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

**Análise de mesotextura pelas técnicas de difração de raios-x e
difração de elétrons retroespalhados em laminados da liga de alumínio
AA3104 H19 utilizados para a fabricação de latas de bebidas.**

EDSON TOGNI

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

Orientador:

Prof. Dr. Nelson Batista de Lima.

São Paulo

2019

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

Análise de mesotextura pelas técnicas de difração de raios-x e difração de elétrons retroespalhados em laminados da liga de alumínio AA3104 H19 utilizados para a fabricação de latas de bebidas.

EDSON TOGNI

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

Orientador:

Prof. Dr. Nelson Batista de Lima.

São Paulo

2019

Togni, Edson

Análise de mesotextura pelas técnicas de difração de raios X e difração de elétrons retroespalhados em laminados da liga de alumínio AA3104 H19 utilizados para a fabricação de latas de bebidas / Edson Togni; orientador Nelson Batista de Lima; -- São Paulo, 2019.

99 p.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear (Materiais) -- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2019.

1. Alumínio. 2. Conformação. 3. Anisotropia. 4. Textura. I. Lima, Nelson Batista de, orient. II. Título.

*Aos meus antepassados, pois
sou quem sou devido a
transmissão de seus valores e
pensamentos através das
gerações.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus.

Agradeço de forma especial ao Prof. Dr. Nelson Batista de Lima orientador e fonte de conhecimentos sem os quais o presente trabalho não seria concretizado.

Ao Prof. Dr. Antônio Augusto Couto, pela indispensável ajuda na realização deste trabalho e pela franqueza de suas críticas ao mesmo.

Ao Eng. André Luís Teixeira Martins pela disponibilização do material estudado.

Ao Meu Irmão Eng. Marcos Antônio Togni que, pelo exemplo, me fez ingressar na carreira de engenheiro e que me incentivou e ajudou nessa empreitada.

Aos meus pais que tiveram como objetivo de vida dar educação e estudo aos filhos.

À minha esposa que sempre me apoiou nessa empreitada.

Ao Serviço Nacional de Aprendizagem industrial SENAI que me deu a oportunidade de realizar este feito.

“As nuvens mudam sempre de posição, mas são sempre nuvens no céu. Assim devemos ser todo dia, mutantes, porém leais com o que pensamos e sonhamos; lembre-se, tudo se desmancha no ar, menos os pensamentos”.
(Paulo Baleki)

RESUMO

Togni, Edson- Análise de textura pelas técnicas de difração de raios-x e difração de elétrons retroespalhados em laminados da liga de alumínio aa3104 H19 utilizados para a fabricação de latas de bebidas. 2019-77p. Dissertação (Mestre em tecnologia Nuclear- Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares- IPEN – CNEN/SP. São Paulo.

O crescimento significativo da capacidade instalada de produção de laminados de alumínio no País deve-se ao crescente consumo de latas para bebidas, um sinal de confiança dos consumidores e de sucesso sem precedentes em termos de solução para o mercado de embalagens. A lata de alumínio pode ser reciclada infinitas vezes. Por isso, consagrou também sua unanimidade, devido ao enorme benefício da reciclagem, que reduz o consumo de energia para a produção do alumínio, preserva o meio ambiente, movimenta a economia, gerando empregos e fonte de renda na coleta, e promove a educação dos cidadãos para o desenvolvimento sustentado. O foco deste trabalho é o estudo da alteração da textura de uma liga de alumínio 3104-H19 nas várias etapas do processo de estampagem das latas de alumínio para bebidas através da análise dos resultados de mesotextura obtidos pelos métodos MEV (Microscópio eletrônico de Varredura)-EBSD (Electron Backscatter Diffraction), bem como a compreensão dos mecanismos da formação da textura e sua influência na conformação das latas de alumínio. A composição química da liga de alumínio foi avaliada através de espectroscopia de dispersão de energia (EDS-MEV) e espectrometria de emissão óptica. Analisou-se sua microestrutura através de microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Realizou-se o ensaio de textura cristalográfica pelo método (SEM-EBSD) nas etapas de estampagem do corpo da lata e em ângulos de zero, 45 e 90 graus em relação a direção de laminação. Avaliou-se o resultado da textura cristalográfica através de Figuras de Polo. A análise microestrutural do laminado revelou dois tipos de compostos intermetálicos com morfologia distinta, $Al_6(Fe,Mn)$ e $Al_{12}(Fe,Mn)_3Si$, espalhados não homogeneamente, junto a dispersóides bem distribuídos na matriz de alumínio. Observou-se que na chapa laminada a textura a zero 45 e 90 graus são diferentes e à medida que os estágios de conformação do corpo da lata vão avançando as texturas a 45 e 90 graus vão

se modificando e ficando semelhantes a da textura a zero grau (direção de laminação). A textura típica de deformação para ligas de alumínio, latão $\{110\}<112>$ e cobre $\{112\}<111>$, junto a textura Goss $\{110\}<001>$, estavam balanceadas pela textura cubo $\{001\}<100>$, típica de recristalização

Palavras Chave: Liga de Alumínio 3104, Caracterização microestrutural, Anisotropia, Textura Cristalográfica.

ABSTRACT

Togni, Edson- Texture analysis by the techniques of x-ray diffraction and-electron backscatter diffraction in aluminum alloys AA3104 H19 used for the manufacture of beverage cans. 2019- 100 p. Dissertação (Mestre em tecnologia Nuclear- Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares- IPEN – CNEN/SP. São Paulo.

The significant growth in the installed capacity of aluminum rolled products in Brazil is due to the increasing consumption of beverage cans, a sign of consumer confidence and unprecedented success in terms of solution for the packaging market. The aluminum can be recycled endlessly. Therefore, it also consecrated its unanimity, due to the enormous benefit of recycling, which reduces energy consumption for the production of aluminum, preserves the environment, moves the economy, generates jobs and sources of income in the collection, and promotes the education of citizens for sustainable development. The focus of this work is the study of the alteration of the texture of a 3104-H19 aluminum alloy in the various stages of the process of stamping aluminum cans for beverages by comparing the mesotexture results obtained by SEM (Scanning Electron Microscope) EBSD (Electron Backscattered Diffraction), as well as the understanding of the mechanisms of texture formation and its influence on the conformation of aluminum cans. The chemical composition of the aluminum alloy was evaluated using energy dispersive spectroscopy (EDS-MEV) and optical emission spectrometry. Its microstructure was analyzed by optical microscopy and scanning electron microscopy (SEM). The crystallographic texture test (SEM-EBSD) was carried out in the stamping stages of the can body and at angles of zero, 45 and 90 degrees with respect to the rolling direction. The result of the crystallographic texture was evaluated through Pole Figures. Microstructural analysis of the laminate revealed two types of intermetallic compounds with distinct morphology, $Al_6(Fe, Mn)$ and $Al_{12}(Fe, Mn)_3Si$, dispersed in a homogeneous manner, together with dispersoids well distributed in the aluminum matrix. It was observed that in the laminated plate the texture at zero 45, 90 degrees are different, and as the stages of conformation of the body of the can advance the textures at 45 and 90 degrees, they are changing

and being similar to the texture at zero degree (direction of rolling). The typical deformation texture for aluminum alloys, brass {110} <112> and copper <112> <111>, together with Goss texture <110>, were balanced by the cube texture {001} <100>, typical of recrystallization

Keywords: Aluminum Alloy 3104, Microstructural Characterization, Anisotropy, Crystallographic Texture.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1 2 OBJETIVO	15
1 3 JUSTIFICATIVA	15
2 REVISÃO DA LITERATURA	16
2 1 ALUMÍNIO	16
2 1 1 Estrutura Cristalina do Alumínio.....	17
2 1 1 2 Discordâncias	18
2 1 1 3 Sistemas de Escorregamento	18
2 1 1 4 Energia De Falha De Empilhamento.....	19
2 1 1 5 Interação De Discordâncias Com Contorno De Grãos.....	20
2 1 2 Produção do Alumínio.	21
2 1 3 O Processo de Fabricação de Alumínio.....	24
2 1 4 As Principais Ligas de Alumínio	27
2.1.5 A Série 3XXX e a Liga 3104 Têmpera H19.....	34
2.2 Fabricação das Latas de Alumínio Para Bebidas	37
2 2 2 Caracterização Microestrutural	44
2 2 3 Textura Cristalográfica.	45
2 2 4 Figuras de Polo	56
2 2 5 Função De Distribuição De Orientações Cristalográficas (FDOC)	60
2 2 6 Textura de laminação a frio em materiais cubicos de face centrada. ...	62
2 2 7 EBSD - MEV.	63
3 MATERIAIS E MÉTODOS	68
3 1 Procedimentos adotados	68
3 2 DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS.....	70
3 2 1 Microscopia Eletrônica de Varredura EDS/EBSD	70
3 2 2 Microscópio Ótico.....	71

3 3 ANÁLISES REALIZADAS.....	71
3 3 1 Análise de Textura Cristalográfica.	71
3 3 2 Caracterização Microestrutural	73
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	73
4 1 TEXTURA CRISTALOGRÁFICA	73
4 2 ANÁLISE DA MICROESTRUTURA.....	83
5 CONCLUSÕES	88
REFERÊNCIAS.....	89

1 INTRODUÇÃO

Uma excepcional combinação de propriedades faz do alumínio um dos mais versáteis materiais utilizados na engenharia, arquitetura e indústria em geral.

A leveza é uma das principais características do alumínio. Seu peso específico é de cerca de 2,70 g/cm³, aproximadamente 35% do peso do aço e 30% do peso do cobre.

O alumínio possui uma fina e invisível camada de óxido, a qual protege o metal de oxidações posteriores. Essa característica de autoproteção dá ao alumínio uma elevada resistência à corrosão.

A característica de ser infinitamente reciclável, sem perda de suas propriedades físico-químicas é uma das principais vantagens do alumínio.

O alumínio é um importante elemento de barreira à luz, é também impermeável à ação da umidade e do oxigênio, tornando a folha de alumínio um dos materiais mais versáteis no mercado de embalagens.

Inovações, tecnologia e serviços têm garantido a forte expansão das aplicações do alumínio no setor de embalagens, seu maior mercado consumidor. No mundo e em especial no Brasil, o mercado vem consumindo folhas e laminados em escala crescente na embalagem de produtos farmacêuticos, cosméticos e higiene, de limpeza, bebidas e produtos alimentícios.

A lata de alumínio para bebidas chegou ao Brasil em 1989, graças à produção interna da chapa nas especificações para o produto e à vinda de empresas detentoras da tecnologia de fabricação. A embalagem tornou-se um caso especial de aceitação irrestrita pelo mercado e pelo consumidor. Hoje, 95% das bebidas vendidas em lata no nosso país utilizam a embalagem de alumínio.

No Brasil, que possui grandes reservas de bauxita, a matéria prima necessária para a fabricação de alumínio comercial, a produção de alumínio primário no ano de 2017 foi de 802.000 toneladas, registrando um aumento de aproximadamente 12% em relação ao ano anterior (ABAL, 2019).

O crescimento significativo da capacidade instalada de produção de laminados no País deve-se ao crescente consumo de latas de alumínio para bebidas, um sinal de confiança dos consumidores e de sucesso sem precedentes em termos de solução para o mercado de embalagens. (ABAL, 2019)

O consumidor logo identificou que a lata de alumínio é mais leve, prática, gela mais rápido e ocupa menos espaço na geladeira. Já os fabricantes de bebidas reconheceram suas vantagens no peso e na produtividade em máquinas, na redução de custos com o transporte e a estocagem. Deste modo, a lata de alumínio abriu mercados, com a vinda de novos fabricantes para o Brasil, atraindo investimentos destinados a aumentar o volume de oferta da chapa e a capacidade de produção de latas que, em 2017, superou 28 bilhões de unidades, como as latas de alumínio pesam em média 13,5 gramas temos 364 mil toneladas de alumínio para uma produção anual de alumínio primário de 801,7 mil toneladas. (ABRALATAS, 2019).

A lata de alumínio pode ser reciclada infinitas vezes. Por isso, consagrou também sua unanimidade, devido ao enorme benefício da reciclagem, que reduz o consumo de energia para a produção do alumínio, preserva o meio ambiente, movimenta a economia, gerando empregos e fonte de renda na coleta e promove a educação dos cidadãos para o desenvolvimento sustentado.

O conhecimento detalhado da matéria prima utilizada para a produção de latas para bebidas é essencial para manter e melhorar os níveis de produtividade impostos pelo mercado. (MARTINS A. , 2014)

As latas de alumínio são produzidas a partir de bobinas de laminados de diferentes ligas deste metal. No caso específico de latas para bebidas a liga utilizada é a 3104 tempera H19, comercializada em bobinas que, na parte final de seu processo produtivo, são laminadas a frio para chegar à espessura necessária e adquirir as propriedades mecânicas solicitadas por diferentes linhas de produção dedicadas a produtos distintos. Este laminado que foi encruado no processo de fabricação de latas é cortado, repuxado, estirado (drawn and wall ironing-DWI) e conformado para chegar à geometria final do produto. No processo de transformação de uma chapa plana até um objeto cilíndrico, as características de conformabilidade do metal são muito importantes. Dentre as informações relacionadas à capacidade da liga em se deformar plasticamente antes da ocorrência de falha, podem ser mencionados os índices de anisotropia normal e planar, o efeito de orelhamento (*earring*) proveniente deste mesmo índice, o expoente de encruamento n , e também as curvas limite de conformação. (OTOMAR, 2010)

A textura influencia no tipo e na intensidade do fenômeno de orelhamento que ocorre na estampagem das latas de alumínio e seu estudo pode fornecer informações para a melhoria de processos que influenciam esta característica. (ENGLER, O. 2012)

1.2 OBJETIVO

Análise da variação da textura cristalográfica durante o processo de conformação do corpo de lata de bebida produzida em liga de alumínio 3104-H19 e compreensão dos mecanismos da formação da textura e sua influência na conformação das latas de alumínio com o objetivo de se ter subsídios para a obtenção de textura favorável para a diminuição do consumo de matéria prima e aumento de produtividade. Pelo uso de funções de distribuição de orientação buscou-se comparar as componentes de textura presente nos laminados e suas respectivas intensidades. Por fim, figuras de polo foram utilizadas para analisar as transformações de textura durante as diferentes etapas de deformação, da chapa até o produto final.

1.3 JUSTIFICATIVA

O conhecimento detalhado de laminados da liga 3104 pode auxiliar a indústria de embalagens a melhorar sua produtividade, possibilitando a identificação de lotes de matéria prima, que em função de alguma característica imperceptível por outros métodos, teriam seu desempenho diminuído nos processos de corte e repuxo profundo evitando-se assim desperdícios. (MARTINS A. , 2014)

O conhecimento da liga pode ajudar na elaboração de ensaios ou testes de recebimento que possam detectar anomalias que não são perceptíveis pela mera observação. Além disso, o estudo detalhado deste material pode gerar propostas de melhoria da liga através da modificação em características específicas do material. A minimização de perdas de processo acarretaria em um maior volume de produção dado uma mesma quantidade de matéria prima. Este maior volume de produção com o uso dos mesmos recursos caracteriza um ganho de produtividade, que por sua vez afeta positivamente inúmeros indicadores comumente utilizados por empresas manufatureiras (MARTINS & LAUGENI, 2005)

Outro ponto a ser mencionado é o da sustentabilidade. Quando problemas ocorrem no processo produtivo há maior geração de refugo, desta forma, quanto melhor a produtividade menor o volume de matéria prima descartada até a obtenção do bem final. Em vista dos grandes volumes de matéria prima utilizados pela indústria pode se afirmar que ganhos de produtividade contribuem para o meio ambiente, já que todos os insumos, como tintas e vernizes, dedicados à geração do bem final são descartados se há refugo. Vale ser mencionado que todo o descarte ocorrido no processo de manufatura de latas retorna ao fabricante da bobina para ser reciclado e o que efetivamente se perde são os insumos e os custos de mão de obra que foram investidos na fabricação de uma unidade de produto acabado que não se realizou. (MARTINS A. , 2014)

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 ALUMÍNIO

O alumínio é um elemento químico de símbolo Al e número atômico 13 (treze prótons e treze elétrons) com massa 27 u. Na temperatura ambiente é sólido, e apesar de ser o elemento metálico mais abundante da crosta terrestre é o metal mais jovem a ser utilizado em escala industrial.

A estrutura cristalina do alumínio possui a célula unitária cúbica de face centrada (CFC), com aresta medindo aproximadamente 0,4049 nm, fator de empacotamento atômico de 0,74 e seu raio atômico mede 0,143 nm (CALLISTER, 2006)

A Figura 1 ilustra a célula unitária cúbica de face centrada, comum a vários metais, com os átomos representados pelo uso de esferas rígidas (a), esferas reduzidas (b), e em conjunto a outras células unitárias na formação de um sólido (c).

Figura 1- Representação esquemática da célula unitária cúbica de face centrada

Fonte: (CALLISTER, 2006)

2 1 1 Estrutura Cristalina do Alumínio

A estrutura cúbica de face centrada tem fator de empacotamento de (0,74).

Observando a sequência de empilhamento de planos cristalinos na direção da diagonal do cubo da estrutura os cristais CFC apresentam três posicionamentos e exibem a sequência "ABCABCABC..."

A Figura 2 ilustra a sequência de empilhamento dos planos de uma célula cúbica de face centrada

Figura 2- Sequência de Empilhamento para Cúbica de Faces Centradas

Quando submetidos a tensões maiores do que o limite de escoamento os materiais dúcteis se deformam e, após um tanto de carga, fraturam.

O mecanismo de deformação na maioria dos materiais envolve o cisalhamento de algumas porções do material com relação as outras. Nos materiais cristalinos isso se dá ao longo de determinados planos atômicos (geralmente o mais compacto).

Os cálculos teóricos para se determinar a tensão necessária para cisalhar um cristal pelo escorregamento simultâneo de todos os átomos de um plano compacto fornecem valores de tensão entre 20 e 100 GPa; estas tensões são várias ordens de grandeza maiores que as observadas experimentalmente.

A busca de uma explicação para esse aparente paradoxo levou à proposição das discordâncias no início do século XX.

2 1 1 2 Discordâncias

Rearranjo atômico que acompanha o movimento de uma discordância em resposta a uma tensão de cisalhamento.

Formação de degraus na superfície de um cristal pela movimentação de discordâncias.

Figura 3- Movimentação de discordâncias

2 1 1 3 Sistemas de Escorregamento

Discordâncias não se movem, mas “escorregam”, em planos e direções bem definidos. A combinação de um plano e uma direção de escorregamento é chamado de sistema de escorregamento.

A figura 4 abaixo mostra o sistema de escorregamento (111) em um cristal CFC. Em cada plano $\{111\}$ existem três direções possíveis de escorregamento (b). Os cristais cúbicos apresentam muitos sistemas de escorregamento. Outros, como os hexagonais, apresentam menos opções.

Figura 4- Plano de escorregamento

À medida em que o material é deformado plasticamente, ocorre um endurecimento gradual (encruamento)

A deformação plástica ocorre por movimentação de discordâncias, à medida que a deformação progride as discordâncias têm cada vez mais dificuldade de se movimentar causando o aumento da resistência por:

Multiplicação das discordâncias.

Dissociação de discordâncias em parciais

Interação das discordâncias com outros defeitos:

- Partículas
- Outras discordâncias
- Átomos de soluto
- Contornos de grão

2 1 1 4 Energia De Falha De Empilhamento

É a energia associada à falha de empilhamento determinada por um par de discordâncias dissociadas;

Alta energia: discordâncias dissociadas não se afastam muito, recompõem-se rapidamente; discordâncias têm alta mobilidade.

Baixa energia: discordâncias dissociadas se afastam grandes distâncias; menor mobilidade

Afeta a distribuição das discordâncias no material encruado.

Quando a energia da falha de empilhamento é baixa as discordâncias parciais se afastam bastante e impedem a ocorrência de escorregamento com desvio e escalada, há pouca tendência à formação de células de discordâncias durante a deformação.

Quando a energia da falha de empilhamento é alta (caso do CFC) as discordâncias parciais não se afastam muito, as discordâncias rapidamente se recombinaem, podendo sofrer processos de escalada ou escorregamento com desvio as discordâncias têm alta mobilidade e alta tendência de rearranjo e aniquilação há a maior tendência à formação de células de discordâncias.

A figura 5 mostra exemplo de grãos com baixa e alta energia de falha de empilhamento.

Figura 5- Exemplos EFE

2 1 1 5 Interação De Discordâncias Com Contorno De Grãos

Dependendo do plano de escorregamento, as discordâncias podem se acumular junto aos contornos de grão. Os contornos de grão também podem atuar como fontes de discordâncias durante a deformação plástica. (Prof. Hélio Goldenstein, 2006)

Ao microscópio, é muito difícil diferenciar quando há um empilhamento de uma fonte de discordâncias no contorno, conforme pode ser visto na figura 6.

Figura 6- Acúmulo de discordâncias no contorno de grãos.

(Prof. Hélio Goldenstein, 2006)

2 1 2 PRODUÇÃO DO ALUMÍNIO.

O alumínio começou a ser produzido comercialmente há cerca de 150 anos (ABAL 2014). Sua produção atual supera a soma da produção de todos os outros metais não ferrosos sendo o metal não ferroso mais consumido no mundo. Uma excepcional combinação de propriedades faz do alumínio um dos mais versáteis materiais utilizados na engenharia, arquitetura e indústria em geral, podendo ser destacado:

a) Ponto de fusão:

O alumínio possui ponto de fusão de 660°C , o que é relativamente baixo comparado ao do aço, que é da ordem de 1570°C .

b) Peso específico:

A leveza é uma das principais características do alumínio. Seu peso específico é de cerca de $2,70\text{ g/cm}^3$, aproximadamente 35% do peso do aço e 30% do peso do cobre.

c) Resistência à corrosão:

O alumínio possui uma fina e invisível camada de óxido, a qual protege o metal de oxidações posteriores. Essa característica de autoproteção dá ao alumínio uma elevada resistência à corrosão.

d) Condutibilidade elétrica:

O alumínio puro possui condutividade elétrica de 62% da IACS (*International*

Annealed Copper Standard), a qual associada à sua baixa densidade significa que um condutor de alumínio pode conduzir tanta corrente quanto um condutor de cobre que é duas vezes mais pesado e proporcionalmente mais caro.

e) Condutibilidade térmica:

O alumínio possui condutibilidade térmica 4,5 vezes maior que a do aço.

f) Refletividade:

O alumínio tem uma refletividade acima de 80%, a qual permite ampla utilização em luminárias.

g) Propriedade antimagnética:

Por não ser magnético, o alumínio é frequentemente utilizado como proteção em equipamentos eletrônicos. Além disso, o metal não produz faíscas, o que é uma característica muito importante para garantir sua utilização na estocagem de substâncias inflamáveis ou explosivas, bem como em caminhões-tanque de transporte de combustíveis

h) Característica de barreira:

O alumínio é um importante elemento de barreira à luz, é também impermeável à ação da umidade e do oxigênio, tornando a folha de alumínio um dos materiais mais versáteis no mercado de embalagens.

i) Reciclagem:

A característica de ser infinitamente reciclável, sem perda de suas propriedades físico-químicas é uma das principais vantagens do alumínio. (ABAL, 2019)

Em 1809 Humprey Davi descobriu um novo metal e o chamou de alumium, mais tarde passou a ser chamado de aluminium (ABAL, 2004). Hans Christian Oesterd isolou o alumínio pela primeira vez em 1825, porém apenas em 1886 foi desenvolvido um processo industrial econômico de redução. Quando o alumínio era pouco conhecido e tinha custo elevado de produção suas primeiras aplicações foram limitadas a trabalhos luxuosos como em estatuetas e placas comemorativas.

Com o desenvolvimento dos processos industriais o metal passou a estar disponível em maiores quantidades (embora ainda medido em quilos e não em toneladas). No final do século XIX, com o aumento da produção e preços menores, foi sendo gradualmente utilizado em utensílios de cozinha e em alguns dos primeiros automóveis que já possuíam painéis revestidos com alumínio

comercialmente puro. No início do século XX, as indústrias de alumínio começaram a trabalhar na produção de ligas de alumínio com propriedades mecânicas mais elevadas. Os primeiros experimentos ocorreram através de tentativas e erros aliados a observações perspicazes, responsáveis pelo aprimoramento dos princípios metalúrgicos fundamentais envolvidos. (ABAL, 2004)

Atualmente, os Estados Unidos e o Canadá são os maiores produtores de alumínio do mundo, mesmo não possuindo jazidas de bauxita em seus territórios dependendo exclusivamente da importação. (ABAL, 2019).

A bauxita é o minério industrial mais importante para a produção do alumínio, contendo de 35 a 45% de óxido de alumínio (ABAL 2004).

O Brasil tem a terceira maior reserva de bauxita do mundo, perdendo apenas para Austrália e Guiné. Além da Amazônia, o alumínio pode ser encontrado no sudeste do Brasil, na região de Poços de Caldas (MG) e Cataguases (MG). O Brasil tem uma grande capacidade para a produção de alumínio, pois, além das grandes reservas de bauxita, tem um alto potencial de geração de energia hidrelétrica, insumo primordial para a produção de alumínio através da eletrólise. (ABAL, 2004).

A produção de produtos transformados de alumínio foi de 1 milhão de t e mostra a seguinte distribuição na tabela 1 a seguir:

Tabela 1-Distribuição da produção de produtos transformados de alumínio

Fonte: (ABAL, 2019)

2 1 3 O Processo de Fabricação de Alumínio

A produção de alumínio começa com a matéria-prima bauxita, uma rocha que geralmente é encontrada próxima à linha do Equador e que é lavrada a poucos metros abaixo do solo.

A bauxita é transportada da mina para a usina, onde é lavada para eliminar a argila e britada, antes de ser transportada para o refino.

A alumina, ou óxido de alumínio, é extraída da bauxita por meio de refinamento.

A alumina é obtida a partir da dissolução da bauxita em uma solução aquecida de soda cáustica e cal.

A solução é aquecida e filtrada e a alumina remanescente é seca, até se transformar em um pó branco.

O processo mais utilizado para obtenção de alumina é o processo Bayer que é esquematizado na figura 7.

Figura 7- Desenho esquemático processo Bayer

Fonte: www.abal.org.br

Alumínio

A obtenção do alumínio ocorre pela redução da alumina calcinada em cubas eletrolíticas, a altas temperaturas, no processo conhecido como Hall-Héroult. São necessárias duas toneladas de alumina para produzir uma tonelada de metal primário pelo processo de Redução. (Fonte ABAL 2019).

São necessárias três matérias-primas para se produzir o alumínio: óxido de alumínio, eletricidade e carbono.

Numa cuba, a eletricidade circula entre um polo negativo (catodo) e um polo positivo (anodo), ambos feitos de carbono. O anodo reage com o oxigênio da alumina e forma gás carbônico (CO₂).

Deste processo resulta o alumínio líquido, que pode, então, ser retirado da cuba.

A transformação da alumina calcinada em alumínio metálico pode ser exemplificada conforme figuras 8 e 9:

Figura 8- Desenho esquemático cuba eletrolítica

Fonte: (ABAL, 2019)

Figura 9- fluxo do processo Hall-Héroult

Fonte: (ABAL, 2019)

2 1 4 As Principais Ligas de Alumínio

O alumínio fundido dissolve outros metais e substâncias metaloides como o silício (que atua como metal). Quando o alumínio se resfria e se solidifica, alguns dos constituintes da liga podem ser retidos em solução sólida. Isto faz com que a estrutura atômica do metal se torne mais rígida. Os átomos podem ser visualizados como sendo arranjados em uma rede cristalina regular formando moléculas de tamanhos diferentes daqueles do elemento de liga principal. A principal função das ligas de alumínio é aumentar a resistência mecânica sem prejudicar as outras propriedades. Assim, novas ligas têm sido desenvolvidas combinando as propriedades adequadas a aplicações específicas. (ABAL, 2006)

2 1 4 1 As Ligas de Alumínio Trabalháveis

As ligas de alumínio podem ser divididas em dois grandes grupos. O primeiro, chamado de ligas trabalháveis (*wrought alloys*), faz referência às ligas que podem ser trabalhadas mecanicamente a frio ou a quente. O segundo grupo, chamado de ligas para fundição (*cast alloys*), faz referência aquelas ligas que em função de suas propriedades não podem ser trabalhadas e se adaptam apenas a processos de fundição. Em adição, as ligas de alumínio podem ser subdivididas em ligas tratáveis termicamente e ligas não tratáveis termicamente. As ligas que respondem a tratamentos térmicos e são endurecíveis por precipitação (solubilização e envelhecimento) são denominadas como tratáveis termicamente. Já as ligas que aumentam suas propriedades mecânicas principalmente pelo mecanismo de encruamento são classificadas como ligas não tratáveis termicamente. A nomenclatura utilizada para as ligas trabalháveis é composta por quatro dígitos. Já a nomenclatura para ligas de fundição é estruturada com três dígitos e um decimal. (MARTINS A. , 2014)

Nas seções que seguem as ligas trabalháveis e de fundição terão suas nomenclaturas detalhadas e seus principais grupos, baseados nos elementos ligantes em maior porcentagem, explanados.

2 1 4 2 As Ligas de Alumínio trabalháveis

As ligas de alumínio trabalháveis são especificadas pelo uso de quatro dígitos.

O primeiro dígito faz referência ao principal elemento de impureza que compõe a liga e faz alusão ao grupo que a liga pertence. Para o grupo de alumínio puro, 1XXX, o segundo dígito (de 1 a 9) indica controles especiais para certas impurezas e os últimos dois dígitos se referem à pureza mínima do alumínio duas casas depois do ponto decimal (0,01%). Por exemplo, a liga de alumínio 1085 possui 99,85% de alumínio e apenas 0,15% de impurezas. O segundo dígito para os grupos 2XXX ao 8XXX indica modificações na liga, sendo o número 0 representativo da liga original e os números de 1 a 9 as respectivas modificações.

Os últimos dois dígitos não possuem significância especial a não ser diferenciar ligas do mesmo grupo (ASM METALS HANDBOOK VOLUME 2, 1992).

A Tabela 2 apresenta os diferentes grupos das ligas trabalháveis e seus respectivos elementos.

Tabela 2-grupos das ligas trabalháveis e seus respectivos elementos.

Ligas trabalháveis mecanicamente	
Série	Principal Elemento Ligante
1XXX	Alumínio puro, pureza > 99%
2XXX	Cobre (Cu)
3XXX	Manganês (Mn)
4XXX	Silício (Si)
5XXX	Magnésio (Mg)
6XXX	Magnésio (Mg) e Silício (Si)
7XXX	Zinco (Zn)
8XXX	Outros elementos
9XXX	Série não utilizada

Fonte: (ASM METALS HANDBOOK VOLUME 2, 1992)

Cada combinação de elementos de impureza afeta a microestrutura de uma forma particular e por consequência as propriedades e características da liga. Por isso cada série tem aplicações específicas às suas qualidades mais acentuadas.

Uma breve explicação das principais características e usos das diferentes séries segue abaixo.

As ligas da série 1XXX são de alumínio puro, e por este motivo não são endurecíveis por tratamento térmico. O alumínio puro exibe boa ductilidade e é muito utilizado em processos que requerem deformação a frio. Os limites de resistência mecânica desta série variam de 70 a 185 MPa. Vários produtos usam ligas da série 1XXX entre eles utensílios domésticos, trocadores de calor, barramentos, peças para as indústrias alimentícias, químicas, e de bebida. (KAUFMAN, 2000)

As ligas da série 2XXX são tratáveis termicamente (endurecíveis por precipitação/envelhecimento), e fazem parte das primeiras ligas de alumínio desenvolvidas (duralumínio). As ligas alumínio cobre exibem boa resistência mecânica sem comprometer de forma muito impactante a ductilidade do material, possuem boa usinabilidade, mas perdem um pouco a resistência à corrosão em relação ao Al puro. Os limites de resistência para a série 2XXX chegam a 430 MPa. Dentre os produtos que usam essa liga estão peças forjadas, peças para as indústrias aeronáutica, de transporte, e de máquinas e equipamentos. (KAUFMAN, 2000)

As ligas da série 3XXX, possuem o manganês como seu principal elemento ligante, não são tratáveis termicamente. Para endurece-las é necessário o trabalho a frio. As ligas desta série possuem excelente resistência à corrosão, boa conformabilidade, e resistência mecânica apreciável. Os limites de resistência mecânica desta série chegam a 285 MPa. Dentre as ligas com maior volume de comercialização figura a 3104, utilizada na fabricação do corpo de latas para bebidas e responsável por grande parte do volume de alumínio reciclado em todo o mundo. Outras ligas desta série são utilizadas em carrocerias para veículos de carga, utensílios domésticos, telhas, forros, produtos para construção civil, e para trocadores de calor e radiadores (KAUFMAN, 2000).

As ligas da série 4XXX possuem o silício como principal elemento ligante. O silício abaixa a temperatura de fusão do alumínio e pode ser adicionado em até 12%(wt), por isso as ligas de alumínio silício são muito utilizadas para soldagem e brasagem de outras ligas, como as da série 1XXX, 3XXX e 6XXX. As ligas desta série são tratáveis termicamente. Algumas ligas, como a 4032, possuem baixo coeficiente de expansão térmica e boa resistência ao desgaste, tornando a útil na

manufatura de pistões para a indústria aeronáutica. Outras aplicações incluem arame de solda, e peças estruturais (anodizadas) para construção civil. A resistência mecânica das ligas desta série chega a 380 MPa (KAUFMAN, 2000).

As ligas da série 5XXX não são tratáveis termicamente, no entanto, o magnésio é um elemento que confere ao alumínio grande potencial de endurecimento por encruamento, proporcional a seu teor na liga. As ligas alumínio magnésio possuem excelente resistência à corrosão e chegam a ter resistência mecânica de 350 MPa. As aplicações para esta série de ligas são inúmeras, e incluem carrocerias de veículos de transporte, vagões ferroviários, elementos estruturais, e fachadas para construção civil (KAUFMAN, 2000).

As ligas da série 6XXX são tratáveis termicamente, e são muito utilizadas em processos de extrusão. Possuem boa resistência à corrosão, podem ter resistência mecânica de até 400 MPa, e são muito utilizadas para extrusão porque o silício aumenta sua fluidez (abaixa o ponto de fusão). Estas ligas são comumente endurecidas por solubilização e envelhecimento. Nas aplicações para esta série de ligas estão os perfis extrudados para as indústrias automobilísticas, de construção civil, e utensílios domésticos (KAUFMAN, 2000).

As ligas da série 7XXX são tratáveis termicamente e possuem boa resistência à corrosão e boa conformabilidade. Esta série, com zinco e magnésio, possui boa soldabilidade e chega a limites de resistência à tração de 610 MPa. Suas aplicações estão em utilizações que requerem grande resistência mecânica como peças para a indústria aeronáutica e militar, moldes para injeção de plásticos, e para fabricação de máquinas e equipamentos. A resistência à corrosão desta série não é tão boa quanto à das séries 5XXX e 6XXX e por este motivo ligas 7XXX são muitas vezes submetidas a tratamentos superficiais caso seu uso seja necessário em ambientes agressivos (KAUFMAN, 2000).

As ligas da série 8XXX geralmente possuem como elementos ligantes o ferro (Fe) e o manganês (Mn), e quando este é o caso, não são tratáveis termicamente. Esta série é recente e seus principais desenvolvimentos foram voltados a aplicações de fundição contínua na fabricação de folhas de alumínio. Quando os principais elementos da liga são o Fe e o Mn a liga se torna endurecível por encruamento. A principal aplicação desta série está em embalagens e em ligas como a 8090 cujo principal elemento é o Lítio e é usada em aplicações

aeroespaciais. Valores típicos de resistência mecânica de até 240 MPa são encontrado para esta série de ligas (KAUFMAN, 2000).

2 1 4 3 Classificação de Têmperas para Ligas de Alumínio

Para as ligas de alumínio, diferentemente das ligas de ferro, não se utiliza a palavra têmpera como sinônimo de tratamento térmico. Têmpera para as ligas de alumínio faz referência a todo e qualquer processo pelo qual o material tenha passado para lhe conferir suas características finais. A classificação das têmperas segue um sistema que utiliza uma letra e dígitos que são agregados aos códigos utilizados na especificação das ligas. Abaixo se encontra uma breve descrição do sistema utilizado para designar as diferentes têmperas comuns às ligas de alumínio.

As letras indicam por qual processo o material passou. A letra F quer dizer que o material está assim como foi fabricado. Depois de trabalhado ou após a fundição não houve nenhum processo adicional. A letra O significa que o material foi recozido. A letra H quer dizer que houve trabalho a frio para o endurecimento da liga de alumínio. A letra H é sempre seguida de dois dígitos, o primeiro faz referência às sequências específicas dos processos utilizados, e o segundo dígito indica a severidade do encruamento. Um terceiro dígito pode ser adicionado em função de variações na têmpera indicada, geralmente este último dígito é utilizado quando há diferenças no controle do processo de têmpera e no controle das propriedades mecânicas em relação ao sistema de dois dígitos. A letra W significa que o material foi solubilizado. A letra quer dizer que houve tratamento térmico e o dígito que segue indica a sequência dos processos utilizados. Quando for conveniente diferenciar variações nos tratamentos térmicos que vão de 1 a 10 outros dígitos podem ser adicionados, excluindo se o 0. Na tabela 4 é possível visualizar os significados das letras e dos números das diferentes têmperas das ligas de alumínio.

Tabela 3-significados das letras e dos números das diferentes têmperas das ligas de alumínio.

Letra	Primeiro Dígito	Segundo Dígito
F Como fabricado	Não aplicável	Não aplicável
O Recozido	Não aplicável	Não aplicável
H Deformado a frio	1 Deformado a frio	2 1/4 duro
	2 Deformado a frio e parcialmente recozido	4 1/2 duro
	3 Deformado a frio e estabilizado	6 3/4 duro
	4 Deformado a frio e pintado ou envernizado	8 Duro
		9 Extra duro
W Solubilizado	Não aplicável	Não aplicável
	Solubilização parcial + Envelhecimento	
	1 natural	Não aplicável
	2 Solubilização parcial + trabalho a frio + Envelhecimento natural	Não aplicável
	3 Solubilização + trabalho a frio + Envelhecimento natural	Não aplicável
T Tratado termicamente Peças trabalháveis	4 Solubilização + Envelhecimento natural	Não aplicável
	5 Envelhecimento artificial	Não aplicável
	6 Solubilização + Envelhecimento artificial	Não aplicável
	7 Solubilização + Estabilização	Não aplicável
	8 Solubilização + trabalho a frio + Envelhecimento artificial	Não aplicável
T Tratado termicamente Peças para fundição	9 Solubilização + Envelhecimento artificial + trabalho a frio	Não aplicável
	1 Solubilização parcial + trabalho a frio + Envelhecimento artificial	Não aplicável
	2 Alívio de tensões	Não aplicável
	4 Solubilização	Não aplicável
	5 Envelhecimento Artificial	Não aplicável
	6 Solubilização + Envelhecimento Artificial	Não aplicável
	7 Solubilização + Estabilização	Não aplicável

Fonte: (ASM METALS HANDBOOK VOLUME 2, 1992)

A grande versatilidade das ligas de alumínio, combinada com as diferentes têmperas, produz uma gama apreciável de materiais para inúmeras aplicações. As Tabelas 4, para as ligas trabalháveis, e a 5, para as ligas de fundição, mostram essa adaptabilidade.

Tabela 4- Aplicações de ligas de alumínio.

Liga	Têmpera	Aplicação Típica
1050	H12 a H18	Equipamento para indústria química, tanques caminhão pipa
1100	O a H18	Utensílios domésticos, chapas
1199	O a H18	Folha para capacitores eletrolíticos, equipamento para indústria química, tanques.
1350	O	Condutores elétricos
2014	O, T3, T4	Chassi para veículos, partes estruturais para indústria aeronáutica
2024	O, T3, T4 T6	Rodas, partes estruturais para indústria aeronáutica
2124	T851	Aviões de uso militar
2218	T61	Partes utilizadas para turbinas de jatos
2219	O e Txx	Partes estruturais utilizadas em altas temperaturas (315C)
2618	T61	Motores
3003	O	Utensílios domésticos, Tanques de armazenamento
3104	H19	Latas para bebidas
4032	T61	Pistões
4034	F	Eletrodo de Solda
5005	O a Hxx	Partes utilizadas na construção civil, utensílios eletrodomésticos, Tubos para refrigeração
5083	O a Hxx	Vasos de pressão, equipamento utilizados em área marítima, componentes utilizados em misseis,
5182	O a Hxx	Partes para indústria automobilística, tampa para latas de bebidas
5356	F	Eletrodos de solda
6005	T5	Vagões de trens, móveis, tubulações de transporte
6066	O	Forjados e extrudados
6101	T6	Condutores elétricos
7049	Txx	Partes estruturais para indústria aeronáutica
7075	O a Txx	Partes estruturais para indústria aeronáutica

Fonte: (ASM METALS HANDBOOK VOLUME 2, 1992)

Tabela 5- Aplicação de ligas de alumínio fundidas.

Liga	Aplicação Típica
380.0	Alojamentos, cabeças de cilindros para motores refrigerados a ar.
A380.0	Alojamento de lâmpadas para postes, estruturas de máquinas, equipamento dentário.
360.0	Frigideiras, tampas, porta-instrumentos, partes com necessidades de resistência a corrosão.
413.0	Pistões, bielas, buchas e alojamentos
518.0	Partes utilizadas em escadas rolantes, componentes de esteiras de transporte, pequenas peças para aviões e barcos.
366.0	Pistões automotivos
355.0	Engrenagens de sincronismo, rotores, compressores, peças para indústria aeronáutica e bélica que requerem alta resistência
356.0	Partes de máquinas operatrizes, rodas de avião, partes para bombas, corpo de válvula.
B433.0	Utensílios domésticos
513.0	Ornamentos e partes utilizadas esteticamente em construção civil
357.0	Blocos de cilindro para motores refrigerados a água
433.0	Conexões para tubulação, utensílios para cozinha, ornamentos, conexões utilizadas em ambiente marinho
520.0	Conexões para aviões, componentes para chassis automotivos e alavancas

Fonte: (ASM METALS HANDBOOK VOLUME 2, 1992)

2.1.5 A Série 3XXX e a Liga 3104 Têmpera H19

A liga de alumínio AA3104-H19, utilizada na fabricação de latas de bebidas e alimentos é uma liga do sistema alumínio-manganês com pequenas quantidades de silício, magnésio e ferro como principais elementos de liga conforme podemos observar na tabela 6.

Tabela 6 -Composição química liga 3104

Composição Química liga 3104 (% em peso)							
Silício	Ferro	Cobre	Manganês	Magnésio	Cromo	Zinco	Titânio
0,60	0,80	0,06 a 0,25	0,80 a 1,40	0,8 a 1,30	-	0,25	0,10

FONTE: (ABAL, 2008)

A liga 3104 foi desenvolvida a partir da liga AA 3004 sendo ambas classificadas como ligas não tratáveis termicamente por não responderem ao tratamento térmico de envelhecimento. A matriz metálica é uma fase sólida de alumínio (Al, estrutura cúbica de face centrada, CFC), com um pequeno percentual de outros elementos dissolvidos em solução sólida na rede cristalina. Durante o lingotamento “*direct chill*” para a obtenção das placas a partir do metal líquido, a formação dos precipitados está relacionada diretamente com a taxa de resfriamento e segregação de soluto. Os compostos intermetálicos ou precipitados formados durante a solidificação têm importante papel durante as etapas de processamento subsequentes do material. (FOGAZZI, 2000)

O Mn faz parte do grupo de elementos que formam precipitados de segunda fase nas ligas de alumínio em função de sua baixa solubilidade e geralmente em sistemas quaternários que também possuem Fe e Si encontra-se o intermetálico $\text{Al}_{12}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}$. A solubilidade do Mn é mais limitada do que a do Mg no alumínio, chegando a aproximadamente 2%. As ligas da série 3XXX geralmente possuem este sistema quaternário Al-Fe-Mn-Si como base, e neste sistema as duas principais fases intermetálicas são a ortorrômbica $\text{Al}_6(\text{Fe}, \text{Mn})$, e a cúbica $\text{Al}_{12}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}$. Os volumes relativos destas duas fases são dependentes da composição química da liga, das taxas de solidificação, e dos parâmetros utilizados no forno de homogeneização. O Fe possui papel preponderante na composição química nos dispersóides ou precipitados, já que sua solubilidade no alumínio de 0,05% é limitada e auxilia na formação destes compostos intermetálicos.

O Fe influencia fortemente ligas Al-Mn-Si, aumentando o volume de compostos intermetálicos mesmo quando sua porcentagem na liga é pequena, auxiliando na precipitação do Mn em solução sólida supersaturada, e impedindo a formação de fases ternárias metaestáveis, como a $\text{Al}_x\text{Mn}_y\text{Fe}_z$ (GANDHI, 1994). Em processos nos quais a taxa de solidificação é alta há predominância da fase $\text{Al}_{12}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}$, em taxas mais amenas, a fração volumétrica da fase $\text{Al}_6(\text{Fe}, \text{Mn})$ é maior (VASUDEVAN & DOHERTY, 1989).

O Si também influencia na proporção da fase $\text{Al}_{12}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}$ presente na liga, quanto maior sua quantidade, mais compostos intermetálicos com esta composição serão formados e mais facilmente se realizará a transformação da fase $\text{Al}_6(\text{Fe}, \text{Mn})$ durante o processo de homogeneização do lingote (GANDHI, 1999).

O Ti, presente em pequenas quantidades na liga 3104, atua como um refinador de grão, adicionado momentos antes da fundição do lingote, geralmente na composição de liga 5% Titânio 0,3% Boro, e proporciona inúmeros pontos para nucleação (ALUMINUM ASSOCIATION, 2007).

O Mn proporciona endurecimento por solução sólida, mas é menos eficaz individualmente no endurecimento por encruamento se comparado ao Mg. Em ligas binárias nas quais o Mn se mantém em solução sua adição é eficaz tanto no endurecimento por solução sólida quanto por trabalho a frio. O Mn apresenta um efeito positivo na alteração da morfologia acicular dos constituintes intermetálicos gerados pelo Fe presente na liga, que fragilizam o material além de funcionar como um retardador do crescimento de grão durante tratamentos térmicos de lingotes. Em adição, o Mn é eficaz em aumentar a temperatura de recristalização e em retardar a recuperação. (ASM METALS HANDBOOK VOLUME 2, 1992)

O Mg proporciona resultados de endurecimento por trabalho a frio mais significativos nas ligas de Al do que o Mn e por esta razão grande parte das ligas comerciais, como a 3104, possui adições deste elemento, às vezes excedendo a porcentagem de Mn. (VASUDEVAN & DOHERTY, 1989)

2.2 FABRICAÇÃO DAS LATAS DE ALUMÍNIO PARA BEBIDAS

Um esquema do processo produtivo de fabricação do corpo da lata pode ser visualizado na Figura 10.

Figura 10- Fluxo de fabricação de latas de alumínio

Fonte (ABRALATAS, 2019)

Na figura 11 temos o desenho esquemático do fluxo de produção através das várias etapas do processo.

Figura 11- Desenho esquemático do fluxo de produção da lata de alumínio.

Fonte: (ABRALATAS, 2019)

O processo tem início com a movimentação das bobinas que por motivos de segurança no transporte chegam na posição vertical (*eye to sky*). O peso das bobinas é limitado em função da capacidade dos equipamentos de movimentação, processos atuais utilizam bobinas que variam entre dez e doze toneladas. O mesmo se aplica as outras especificações da bobina que tem sua largura definida em função do ferramental utilizado no primeiro processo de conformação, e sua espessura em função do desenho do ferramental e das especificações do produto final. A primeira etapa do processo consiste em posicionar a bobina horizontalmente (*eye to horizon*) para que, nesta posição, ela seja alimentada no desbobinador.

Uma vez posicionada no desbobinador a folha é introduzida em um equipamento cuja finalidade é aplicar uma fina camada de óleo no metal para auxiliar no processo de corte e repuxo. A primeira operação que efetivamente altera o formato da folha é a formação do copo que se dá pelo uso de uma prensa mecânica de dupla ação que primeiramente corta o esboço e depois repuxa o copo utilizando ferramentas de conformação.

Os tipos de prensas que realizam esta operação são variados, as mais atuais possuem conjuntos de ferramenta que permitem a conformação de mais de 12 copos por ciclo. As prensas de copo mais modernas chegam a velocidades

superiores a 230 ciclos por minuto. As ferramentas utilizadas no corte e repuxo do copo podem ser visualizadas na Figura 12.

Figura 12-Ferramentas de corte e repuxo utilizadas na conformação do copo

Fonte: (MARTINS A. , 2014) adaptado de www.stollemachinery.com

Uma vez pronto o copo o próximo equipamento no processo de conformação é comumente chamado de *bodymaker*. Este equipamento é essencialmente uma prensa horizontal que faz o repuxo profundo e o afinamento da parede do copo, a este processo dá-se o nome de *ironing* em Inglês. Por ter duas etapas: fabricação do copo e repuxo do corpo o processo de fabricação de latas de é comumente referido como DWI, do Inglês *drawn and wall ironed*. A conformação do perfil do fundo lata também é realizada neste mesmo equipamento. Este é o processo mais sensível às propriedades do material. Valores como o limite de escoamento, limite de resistência à tração, e alongamento percentual, junto às progressões das ferramentas de conformação, que geralmente são fabricadas de carbeto de tungstênio (metal duro) e as condições da máquina em si, em adição ao regime de lubrificação utilizado, definem janelas de operação que são muito importantes para o bom desempenho do processo. O funcionamento mecânico básico de uma *bodymaker* pode ser visualizado na figura 13 e uma breve descrição das ferramentas utilizadas neste equipamento encontra-se na figura 14 a seguir.

Durante a conformação nas *bodymakers* óleo em emulsão é utilizado para controlar a temperatura do conjunto de ferramentas e aumentar a lubricidade. Um típico estojo de ferramentas, chamado de *tool pack* em Inglês, pode ser visualizado na figura 8. Os orifícios que permitem a entrada do óleo refrigerante podem ser vistos na mesma fotografia entre os suportes das ferramentas. Devido à anisotropia dos laminados de alumínio a borda das latas fica irregular depois do repuxo profundo e deve ser cortada antes que a lata continue no processo produtivo. Este efeito, junto à progressão da deformação plástica realizada no copo pode ser visualizado na figura 15.

Figura 13-Componentes mecânicos básicos da bodymaker

Fonte (MARTINS A. , 2014): adaptado de www.intpacsol.com

Figura 14-Descrição das ferramentas de conformação utilizadas na bodymaker.

Fonte: (MARTINS A. , 2014) adaptado de www.pridecan.com

Figura 15-Estojo de ferramentas e latas correspondentes.

Fonte: (Stolle Machinery, 2019)

Figura 16- (a) Copo, (b) ferramenta de repuxo, (c) lata acabada com borda irregular, (d) lata acabada com a apara retirada.

Fonte: Adaptado de www.sandvik.com

A próxima etapa é a limpeza da lata para retirada de óleos e finos de alumínio acumulados durante a conformação. O equipamento utilizado para este fim é chamado de lavadora e é compartimentado em diferentes estágios cada um com uma função distinta de limpeza. Depois de lavada, uma fina camada de verniz é adicionada ao fundo da lata, a fim de diminuir o coeficiente de fricção entre o alumínio e as superfícies por onde desliza. Neste ponto o produto está pronto para ser diferenciado pelo rótulo. A decoração da lata ocorre pelo processo de litografia e os equipamentos mais modernos chegam a utilizar oito cores na pintura da lata. Logo depois da pintura uma camada de verniz externo é adicionada e a lata é seca em um forno que a movimenta por uma corrente de pinos. A figura 17 é de um modelo bastante utilizado de decoradora.

Figura 17- Decoradora do corpo da lata.

Fonte: (Stolle Machinery, 2019) www.stollemachinery.com

A próxima etapa do processo consiste na aplicação de uma camada de verniz no interior da lata e tem a função de evitar o contato do produto líquido com o alumínio. Os equipamentos que realizam esta tarefa são comumente chamados de LSM, do Inglês *lacquer spray machine*. Diferentes camadas de verniz podem ser aplicadas de acordo a especificações do produto a ser envasado. Diferentes

conjuntos, alguns com uma pistola de aplicação e outros com duas, são de uso comum. A figura 18 demonstra a aplicação de verniz em uma lata.

Figura 18- Aplicação de verniz interno em lata.

Fonte: www.nordson.com

O verniz interno é curado em um forno chamado de IBO, do Inglês *internal baking oven*. Até este instante as paredes da lata estão paralelas e o próximo passo no processo é a conformação do pescoço e do flange. O equipamento que realiza essa conformação é chamado de *necker* e o faz através de ferramentas progressivas que vão gradativamente conformando o raio do pescoço da lata. A quantidade de estações de conformação varia e para algumas aplicações mais de 20 estações são utilizadas (garrafas de alumínio). Duas estações distintas, uma chamada de flageladora, e outra chamada de *light tester*, realizam respectivamente a conformação do flange e a verificação da presença de micro furos na lata por meio de sensores de luz. Depois que a etapa de flangeamento é terminada a lata está pronta.

A figura 19 ilustra a conformação do pescoço e do flange da lata. A etapa do teste de luz e as duas etapas subsequentes que inspecionam o interior e o exterior da lata servem para assegurar a qualidade do produto e já não alteram mais suas características. Vale mencionar que as inspeções não são realizadas por amostragem e que todas as latas produzidas que vão para a embalagem final são

cheçadas. Por fim as latas são embaladas em uma paletizadora para serem expedidas para diversos clientes.

Figura 19- Conformação do pescoço e do flange da lata.

Fonte: (MARTINS A. , 2014)

2 2 2 Caracterização Microestrutural

A caracterização microestrutural dos materiais é de grande importância já que reconhecidamente as propriedades, essenciais à aplicação e ao desempenho do material em uso, são dependentes de suas particularidades microscópicas. A dependência intrínseca entre o processamento, a estrutura, as propriedades, e por fim, o desempenho do material é objeto de inúmeros estudos e de muitos livros didáticos. Tecnologias atuais permitem a inversão da abordagem tradicional de entender e explicar as propriedades dos materiais através da análise microestrutural e tornam possível projetar propriedades, muitas vezes inéditas, por meio da manipulação a nível atômico. Atualmente a microestrutura dos metais pode ser estudada por vários meios, dentre os mais utilizados podem ser mencionados as análises metalográficas, análises de difrações, e as análises de textura. No entanto, abundam vários outros métodos, como os de ressonância, espectrometria, cromatografia, espalhamento, e outros mais.

Análises metalográficas são amplamente utilizadas para correlacionar propriedades e microestruturas, além de serem muito úteis na investigação de falhas e na proposição de melhorias para ligas metálicas. Estas análises podem ser divididas em três categorias distintas, a primeira usa luz visível para o estudo da

microestrutura e é de modo geral chamada de microscopia óptica. A segunda categoria, especialmente útil no estudo da superfície dos metais, utiliza um feixe de elétrons para bombardear a área de interesse e produzir uma imagem gerada por computador, é chamada de microscopia eletrônica de varredura (MEV). A terceira categoria que possui a capacidade de identificar defeitos cristalinos e segundas fases imperceptíveis para outras técnicas usa um feixe de elétrons que passa através de um finíssimo corpo de prova para gerar imagens estruturais dos metais é chamada de microscopia eletrônica de transmissão (MET). (ASM METALS HANDBOOK VOLUME 10, 1998). (PADILHA, 2000)

A microscopia ótica continua a ser a mais utilizada na caracterização dos materiais, mas as relativamente novas tecnologias de MEV e MET são responsáveis por grandes descobertas recentes e constatações de teorias já amplamente difundidas.

Neste estudo da liga de alumínio 3104 a microscopia ótica foi utilizada para identificação de compostos intermetálicos e seus tamanhos, a microscopia eletrônica de varredura para o mesmo fim e para análise semi-quantitativa da composição química destes precipitados, e a análise de textura do metal com têmpera H19 para verificação de orientações cristalográficas preferenciais, tendências de orelhamento, e mudanças conforme a deformação progride da chapa até a geometria final da lata.

2 2 3 Textura Cristalográfica.

Materiais policristalinos são compostos por inúmeros grãos que também são chamados de cristais. Os contornos de grão são a fronteira entre cristais com orientações cristalográficas diferentes. Existem algumas teorias relativas ao contorno de grão, a que atualmente é a mais aceita foi elaborada por H. Gleiter e usa um modelo de degraus para representar áreas de baixa adaptação entre contornos de alto ângulo. Os grãos de um policristal preenchem todo espaço ocupado pelo sólido além de satisfazer outras exigências como manter o equilíbrio das tensões superficiais (contornos de grão), e encaixarem-se uns aos outros de forma que haja equilíbrio também no número de faces, vértices e arestas. O poliedro com vinte e quatro vértices, trinta e seis arestas, e quatorze faces,

chamado de ortotetracaidecaedro, é o que melhor se adapta a estas exigências (PADILHA,2000).

É importante ser mencionado que este é um poliedro ideal, e que empiricamente os grãos dos sólidos cristalinos possuem geometrias variadas, muitas vezes similares ao modelo teórico. A figura 20 ilustra o poliedro acima mencionado, sua provável compactação tridimensional, e o agregado sólido.

Figura 20—(a) ortotetracaidecaedro, (b) compactação de grãos, (c) agregado sólido.

Fonte: (PADILHA, 2000)

A orientação cristalográfica dos grãos nos sólidos policristalinos raramente é completamente aleatória, como ocorre com sólidos gerados através de tecnologias de metalurgia do pó, e geralmente possui uma tendência ou uma orientação preferencial. A esta tendência de orientação preferencial, que para muitos materiais ocorre naturalmente e é ainda mais acentuada por alguns tipos de processos termomecânicos, dá-se o nome de textura.

Análises de textura são de grande importância porque muitos materiais possuem propriedades dependentes desta orientação preferencial. Certas propriedades em alguns materiais chegam a variar até 50% influenciadas pela textura, que por sua vez está relacionada à anisotropia.

Algumas das propriedades que são reconhecidamente afetadas pela textura incluem o módulo de Young, o coeficiente de Poisson, a resistência mecânica, a tenacidade, a ductilidade, a permeabilidade magnética, a condutividade elétrica, e

a expansão térmica para materiais que não possuem a célula unitária do tipo cúbica. A correlação entre a textura e o comportamento do material em processos de conformação, como o repuxo profundo e o estiramento, aumenta ainda mais a importância de estudos nesta área. As texturas são alteradas consideravelmente após o material passar por processos de deformação, recristalização, ou mudanças de fase.

O estudo sobre a textura dos materiais cresce em duas frentes, sendo uma preocupada com o controle tecnológico do processamento de materiais e suas propriedades finais e a outra voltada para aspectos técnicos e acadêmicos da ciência dos materiais. O método mais utilizado para mensuração de textura é a difração de raios X com auxílio de um goniômetro (figura 21). Este método permite que a fração volumétrica de uma amostra, para uma família específica de planos cristalográficos como $\{111\}$ ou o $\{001\}$, seja identificada em relação a sua orientação preferencial (ENGLER & RANDLE, Introduction to Texture Analysis, 2010).

Figura 21- Difratômetro de raios x (fonte Panalytical)

Difração de raios X: A ideia da regularidade submicroscópica em três dimensões dos átomos em um sólido remonta ao século XVIII, quando foi sugerida

pela primeira vez por Rene Just Haüy para explicar o hábito cristalino dos cristais naturais.

A comprovação desta ideia ocorreu em 1912 com as experiências de Max Von Laue envolvendo a difração de raios X por redes cristalinas. Em sua experiência von Laue incidiu um feixe de raios X sobre um monocristal de cloreto de sódio e registrou o espectro de pontos obtidos em uma chapa fotográfica, onde cada ponto é formado pela difração do feixe incidente por um conjunto de planos cristalográficos. O experimento idealizado por von Laue é utilizado até os dias hoje para a orientação de monocristais e de grãos gigantes em materiais policristalinos.

Em 1913, Bragg propôs um modelo simples de ser demonstrado geometricamente que explica a formação dos picos de difração. Bragg postulou que o feixe de raios X incidente é refletido de forma especular pelos planos cristalinos, isto é o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão, e que um conjunto de feixes incidindo sobre o conjunto de planos sofre uma interferência construtiva e a condição para que isto ocorra é de que o espaçamento interplanar seja igual a um múltiplo inteiro do comprimento de onda incidente, equação (1).

$$n \lambda = 2d \sin \Phi$$

Equação 1

Onde: λ , é o comprimento de onda incidente, d a distância interplanar e Φ o ângulo de incidência.

A Fig.22 apresenta o diagrama esquemático utilizado para mostrar as relações angulares utilizadas na dedução de Bragg.

A dedução da lei de Bragg a partir deste esquema geométrico é bastante ilustrativa, porém a simplificação do modelo esconde conceitos importantes do fenômeno de difração. Von Laue propôs uma formulação equivalente à de Bragg, mais elegante do ponto de vista físico, porém utilizando um modelamento matemático mais complexo baseado na rede cristalina descrita no espaço recíproco ou espaço de Fourier.

Figura 22 Diagrama utilizado na dedução da lei de Bragg.

Fonte (CULLITY & STOCK, 2001)

Von Laue postulou que o feixe incidente de raios X interage com os elétrons dos átomos acelerando-os, e estes passam a espalhar radiação em todas as direções com o mesmo comprimento de onda da radiação incidente, a interferência construtiva destas ondas ocorrerá em determinadas direções em função da posição dos átomos na estrutura cristalina originando o pico de difração. O comportamento proposto para o elétron neste caso é o de um elétron livre sobre o qual incide uma onda plana, neste caso os elétrons estão ligados, porém a frequência da onda incidente é muito maior que a frequência característica do elétron ligado, de maneira que ele se comporta como um elétron livre (Pessoa, 1985).

No caso de materiais policristalinos o feixe interage com muitos cristalitos e a difração por diferentes planos cristalinos ocorre ao mesmo tempo de maneira que cones de difração são formados. Neste caso, os cones de difração interceptam o filme fotográfico formando anéis, conhecidos como anéis de Debye.

Quando os materiais policristalinos apresentam orientação preferencial ocorre uma impressão não uniforme dos anéis, está foi a primeira maneira de se analisar a textura em material policristalinos. Este método fornece apenas informações qualitativas (Barret, 1952)

No difratômetro de raios X a análise de textura pode ser realizada utilizando-se a geometria de Bragg-Bretano, ou parafocal. A Fig. 23 apresenta o

esquema de posicionamento da amostra, no difratômetro de raios X, em relação ao feixe de raios X, especificando os ângulos alfa (α) e beta (β).

Figura 23 Esquema de posicionamento da amostra, no difratômetro de raios X, para coleta de dados para análise de textura.

Fonte: (CULLITY & STOCK, 2001)

A análise utilizando o difratômetro de raios X apresenta as vantagens de que o fator de absorção é constante para a faixa de 0° a 50° (Cullity e Stocks, 2001) e de que a intensidade é medida de forma quantitativa por um detector. Para a obtenção de uma figura de polo completa é necessário realizar-se medidas por transmissão e por reflexão do feixe de raios X.

A medida por transmissão é realizada para a faixa de ângulo alfa de 50° a 90° e a medida por reflexão para a faixa de 0° a 50° . Na medida por transmissão é necessário que a espessura da amostra seja transparente ao feixe de raios X, isto implica na necessidade de um afinamento da amostra, outro inconveniente nesta medida é a necessidade da correção da absorção devido à variação do volume do material difratante, em função do ângulo alfa e variação da distância do feixe de raios X.

A medida por reflexão ou método de Schulz (Fig. 23), que foi utilizada no desenvolvimento deste trabalho, apresenta além da vantagem de o fator de absorção poder ser considerado constante também a de que a espessura da amostra somente é limitada pelo acessório de medida. Considerando-se estas

vantagens, foram desenvolvidos métodos matemáticos que permitem a obtenção da figura de polos completa a partir dos dados experimentais obtidos pelo método da reflexão para a faixa de ângulo alfa de 0° a 75° chamada de figura de polo incompleta. (Lima, 1986; Bimge, 1982).

A desfocalização é um efeito instrumental que ocorre devido à diferença de área irradiada em função do ângulo alfa. Para se efetuar as correções de desfocalização são realizadas medidas em uma amostra isenta de orientação cristalográfica, na qual teoricamente intensidade é constante, de maneira que variações no valor da intensidade em função do ângulo alfa são decorrentes da variação da área iluminada em função da geometria de medida.

Os dados experimentais obtidos são representados graficamente através da figura de polos. Outras formas de representação da textura são a figura de polos inversa e o espaço tridimensional de Euler, a partir dos resultados obtidos após o processamento dos dados.

Na Fig. 24 apresenta-se a figura de polos obtida a partir de dados experimentais. As distribuições de intensidade, assim como as simetrias entre os quadrantes da figura de polos são conhecidas para determinados tipos de materiais e processos de deformação e/ou tratamento térmico ao qual o material foi submetido.

Figura 24 Figura de polos (111) de uma chapa de Al laminada com redução de 95% (Barret C, 1952).

Fonte: (CULLITY & STOCK, 2001)

Os processos de laminação e de trefilação estão entre os que mais exacerbam a textura das ligas de alumínio, influenciando consideravelmente suas propriedades. A figura 25 apresenta duas chapas, uma das quais possui tendência de orientação aleatória (a) e outra com textura acentuada (b), as iniciais DL, D, e DN representam respectivamente a direção de laminação, a direção transversal, e a direção normal.

Figura 25- Materiais sem textura (a) e com textura (b).

Fonte: (FREITAS.F, 2003)

Para que uma análise de textura seja realizada é necessário haver medidas de referência, ou sistemas de coordenadas. Pelo menos dois sistemas são indispensáveis na medição de orientações preferenciais, um ligado ao sólido nas suas medidas macroscópicas e outro relacionado ao cristal, ou grãos unitários. Geralmente opta-se pelo uso de sistemas cartesianos e no sistema que faz referência a amostra é comum que os eixos sejam emparelhados com superfícies e direções significativas para o sólido estudado. Para amostras fabricadas os eixos podem ser escolhidos em relação à geometria final da peça e para laminados é comum que os eixos coincidam com a direção de laminação, direção transversal, e direção normal da amostra. No sistema de coordenadas do cristal as direções cristalográficas são geralmente utilizadas e para cristais ortogonais, como os cúbicos, tetragonais, e ortorrômbicos, as direções $[100]$, $[010]$, e $[001]$, são comumente elegidas. A figura 26 apresenta os sistemas de coordenadas XYZ para

a amostra macroscópica e para o cristal, que utiliza as direções $[100]$, $[010]$, $[001]$ como eixos. Esforços significativos foram dedicados à criação de sistemas padronizados para exibir dados sobre texturas e atualmente as figuras de polo (FP) e as funções de distribuição de orientação (FDO) são os meios mais utilizados (ENGLER & RANDLE, Introduction to Texture Analysis, 2010).

Figura 26-Sistemas de coordenadas para amostra, XYZ, e para o cristal.

Fonte: Engler e Randle (2010).

No estudo de textura deve se diferenciar entre microtextura, mesotextura e macrotextura (textura). A microtextura considera a orientação de cada grão individual da população de grãos que está relacionada com uma ou mais características da microestrutura. A mesotextura é a textura entre grãos, onde a orientação entre grãos vizinhos é utilizada para caracterizar a desorientação entre eles ou a geometria do contorno de grãos. A macrotextura considera os grãos num policristal como uma população estatística simples, sem levar em conta a localização espacial de qualquer grão ou a relação com seus vizinhos. Na figura 27 observa-se a relação esquemática entre microtextura, mesotextura e macrotextura.

Figura 27- Diagrama esquemático ilustrando as relações entre Macrotextura, microtextura e mesotextura

Fonte: (ENGLER & RANDLE, Introduction to Texture Analysis, 2010)

A textura da liga influencia no tipo e na intensidade do fenômeno de orelhamento no embutimento profundo de metais, e a comparação entre laminados e suas propriedades pode fornecer informações para a melhoria de processos que influenciam esta característica (ENGLER, O, 2012).

Estudos sobre o repuxo profundo de metais demonstram que as taxas limite de repuxo, chamadas também de razão crítica do diâmetro (LDR – *limiting drawing ratio*), e os índices de anisotropia normal (**R**) são parâmetros significativos da conformabilidade do material a este tipo de processamento (ASTM METALS HANDBOOK VOLUME 08,2000).

As taxas limite de repuxo indicam a razão entre o tamanho máximo do esboço (*blank*) e o diâmetro do punção para que na conformação de repuxo profundo não ocorra fratura no copo e tampouco rugas nas paredes ou outros defeitos. Em essência LDR é o resultado da divisão do diâmetro do máximo do esboço (*blank*) ($D_o \text{ Max}$) pelo diâmetro do punção (d_o) de forma que a peça final esteja isenta de defeitos. Quanto maior o LDR de um material mais propício o mesmo será para operações de repuxo profundo. Os índices de anisotropia planar (ΔR) também são de importância, pois indicam tendências de “orelhamento” no

copo. Os índices de anisotropia normal, que podem ser entendidos como as diferenças de propriedades na direção ortogonal ao plano da chapa, não tiveram sua importância reconhecida até recentemente. Isto se deu devido à dificuldade de medição das propriedades na direção da espessura e porque as consequências da anisotropia nesta direção não são visualizáveis (OMAR,2010)

A Figura 28 mostra exemplos típicos do fenômeno de orelhamento na estampagem.

Figura 28- Efeito do orelhamento.

– Efeito de "orelhamento" (a) 0o e 90o; (b) 45o; (c) 0o, 45o e 90o; (d) isento.
Fonte: Hosford e Caddell (1993).

No alumínio comumente utilizado na manufatura de latas para bebidas, vários fatores influenciam a textura do material, dentre eles:

- a) A estrutura do lingote formado no processo de refusão com resfriamento direto (*direct chill casting*);
- b) O tratamento térmico de homogeneização;
- c) A quantidade de passes e a redução na laminação a quente nos rolos reversíveis;
- d) A redução e a quantidade de rolos utilizados na laminação "tandem";
- e) A quantidade de passes e a redução na laminação a frio;
- f) As curvas de tempo e temperatura de tratamento térmico do forno de recozimento quando este é utilizado, principalmente a de aquecimento (YU, BROOKS, & GOODRICH, 1993).

Todos estes fatores influenciam na qualidade do material seja na alteração ou falta de padronização da textura, variação e ou aumento do tamanho de grão,

variação das propriedades mecânicas que, no instante de uso são, para todos os efeitos, imperceptíveis ao olho nu.

A análise da macrotextura até meados da década de 80 era realizada apenas pelas técnicas de difração de raios X e difração de nêutrons. A possibilidade da análise da macrotextura utilizando a técnica de difração de elétrons retroespalhados no microscópio eletrônico de varredura, que permite correlacionar a medida da orientação com sua localização na microestrutura, foi uma ferramenta muito bem-vinda na área de engenharia de materiais.

O (EBSD) *Electron backscatter diffraction*, também conhecido como *backscatter Kikuchi diffraction* (BKD), é uma técnica de medição de orientação cristalográfica baseada no Microscópio eletrônico de varredura. (Bunge H.-J. , 1992)

2.2.4 Figuras de Polo

A orientação de um cristal unitário pode ser representada pela sua posição no espaço em referência a um sistema de coordenadas. Projeções estereográficas, nas quais uma esfera de referência é centrada na origem do sistema de coordenadas, podem ser utilizadas para a construção das figuras de polo. A Figura 29 ilustra a esfera de referência e o plano de projeção.

Figura 29- Projeção estereográfica.

Fonte: ASM Metals Handbook Volume 10 (1998).

É possível definir a posição de um polo através de dois ângulos, χ e η . O ângulo χ pode ser referenciado em relação ao polo norte, se χ é igual a zero então a posição do polo é o Norte na esfera. O ângulo η pode ser referenciado em relação ao plano de projeção dado um ponto qualquer de referência (ASM METALS HANDBOOK VOLUME 10, 1998).

A figura 30 mostra os ângulos χ e η . As figuras de polo usam esta mesma técnica e notações para definir as orientações de um cristal unitário. A construção de uma figura de polo pode ser visualizada na Figura 31 que exhibe o cristal unitário e a esfera de referência ao seu redor.

Nesta sequência as direções $\langle 100 \rangle$ foram utilizadas para construção da figura de polo.

Figura 30- Ângulos χ e η usados em projeções estereográficas.

Fonte: (ASM METALS HANDBOOK VOLUME 10, 1998)

Figura 31-Construção de uma figura de polo $\langle 100 \rangle$.

Fonte: (ALLUMATER, 2018).

É possível notar que vetores normais (na direção $\langle 100 \rangle$) as faces do cubo são projetadas no hemisfério norte da esfera de referência e depois estes pontos são todos conectados ao polo sul. O plano de projeção passa então a ser o plano equatorial e os pontos onde as linhas trespassem este plano se tornam a figura de polo representativa destas faces da célula unitária. Da mesma forma que um cristal unitário pode ser representado por uma figura de polo a sobreposição de várias figuras mostra a textura de um sólido policristalino. A figura 32 apresenta uma figura de polo para um uma textura aleatória (a), o mesmo que uma textura sem uma orientação preferencial, e uma figura de polo para uma textura acentuada (b).

Figura 32-Figura de polo para material sem textura (a) e para material com textura acentuada (b).

Fonte: (ALLUMATER, 2018)

As figuras de polo podem ser entendidas como sistemas de referência que levam em consideração dois sistemas de coordenadas, m relacionado ao objeto estudado por meio dos eixos $\{S_1S_2S_3\}$, e outro pertinente às orientações cristalográficas pelos eixos $\{C_1C_2C_3\}$ que é projetado no sistema S. Desta forma, as figuras de polo, assim como as funções de distribuição de orientação, atendem a necessidade de haver dois sistemas de referência para a correta interpretação da tendência de orientação preferencial (ENGLER & RANDLE, Introduction to Texture Analysis, 2010).

2.2.5 Função De Distribuição De Orientações Cristalográficas (FDOC)

A FDOC especifica a frequência de ocorrência (a probabilidade de encontrar) determinadas orientações (HKL) $\langle uvw \rangle$ em uma amostra de material. Esta probabilidade em uma amostra sem textura é igual a unidade. Na FDOC, a orientação de um cristal é definida por três ângulos de Euler, os quais constituem três rotações consecutivas que, aplicadas aos eixos $[100]$, $[010]$ e $[001]$ da célula cristalina do cristal, tornam os mesmos coincidentes com os eixos DL, DT e DN da chapa ou amostra do material respectivamente. A notação mais usada para os ângulos de Euler foi proposta por Bunge (H.J.Bunge, 1969) utilizando os ângulos ϕ_1 , Φ , ϕ_2 , mostrados na figura 33.

Figura 33- Definição dos ângulos de Euler conforme notação de Bunge.

(ResearchGate, 2019)

Observa-se que os índices do plano $\{hkl\}$ dependem somente dos ângulos Φ e ϕ_2 enquanto a direção $\langle uvw \rangle$ é função dos ângulos, é comum utilizar-se os ângulos (ϕ_1 , Φ , ϕ_2) no intervalo de 0 a $\frac{\pi}{2} \text{ rad}$. Isto permite a construção de gráficos em secções de ϕ_2 constante, onde os planos $\{hkl\}$ e as direções $\langle uvw \rangle$ que pertencem a estes planos estão representadas. Os planos são representados por linhas retas e as direções por pontos sobre as linhas.

A figura 34 mostra as orientações $\{hkl\} \langle uvw \rangle$ que, para chapas laminadas de materiais do sistema cúbico, pertencem as fibras DL e DN, em coordenadas de Bunge. A Secção de $\varphi_2=45^\circ$ contém para o sistema cúbico todas as Orientações de interesse.

A Função distribuição de Orientação $f(g)$ pode ser calculada a partir de figuras de polo diretas, obtidas por difração de raios X, ou pode ser medida diretamente, usando-se a técnica de EBSD. Ela é representada por secções onde φ_2 é constante com curvas de nível de isovalor.

A figura 35 mostra um exemplo de FDO em cortes a 0° e 45°

Figura 34-Secção de $\varphi_2=45^\circ$ onde são mostradas as orientações pertencentes às fibras DL e DN

(C.S da C Viana, 2003)

Figura 35- Exemplo de FDO de dois cortes 0° e 45°

(ResearchGate, 2019)

2.2.6 Textura de laminação a frio em materiais cúbicos de face centrada.

As texturas de laminação a frio de materiais CFC apresentam suas componentes principais ao longo de um tubo de orientações que se estende da orientação $\{110\} \langle 111 \rangle$ até $\{112\} \langle 111 \rangle$. Metais e ligas com baixa energia de falha de empilhamento (EFE) como latão- α , tendem a esvaziar a região do tubo próximo de $\{112\} \langle 111 \rangle$ enquanto materiais com alta energia de falha de empilhamento, como os aços ao carbono e o alumínio fazem o oposto. O cobre, com energia de falha de empilhamento intermediária, apresenta um tubo de orientações com intensidade aproximadamente cte e, por isso, é considerado possuir a textura CFC referência.

A figura 36 mostra as secções de $\phi_2=45^\circ$ das “FDOCs” do Alumínio, cobre e latão- α laminados a frio com grau de encruamento de 90% (redução de espessura em 90% sem recozimento intermediário). Superpondo-se o ábaco de $\phi_2=45^\circ$, mostrado na figura 34 constata-se o que foi dito acima. (C.S da C Viana, 2003)

Figura 36- Secções de $\phi_2=45^\circ$ das FDOCs de chapas laminadas 90% a frio para o (a) Alumínio (alta EFE), (b) Cobre e (c) Latão (baixa EFE).

(Bunge H. , 1982)

Algumas componentes típicas do tubo de orientação da textura de deformação dos materiais CFC recebem nomes próprios conforme mostra a tabela 7.

Tabela 7- Orientações pertencentes ao tubo de orientações CFC

Nome	Símbolo	Plano	Direção	ϕ_1	Φ	ϕ_2
Goss	G	011	100	90	90	45
Brass	B	011	211	55	90	45
S	S	123	364	59	37	63
Cobre	C	112	111	90	35	45
Dillamore	D	4 4 11	11 11 8	90	27,2	45
Cubo		001	100	45	0	45
Cubo gir.		001	110	90	0	45

(C.S da C Viana, 2003)

2 2 7 EBSD - MEV.

Difração de elétrons retro espalhados (EBSD) é uma técnica de caracterização cristalográfica e microestructural para estudar materiais cristalinos ou policristalinos. A técnica envolve a compreensão da estrutura, a orientação do cristal (textura) e fase dos materiais no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Tipicamente, é utilizado para explorar microestruturas, revelando textura, defeitos, morfologia dos grãos e deformação. Pode ser combinado com técnicas complementares dentro do MEV para discriminação de fase.

Tradicionalmente, estes tipos de estudos eram realizados utilizando difração de raios-X (DRX), difração de nêutrons e / ou de difração de elétrons em um Microscópio Eletrônico de Transmissão (TEM).

No EBSD um feixe estacionário de elétrons atinge uma amostra cristalina inclinada e os elétrons difratados formam um padrão em uma tela fluorescente. Este padrão é característico da estrutura cristalina e da orientação dos cristais onde o padrão foi gerado.

Através do EBSD é possível a determinação da macrotextura, microtextura e mesotextura. Com esta técnica se obtém informações mais precisas de orientação cristalográfica e microestrutural que fornecem subsídios para compreender o mecanismo de formação da distribuição preferencial e poder agir no processo obtendo uma textura favorável a diminuição da utilização de matéria prima.

A Técnica de Difração de elétrons retro espalhados (EBSD) utiliza elétrons retroespalhados que são os únicos que tem energia suficiente para causar luminescência em uma tela de fósforo ou sensibilizar uma emulsão fotográfica e efetivamente contribuir na formação de uma figura de difração no MEV f. Esta figura de difração é formada através das linhas de Kikuchi, conforme esquematizado na figura 28. (Hurley, 2003)

Figura 37-Formação da figura de KIKUCHI

Fonte: (Oxford instruments, 2007)

Estas linhas são formadas pelo espalhamento do feixe de elétrons, que incidindo nos planos cristalinos em todas as direções, sofrem espalhamento elástico. Quando a lei de Bragg é satisfeita cones de difração são formados, sendo que cada conjunto de planos cristalinos forma dois cones de difração: um proveniente do lado superior do plano e outro proveniente do lado inferior. A

intersecção do plano de Kikuchi com a tela fosforescente, colocado na frente da amostra, resulta em pares de linhas paralelas, uma clara e outra escura. Os elétrons espalhados inelasticamente contribuem para a formação do fundo “*background*” difuso.

A figura de difração é constituída por conjuntos de pares de linhas paralelas sobre um fundo difuso. A distância entre cada par de linhas é inversamente proporcional ao espaçamento interplanar da respectiva família de planos.

Os pontos de intersecção estão associados com os respectivos eixos das zonas de planos.

A imagem da tela fosforescente é capturada por uma câmara especial, sensível a pequenas quantidades de luz, colocada do lado externo em frente a uma janela transparente de vidro de chumbo. O vidro de chumbo permite a passagem da luz e absorve os raios x.

A imagem capturada é processada, o contraste é melhorado por meio da subtração do ‘*background*’, digitalizada e indexada automaticamente com o auxílio de um microcomputador (a indexação exige o conhecimento prévio da estrutura cristalina da fase analisada).

2 2 5 1 Potencialidades Do Método

- a) Amostras relativamente grandes, maiores que, por exemplo, 10 por 10 mm podem ser analisadas;
- b) Figuras de difração podem ser obtidas de microrregiões com diâmetro menor que 1 micron. A resolução espacial depende fortemente do número atômico do material que está sendo analisado, da diferença de potencial utilizada para acelerar o feixe de elétrons, da corrente da amostra e do tipo de filamento utilizado para a emissão de elétrons (uma DDP de 20Kv e corrente da amostra de 1nA com filamento de Tungstênio tem se uma resolução de 0,5microns);
- c) As orientações podem ser medidas com uma precisão relativa de cerca de 0,5°;
- d) Para medidas controladas por computadores, o tempo médio de cada medida fica entre 1 e 2 segundos. Isso permite que um grande número de medidas possa ser obtido e que áreas grandes sejam pesquisadas;

2 2 5 2 Principais Aplicações

- a) Medidas de orientação de grãos (microtextura e mesotextura).
- b) Identificação de fases
- c) Medidas de tensões internas

Os estudos de microtextura e mesotextura tem uma importância predominante como, por exemplo, na determinação da orientação cristalográfica de microrregiões.

Nas determinações de microestrutura utilizando o EBSD é medida a orientação do grão um a um.

Neste caso, os resultados também podem ser representados em figuras de polo, mas, além disso, a orientação de cada grão individualmente pode ser reconhecida no conjunto.

Na figura 38 temos o esquema da formação da figura de Kikuchi e na figura 39 o ciclo de indexação do EBSD.

Figura 38-Formação da figura de Kikuchi

Fonte: (Oxford instruments, 2007)

- O feixe de elétrons atinge a amostra
- O espalhamento do feixe produz elétrons viajando em todas as direções em pequeno volume (volume de excitação)
- Os elétrons que viajam na direção que satisfaz a equação de Bragg para um plano (hkl) formam as linhas de Kikuchi
- Os elétrons atingem o filme de fosforo e produzem luz
- A luz é detectada por uma câmara CCD e é convertida em imagem que é indexada.

Figura 39-Ciclo de indexação de EBSD

Fonte: (Oxford instruments, 2007)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 PROCEDIMENTOS ADOTADOS

Este estudo busca entender o comportamento da textura cristalográfica na chapa de alumínio laminado 3104 H19 nas etapas de conformação da lata de alumínio.

O laminado foi produzido em um laminador a frio e pelo uso de mais de um conjunto de rolos para atingir a espessura final em uma etapa. As bobinas variam em seu comprimento e as larguras são definidas pelo conjunto de ferramentas instalado na prensa de copos. A espessura final nominal do laminado é 0,270 mm.

A Tabela 08 apresenta a composição química do laminado obtida por espectrometria de absorção atômica e a composição química referência da liga 3104.

Tabela 8- Composição química liga AA3104

Laminado	Liga	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Ga	V
NBR 6834				0,05	0,8	0,8				
Fonte (ABAL, 2008)	3104	0,6	0,8	0,25	1,4	1,3	0,25	0,1	0,05	0,05
Laminado.	3104	0,5	0,42	0,29	0,87	0,72	0,08	---	--	--

Fonte: O Autor

Com o objetivo de entender detalhadamente as mudanças na textura do material conforme a deformação plástica progride no processo de DWI (*drawn and wall ironing*), amostras do laminado foram coletadas em diferentes etapas de conformação para geração de figuras de polo e estudo da textura como segue:

Chapa laminada 1 corpo de prova.

De cada um dos 5 estágios de conformação foram retirados 3 corpos de prova de 20 por 20 mm sendo:

Um corpo de prova na lateral do *blank* seguindo o sentido de laminação.

Um corpo de prova na lateral do *blank* a 45 graus do sentido de laminação

Um corpo de prova na lateral do *blank* a 90 graus do sentido de laminação.

Figura 40-Chapa de alumínio e Etapas progressivas de conformação utilizadas na obtenção de corpos de prova para análise de textura.

Fonte: Autor

Figura 41-Estágio 1 com a indicação dos ângulos onde se retirou as amostras.

Fonte: Autor

Os corpos de prova para a caracterização estrutural via MEV foram os mesmos utilizados para a geração dos gráficos de textura e EDS.

A preparação dos corpos de prova seguiu os critérios para preparação de corpos de prova para EBSD, que resumidamente consiste em: Lixamento em lixadeira circular com lixas novas a base de SiC na sequência de grana: 400, 600 e posterior polimento em politriz automática com diamante 9 micra, 6 micra, 3 micra e 1 micra e polimento com sílica coloidal em politriz automática, acabamento em politriz manualmente e posteriormente foram mergulhados em solução de ácido fluorídrico 5% por 20 segundos (com o objetivo de corroer a camada encruada na preparação), lavados com álcool etílico 92gl e secados com soprador de ar quente.

O lixamento com lixa 220 e 320 não foi realizado devido a espessura da chapa ser muito fina (0,27 mm) e a utilização dessas lixas deixou a amostra extremamente fina após o acabamento.

3 2 DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

3 2 1 Microscopia Eletrônica de Varredura EDS/EBSD

Coletou-se as imagens para caracterização estrutural e textura através de um microscópio eletrônico de varredura marca ZEISS modelo Auriga com sonda marca Oxford Modelo Nordys acoplada. Utilizou-se o software *Channel 5* (Oxford instruments HKL) para a análise da textura. Utilizou-se a voltagem de aceleração de 20Kv.

Figura 42- Microscópio Eletrônico de Varredura (SENAI OSASCO)

Fonte O Autor

Utilizou-se o método de elétrons secundários para a coleta de imagens para caracterização estrutural, obteve-se primeiramente imagens sem ataque e posteriormente com ataque químico com ácido fluorídrico 5%.

3 2 2 Microscópio Ótico

Utilizou-se o microscópio Olympus GX53 com analisador de imagem Olympus IA-G53 para a microscopia óptica.

Figura 43-Microscópio Ótico Olympus

Fonte: Website Olympus

Utilizou-se os mesmos corpos de prova da microscopia ótica para a análise no MEV conforme descrito acima, analisou-se os corpos de prova nas condições: polido e posteriormente polido e atacado.

3 3 ANÁLISES REALIZADAS

3 3 1 Análise de Textura Cristalográfica.

As secções abaixo descrevem os métodos e os equipamentos utilizados na caracterização da textura do laminado e dos *blanks* nos estágios de conformação da lata objeto do presente estudo.

Os parâmetros de aquisição da textura foram escolhidos de acordo com os melhores resultados obtidos mediante testes com a amostra conforme tabela 9.

As fases escolhidas par aquisição foram o alumínio, magnésio e cobre conforme tabela 10.

Optou-se por colocar o magnésio e cobre apenas como referência para aferição do ensaio.

Tabela 9-Parâmetros para aquisição:

Voltagem	20.00 kV
Inclinação da amostra em graus	70.09 °
Taxa de obtenção	81.02 %
Velocidade de aquisição	1.04 Hz

Fonte: O Autor.

Tabela 10- Fases escolhidas para aquisição.

Fase	Parâmetros de rede						Grupo espacial	Database
	a	b	c	alfa	beta	gama		
Alumínio	4.05 Å	4.05 Å	4.05 Å	90.00 °	90.00 °	90.00 °	225	HKL
Cobre	3.61 Å	3.61 Å	3.61 Å	90.00 °	90.00 °	90.00 °	225	HKL
Magnésio	3.21 Å	3.21 Å	5.21 Å	90.00 °	90.00 °	120.0 °	194	HKL

Fonte: O Autor.

O plano cristalográfico escolhido para a obtenção das figuras de polo foi o (111). Com os dados gerados do EBSD as figuras de polo foram obtidas e as funções de distribuição de orientações (FDOs) calculadas. Foram retiradas amostras dos cinco diferentes estágios progressivos de conformação e nos três ângulos ilustrados na figura 41 com o objetivo de se avaliar as alterações na textura durante a conformação. No total dezesseis figuras de polo foram geradas, uma no estado laminado e uma para cada estágio de conformação, em cada um dos três

ângulos escolhidos em relação à direção de laminação (0° , 45° e 90°). A direção de laminação foi visualmente determinada pelo fundo da lata e do copo, e os corpos de prova nos diferentes ângulos foram ensaiados para verificação de diferenças de textura após a deformação inicial da chapa.

3 3 2 Caracterização Microestrutural

Na caracterização microestrutural os laminados foram submetidos à análise em microscópio ótico e eletrônico. No primeiro identificaram-se compostos intermetálicos (precipitados) na matriz, e no segundo foi possível, por meio da técnica de espectroscopia de dispersão de energia, identificar semi quantitativamente os elementos presentes nestes compostos.

Microscopia Óptica

Um microscópio Olympus modelo GX53 acoplado a um sistema de digitalização de imagens foi utilizado para gerar as imagens de microscopia óptica. Uma amostra do plano da chapa foi confeccionada. Imagens foram obtidas em ampliações de 500 vezes.

Microscópio Eletrônico de varredura.

Realizou-se análise semi-quantitativa de composição química pela técnica EDS (*energy dispersive spectroscopy*) em microscópio eletrônico de varredura marca ZEISS modelo Auriga com sonda marca Oxford Modelo Nordys acoplada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As secções que seguem dedicam-se a mostrar os resultados das caracterizações realizadas no laminado da liga 3104-H19 nas etapas de conformação da lata de alumínio e compará-los com estudos relacionados a este material, sendo primeiramente a análise de textura cristalográfica, e posteriormente as características microestruturais.

4 1 TEXTURA CRISTALOGRÁFICA

As figuras de polo geradas por DRX das amostras retiradas do laminado nas diferentes etapas de conformação mostram que há mudança na textura

cristalográfica durante o processo de DWI especialmente para as amostras retiradas a 90° em relação à direção de laminação. As Figuras 44, 45 e 46 mostram as figuras de polo do plano cristalográfico (111), na direção de laminação (zero graus) figura 44, a 45° figura 45, e na direção transversal (90°) figura 46, durante as sucessivas deformações a frio ocorridas nas cinco etapas de conformação da lata. É possível notar que a zero graus houve pouca mudança nas figuras de polo da primeira à última etapa de conformação. Já nas figuras das amostras retiradas a 45° houve mudança. Uma rotação mais intensa da figura pode ser observada nas amostras retiradas a 90° , que ao final da quinta etapa se assemelha as figuras obtidas a 0 graus.

Figura 44- Figuras de polo geradas por DRX de amostras dos 5 estágios de conformação a 0° no plano (111).

Fonte: (MARTINS A. , 2014) Estudo Comparativo De Propriedades Mecânicas E Textura De Laminados Da Liga De Alumínio 3104-H19

Figura 45-Figuras de polo de amostras dos 5 estágios de conformação a 45o no plano (111)

Fonte: (MARTINS A. , 2014) Estudo Comparativo De Propriedades Mecânicas E Textura De Laminados Da Liga De Alumínio 3104-H19

Figura 46-Figuras de polo de amostras dos 5 estágios de conformação a 90o no plano (111)

Fonte: (MARTINS A. , 2014) Estudo Comparativo De Propriedades Mecânicas E Textura De Laminados Da Liga De Alumínio 3104-H19

As figuras de polo geradas por EBSD (figuras 47 a 49) das amostras retiradas do laminado nas diferentes etapas de conformação mostram alterações semelhantes às Obtidas por DRX conforme se esperava e conforme pode se observar na figura 47.

As figuras de polo retiradas do laminado e nas diferentes etapas de conformação a zero grau (direção de laminação) são similares, indicando texturas semelhantes, conforme podemos observar na figura 47, por outro lado observamos que nas amostras a 45 graus e a 90 graus há uma variação na textura a cada etapa de conformação, havendo uma “rotação” da figura de polo indicando uma rotação dos planos cristalinos, conforme podemos observar nas figuras 48 e 49.

Figura 47-Figuras de polo geradas por EBSD de amostras dos estágios de conformação a 0° no plano (111).

Fonte: O Autor

Figura 48- Figuras de polo geradas por EBSD de amostras dos estágios de conformação a 45° no plano (111).

Fonte: O autor

Figura 49- Figuras de polo geradas por EBSD de amostras dos estágios de conformação a 90° no plano (111).

Fonte: O autor

As figuras 50, 51 e 52 mostram o mapa de textura para os vários estágios e ângulos. Observou-se a semelhança da textura entre os mapas gerados na direção de laminação (zero graus) figura 50 onde temos a predominância da textura cobre (verde) e em menor quantidade a textura latão (marrom) em todos os estágios.

Nas figuras 51 e 52 temos a variação da textura nas etapas de conformação.

Legenda figuras 50, 51 e 52

Marrom	– Textura Latão (chapa)	$\{110\}<112>$ (deformação)
VERMELHO	- Textura Cubo	$\{001\}<100>$ (recristalização)
AZUL	- Textura GOSS	$\{110\}<011>$
VERDE	- Textura COBRE	$\{112\}<111>$ (deformação)

Figura 50-Mapas de textura para laminado e estágios a zero graus

Fonte: O autor

Observa-se na figura 51 a alteração da textura a medida que a conformação vai aumentando em cada estágio, no primeiro estágio observa-se a predominância da textura cobre (verde) e cubo (vermelha), para textura Cubo e Goss (azul) no segundo estágio, no terceiro estágio tem-se a predominância da textura Latão

(marrom), no quarto estágio tem-se uma mescla de texturas Latão, Cobre e Goss e no quinto estágio tem-se a predominância da textura latão e cobre.

Figura 51-Mapa de textura gerados por EBSD de amostras dos estágios de conformação a 45° no plano (111).

Fonte: O autor

Observa-se na figura 52 a alteração da textura a medida que a conformação vai aumentando em cada estágio, conforme observado na figura 51, onde no primeiro estágio observa-se a predominância da textura Cobre (verde) com a presença da textura Latão (marrom), no segundo estágio observa-se uma mescla da estrutura cobre (verde e latão (marrom) com a presença da textura Cubo (vermelha), no terceiro estágio tem-se ainda a predominância da textura cobre (verde) com o aumento da textura Cubo (vermelha) a diminuição da textura latão (marrom) e o surgimento da textura Goss (azul), no quinto estágio tem-se a predominância da textura Latão (marrom) e pequena quantidade das texturas Cobre (verde) e Cubo (vermelho).

Figura 52-Mapas de textura gerados por EBSD de amostras dos estágios de conformação a 90° no plano (111).

Fonte: O autor

Nas figuras 53, 54 e 55 tem-se o mapa de posição dos cristais no plano de laminação nos 5 estágios de conformação e nos 3 ângulos.

Referência de posição dos cristais.

Observa-se na figura 53 que no laminado tem-se a predominância de cristalitos nos planos (101) e (111), no primeiro estágio há um aumento de cristais no plano [101], no terceiro estágio há a predominância de cristais na posição (101)

com a presença de cristais na posição (001) e (111), no quarto estágio tem-se a predominância de cristalitos nos planos (101) e (111) o mesmo ocorrendo no quinto estágio.

Figura 53-Plano de laminação com figura de polo invertida gerada por EBSD de amostras dos estágios de conformação a 0° no plano (111).

Fonte: O autor

Observa-se na figura 54 que no primeiro estágio tem-se a predominância de cristalitos nos planos (001) e (111), no segundo estágio há um aumento de cristais no plano (001), no terceiro estágio há a predominância de cristais na posição (111) com a presença de cristais na posição (001) e (111), no quarto estágio tem-se a mescla de cristalitos nos planos (101), (111) e (001) o mesmo ocorrendo no quinto estágio, porém com cristalitos mais alinhados.

Figura 54-Plano de laminação com figura de polo invertida gerada por EBSD de amostras dos estágios de conformação a 45°

Fonte: O autor

Observa-se na figura 55 que no primeiro estágio tem-se a predominância de cristalitos nos planos (001) com a presença de cristalitos no plano (111), no segundo estágio há um aumento de cristais no plano (001), no terceiro estágio há o aumento da quantidade de cristalitos na posição (111) mesclados com cristais na posição [001] e com a presença de cristalitos no plano e (111), no quarto estágio tem-se a mescla de cristalitos nos planos (111) e (001) o mesmo ocorrendo no quinto estágio.

Figura 55-Plano de laminação gerado por EBSD de amostras dos estágios de conformação a 90° no plano (111).

Fonte: O autor

4.2 ANÁLISE DA MICROESTRUTURA.

Observou-se na figura 56, gerada por microscopia ótica, compostos intermetálicos (precipitados), com tamanhos e distribuição heterogênea predominante em contornos de grão (verde). A figura exibe a micrografia no estado laminado onde os compostos intermetálicos são evidenciados por tratamento de imagem. (VERDE) a tabela 11 mostra a porcentagem dos precipitados calculada por processamento de imagem.

Figura 56-Microestrutura no estado laminado com tratamento de imagem para evidenciar precipitados (verde)

Fonte: O autor

Tabela 11- Determinação da porcentagem de precipitados na matriz.

Referência	Estado laminado
Observação	Não atacado
Data	20/08/2018
Precipitados	2,08%

Fonte: O autor

Observou-se na figura 57, em amostra retirada a 45 graus do conformado do segundo estágio, a presença de dois precipitados diferentes: um de forma aproximadamente retangular e orientado e outro de formato irregular.

A composição química obtida por EDS evidencia a diferença entre os precipitados (gráfico 1).

Figura 57- Imagem MEV Evidenciando região onde se fez análise química EDS

Fonte: O autor

Gráfico 1-Gráfico EDS evidenciando comp. química spectrum 37 e 38.

Fonte: O autor

A figura 58 mostra o mapa de concentração de composição química gerado por MEV EDS onde a concentração dos elementos é evidenciada por cores. Observa-se uma matriz de alumínio (verde) com pequenos precipitados ricos em Mn no interior dos grãos (vermelho) e concentração de manganês em grandes precipitados em contorno de grão. Observa-se que a distribuição de Fe (azul) e Mn (vermelho) estão na mesma proporção e a concentração de Si (Roxo) está em menor proporção

Figura 58- Mapa de composição química obtido por MEV/EDS

Continuação figura 58

Mn K α 1

100 μ m

Fe K α 1

100 μ m

Continuação figura 58

Fonte: O autor

Os compostos intermetálicos encontrados podem ser diferenciados por sua morfologia e a sua composição química. Os dois principais compostos possuem características distintas, um com tendência de alongamento na direção de laminação, o outro com formato facetado. Presume-se que esta tendência de alongamento na direção de laminação é influenciada pela menor dureza do composto $\text{Al}_6(\text{Fe}, \text{Mn})$ em relação ao intermetálico $\text{Al}_{12}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}$. Em todas as micrografias dos laminados foi possível observar compostos com estes dois tipos de morfologia.

5 CONCLUSÕES

Observou-se que há semelhança da textura dos materiais retirados na direção de laminação em todos os estágios.

Há mudança significativa na textura do material conforme a deformação progride para as amostras com ângulos de 45 e 90 graus em relação a direção de laminação.

A alteração na textura nos ângulos se assemelha a uma “relaminação” do material que tende a assumir uma textura similar a existente a 0° quando consideradas as figuras de polo referência em DRX, porém as figuras de polo geradas por EBSD a 45° não apresentaram o mesmo comportamento, o que

possivelmente ocorreu devido a retirada das amostras próximas a base do copo, onde houve menor deformação.

A textura cristalográfica do laminado possui componentes similares em intensidades parecidas.

As principais componentes encontradas foram a latão $\{110\}\langle 112 \rangle$, a cobre $\{112\}\langle 111 \rangle$, a Goss $\{110\}\langle 011 \rangle$, e a cubo $\{001\}\langle 100 \rangle$.

Neste processo nota-se a intensificação das componentes cobre e majoritariamente latão conforme aumenta o trabalho a frio em detrimento a componente cubica que perde intensidade.

Esta alteração da textura em função de um processo termomecânico é referenciada como se uma componente consumisse a outra.

As componentes latão e cobre são típicas para materiais cúbicos de face centrada que passaram por processos de deformação a frio e são responsáveis pela tendência de orelhamento a 45° em relação a direção de laminação.

A componente cubo é típica de recristalização e causa a tendência de orelhamento a 0° e 90° . Essa textura balanceada do laminado gera uma tendência de pequeno orelhamento a 0° , 45° , 135° , 180° , 225° , e 315° , fazendo com que um material anisotrópico se comporte de forma análoga a um material isotrópico em processos de repuxo profundo.

Os mapas obtidos nos diferentes estágios de conformação indicam que há mudanças na textura do material conforme a deformação progride do corte e repuxo até a geometria do produto final.

A metalografia mostra que os dois principais compostos possuem características distintas, um com tendência de alongamento na direção de laminação, o outro com formato facetado. Presume-se que esta tendência de alongamento na direção de laminação é influenciada pela menor dureza do composto $\text{Al}_6(\text{Fe},\text{Mn})$ em relação ao intermetálico $\text{Al}_{12}(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{Si}$. Em todas as micrografias dos laminados foi possível observar compostos com estes dois tipos de morfologia.

REFERÊNCIAS

ABAL. (2004). *Fundamentos do Alumínio e Suas Aplicações*. São Paulo: ABAL.

- ABAL. (2006). Guia técnico do Alumínio. Em ABAL, *Guia técnico do Alumínio- Características Físico-químicas* (p. 183). São Paulo: ABAL.
- ABAL. (2008). *Coletânea de Normas técnicas de Alumínio e suas Ligas*. São Paulo: ABAL.
- ABAL. (28 de 02 de 2019). ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMINIO. Fonte: abal: <http://abal.org.br/estatisticas/nacionais/aluminio-primario/>
- ABRALATAS. (27 de 02 de 2019). ABRALATAS.ORG.BR. Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FABRICANTES DE LATAS DE ALTA RECICLABILIDADE: <http://www.abralatas.org.br/grafico/brasil-vendas-de-latas-para-bebidas-e-taxa-de-crescimento-anual-1990-a-2013/>
- ALLUMATER. (22 de 12 de 2018). ALLUMATER. Fonte: ALLUMATER: <HTTP://ALUMINIUM.MATTER.ORG.UK>
- ALUMINUM ASSOCIATION. (2007). *Rolling aluminum:From the Mine through the Mill*. Arlington: Aluminum Association.
- ASM METALS HANDBOOK VOLUME 10. (1998). Materials Characterization. Em A. INTERNATIONAL, *Materials Characterization* (p. VOLUME 10). ASM INTERNATIONAL.
- ASM METALS HANDBOOK VOLUME 2. (1992). Properties and Selection:Nonferrous alloys and special purpose Material. Em ASM, *ASM INTERNATIONAL HANDBOOK VOL 2* (p. sn). ASM.
- Bunge, H. (1982). *Texture Analysis in Material Science*. Butterworths.
- Bunge, H.-J. (1992). Texture analysis in material science. Em H.-J. Bunge, *Texture analysis in material science*.
- C.S da C Viana, A. S. (2003). Texturas de Deformação. Em *Textura e Relações de Orientação* (pp. 38,39,45). São Paulo: IPEN-.
- CALLISTER, W. (2006). *Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais*. Rio de Janeiro: LTC.
- ENGLER, O. (2012). Control exture and Earing in Aluminum Alloy AA 3105 Sheet For Packaging. *Materials Science and Engineering*, 69-80,.
- ENGLER, O., & RANDLE, V. (2010). Introduction to Texture Analysis. Em O. ENGLER, & V. RANDLE, *Introduction to Texture Analysis*. Boca Raton: CRC Press.
- FOGAZZI, W. (2000). Análise Microestrutural da Liga AA 3104 H19.

- FREITAS, F. (2003). Adequabilidade das Condições de Laminação de um Aço de Baixo Carbono a estampagem profunda. *Dissertação de Mestrado apresentada a Universidade Federal do. Fortaleza, Ceara, Brasil.*
- GANDHI, C. (1999). Effect of Homogenization on the Microstructural Development in D.C.Cast AA3104 Aluminum Alloy Used for Can Body Stock. *Effect of Homogenization on the Microstructural Development in D.C.Cast AA3104 Aluminum Alloy Used for Can Body Stock.* Kharagpur,, India.
- H.J.Bunge. (1969). *Mathematische metod texture.* Akademie Verlag.
- HOSFORD, W., & CADDELL, R. (1993). *Metal Forming.* New Jersey: Prentice Hall,.
- Hurley, P. a. (2003). *The application of EBSD to the study of substructural development in a cold rolled single-phase aluminium alloy.* Oxford: Acta Materialia.
- KAUFMAN, G. (2000). *Introduction to Aluminum Alloys and Tempers.* NEW YORK: ASM INTERNATIONAL.
- MARTINS, A. (03 de março de 2014). *Estudo comparativo de propriedades mecânicas e textura de laminados da liga de alumínio 31 4-H19.* São Paulo.
- MARTINS, P., & LAUGENI, F. (2005). *Administração da Produção.* São Paulo: Saraiva.
- Mártires, R. A. (2017). *Relatório estatístico do Alumínio.* Belén: Agência Nacional de Mineração.
- OTOMAR, H. (JANEIRO de 2010). Estudo Comparativo da Estampabilidade da Liga de Alumínio AA1050. *Dissertação de Mestrado.* São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Oxford instruments. (2007). *EBSD- Reference Manual.*
- PADILHA, A. (2000). *Materiais de Engenharia –Microestrutura e Propriedades.* Curitiba: Hemus.
- ResearchGate. (13 de Abril de 2019). Fonte: ResearchGate: <https://www.researchgate.net>
- Stolle Machinery. (26 de 2 de 2019). Fonte: stollemachinery .com: <https://www.stollemachinery.com>
- VASUDEVAN, A., & DOHERTY, R. (1989). *Aluminum Alloys –Contemporary Research and Applications:.* San Diego: Academic Press,.

YU, ..., BROOKS, C., & GOODRICH, S. (1993). The Effect of Cold Working and Annealing Practice on Earing in 3104 Al Alloy Sheet. Em .. YU, C. BROOKS, & S. GOODRICH, *Materials Characterization*, (pp. 251-259). janeiro.

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 e Tecnologia e Inovação**