25]</sup>

Dentre todos os fatores, a redistribuição das tensões é um dos fenômenos mais importantes, uma vez que pode converter tensões residuais compressivas pré-existentes no material em tensões residuais trativas, ou converter tensões trativas em compressivas, durante a deformação plástica.<sup>[27]</sup>

Esse efeito se deve ao fato das tensões residuais serem auto equilibrantes, ou seja, quando parte do sistema sofre uma alteração, o restante do corpo se ajusta para manter seu equilíbrio, assegurando que a resultante de suas forças e momentos sejam zero.<sup>[28]</sup>

Neste contexto, a condição inicial de tensão de um material é nula ( $\sigma = 0$ ). Após a aplicação de uma força, o material terá tensões trativas ( $+\sigma$ ) e compressivas ( $-\sigma$ ) ao longo de sua espessura, se esta força não for suficiente para exceder o limite elástico do material, após sua remoção o material voltará ao seu estado natural  $\sigma=0$ .

No entanto, se a força aplicada ultrapassar o limite de elasticidade do material, ocorrerá a deformação plástica, de modo que quando a força exercida sobre o material cessar, a ação das forças internas será insuficiente para reduzir a tensão a zero, dando ao material a característica trativa ou compressiva, de acordo com o método utilizado.<sup>[28,29]</sup>

Materiais vitais em projetos comumente passam por tratamentos térmicos e processos mecânicos que lhe fornecem tensões residuais compressivas na superfície, contribuindo com sua resistência a fadiga, resistência à corrosão sob tensão e a resistência à fadiga intragranular, já que estes serão sujeitos às condições difíceis de trabalho, com movimentos cíclicos e cargas altas.

Tendo em vista a importância das tensões residuais, faz-se indispensável sua determinação para a avaliação de projetos mecânicos e estruturais, uma vez que estas podem aumentar ou comprometer a vida útil do equipamento, através de métodos de confiança que impliquem na determinação precisa das tensões.

Dentre os métodos, temos os não destrutivos, tais como o ultra-som, a difração de nêutrons e a difração de raios X, técnica utilizada neste trabalho.<sup>[11]</sup>

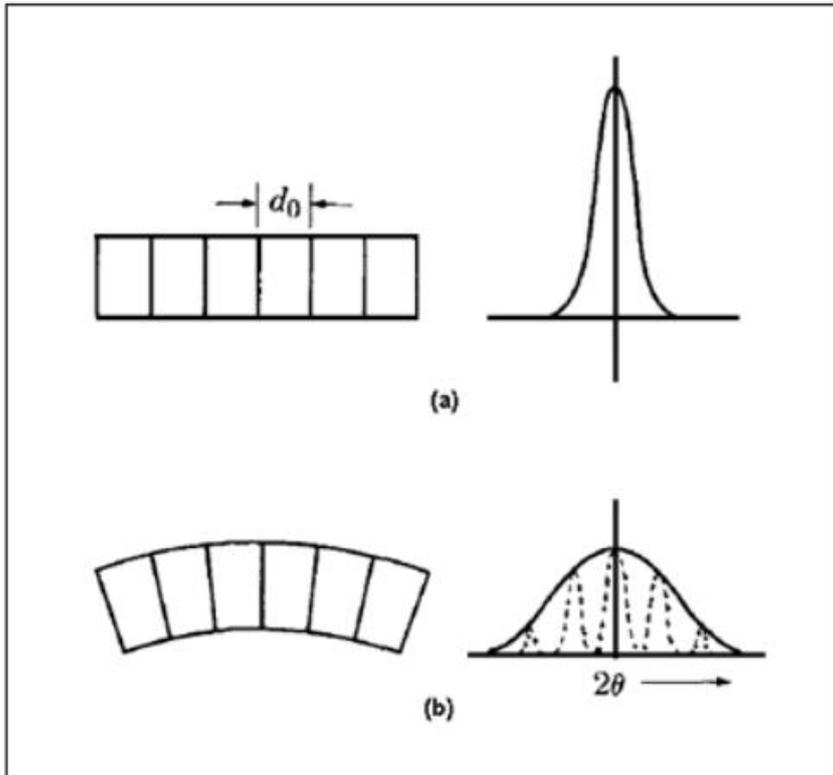
### **3.4 Difração de raios X**

A difração de raios X é um método muito utilizado para análise não destrutiva em materiais metálicos. Neste estudo foi utilizada para o cálculo da microdeformação na rede cristalina pelo método Williamson-Hall e para a medida da distribuição de tensão residual pelo método  $\text{sen}^2\Psi$ .

#### **3.4.1 Microdeformação na rede cristalina**

A microdeformação tem como base o estudo dos perfis de difração de raios X da amostra, onde o resultado da difração em um cristal sem deformações é um pico intenso e bem definido, e à medida que o material é deformado, há um deslocamento em  $2\Theta$  para a esquerda e para a direita proporcionados pelos campos de compressão e tração, de forma que o pico perca intensidade e ganhe em alargamento conforme figura 6 a e b.<sup>[12]</sup>

Figura 6: Representação de um pico sem deformações (a) com deformação (b)



Fonte: Cullity, 1978 <sup>[12]</sup>

Diversas formulações foram desenvolvidas para o cálculo de microdeformação com base nos perfis de difração de raios x, entre elas, o método de Williamson Hall.

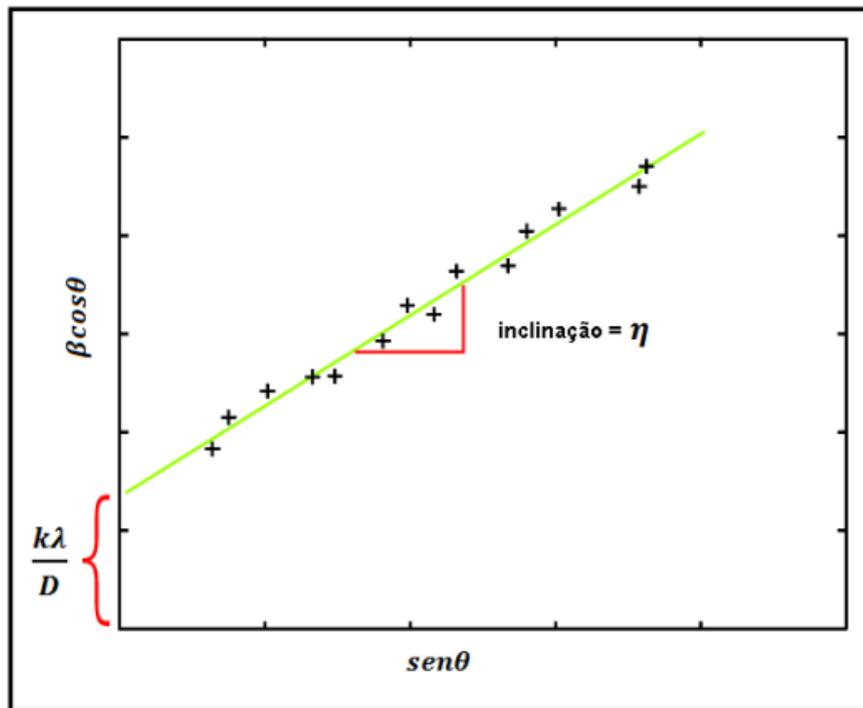
O método proposto por G. K. Williamson e W. H. Hall em 1953, permite a separação das contribuições relacionadas ao tamanho médio de cristalitos e a microdeformação da rede cristalina, através da utilização das informações dos perfis da difração obtido experimentalmente pela equação:

$$\beta \cos \theta = \frac{k\lambda}{D} + \eta \sin \theta \quad (4)$$

Onde  $\beta$  é a largura do pico a meia altura;  $\lambda$  é o comprimento de onda da radiação;  $D$  é a estimativa do tamanho médio dos cristalitos e  $\eta$  é a estimativa da microdeformação da rede cristalina.<sup>[30,31,32]</sup>

De forma gráfica, figura 7, pode-se determinar o tamanho do cristalito pelo intercepto no eixo das ordenadas ( $\beta \cos\theta$ ) e a a microdeformação da rede cristalina pelo coeficiente angular da reta ( $\eta$ ).

Figura 7: Metodologia para determinação da microdeformação



Fonte: OLIVEIRA, 2016<sup>[28]</sup>

Em outras palavras, a inclinação corresponde à microdeformação da rede cristalina e o intercepto em y ao tamanho médio do cristalito do tipo  $y = A + Bx$ , onde a microdeformação da rede cristalina é calculada por  $\varepsilon = \frac{B}{2}$  e o tamanho médio de cristalito por  $D = 0.9 \frac{\lambda}{A}$ .

Lembrando que o modelo da equação criado por Williamson-Hall não prevê o deslocamento dos picos causados pela densidade de discordâncias presentes em um material deformado.<sup>[11]</sup>

Outra forma de considerar o método de Williamson-Hall é a partir da avaliação do conjunto de dados do alargamento integral  $\beta$  (largura à meia altura), conhecida também por *Full width at half maximum* (FWHM), versus o módulo do vetor de difração  $\vec{g}_{hkl}$  para picos referentes às reflexões (hkl). Este método clássico

assume que o alargamento é causado pela soma linear das contribuições dos efeitos de tamanho e distorções cristalinas e que o valor de  $\varepsilon^2$  (deformação da rede cristalina) é independente da orientação cristalográfica.<sup>[30,32]</sup>

### 3.4.2 Tensão residual por difração de raios X

Em 1925 foi realizada a primeira medida de tensão residual por difração de raios X, seus resultados eram gravados em películas fotográficas. Anos mais tarde, em 1953 com um grande avanço de tecnologia a tensão interna passou a ser medida por um difratômetro de raios X, de maneira mais rápida e com seus resultados gravados eletronicamente.<sup>[12]</sup>

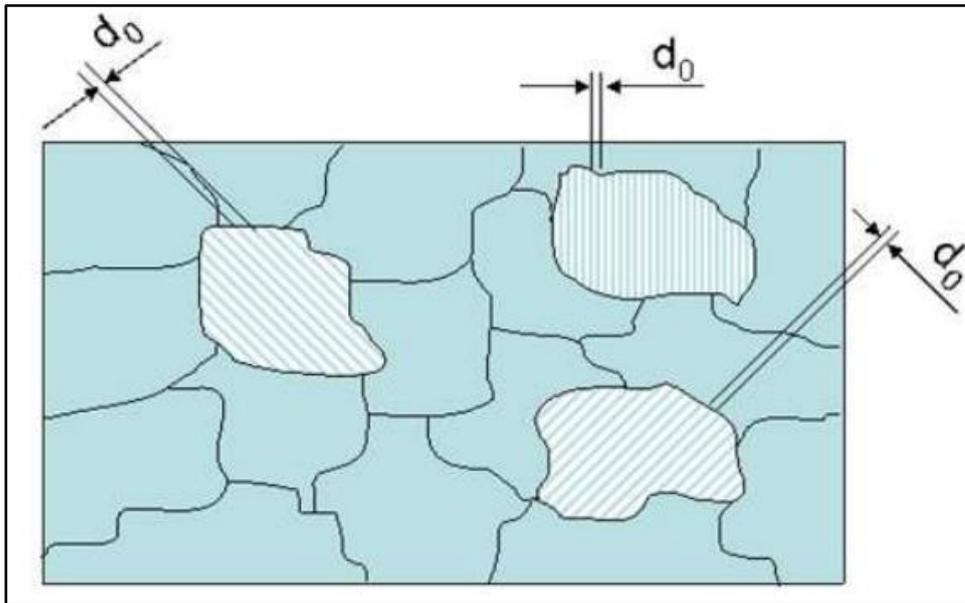
As medidas de tensão residual por difração de raios X são baseadas na alteração das distâncias interplanares do material cristalino, medidas por meio da posição angular dos feixes difratados, de modo que a variação da distância interplanar é relacionada à deformação a partir da qual a tensão pode ser calculada.<sup>[13]</sup>

A vantagem do uso da difração para medir tensão residual está em seu rápido tempo de medida e aspecto não destrutivo do material, além de apresentar dois métodos de análise de tensão interna: análise bidimensional, utilizada neste trabalho, onde a tensão pode ser medida em qualquer direção, e a análise unidimensional exclusiva para monocristais, determinada apenas em uma direção.<sup>[11,12]</sup>

Na análise bidimensional as macrotensões são calculadas quando a deformação elástica gera uma mudança na distância interplanar. Nos casos em que se ultrapassam o limite de deformação elástica, a rede do cristal irá modificar-se formando as microtensões, mas este aumento de tensões não será adicionado na tensão macroscópica. Mesmo quando uma deformação plástica não uniforme gere tensões internas, todas as macrotensões internas permanecem quando o material atinge a deformação plástica.<sup>[13]</sup>

Considerando um material policristalino, sendo ele de metal ou cerâmica, seu espaçamento interplanar  $d_0$  será o mesmo para todas as famílias de planos, em qualquer direção, quando o material está livre de tensões, como observado na figura a seguir.<sup>[20,35]</sup>

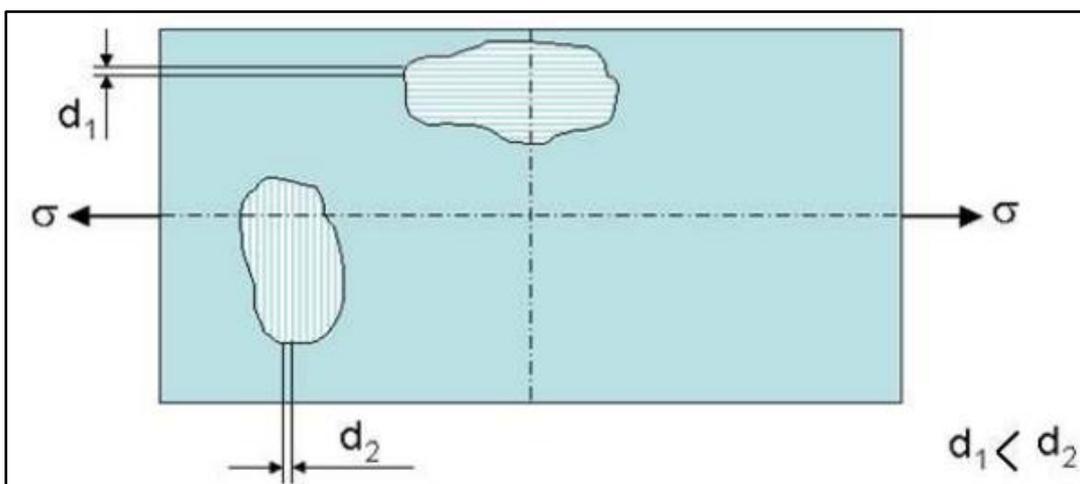
Figura 8: Espaçamento interplanar  $d_0$



Fonte: François et al., 1996<sup>[35]</sup>

Contudo, quando o material é submetido a uma tensão durante a deformação plástica, o espaçamento interplanar  $d$ , irá variar de acordo com a orientação dos planos relativos à direção da tensão. Onde a distância interplanar aumentará para os planos perpendiculares à direção da tensão aplicada e diminuirá para os planos paralelos a essa tensão, como exemplificado na figura 9.<sup>[35]</sup>

Figura 9: Variação do espaçamento interplanar mediante tensão



Fonte: François et al., 1996<sup>[35]</sup>

Desta maneira a tensão residual de um material pode ser definido, segundo a lei de Bragg, pela variação do espaçamento interplanar  $d-d_0$ , medida pela posição dos picos de difração segunda a equação a seguir.

$$\varepsilon = \frac{d - d_0}{d_0} = \frac{\Delta d}{d_0} = -(\theta - \theta_0) \cot g \theta_0 = -\Delta \theta \cot g \theta_0 \quad (5)$$

Onde  $\theta$  é a posição do pico de difração para o espaçamento interplanar  $d$  (material sobre tensão) e  $\theta_0$  é a posição correspondente para  $d_0$  (material livre de tensão).

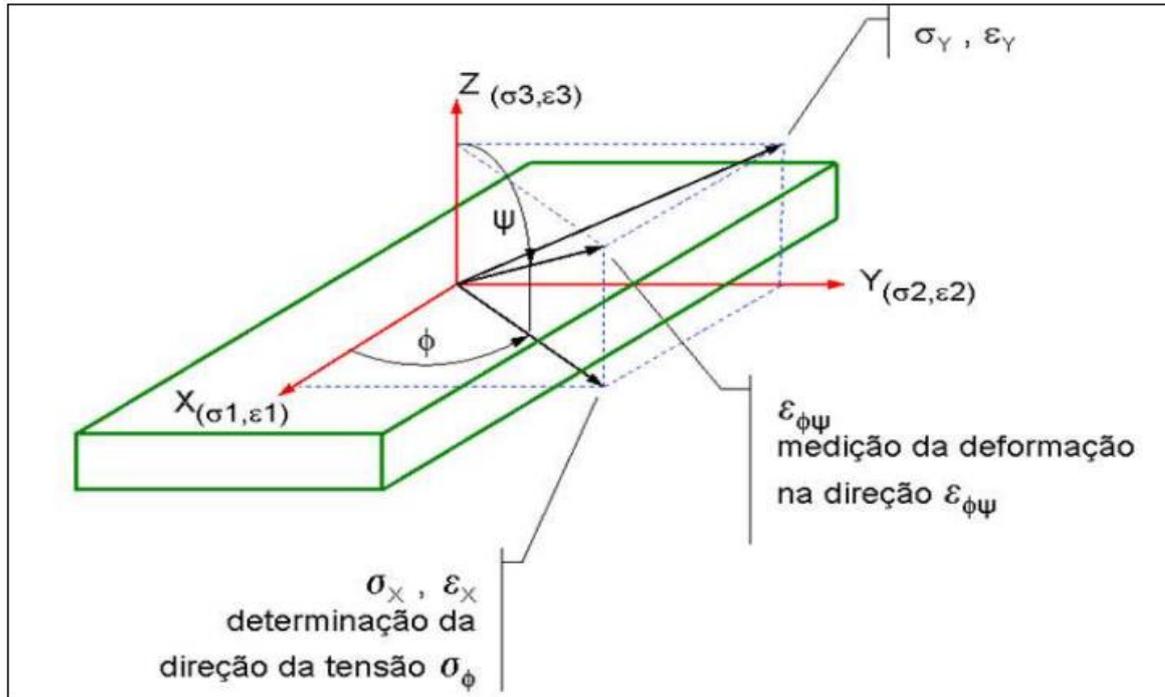
Sendo assim, a tensão pode ser calculada a partir da medição da deformação em várias direções mais a constante elástica do material.<sup>[20,35]</sup>

O cálculo da tensão residual por difração de raios X é fundamentado na determinação de duas componentes de deformação  $\varepsilon_{\varphi\psi 1}$  e  $\varepsilon_{\varphi\psi 2}$  em direções pré-determinadas pelos ângulos  $\varphi$  e  $\psi$  de um sistema de coordenadas esféricas. Onde  $\varepsilon$  é a microdeformação, e  $\psi$  e  $\varphi$  são os ângulos polares e azimutais.<sup>[34]</sup>

Com base na determinação da relação entre o plano da tensão e a distorção da superfície da amostra, faz-se possível o cálculo da relação da tensão ( $\sigma$ ) para um dado grau de inclinação da superfície da amostra. O ângulo entre a inclinação do plano da amostra e o plano da difração é nomeado de  $\psi$  (psi).<sup>[33]</sup>

Escolhendo um ponto qualquer na superfície da amostra para foco de medição, pode-se definir  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  e  $\sigma_3$  como as tensões principais;  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  e  $\varepsilon_3$  como as deformações principais. E conforme o plano de tensão apresentado a seguir, o valor de  $\sigma_3$  para o eixo Z é 0.<sup>[33]</sup>

Figura 10: Direções principais de tensão e deformação



Fonte: Rigaku, 2003<sup>[33]</sup>

Através da equação a seguir, é determinado a deformação  $\varepsilon_{\phi\psi}$ , segundo a teoria da elasticidade para o estado biaxial de tensões.

$$\varepsilon_{\phi\psi} = \left( \frac{1+\nu}{E} \right) \sigma_{\phi} \cdot \text{sen}^2 \psi - \frac{\nu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (6)$$

E a diferença entre as componentes de deformações será:

$$\varepsilon_{\phi\psi_2} - \varepsilon_{\phi\psi_1} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{\phi} (\text{sen}^2 \psi_2 - \text{sen}^2 \psi_1) \quad (7)$$

Onde E (módulo de elasticidade) e  $\nu$  (Poisson) são as constantes elásticas do material,  $\psi$  e  $\phi$  são os ângulos polares e azimutais,  $\sigma_{\phi}$  a componente média da tensão,  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  as tensões principais.<sup>[20,34]</sup>

O cálculo para  $\sigma_{\phi}$  pode ser descrito como:

$$\sigma_{\phi} = \left( \frac{E}{1+\nu} \right) \frac{\varepsilon_{\phi\psi 2} - \varepsilon_{\phi\psi 1}}{\sin^2 \psi_2 - \sin^2 \psi_1} \quad (8)$$

E através da lei de Bragg, a deformação  $\varepsilon_{\phi\psi}$  pode ser descrita como:

$$\varepsilon_{\phi\psi} = \frac{d_{\phi\psi} - d_0}{d_0} = -\cot \theta_0 (\theta_{\phi\psi} - \theta_0) \quad (9)$$

Onde  $d_{\phi\psi}$ ,  $d_0$  e  $\theta_{\phi\psi}$ ,  $\theta_0$  são as distâncias interplanares e os ângulos de difração para materiais com e sem tensão respectivamente.

Por final, a equação para o cálculo da componente de tensão  $\sigma_{\phi}$  na direção escolhida é:

$$\sigma_{\phi} = -\frac{E}{2(1+\nu)} \frac{\pi}{180} \cot \theta \frac{\delta(2\theta)}{\delta(\sin^2 \psi)} \quad (10)$$

Para a obtenção de resultados mais confiáveis, é necessário que a medição do ângulo  $\theta$  seja realizada em mais que duas posições  $\psi$  ( $\psi_1$ ,  $\psi_2$ ,  $\psi_3$ ,  $\psi_n$ ) e os valores angulares de  $\theta_n$  ( $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_n$ ), correspondentes a cada ângulo  $\psi_n$ , são plotados em função de  $\sin^2 \psi$ . O coeficiente angular de ajuste da função,  $y=ax+b$ .<sup>[20,34]</sup>

E já que os valores de  $E$ ,  $\nu$  e  $\theta$  são conhecidos, eles podem ser substituídos por uma constante ( $k$ ), na equação:

$$\sigma_{\phi} = -k \frac{\delta(2\theta)}{\delta(\sin^2 \psi)} \quad (11)$$

## **4 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **4.1 Material**

No presente estudo foi utilizado a liga Al-Cu 2024, cedida pelo Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA) na forma de corpos-de-prova de impacto, envelhecidos naturalmente.

Os corpos de prova possuem dimensões de 1cm largura, 1cm de altura e 5,5 cm de comprimento.

### **4.2 Métodos**

#### **4.2.1 Fluorescência de Raios X**

A fluorescência de raios X foi utilizada neste trabalho para análise elementar do alumínio. O teste foi realizado no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN, área de materiais, no equipamento da Shimadzu modelo EDX-720, ilustrado na figura a seguir.

Figura 11: Equipamento Shimadzu EDX-720



Fonte: autora

A área analisada neste ensaio foi a superfície da amostra sem a aplicação do shot peening.

#### 4.2.2 Shot Peening

O jateamento das granalhas de aço foi realizado na empresa Sinto Brasil, localizada em São Paulo, com o acompanhamento da autora.

Para este processo foram selecionadas 4 granalhas (AC20, AC40, AC60, AC100), que se diferenciam quanto ao seu tamanho.

As tabelas a seguir contêm dados técnicos das granalhas fornecidos pelo executor do processo de shot peening, como composição química, diâmetro das granalhas utilizadas e energia cinética.

Tabela 4: Composição das granalhas

| <b>Composição Química</b> |                |
|---------------------------|----------------|
| Cr                        | 16,00 - 20,00% |
| Ni                        | 7,00 - 9,00%   |
| Si                        | 1,80 - 2,00%   |
| Mn                        | 0,70 - 1,20%   |
| C                         | 0,05 - 0,20%   |

Fonte: autora

Tabela 5: Dados técnicos das granalhas

| <b>Granalha</b> | <b>Diâmetro (m)</b>   | <b>Volume (m<sup>3</sup>)</b> | <b>Massa (Kg)</b>      | <b>Energia Cinética (J)</b> |
|-----------------|-----------------------|-------------------------------|------------------------|-----------------------------|
| AC20            | $0,195 \cdot 10^{-3}$ | $38,8236 \cdot 10^{-13}$      | $1,7858 \cdot 10^{-8}$ | $2,0358 \cdot 10^{-6}$      |
| AC40            | $0,6 \cdot 10^{-3}$   | $11,3103 \cdot 10^{-11}$      | $5,2027 \cdot 10^{-7}$ | $5,9310 \cdot 10^{-5}$      |
| AC60            | $0,975 \cdot 10^{-3}$ | $4,8508 \cdot 10^{-10}$       | $2,2313 \cdot 10^{-6}$ | $2,5436 \cdot 10^{-4}$      |
| AC100           | $1,20 \cdot 10^{-3}$  | $9,0482 \cdot 10^{-10}$       | $4,1621 \cdot 10^{-6}$ | $4,7447 \cdot 10^{-4}$      |

Fonte: autora

O equipamento, juntamente com seu interior é ilustrado na figura 12.

Figura 12: Equipamento para jateamento de granalhas e seu interior (Sinto Brasil)



Fonte: autora

#### 4.2.3 Análise Microestrutural

Para a análise microestrutural foram necessárias duas técnicas, microscopia e difração de raios X.

Dentro da microscopia foi utilizado o microscópio óptico (MO) e o microscópio eletrônico de varredura (MEV). Com a microscopia óptica foi possível verificar como os grãos estão dispostos no material e analisar transversalmente as amostras após shot peening, com o intuito de verificar a profundidade dos jateamentos. Já o MEV, foi utilizado para análise de superfície das amostras após jateamento.

Os ensaios de análise de superfície foram realizados no IPEN, centro de materiais, pelo equipamento da Hitachi modelo TM 3000.

Figura 13: Equipamento Hitachi TM 3000



Fonte: autora

A microscopia óptica para análise transversal das amostras foi realizada no Centro de Pesquisas, Desenvolvimento e Ensaios, CPDE, da empresa Termomecânica, em São Bernardo do Campo, SP.

Para estes ensaios foram necessários que as amostras fossem lixadas, polidas e atacadas quimicamente após embutimento.

As lixas utilizadas no processo foram as de malha #500 e #1200, seguida pela lixa de transição MD Allegro e por fim passadas no pano de polimentos MD Mol e MD Nap, a força utilizada variou de 5N a 10N e a cada etapa as amostras foram limpas por ultrassom.

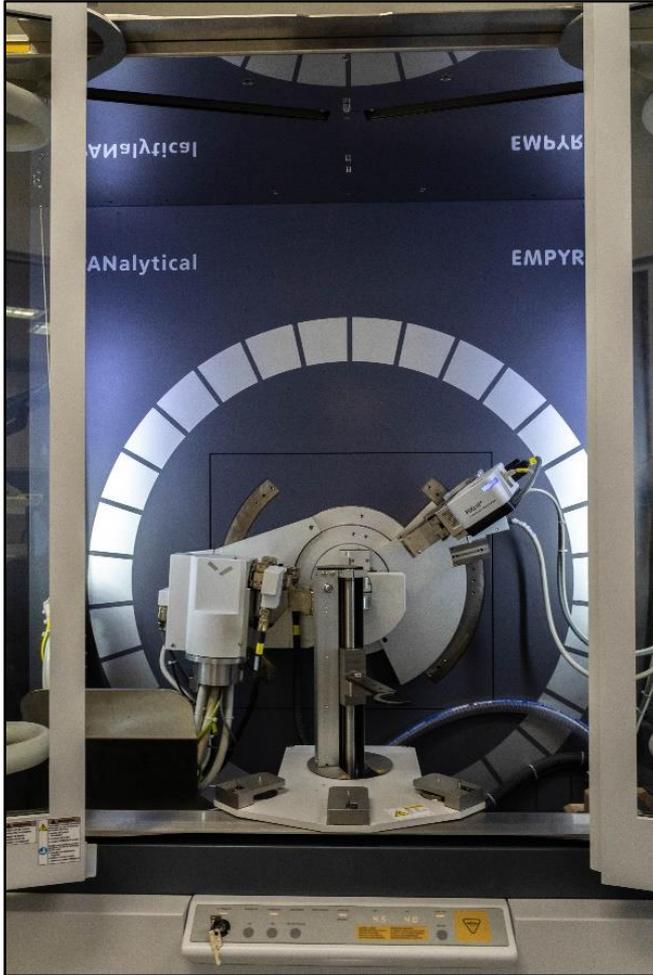
Já a microscopia óptica com o intuito de verificar como os grãos estão dispostos no material foi realizado na Companhia Brasileira de Alumínio, CBA. Neste ensaio a microscopia óptica é associada a luz polarizada através do software Olympus Stream Essentials, função Grains Intercept, conforme norma ASTM E112.

Para este ensaio foi necessário que a amostra sem shot peening passasse por ataque eletrolítico de 20V utilizando uma solução de ácido fluorbórico (HBF<sub>4</sub>) com concentração de 1,8%, por 4 minutos.

A difração de raios X foi realizada no Laboratório de Caracterização Tecnológica, LCT, localizado no Departamento de Minas e Petróleo da USP, pelo equipamento Empyrean da Panalytical. Esta técnica possibilitou a identificação de fases cristalinas e a determinação da microdeformação na rede, pelo método de Williamson Hall, das amostras com e sem shot peening.

As figuras 14 e 15 representam, respectivamente, a ilustração do equipamento Empyrean e do porta amostra adequado para metais utilizado no ensaio.

Figura 14: Equipamento Empyrean



Fonte: autora

Figura 15: Porta amostra para metais



Fonte: autora

O equipamento Empryrean possui um software único que responde as condições de coleta abaixo. Todos os difratogramas foram coletados seguindo o mesmo padrão.

Faixa angular  $2\theta = 30^\circ$  até  $90^\circ$ ;

Passo angular =  $0,02^\circ$ ;

Tempo por passo = 150s;

Tensão e corrente = 45kV/40mA.

#### 4.2.4 Fator de Concentração de Tensão

A análise de rugosidade foi executada em corpos de prova de impacto, sem shot peening e com o shot peening (AC20, AC40, AC60 e AC100), no IPEN pelo equipamento Mitutoyo modelo SJ-201 seguindo a ISO-1997.

A área analisada de cada corpo de prova seguiu o mesmo critério, 6 pontos no sentido longitudinal e transversal, a figura a seguir ilustra o momento do ensaio.

Figura 16: Equipamento Mitutoyo



Fonte: autora

A avaliação do fator de concentração de tensão,  $K_t$ , explanado anteriormente no trabalho, foi realizada por meio de dados obtidos pelo ensaio de rugosidade (profundidade média,  $R_z$ ) e por informações obtidos por micrografias em MEV da superfície (medida entre os picos,  $S$ ), analisadas pelo software ImageJ.

#### 4.2.5 Tensão Residual por Difração de Raios X

O ponto chave desta pesquisa se encontra na avaliação da distribuição da tensão residual do material após o jateamento das granalhas de aço.

O estudo se inicia com a tensão residual superficial dos corpos de prova e em seguida é feito a análise de tensão residual em profundidade.

A preparação das amostras para o teste de tensão residual em profundidade começou com a medida de sua espessura pelo micrômetro. Após cada medida do micrometro, era medido a tensão residual do material e depois feito o ataque com ácido clorídrico (HCl) concentrado, observando os parâmetros de tempo e volume de ácido.

Para cada 10  $\mu\text{m}$  removidos de material são aplicados 5ml de ácido por 30s.

O equipamento utilizado foi o Automate II da marca Rigaku, localizado no centro de materiais, IPEN, com o tubo de anodo de Cromo com feixe de 2 mm de diâmetro, mostrado na figura 17. As condições de análise mostradas a seguir, se dão de acordo com o material, alumínio cúbico de face centrada.

HKL= 311

$2\theta = 139,49^\circ$

Faixa angular  $2\theta = 129,23^\circ$  até  $149,63^\circ$

Passo=  $0,1^\circ/10\text{s}$

$\text{sen}^2\psi = 6$  pontos equidistantes (0-18,4-26,6-33,2-39,2-45)

Tensão e corrente= 40kV/20mA

Módulo de Young= 71.900MPa

Razão de Poisson= 0,28

Figura 17: Equipamento Automate II



Fonte: autora

#### 4.2.6 Dureza

O ensaio de dureza também foi realizado no IPEN, centro de materiais, CECTM, pelo equipamento Sussen Wolpert Testor HT.

Este teste foi realizado com carga de 100Kg, indicada pelo manual do equipamento de acordo com o material a ser analisado, no corpo de prova sem shot peening e nos corpos de prova jateados com as granalhas AC20, AC40, AC60 e AC100.

A equipamento utilizada é representado na figura a seguir.

Figura 18: Equipamento Wolpert Testor



Fonte: autora

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Análise Elementar

A composição química em porcentagem em peso do material utilizado é ilustrada na tabela a seguir.

Tabela 6: Resultado quantitativo da análise química do alumínio 2024 por fluorescência de raios X.

| Elemento | % wt   |
|----------|--------|
| Al       | 90,447 |
| Mg       | 4,453  |
| Cu       | 3,261  |
| Mn       | 0,567  |
| Eu       | 0,508  |
| K        | 0,286  |
| Fe       | 0,184  |
| Zn       | 0,166  |
| Cr       | 0,086  |
| Ti       | 0,019  |
| V        | 0,015  |
| Zr       | 0,008  |

Fonte: Autora

Os resultados obtidos confirmam que o material em estudo está de acordo com as especificações da *Aluminum Association*. Uma vez que a composição predominante é o alumínio, representando cerca de 90% da sua

composição e seus principais elementos de liga são o Cobre (Cu) e o Magnésio (Mg). Contudo a amostra analisada apresenta alteração na composição do Mg e Cu, quando comparada com a literatura.

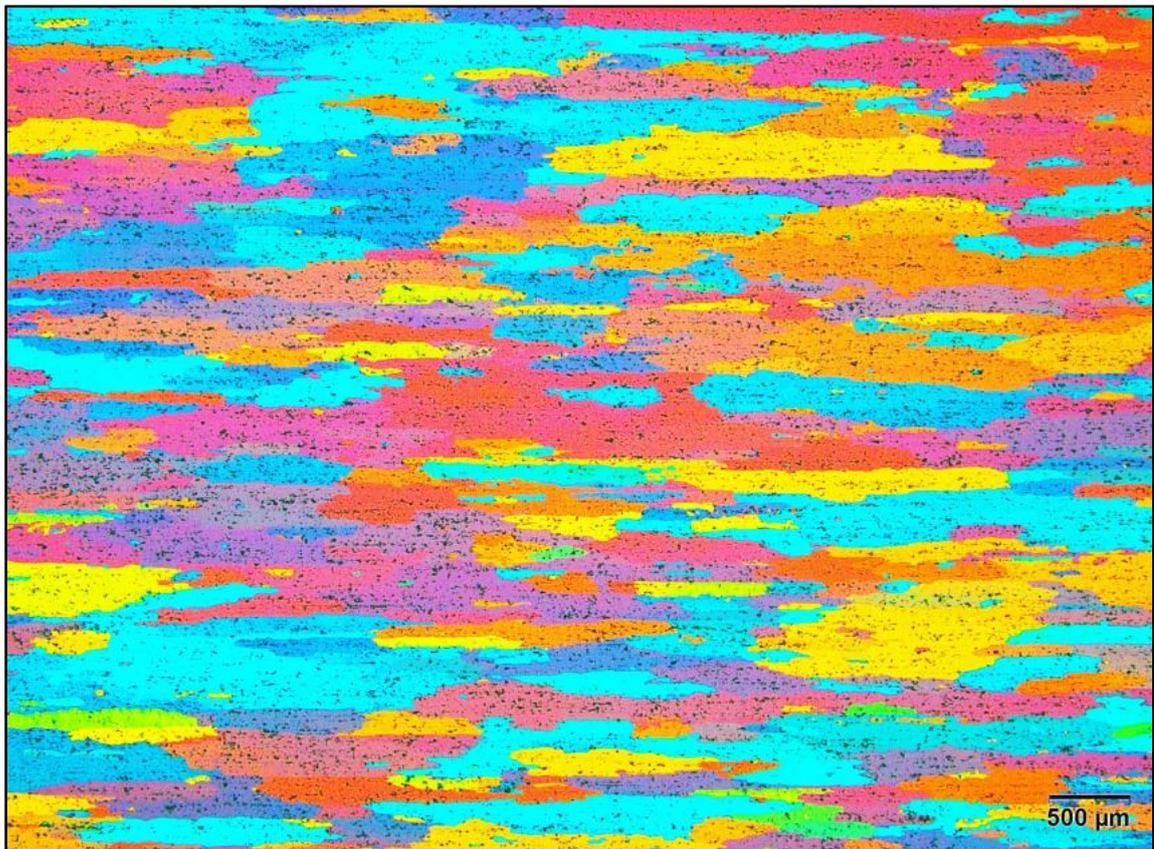
## 5.2 Análise Microestrutural

### 5.2.1 Microscopia

A imagem por microscopia óptica da continuidade a caracterização do material como recebido, sendo uma amostragem de como os grãos estão dispostos ao longo do material.

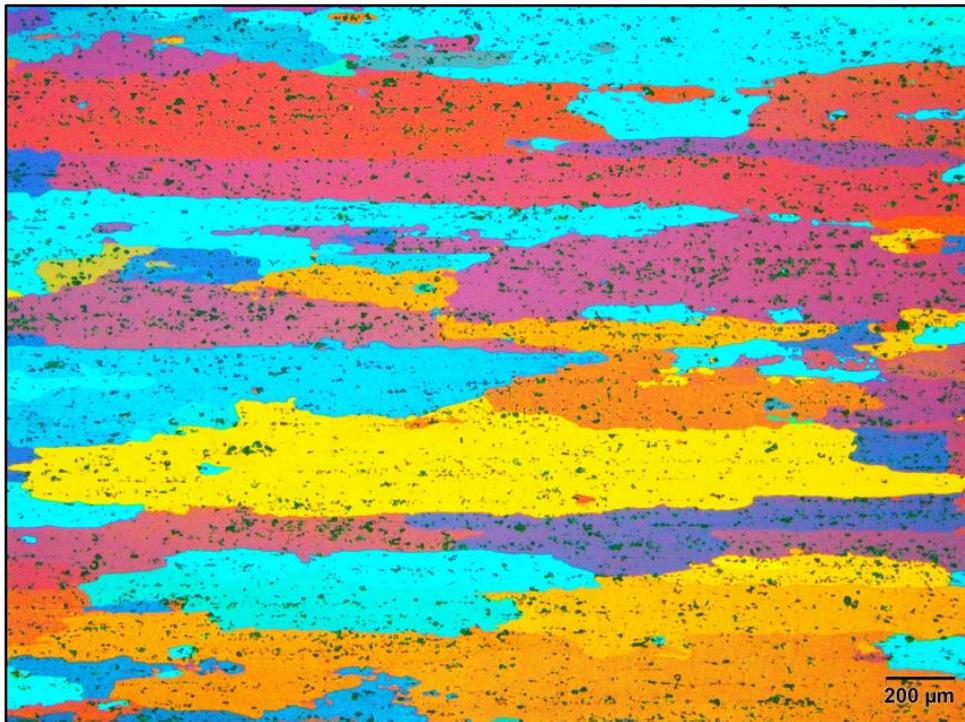
A seguir é apresentado as micrografias do material, alumínio 2024, com aumento de 20, 50 e 100 vezes.

Figura 19: Micrografia com luz polarizada aumento de 20x



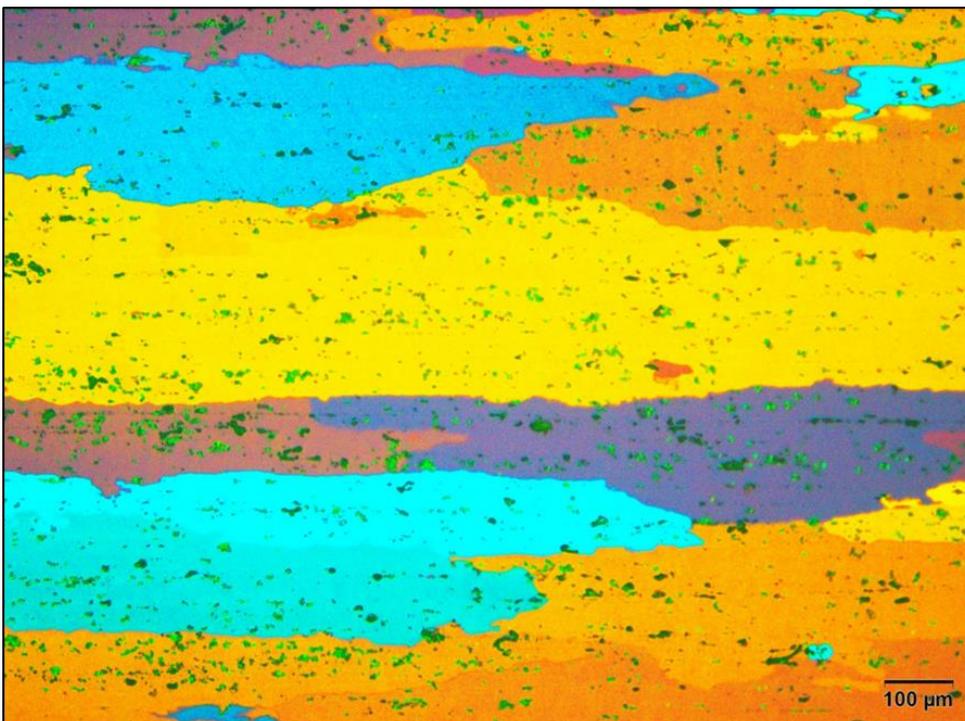
Fonte: Autora

Figura 20: Micrografia com luz polarizada aumento de 50x



Fonte: Autora

Figura 21: Micrografia com luz polarizada aumento de 100x



Fonte: Autora

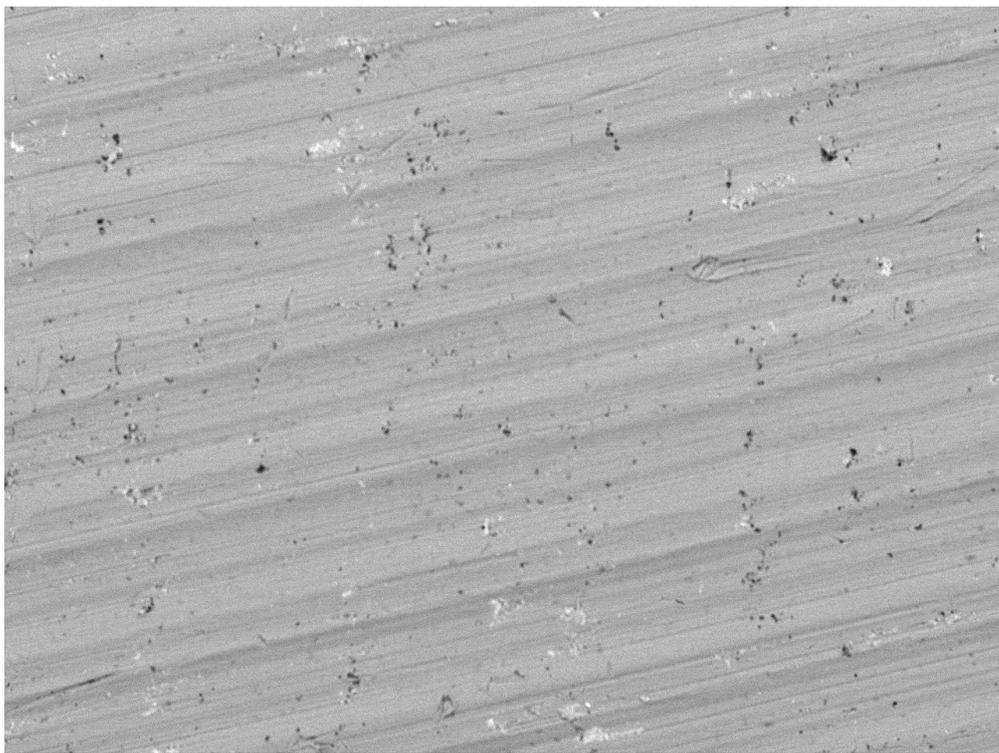
Estas micrografias representam a disposição dos grãos ao longo da superfície, observa-se a estrutura granular deformada no sentido de laminação.

A homogeneidade do alongamento dos grãos demonstra boa uniformidade e qualidade do processo mecânico.<sup>[36,37]</sup>

A coloração das micrografias se deve as diferentes orientações cristalográficas de cada grão da amostra.

Após o processo de jateamento, é possível comparar a mudança na superfície do material entre as amostras sem shot peening e com shot peening (AC20, AC40, AC60 e AC100), conforme ilustrado nas figuras a seguir feitas por MEV.

Figura 22: Micrografia em superfície amostra sem jateamento

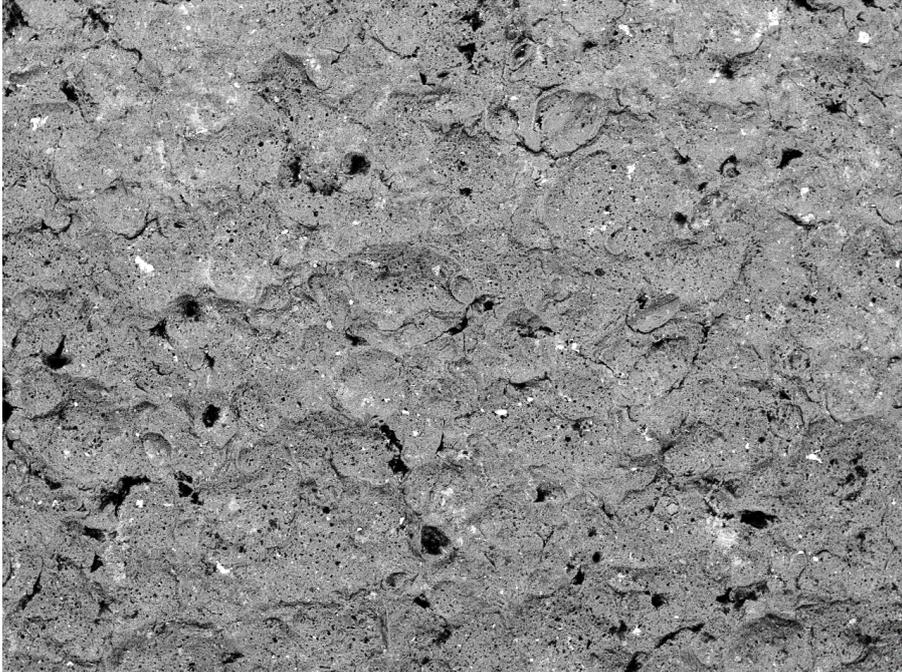


Sem Shot

AL D9.0 x200 500 um

Fonte: autora

Figura 23: Micrografia em superfície amostra AC20

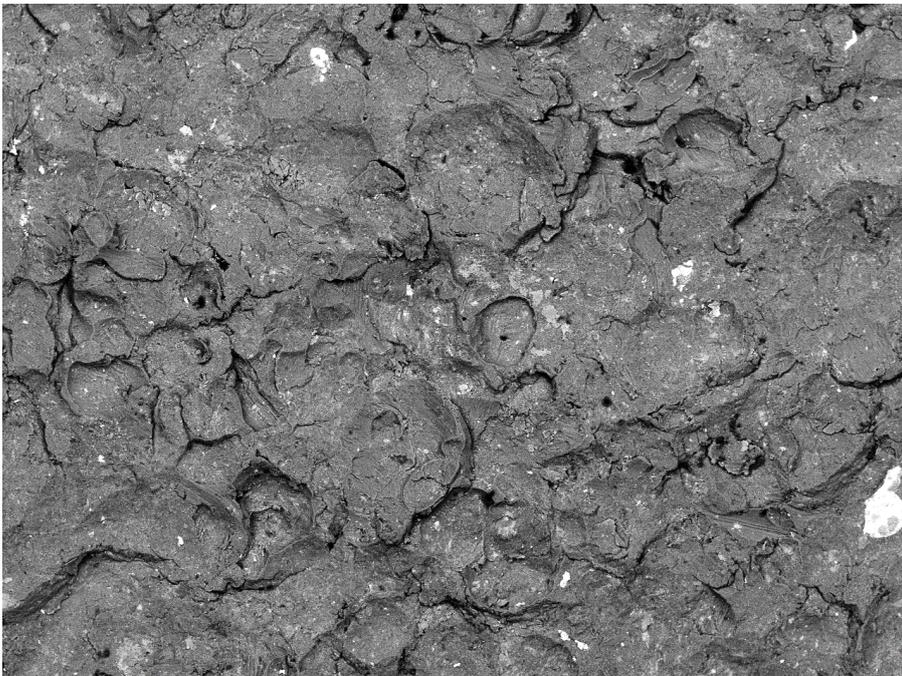


AC20

AL D9.0 x200 500 um

Fonte: autora

Figura 24: Micrografia em superfície amostra AC40

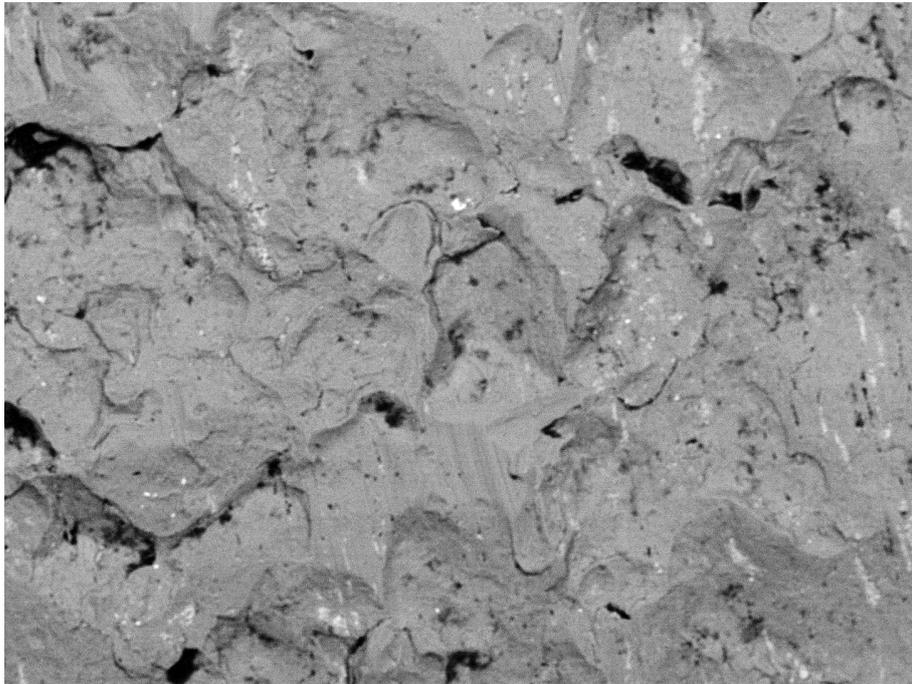


AC40

AL D9.0 x200 500 um

Fonte: autora

Figura 25: Micrografia em superfície amostra AC60

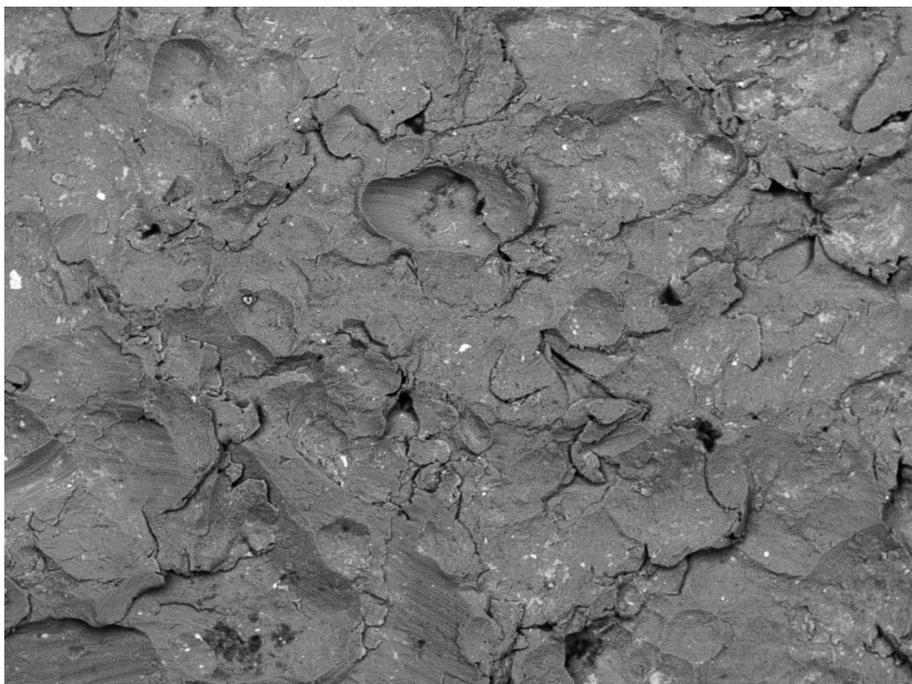


AC60

AL D9.0 x200 500 um

Fonte: autora

Figura 26: Micrografia em superfície amostra AC100



AC100

AL D9.0 x200 500 um

Fonte: autora

A Figura 22, representa o material como recebido, ou seja, sem passar pelo processo de shot peening. As linhas paralelas indicam que o material foi usinado e apresenta uma boa homogeneidade.

As demais figuras representam os corpos de prova submetidos ao jateamento. Observa-se que à medida que o tamanho da granalha aumenta, o diâmetro das cavidades e a distância entre elas também aumentam.

A figura 23, amostra jateada com a granalha AC20 exibe cavidades menores e mais próximas entre si, evidenciando uma melhor e uniforme cobertura do jateamento. Também é notável a presença de trincas finas em pequena quantidade.

Já as amostras jateadas com granalhas maiores apresentam maior quantidade de trincas, evidenciando que o tamanho da granalha influencia na espessura e quantidade de trincas advindas pelo processo de shot peening.

As ilustrações a seguir, feitas também por microscopia ótica, retratam o comportamento do material em profundidade após o shot peening. Estas figuras estão com ampliação de 200x.

Figura 27: Micrografia em profundidade AC20

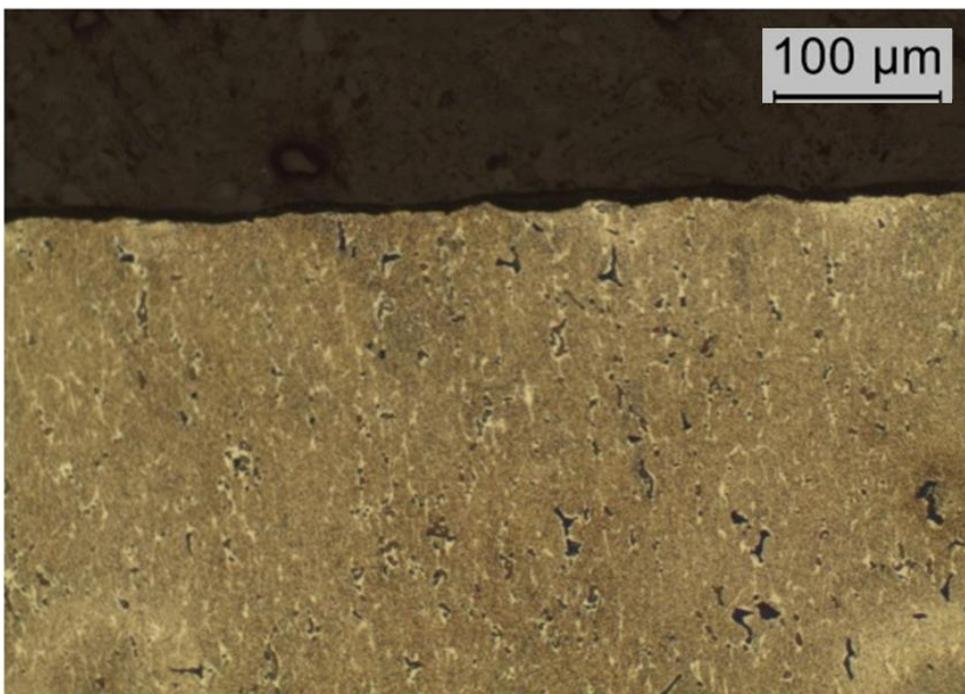
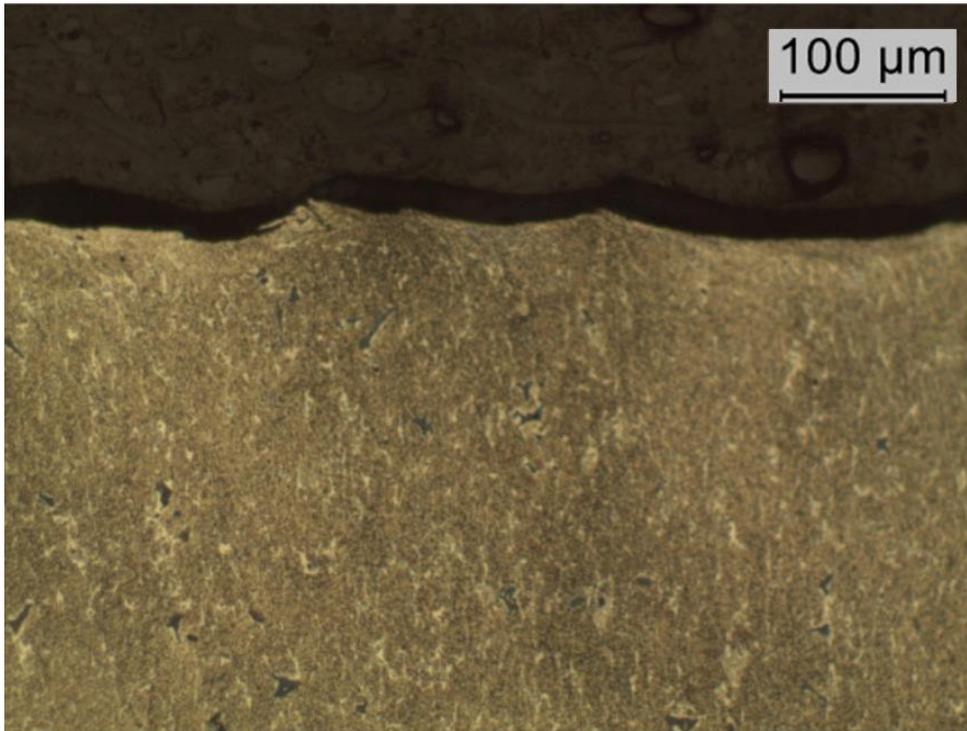
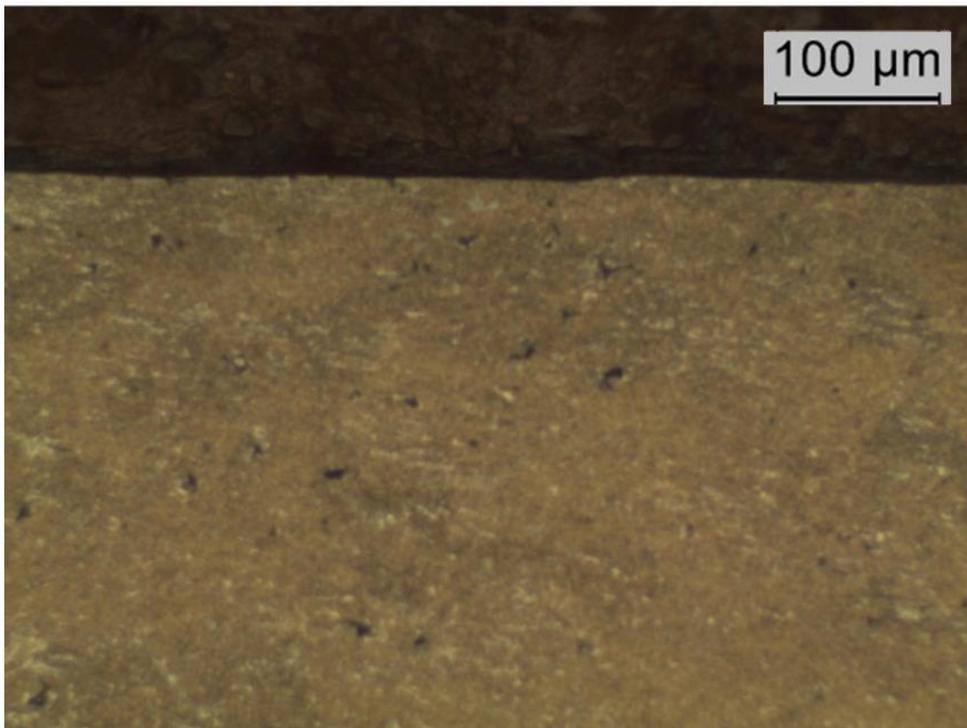


Figura 28: Micrografia em profundidade AC40



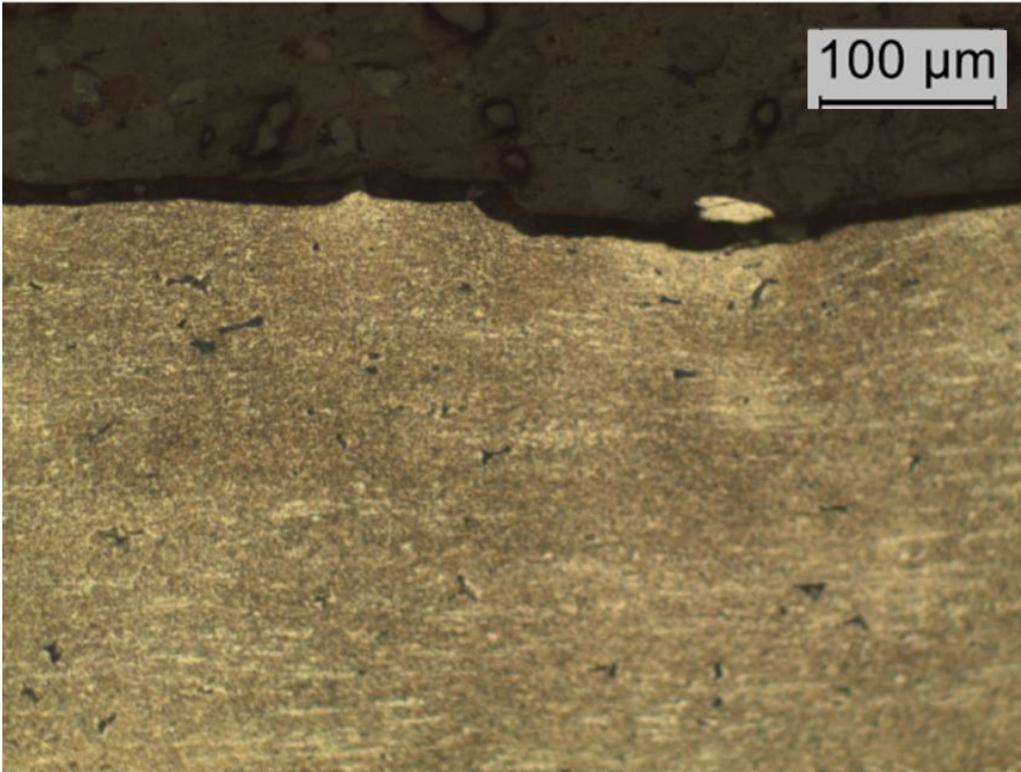
Fonte: autora

Figura 29: Micrografia em profundidade AC60



Fonte: autora

Figura 30: Micrografia em profundidade AC100



Fonte: autora

Ao comparar as figuras, é possível associar o aumento das cavidades com o aumento do diâmetro das granalhas utilizadas no processo.

Na figura 30, amostra jateada com a granalha AC100, é claramente perceptível a influência do shot peening no comportamento dos grãos próximos à superfície. Observa-se uma mudança de sentido nas linhas horizontais, que passam a seguir o formato curvo das esferas do shot peening.

Nessa região, onde ocorre a deformação dos grãos, é evidente a influência do shot peening no aumento da tensão residual compressiva. No entanto, após essa região, a tensão residual do material retorna à sua magnitude original.<sup>[20]</sup>

Essas observações ressaltam como o shot peening afeta a microestrutura superficial do material, resultando na formação de cavidades e na alteração do comportamento dos grãos. Essa deformação induzida contribui para o aumento da tensão residual compressiva, trazendo benefícios significativos em termos de resistência e fadiga do material e deformação na rede.

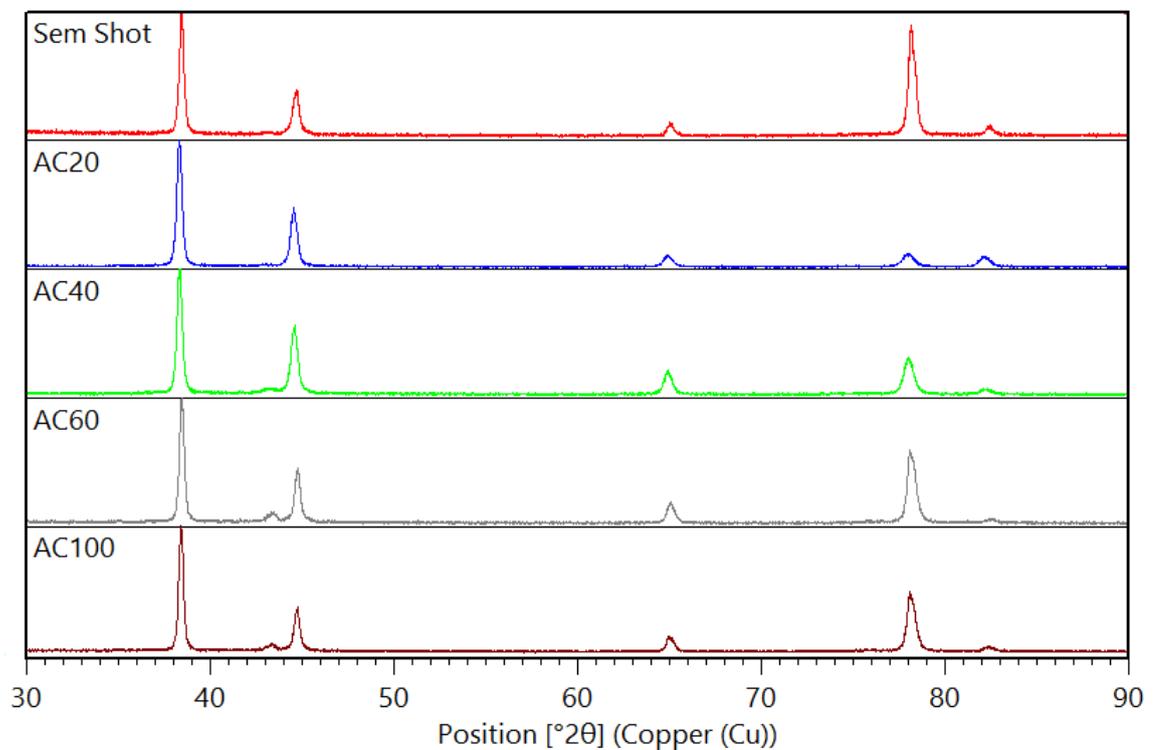
Ao promover a formação de cavidades superficiais, o shot peening cria uma topografia irregular que aumenta a área de contato entre o material e o ambiente, melhorando sua capacidade de resistir a tensões externas e em contraponto diminuindo a resistência corrosão.

Portanto, ao modificar a microestrutura superficial e induzir uma tensão residual compressiva, favorável, o shot peening desempenha um papel crucial na melhoria das propriedades mecânicas do material, proporcionando maior resistência à fadiga.

### 5.2.2 Difração de Raios X

A análise de difração de raios X, identificação de fases cristalinas, comprova que o material em questão é o alumínio cubico de face centrada. Na figura 31 é apresentado os difratogramas da amostra sem shot peening e com shot peening jateadas com as granalhas AC20, AC40, AC60 e AC100.

Figura 31: Difratograma do alumínio sem e com jateamento



Fonte: autora

Constata-se que os padrões de difração das amostras estudadas pertencem ao mesmo material, porém, apresentam diferenças significativas em termos de susceptibilidades às deformações e planos de escorregamento.

A presença de textura nas amostras é um indicativo da influência de processos anteriores, como a usinagem, que podem induzir uma direção preferencial de deslizamento dos planos cristalinos. Como na amostra sem shot peening, onde textura é mais proeminente no plano (311).

Nas amostras tratadas com as granalhas AC60 e AC100 a textura também é observada mais proeminente no plano (311), entretanto em menor grau com relação a amostra sem shot peening.

Por outro lado, na amostra tratada com a granalha AC20, é notável a ausência de textura nos difratogramas, sugerindo que o processo de shot peening conseguiu sobrepor-se de forma eficiente aos efeitos do processo de usinagem prévio. Isso pode ser atribuído a uma melhor cobertura e distribuição das deformações causadas pelo shot peening, o que resultou em uma redução da influência da usinagem e conformação, na textura final do material. O padrão de difração da amostra AC20 é o que mais se aproxima do padrão de difração do alumínio conforme padrões de fichas cristalográficas disponíveis pelo ICDD (International Centre for Diffraction Data).

Essas observações indicam que o shot peening desempenha um papel importante na modificação da textura e nas características estruturais do material. Por meio de um controle eficiente deste processo, é possível minimizar ou eliminar a textura induzida por processos anteriores (usinagem, lixamento e polimento), resultando em uma estrutura mais homogênea e uniforme.

### 5.2.3 Microdeformação na rede cristalina

A determinação da porcentagem da microdeformação na rede cristalina teve por base a análise do perfil dos picos proporcionado pela difração de raios X, ou seja, análise do posicionamento e alargamento dos picos difratados.

Desta forma pode-se entender que a microdeformação correspondente ao deslocamento dos átomos na posição de equilíbrio, onde parte da energia

oriunda do shot peening é consumida pela microdeformação e parte fica para a tensão residual.

A tabela apresentada a seguir fornece a porcentagem da microdeformação na rede cristalina para as amostras sem e com shot peening.

Tabela 7: Resultado em porcentagem da microdeformação na rede cristalina

| <b>Amostra</b>   | <b>Microdeformação na rede (<math>\epsilon</math>) %</b> |
|------------------|--|
| Sem shot peening | 0,031  |
| AC 20            | 0,148  |
| AC40             | 0,109  |
| AC 60            | 0,108  |
| AC100            | 0,076  |

Fonte: autora

Observa-se que todas as amostras apresentam algum nível de microdeformação na rede cristalina. Essas deformações são atribuídas à conformação do material, tratamento térmico e shot peening.

Comparando as amostras tratadas com shot peening, nota-se que a granalha AC20 apresenta a maior porcentagem de microdeformação na rede (0,148%). Isso indica que o processo de shot peening com essa granalha resultou em uma maior introdução de deformações na estrutura cristalina, o que pode estar relacionado a uma melhor e mais uniforme cobertura do shot peening em sua superfície, como é observado nas imagens do MEV anteriormente.

As amostras tratadas com as granalhas AC40, AC60 e AC100 apresentam porcentagens ligeiramente mais baixas de microdeformação na rede (0,109%, 0,108% e 0,076%, respectivamente). Isso sugere que essas granalhas proporcionaram um nível um pouco menor de deformações na estrutura cristalina em comparação com a granalha AC20.

Ao comparar os difratogramas com os valores de microdeformação, observa-se que cada plano das cinco amostras apresenta um comportamento

distinto. Isso indica que as microtensões atuam de maneira única em diferentes planos, devido às diferentes susceptibilidades das deformações e aos diferentes planos de escorregamento, o que resulta em variações das características estruturais.

Essas diferenças podem ser atribuídas às interações entre os planos de escorregamento e a distribuição das tensões residuais. Cada plano cristalino possui uma estrutura e uma disposição atômica distinta, o que influencia sua resposta às deformações e às tensões impostas pelo shot peening.

É importante ressaltar que a porcentagem da microdeformação na rede cristalina está relacionada à magnitude das deformações introduzidas no material durante o shot peening, que influenciam diretamente as propriedades mecânicas do material.

Portanto, a análise da porcentagem da microdeformação na rede cristalina nas diferentes amostras fornece informações valiosas sobre a extensão das deformações introduzidas pelo shot peening. Esses resultados podem ser utilizados para avaliar e comparar a eficácia do processo com diferentes granalhas, auxiliando no desenvolvimento de estratégias de tratamento adequadas para obter as propriedades desejadas no material.

### 5.3 Fator de Concentração de Tensão

A avaliação do fator de concentração da tensão ( $K_t$ ) foi realizada por meio de informações obtidas pelo estudo da rugosidade, profundidade média ( $R_z$ ) representada na tabela 8 e pelos dados estatísticos obtidos por micrografias em MEV da superfície, obtendo o diâmetro médio resultante do impacto das granalhas na superfície da amostra ( $S$ ), ilustradas pelas figuras 23 a 26, vista anteriormente, aplicadas na equação 1, detalhada na revisão da literatura.

A tabela adiante apresenta os valores fornecidos pelo ensaio de rugosidade,  $R_z$ .

Tabela 8: Resultado do ensaio de rugosidade em  $\mu\text{m}$ 

| <b>Amostra</b>   | <b>Rz (<math>\mu\text{m}</math>)</b> |
|------------------|--------------------------------------|
| Sem shot peening | 5,47                                 |
| AC20             | 16,82                                |
| AC40             | 23,87                                |
| AC60             | 26,82                                |
| AC100            | 31,41                                |

Fonte: Autora

Ao analisar os valores de rugosidade, observa-se que a amostra sem shot peening apresenta a menor rugosidade superficial, com um valor de Rz de 5,47  $\mu\text{m}$ . Isso indica uma superfície mais lisa e menos irregular.

Por outro lado, as amostras tratadas com shot peening mostram um aumento significativo na rugosidade superficial. A amostra tratada com a granalha AC20 apresenta um valor de Rz de 16,82  $\mu\text{m}$ , enquanto as amostras tratadas com as granalhas AC40, AC60 e AC100 apresentam valores de Rz de 23,87  $\mu\text{m}$ , 26,82  $\mu\text{m}$  e 31,41  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Isso indica que a formação de cavidades e irregularidades na superfície do material devido ao impacto das partículas durante o jateamento, tem relação com o tamanho da granalha, ou seja, quanto maior a granalha maior será a irregularidade da amostra.

Já os valores obtidos em (Kt) para as amostras jateadas estão descritos pela tabela 9.

Tabela 9: Resultado do fator de concentração de tensão (Kt)

| <b>Amostra</b> | <b>Kt</b> |
|----------------|-----------|
| AC20           | 1,81      |
| AC40           | 1,50      |
| AC60           | 1,44      |
| AC100          | 1,42      |

Fonte: Autora

Comparando as amostras tratadas com as diferentes granalhas, observa-se que a amostra tratada com a granalha AC20 apresenta o maior valor de Kt (1,81), seguida pelas amostras tratadas com as granalhas AC40, AC60 e AC100, que apresentam valores de Kt de 1,50, 1,44 e 1,42, respectivamente.

O valor do Kt está relacionado à quantidade de pontos de tensão distribuídos na superfície do material, similar ao encruamento, onde as cavidades formadas por granalhas de maior diâmetro possuem menor fator de concentração distribuído pela superfície.

Essas tensões concentradas podem ser benéficas em termos de resistência à fadiga, mas também podem aumentar o risco de iniciação e propagação de trincas. Conforme figuras por MEV, as trincas observadas na amostra AC20 possuem menores espessuras e quantidade quando comparadas com as demais granalhas.

Portanto, é importante considerar esses aspectos ao avaliar a adequação do shot peening para uma aplicação específica.

#### **5.4 Distribuições da Tensão Residual por Difração de Raios X**

A tabela a seguir apresenta as tensões residuais superficiais das cinco amostras estudadas:

Tabela 10: Tensão residual de superfície

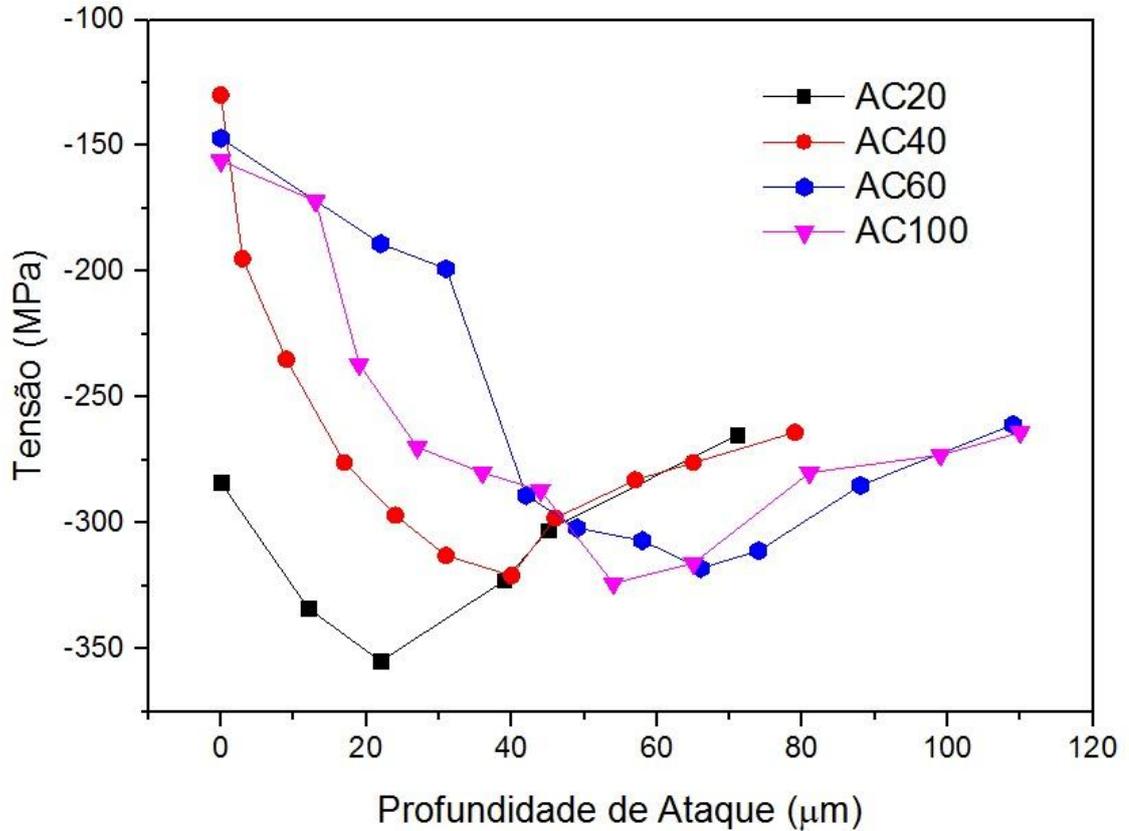
| <b>TENSÃO RESIDUAL SUPERFICIAL (MPa)</b> |      |      |      |       |
|--|------|------|------|-------|
| Sem shot peening                         | AC20 | AC40 | AC60 | AC100 |
| -31                                      | -284 | -130 | -147 | -156  |

Fonte: Autora

Observa-se que todas as amostras apresentam tensões residuais superficiais em compressão. Notavelmente, as amostras tratadas com shot peening exibem magnitudes maiores, sendo que as amostras AC40, AC60 e AC100 possuem valores próximos entre si. No entanto, destaca-se que a amostra jateada com a granalha AC20 apresenta a maior compressão na tensão residual superficial, registrando -284 MPa.

A distribuição da tensão residual em profundidade é apresentada na figura 32, onde o eixo das abscissas representa a profundidade do ataque e o eixo das ordenadas representa a tensão em MPa.

Figura 32: Distribuição da tensão residual em profundidade



Fonte: Autora

Mediante resultados nota-se que o aumento da tensão residual compressiva se dá de forma mais contundente conforme certa profundidade. É importante ressaltar que as amostras tratadas com as granalhas AC40, AC60 e AC100 apresentam valores máximos de tensão residual compressiva em profundidades semelhantes. No entanto, a amostra tratada com a granalha AC60 alcançou esses valores em profundidades maiores. Tal fato está relacionado com a influência da energia cinética promovida pelo jateamento, vide tabela 5.

O processo de shot peening se mostrou mais eficiente ao utilizar a granalha AC20, uma vez que a tensão residual compressiva máxima ocorreu em profundidades menores em comparação com as outras granalhas. Esse fato é significativo, pois quanto menor a região entre a superfície e a tensão residual máxima, menor é a probabilidade de surgimento de trincas.

Portanto, com base nos resultados, o processo de shot peening com a granalha AC20 demonstrou maior eficiência, uma vez que proporcionou uma maior tensão residual compressiva em profundidades menores. Essa característica contribui para reduzir os riscos de formação de trincas e aumentar a vida útil do material.

Com relação as micrografias observadas em MEV, nota-se que quanto menor a quantidade de trincas formadas pelo impacto das esferas mais compressiva é a tensão residual, evidente na figura 23, AC20. Já na figura 26, AC100, nota-se trincas maiores indicando maior deformação plástica no material, apresentando conseqüentemente menor tensão residual compressiva.

### 5.5. Dureza

Pelos resultados apresentados no ensaio mecânico de dureza, tabela 11, percebe-se que os valores estão dentro do esperado para o material, havendo diferença de no máximo 9HV, valor insuficiente para causar interferência nesta propriedade do material.

Tabela 11: Resultado do ensaio de Dureza

| <b>Amostra</b>   | <b>Vickers (HV)</b> |
|------------------|---------------------|
| Sem shot peening | 147                 |
| AC20             | 143,8               |
| AC40             | 148,6               |
| AC60             | 143                 |
| AC100            | 139,6               |

Fonte: autora

Com base nos resultados de dureza Vickers apresentados, nota-se que a amostra com o tamanho AC40 apresentou a maior dureza após o tratamento de shot peening. Sua dureza foi medida em 148,6 HV, o que indica uma maior resistência à deformação plástica em comparação com as outras amostras.

## 6. CONCLUSÃO

Amostras jateadas com granalhas maiores apresentam maior quantidade de trincas, evidenciando que o tamanho da granalha influencia na espessura e quantidade de trincas advindas pelo processo de shot peening.

Quanto menor a quantidade de trincas formadas pelo impacto das esferas mais compressiva é a tensão residual superficial, evidente na amostra jateada com a granalha menor, AC20.

Granalhas maiores, que geram trincas maiores, indicam maior deformação plástica no material, apresentando conseqüentemente menor tensão residual compressiva superficial.

Entre as granalhas AC20, AC40, AC60 e AC100 não houve mudanças significativas quanto o valor máximo de compressão, indicando que, conforme estudo o tamanho da granalha não influencia em sua eficiência e sim na profundidade de alcance da máxima tensão compressiva.

Granalhas de maior dimensão e energia cinética proporcionada faz com que a tensão residual máxima compressiva ocorra em profundidades maiores.

A utilização da granalha AC20 diminui a probabilidade do surgimento de trincas, pois a área entre a superfície e a tensão máxima compressiva é menor, mostrando-se mais eficaz quando comparada as granalhas AC40, AC60 e AC100.

O presente estudo proporcionou a otimização do uso do material mantendo a eficiência exigida em suas aplicações. A compreensão da influência do tamanho da granalha nas tensões residuais permitirá a seleção adequada dos parâmetros de shot peening, possibilitando melhorar a resistência mecânica e a vida útil das peças tratadas. Além disso, o conhecimento adquirido pode ser aplicado na indústria para garantir a qualidade e o desempenho aprimorado dos componentes metálicos em diferentes contextos de uso.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABAL. Associação brasileira do alumínio. *In*: ABAL. **Alumínio**: História do alumínio. 1 jan. 2019. Disponível em: <https://abal.org.br/aluminio/historia-do-aluminio/>. Acesso em: 19 mar. 2022.
- [2] ABAL. Associação brasileira do alumínio. *In*: ABAL. **Alumínio**: Cadeia-primaria. 1 jan. 2019. Disponível em: <https://abal.org.br/aluminio/historia-do-aluminio/>. Acesso em: 20 mar. 2022.
- [3] ABAL. Associação brasileira do alumínio. *In*: ABAL. **Alumínio**: Características Químicas e Físicas. 1 jan. 2019. Disponível em: <https://abal.org.br/aluminio/historia-do-aluminio/>. Acesso em: 26 fev. 2022.
- [4] ABAL. Associação brasileira do alumínio. *In*: ABAL. **Sustentabilidade**: Reciclagem. 1 jan. 2019. Disponível em: <https://abal.org.br/aluminio/historia-do-aluminio/>. Acesso em: 26 fev. 2022.
- [5] ASM INTERNATIONAL. ASM International: The Materials Information Company. *In*: ASM INTERNATIONAL. **ASM Handbook**: Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials. 1990. v. 2.
- [6] TAVARES, Rogério Itaborahy. **Estudo de propagação de trincas por fadiga em conjugados laminados alumínio 1100 / alumínio 2024**. 1984. 231 p. Dissertação de Mestrado (Mestre em ciências em Engenharia e Ciência dos Materiais) - INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA -RJ, 1984.
- [7] CAMARGO, J.A.M. **A influência do shot peening e das anodizações crônicas, sulfúrica e dura sobre a resistência à fadiga da liga Al 7050 – T 7451 de uso aeronáutico**. 2007. Tese doutorado (Doutor em Engenharia Mecânica) - UNESP, 2007.
- [8] QINJIE, Lin *et al.* Effects of different shot peening parameters on residual stress, surface roughness and cell size. **Surface and Coatings Technology**, v. 398, 25 set. 2020. DOI <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126054>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0257897220307234>. Acesso em: 3 jan. 2023.
- [9] METAL IMPROVEMENT COMPANY. **Shot Peening Applications**. 9. ed. 2005. 60 p.
- [10] TORRES, M.A.S. *et al.* An evaluation of shot peening, residual stress and stress relaxation on the fatigue life of AISI 4340 steel. **International Journal of Fatigue**, p. 877–886, 2002.
- [11] SOARES, M.C.B.V. **Influência das tensões residuais no comportamento em fadiga e fratura de ligas metálicas**. 1998. 126 p. Tese doutorado (Doutorado em Ciências na Área de Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear) - IPEN- USP, 1998.

- [12] CULLITY, B.D. **Elements of X-ray diffraction**. Addison-Wesley Publishing Company Inc. 2ª Ed. Reading, Massachusetts, USA. 1978.
- [13] REGONE, N. N.; **Determinação de Tensão Residual em Camadas Superficiais**. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP., 2000.
- [14] INTERNATIONAL ALUMINIUM. Estatísticas. *In: Estatísticas: Produção de alumínio primário*. 20 mar. 2023. Disponível em: <https://international-aluminium.org/statistics/primary-aluminium-production/>. Acesso em: 24 mar. 2023.
- [15] ABAL. Associação brasileira do alumínio. *In: ABAL. Alumínio: características químicas e físicas: propriedades mecânicas*. 1 jan. 2019. Disponível em: <https://abal.org.br/aluminio/historia-do-aluminio/>. Acesso em: 13 mar. 2022.
- [16] ABAL. Associação brasileira do alumínio. *In: ABAL. Alumínio: características químicas e físicas: Ligas*. 1 jan. 2019. Disponível em: <https://abal.org.br/aluminio/historia-do-aluminio/>. Acesso em: 14 maio 2022.
- [17] ASM HANDBOOK; **Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Pure Metals**. The Ninth Edition of Metals Handbook, v. 2, 1991.
- [18] KENT, R. **Aluminum: Properties, Physical Metallurgy and Phase Diagrams**. VAN, Horn (ed.). 1967. v. 1.
- [19] THOMPSON, DS. Metallurgical factors affecting high strength aluminum alloy production. **Metallurgical Transactions A**, v. 6, p. 671–683, abr. 1975. DOI <https://doi.org/10.1007/BF02672287>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02672287#citeas>. Acesso em: 23 dez. 2022.
- [20] OLIVEIRA, R.R. **Avaliação da tensão residual em alumínio 7050 conformado pelo processo peen forming**. 2011. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Ciências na área de Tecnologia Nuclear – Materiais) - IPEN- USP, 2011.
- [21] MITUTOYO CORPORATION. **Medidor de Rugosidade Superficial Modelo SJ-210**: Manual do usuário. 2009. 412 p.
- [22] ALMEN, J. O., BLACK, P. H., **Residual Stresses and Fatigue in Metals**. New York, MacGraw Hill, Book Company, 1963
- [23] WANG, R., XIANGBIN, L., YONGGUI et al.. **Investigation on the Microstructure in Shot-Peening Surface Straining Layer of Materials**. First Conference on Shot Peening, p.185-192, 1981.
- [24] WAGNER, L., LUETJERTNG, G., **Influence of Shot Peening on the Fatigue Behavior of Titanium Alloys**. First International Conference on Shot Peening, p. 351-357, 1981.
- [25] VIERICK, D., LOHE, D., VOHRINGER, et.al. O., **Relaxation of Residuals Stresses in a Nickel-base Superalloy due to Dislocation Creep**. UK Conference paper Inconel 617Ni, Nickel base Alloys, Superalloys. 31. Met A: 9207-31-2321, 1991.

- [26] ROIK, I.S.; BLÖDORN, R. Estudo da influência dos parâmetro de laser de fibra na geração de cavidades para medição de tensão residual. **Revista da UNIFEBE: Tecnologias: Engenharia, Produção e Construção**, v. 1, ed. 27, 30 out. 2022. Disponível em: <https://periodicos.unifebe.edu.br/index.php/RevistaUnifebe/article/view/881>. Acesso em: 22 abr. 2023.
- [27] GUROVA, T; TEODÓSIO, J. R; REBELLO, J.M.A; et al., **Study of Residual Stress State During Plastic Deformation under Uniaxial Tension in 5.0 Cr and 0.5 Mo Steel**, Scripta Materialia, vol.36, n.9, pp. 1031-1035, 1997.
- [28] OLIVEIRA, R.R. **Estudo do efeito da tensão residual na microdeformação da rede cristalina e no tamanho de cristalito em aço Cr-Si-V jateado com granalhas de aço**. 2016. 146 p. Tese doutorado (Doutorado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear- Materiais) - IPEN- USP, 2016.
- [29] CULLITY, B.D.; STOCK, S.R.; **Elements of x-ray diffraction**. 3th ed. Prentice Hall, cap 15, p.435-469. Upper Saddle River. New Jersey. 2001.
- [30] WILLIAMSON, G.K.; HALL, W. **X-ray line broadening from filed aluminium and wolfram**. Acta metallurgica, v. 1, ed. 1, p. 22-31, 1953. DOI [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(53\)90006-6](https://doi.org/10.1016/0001-6160(53)90006-6). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0001616053900066?via%3Dihub>. Acesso em: 17 jan. 2023.
- [31] WILLIANSOM, G., K.; SMALLMAN R. E.; **Dislocation densities in some annealed and cold-worked metals from measurements on the X-ray debye-scherrer spectrum**. Philos. Mag. 1; pp 34-46. 1955.
- [32] ARAÚJO, J.C.R. **Síntese e caracterização microestrutural de nanopartículas de ouro**. 2019. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia-UFU, 2019. DOI <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2019.338>. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/25155>. Acesso em: 19 fev. 2023.
- [33] RIGAKU. **Residual stress data process program 2** (ver. 2.0) d/max-2000 instruction manual, Rigaku Corporation, 2006. 10<sup>a</sup> ed.
- [34] ASSIS, J.T.; MONIN, V.I.; SOUZA, P.S.; WEIDLICH, M.C.; GUROVA, T.; TEODOSIO, J.R. **Processamento dos dados de difração de raios x para medição de tensões**. Disponível em: < <https://www.sbmac.org.br/publicacoes/>>. Acesso em: 09 out. 2022.
- [35] FRANÇOIS, M. ; SPRAUEL, J.M.; DEHAN, C.F.; JAMES, M.R.; CONVERT, F.; LU, J.; LEBRUN, J.L.; LI, N.; HENDRICKS, R.W. ; X-Ray diffraction method. In: **Handbook of measurement of residual stresses**. Society for Experimental Mechanics; Fairmont Press,. cap. 5. Lilburn, GA, 1996.
- [36] JUNIOR, N.I.D. **Estudo do comportamento mecânico da liga Al-Cu 2024 solubilizada e envelhecida para aplicação aeronáuticas**. 2011. Dissertação de Mestrado (Mestre em Engenharia de Materiais) - Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2011.
- [37] VANDER VOORT, G.F. Color Metallography. **ASM Handbook: Metallography and Microstructures**, v. 9, p. 493-512, 2004.

---

---

**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**  
Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Ensino  
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária CEP: 05508-000  
Fone/Fax(0XX11) 3133-8908  
SÃO PAULO – São Paulo – Brasil  
<http://www.ipen.br>

O IPEN é uma Autarquia vinculada à Secretaria de Desenvolvimento, associada à Universidade de São Paulo e gerida técnica e administrativamente pela Comissão Nacional de Energia Nuclear, órgão do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações.

---

---