

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**MARIA CLARA FERREIRA PEREIRA**

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E MICROESTRUTURAL DE UMA LIGA DE  
ALUMÍNIO EMPREGADA NA FABRICAÇÃO DE RECIPIENTES DE BEBIDAS,  
AO LONGO DAS DIVERSAS ETAPAS DO PROCESSO**

**BELO HORIZONTE**

**2025**

MARIA CLARA FERREIRA PEREIRA

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E MICROESTRUTURAL DE UMA LIGA DE  
ALUMÍNIO EMPREGADA NA FABRICAÇÃO DE RECIPIENTES DE BEBIDAS, AO  
LONGO DAS DIVERSAS ETAPAS DO PROCESSO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Profa. Dra. Elaine Carballo Siqueira

BELO HORIZONTE

2025

MARIA CLARA FERREIRA PEREIRA

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E MICROESTRUTURAL DE UMA LIGA DE  
ALUMÍNIO EMPREGADA NA FABRICAÇÃO DE RECIPIENTES DE BEBIDAS,  
AO LONGO DAS DIVERSAS ETAPAS DO PROCESSO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em:

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof(a). Dr(a) Elaine Carballo Siqueira Corrêa

---

Prof(a). Dr.(a) Aline Silva Magalhães

---

Prof. Dr. Wellington Lopes

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à minha mãe, Maria do Carmo, que sempre lutou com coragem e dedicação para que eu tivesse a oportunidade de me desenvolver por meio dos estudos.

Ao meu querido pai, Levy, em memória, que foi um grande incentivador dos meus sonhos e da construção da minha carreira.

À minha avó Enny, exemplo de força e resiliência, cujos ensinamentos me acompanharam em cada desafio.

Ao meu companheiro Denis, que, com apoio incondicional e generosidade, esteve ao meu lado em todos os momentos dessa jornada.

À minha madrinha Ana e saudosa sogra Ângela, que, pelo exemplo, me ensinou a enxergar os processos com mais leveza e serenidade.

À minha orientadora, professora Dra. Elaine Carballo, que, a partir do momento em que aceitou esse compromisso, ofereceu conhecimento, direcionamento preciso e apoio que foram essenciais para a realização deste trabalho.

Aos colegas do CEFET, pela convivência enriquecedora e pelas trocas constantes que marcaram cada semestre.

Aos técnicos de laboratório e responsáveis pela manutenção do departamento, que, sempre solícitos, tornaram possíveis os ensaios e análises realizados.

E, por fim, a todos que estiveram ao meu lado ao longo desse percurso — família, amigos de vida, do estágio e do trabalho —, deixo meu sincero agradecimento: sem vocês, essa caminhada não teria sido tão relevante para minha formação pessoal e profissional.

## RESUMO

O alumínio é amplamente empregado na indústria de manufatura, destacando-se na produção de embalagens metálicas, como latas para bebidas, devido às suas propriedades de leveza, resistência mecânica e boa conformabilidade. Entre as ligas comumente utilizadas, a 3104 H19, encruada por laminação a frio, apresenta características mecânicas e químicas adequadas para suportar as exigências do processo de fabricação e do uso final. Este trabalho teve como objetivo analisar a influência das diferentes etapas de conformação mecânica e ciclos térmicos, do processo produtivo de latas de bebidas sobre as propriedades do material, por meio da caracterização mecânica e microestrutural da liga. Foram conduzidos ensaios de tração, microdureza Vickers, compressão axial e análise microestrutural em amostras extraídas em pontos estratégicos ao longo da linha de produção, abrangendo desde a estampagem profunda até as etapas térmicas de secagem e cura, bem como as conformações finais de flange e pescoço. Os resultados indicam que há impactos nas propriedades mecânicas da liga ao longo do processo, com destaque para o aumento da dureza e da tensão de limite de resistência à tração nas regiões submetidas à conformação plástica intensa (formação do copo e do corpo). Além disso, os ciclos térmicos (forno de secagem da lavadora e o de secagem e cura do verniz interno), mesmo conduzidos abaixo da temperatura de recristalização (200-300 °C), promoveram alterações microestruturais que remetem a fenômenos de recuperação, afetando a resposta mecânica do material. Soma-se a isso, indícios de que na etapa de secagem da decoradora, houve um fenômeno que pode estar relacionado ao envelhecimento, devido ao aumento dos limites de resistência à tração e da microdureza. Tais observações contribuem para uma compreensão do comportamento da liga 3104 H19 durante o processamento, porém, visando o aprimoramento dos parâmetros térmicos e mecânicos críticos ao desempenho estrutural da embalagem, sugere-se uma continuidade do estudo ampliando o espaço amostral e utilizando técnicas mais específicas de caracterização. Dessa forma, o controle de processos

**Palavras chave:** Liga de alumínio 3104 H19, Fabricação de latas, Propriedades mecânicas, Análise microestrutural.

## ABSTRACT

Aluminum is widely employed in the manufacturing industry, particularly in the production of metal packaging such as beverage cans, due to its low density, mechanical strength, and good formability. Among the commonly used alloys, 3104 H19—strain-hardened by cold rolling—exhibits mechanical and chemical characteristics suitable for withstanding the demands of both the manufacturing process and the final application. This study aimed to analyze the influence of the different stages of the can manufacturing process on the material properties through mechanical and microstructural characterization of the alloy. Tensile tests, Vickers hardness measurements, axial compression tests, and microstructural analyses were carried out on samples extracted from strategic points along the production line, covering stages from deep drawing to the thermal cycles of drying and curing, as well as the final forming operations of flanging and necking. The results indicate that the alloy's mechanical properties are affected throughout the process, particularly with increased hardness and ultimate tensile strength in regions subjected to intense plastic deformation (such as cup and body formation). Furthermore, thermal cycles (drying oven after washing and curing oven for internal coating), although conducted below the recrystallization temperature, led to microstructural changes associated with recovery phenomena, influencing the mechanical response of the material. In addition, there is evidence suggesting that the drying stage in the decorator oven may have induced a phenomenon related to aging, as observed by the increase in tensile strength and microhardness. These findings contribute to the understanding of the behavior of the 3104 H19 alloy during processing. However, with a view to optimizing the thermal and mechanical parameters critical to the structural performance of the packaging, further research is recommended, involving a broader sampling scope and the application of more specific characterization techniques.

**Key-words:** 3104 H19 alloy, Can manufacturing, Mechanical Properties, Microstructural analysis

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1 - Módulo de Young versus fração em peso de elementos ligantes no alumínio.</b>	<b>15</b>
<b>Figura 2 - Interação entre discordância e precipitado.</b>	<b>16</b>
<b>Figura 3 - Diagrama de tensão versus temperatura de trabalho de algumas ligas.</b>	<b>18</b>
<b>Figura 4 - Processo de solubilização com resfriamento brusco.</b>	<b>19</b>
<b>Figura 5 - Composto coerente ao fim do processo de envelhecimento.</b>	<b>20</b>
<b>Figura 6 - Formatos de lata de alumínio produzidos no Brasil.</b>	<b>23</b>
<b>Figura 7 - Fluxograma do processo de fabricação.</b>	<b>24</b>
<b>Figura 8 - Processo de estampagem do copo.</b>	<b>25</b>
<b>Figura 9 - Máquina Bodymaker.</b>	<b>25</b>
<b>Figura 10 - Sistema de conformação da formadora do corpo.</b>	<b>26</b>
<b>Figura 11 - Dinâmica de estiramento do copo na bodymaker.</b>	<b>27</b>
<b>Figura 12 - Esquema da lavadora e os estágios.</b>	<b>28</b>
<b>Figura 13 - Decoradora do rótulo e s rolos de impressão.</b>	<b>29</b>
<b>Figura 14 - Aplicação do verniz interno.</b>	<b>29</b>
<b>Figura 15 - Necker: Equipamento de formação do pescoço.</b>	<b>30</b>
<b>Figura 16 - Ferramentas usadas na conformação do pescoço e flange.</b>	<b>31</b>
<b>Figura 17 - Evolução global da lata em seu processo de fabricação.</b>	<b>31</b>
<b>Figura 18 - Fluxograma do processo de análise das amostras de cada etapa.</b>	<b>32</b>
<b>Figura 19 - Esquema de retirada de amostra para cada etapa de análise.</b>	<b>33</b>
<b>Figura 20 - Fluxograma do processo de retirada das amostras de alumínio.</b>	<b>34</b>
<b>Figura 21 - Dimensões do corpo de prova de tração em milímetros.</b>	<b>34</b>
<b>Figura 22 - Equipamento de ensaio de tração: SHIMADZU AG-X 10kN.</b>	<b>35</b>
<b>Figura 23 - Amostra a partir do comprimento da lata.</b>	<b>36</b>
<b>Figura 24 - Lâminas para autoclavagem.</b>	<b>37</b>
<b>Figura 25 - Microscópio óptico Fortel KONTROL.</b>	<b>38</b>
<b>Figura 26 - Microdurômetro Vickers SHIMADZU HV-2.</b>	<b>38</b>
<b>Figura 27 - Axial load tester , AXL 3050.</b>	<b>39</b>
<b>Figura 28 - Avaliação da resistência mecânica do material a cada etapa do processo.</b>	<b>42</b>
<b>Figura 29 - Avaliação da ductilidade do material a cada etapa do processo.</b>	<b>42</b>
<b>Figura 30 - Análise MEF das etapas de estampagem do alumínio.</b>	<b>46</b>
<b>Figura 31 - Microscopia óptica da bobina e copo formado.</b>	<b>47</b>
<b>Figura 32 - Microscopia óptica progressões (P1, P2 e P3) em duas ampliações.</b>	<b>49</b>

<b>Figura 33 - Microscopia óptica entrada e saída da lavadora.</b>	<b>50</b>
<b>Figura 34 - Microscopia óptica saída da Decoradora.</b>	<b>51</b>
<b>Figura 35 - Microscopia óptica entrada e saída do IBO.</b>	<b>52</b>
<b>Figura 36 - Microscopia óptica saída do Necker.</b>	<b>53</b>
<b>Figura 37 - Gráfico das médias de Microdureza Vickers.</b>	<b>54</b>
<b>Figura 38 - Avaliação mecânica em compressão a cada etapa do processo.</b>	<b>57</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1 - Propriedades do alumínio puro (1xxx).</b>	<b>13</b>
<b>Tabela 2 - Família das ligas de alumínio trabalhadas mecanicamente.</b>	<b>14</b>
<b>Tabela 3 - Alguns elementos e a principal contribuição para a propriedade da liga.</b>	<b>14</b>
<b>Tabela 4 - Alguns processos de conformação aplicados ao alumínio.</b>	<b>17</b>
<b>Tabela 5 - Ligas de alumínio em função da condição metalúrgica.</b>	<b>17</b>
<b>Tabela 6 - Composição química dos elementos da liga AA3104.</b>	<b>33</b>
<b>Tabela 7 - Parâmetros do ensaio de caracterização por microdureza.</b>	<b>39</b>
<b>Tabela 8 - Propriedades mecânicas em tração.</b>	<b>41</b>
<b>Tabela 9 - Resultados da análise MEF.</b>	<b>46</b>
<b>Tabela 10 - Microdureza Vickers a cada etapa do processo.</b>	<b>54</b>
<b>Tabela 11 - Tensão de compressão por etapa do processo e desvio padrão.</b>	<b>56</b>

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	
10	
<b>2 OBJETIVOS</b>	<b>11</b>
2.1 Objetivo geral	11
2.2 Objetivos específicos	11
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>12</b>
3.1 Breve histórico do alumínio	12
3.2 Propriedades do alumínio e suas ligas	12
3.3 Estabilidade térmica e tratamentos térmicos mais utilizados	18
3.4 Características gerais da microestrutura das ligas de alumínio	21
3.5 Breve resumo do mercado brasileiro de latas	22
3.6 Processo de fabricação das latas de alumínio para bebidas	23
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>32</b>
4.1 Descrição geral do trabalho a ser desenvolvido	32
4.2 Materiais	33
4.3 Métodos	34
4.3.1 <i>Caracterização mecânica por tração</i>	34
4.3.2 <i>Caracterização microestrutural</i>	36
4.3.3 <i>Caracterização por microdureza Vickers</i>	38
4.3.4 <i>Caracterização mecânica por compressão</i>	39
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>41</b>
5.1 Caracterização mecânica por tração	41
5.2 Caracterização microestrutural	47
5.3 Caracterização por microdureza	53
5.4 Caracterização mecânica por compressão	56
<b>6 CONCLUSÃO</b>	<b>59</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>60</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No processo de fabricação de latas de alumínio, o maior desafio é a obtenção de matéria prima. Somente em 1982, o Brasil obteve tecnologia suficiente para nacionalizar a produção de alumínio primário, permitindo assim o surgimento das indústrias de chapas e outros produtos semiacabados. Isso em decorrência do incentivo à utilização desse material em detrimento dos demais materiais, como aços, que antes eram importados e chegavam ao mercado com custos e prazo de entrega elevados.

A primeira fábrica de latas de alumínio só iniciou suas atividades em 1986, na cidade de Pouso Alegre, em Minas Gerais, depois de muito aperfeiçoamento no processo produtivo do alumínio laminado para que se alcançasse as propriedades necessárias para usá-lo como matéria prima. O impacto no setor de embalagens foi tão positivo que chegou a apresentar um aumento anual de demanda de aproximadamente 30%. No ano de 2006 o setor alcançou 10 bilhões de latinhas vendidas e, devido ao alto índice de reciclagem (com quase 100% do volume produzido retornando como matéria-prima), a competitividade do alumínio no mercado é ainda mais elevada, especialmente por combinar desempenho técnico e sustentabilidade. Concomitante a isso, houve a valorização das cooperativas e dos grupos de catadores de materiais recicláveis (ABRALATAS). A partir daí, ocorreram muitas inovações de tamanhos, rótulos e tecnologias utilizadas, sendo ainda hoje uma grande demanda na indústria de embalagens.

Mesmo sendo um produto popular no mercado, o conhecimento técnico de cada etapa do processo ainda é propriedade das grandes fabricantes. Para fabricar uma lata a partir de uma chapa de alumínio, são etapas com variáveis sensíveis, ferramentais de alta performance, além da aplicação de conformação mecânica, ciclos térmicos nos fornos de secagem e cura dos vernizes. Assim como é importante o controle das variáveis de processo, é de suma importância entender também o efeito de cada uma delas em relação às propriedades do material, de forma a garantir que o produto final atenda às especificações técnicas exigidas por cada cliente, reduzindo retrabalhos e perdas.

Nesse sentido, o presente trabalho propõe uma análise exploratória desses efeitos a cada etapa do processo de fabricação de embalagens de alumínio para bebidas, identificando a evolução das propriedades mecânicas e microestruturais ao longo do processo.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

A partir das propriedades gerais das ligas de alumínio e do processo de fabricação de latas de bebida desse material, o presente trabalho visa identificar o efeito de cada etapa de deformação plástica e ciclos térmicos nas propriedades mecânicas do material e mapear a sua evolução durante o processo.

### **2.2 Objetivos específicos**

Considerando o estudo do processo produtivo e os efeitos sobre o material, foram conduzidas as seguintes análises para as etapas previamente estabelecidas:

- Caracterização das propriedades de resistência à tração, compressão e deformação superficial por meio da dureza superficial;
- Análise de alterações microestruturais e sua evolução, por microscopia óptica;
- Correlação das propriedades caracterizadas e dos resultados encontrados dos ensaios visuais e mecânicos;
- Estabelecimento em termos qualitativos da amplitude de impacto de cada etapa às propriedades da liga de alumínio empregada.

As etapas que serão retiradas as amostras consistem; bobina, formação do copo, formação do corpo, entrada e saída da lavadora, entrada e saída da decoradora, entrada e saída do forno de secagem do verniz interno e, finalmente, entrada e saída da formadora do pescoço. Essas análises visam ampliar o entendimento sobre os efeitos do processamento industrial na liga 3104 H19, possibilitando a previsão de seu comportamento mecânico e o aprimoramento do controle de processos na fabricação do produto final.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 Breve Histórico do Alumínio**

De acordo com a Associação Brasileira do Alumínio (ABAL,2007), um dos elementos mais abundantes na crosta terrestre é o alumínio, mas se tornou popular há cerca de 150 anos na indústria metalúrgica. Só foi possível a sua produção industrial graças ao processo de refino da Bauxita (Bayer) e à descoberta do processo de obtenção do alumínio metálico a partir da eletrólise da alumina (Hall-Hérault) (BARBOSA,2014).

No Hemisfério Sul, sua produção se deu a partir do ano de 1945, na cidade de Ouro Preto em Minas Gerais, no qual foi produzido o primeiro lingote pela fábrica Elquisa. Atualmente, o alumínio segue as ligas ferrosas como os metais com maior utilização no mercado, devido à sua combinação de propriedades que resultam em versatilidade de aplicações e excelente trabalhabilidade (ABAL,2007).

#### **3.2 Propriedades do Alumínio e suas Ligas**

Com uma pureza de aproximadamente 99,80%, o alumínio comercial apresenta ponto de fusão de 660°C. Já as ligas de alumínio, fundem a uma temperatura inferior por apresentar outros elementos em sua composição. Seu baixo peso específico, uma das características que favorecem sua aplicação em aeronaves, é aproximadamente 2,70 g/cm<sup>3</sup>, 35% do peso específico do aço (ABAL,2007).

A alta resistência à corrosão do alumínio é explicada pelo fato dos átomos da superfície do material, interagir com o oxigênio atmosférico formando uma película de décimos de milionésimos de polegada de óxido de alumínio, que é inerte e impede a progressão do processo corrosivo. Essa película fina é incolor e não é quebradiça, como a película de óxido de ferro, possibilitando uma proteção mais eficiente (ASM, 1993).

De forma sucinta, a tabela 1 apresenta algumas propriedades do alumínio puro.

**Tabela 1 - Propriedades do alumínio puro (1xxx).**

<b>Propriedades</b>	<b>Dados</b>
Densidade g/cm <sup>3</sup>	2,70
Temperatura de fusão (°C)	660
Módulo de elasticidade (MPa)	70.000
Coefficiente de dilatação térmica (L/°C)	23.10 <sup>-6</sup>
Condutibilidade térmica a 25°C (Cal/cm/°C)	0,53
Condutibilidade elétrica (%IACS)	61

Fonte: Adaptado de ABAL, 2007.

As ligas podem ser divididas em dois grupos: os que são trabalhadas mecanicamente e as ligas fundidas. Ainda assim há uma subdivisão se tratando das que as ótimas propriedades mecânicas são obtidas por tratamento térmico e as que não respondem a esse mesmo processo e, portanto, sua propriedade mecânica é proporcional ao trabalho mecânico e por conseguinte ao grau de encruamento da microestrutura. Em relação às ligas fundidas a presença de elementos de liga e as fases presentes irão determinar suas propriedades (ABAL,2007).

O alumínio fundido é capaz de dissolver diversos outros elementos e manter a solução sólida em uma ampla faixa de temperatura, formando as ligas de alumínio, com propriedades específicas para cada tipo de aplicação. Os elementos de liga são importantes na estrutura da liga pois além de definir propriedades físicas, podem formar diversas microestruturas de acordo com a concentração. Para padronizar, as ligas são divididas em famílias que são apresentadas na tabela 2.

**Tabela 2 - Família das ligas de alumínio trabalhadas mecanicamente.**

<b>Liga</b>	<b>Característica</b>
1XXX	Composição controlada e pura utilizada preferencialmente para indústria elétrica e química
2XXX	Cobre é o principal elemento de liga seguido do magnésio. Frequentemente utilizada na indústria de aeronaves.
3XXX	O Manganês é o principal elemento de liga. Aplicada na arquitetura e em diversos outros produtos, como embalagens de bebidas.
4XXX	Silício é o principal elemento de liga. Sendo empregadas em rodas e varetas de solda.
5XXX	Magnésio é o principal elemento de liga. Utilizada em cascos de barcos e outros produtos que são expostos a ambientes marinhos.
6XXX	Magnésio e Silício são os principais elementos de liga. Comumente utilizada em extrusões arquitetônicas.
7XXX	Zinco é o principal elemento de liga. Mas além dele pode ser identificado elementos como cobre, magnésio, cromo e zinco. Usado em componentes de aeronaves e aplicações que exigem altas resistências.
8XXX	Apresenta composição finas de lítio. Caracterizando diversas composições.
9XXX	Não especificado.

Fonte: Adaptado de ASM, 1993.

Os elementos com alta solubilidade no alumínio são: magnésio, cobre, silício, zinco, lítio, manganês, germânio e prata. Já o ferro, níquel, cromo e titânio são considerados pouco solúveis no alumínio, formando compostos intermediários (SILVA, 2017). Na tabela 3, apresenta-se o elemento químico e sua principal contribuição em relação às propriedades das ligas fundidas.

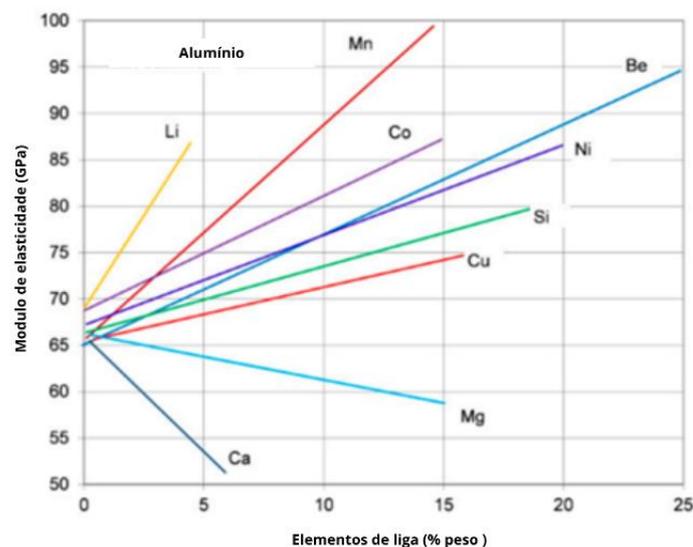
**Tabela 3 - Alguns elementos e a principal contribuição para a propriedade da liga.**

<b>Elemento (s)</b>	<b>Principal impacto</b>
Mg, Fe, Mn	Aumento de resistência por solução sólida
Cu	Aumento da usinabilidade
Si	Aumento da resistência à corrosão
Mn, Si	Aumento da fluidez de fundição

Fonte: Adaptado de ABAL, 2007.

Nesse sentido, os elementos de liga são determinantes na microestrutura por possibilitarem formação de solução sólida, refino de grão, modificações nas fases metálicas e intermetálicas, etc. Quando os elementos de liga formam uma solução sólida, as propriedades do material, como o módulo de elasticidade, são determinadas a partir das interações atômicas e sua natureza. Já quando há a presença de um precipitado, sua influência neste parâmetro se dá pela fração volumétrica e pelo módulo intrínseco às suas respectivas fases. A figura 1 apresenta a fração em peso dos elementos de liga no alumínio e sua influência no módulo de elasticidade (CZERWINSKI; 2020).

**Figura 1 - Módulo de Young versus fração em peso de elementos ligantes no alumínio.**

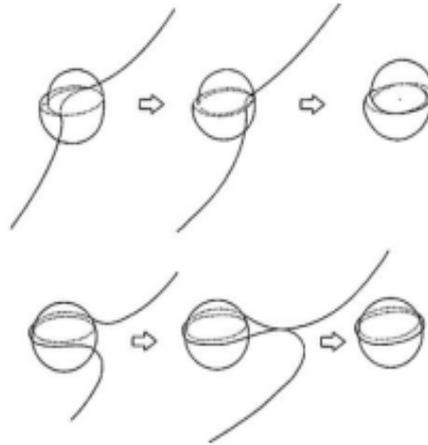


Fonte: CZERWINSKI, 2020.

Os átomos do soluto causam uma distorção da rede cristalina que gera tensões residuais, reduzindo o deslocamento de discordâncias e afetando a resistência mecânica do material. Por conseguinte, durante o aquecimento, os átomos dos elementos de liga tendem a migrar por difusão para sítios atômicos condizentes ao tamanho do seu raio, diminuindo a energia de deformação, além de imobilizar as discordâncias das redes cristalinas (CZERWINSKI, 2020).

Com base nisso pode ocorrer de a discordância provocar o corte de um precipitado por cisalhamento, quando o diâmetro do átomo de precipitado é pequeno (coerente), ou contornar o precipitado quando a distância entre dois átomos do precipitado é grande (incoerente). Os dois fenômenos estão ilustrados na figura 2.

**Figura 2 - Interação entre discordância e precipitado.**



Fonte: Adaptado de SILVA, 2017.

Uma das propriedades mais importantes para a aplicação desse material na indústria alimentícia é não apresentar toxicidade, permitindo o uso na fabricação de equipamentos que entram em contato direto com alimentos e também usado em embalagens e outros utensílios no geral (ABAL, 2007).

Por fim, tendo em vista todas as características físicas e químicas do alumínio, o alumínio pode ser utilizado em diversos processos de conformação que podem ser classificados em mecânicos ou metalúrgicos, de acordo com os parâmetros: o mecânico envolve aplicações de forças externas, pode ser em temperaturas baixas ou elevadas (sempre inferior à temperatura de fusão); o metalúrgico envolve aplicação de forças externas juntamente com o aquecimento podendo ser em temperaturas abaixo do ponto de fusão do material (REGADA; 2015).

Logo, os processos de conformação plástica podem ser classificados com base nos critérios de tipo de força externa e da temperatura de trabalho. Assim, se utilizou desses parâmetros para classificar e apresentar alguns processos aplicados ao alumínio, na tabela 4.

**Tabela 4 - Alguns processos de conformação aplicados ao alumínio.**

<b>Processo</b>	<b>Força predominante</b>	<b>Temperatura de trabalho</b>	<b>Aplicações</b>
Laminação	Compressão direta	A frio/ a quente	Placas, chapas, barras
Trefilação	Compressão indireta	A frio	Barras, arames, fios, tubos
Forjamento	Compressão direta	A frio/ a quente	Peças forjadas
Estampagem (profunda)	Compressão direta na região de aplicação do punção e indireta no flange	A frio/ a quente	Peças grandes estampadas a partir de chapas
Calandragem	Flexão	A frio	Tubos

Fonte: Adaptado de REGADA, 2015.

Cada processo citado, contribui para as propriedades mecânicas do produto final, de acordo com o controle e combinação das variáveis de processamento e o tipo de tensão utilizada. A escolha dessas determina o resultado final da microestrutura, mudança de fase e propriedades mecânicas.

De acordo com a variação de parâmetros de processamento e as condições metalúrgicas, a que o material é submetido, pode-se classificar as ligas de alumínio em cinco estados distintos, que estão apresentados na tabela 5.

**Tabela 5 - Ligas de alumínio em função da condição metalúrgica.**

<b>Classificação</b>	<b>Estado</b>
F	Bruto de vazamento
O	Recozido: aplica-se em laminados que passaram pelo processo de recristalização
H	Encruado: produtos endurecidos por conformação plástica
W	Solubilização: aplicado a ligas para posterior envelhecimento.
T	Tratado termicamente.

Fonte: SILVA, 2017.

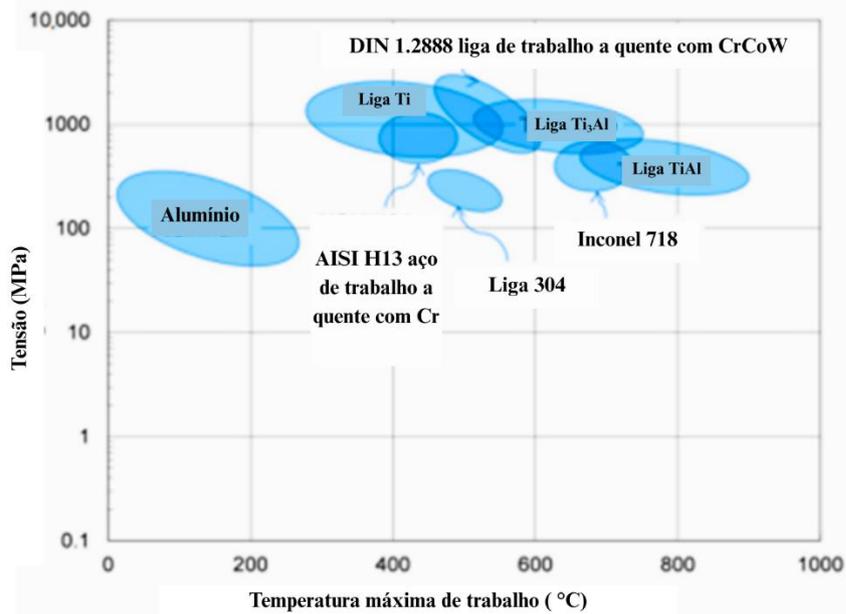
A partir de propriedades e processamentos, o alumínio e suas ligas são empregados em vários setores produtivos sendo que será visto mais adiante o seu uso em indústrias de embalagem para bebidas, mais especificamente, as latas de alumínio.

### 3.3 Estabilidade Térmica e Tratamentos Térmicos mais Utilizados

Ao selecionar o material para um projeto mecânico é fundamental conhecer seu comportamento nas condições de trabalho a que será submetido. Ressalta-se ainda sua estabilidade em relação às variações de temperatura de trabalho, isto é, a capacidade do material em manter suas propriedades quando exposto ao aumento ou declínio de temperatura, em um intervalo de tempo (CZERWINSKI, 2020).

Devido ao baixo ponto de fusão do alumínio (660°C, aproximadamente) quando comparado com outras ligas metálicas, seu uso ainda é restrito a baixas variações de temperatura. A partir disso, analisa-se na figura 3 a comparação entre a tensão (MPa) e a variação de temperatura entre o alumínio e as ligas resistentes termicamente e pode-se concluir que a temperatura máxima de trabalho do alumínio é de até 300°C.

**Figura 3 - Diagrama de tensão versus temperatura de trabalho de algumas ligas.**



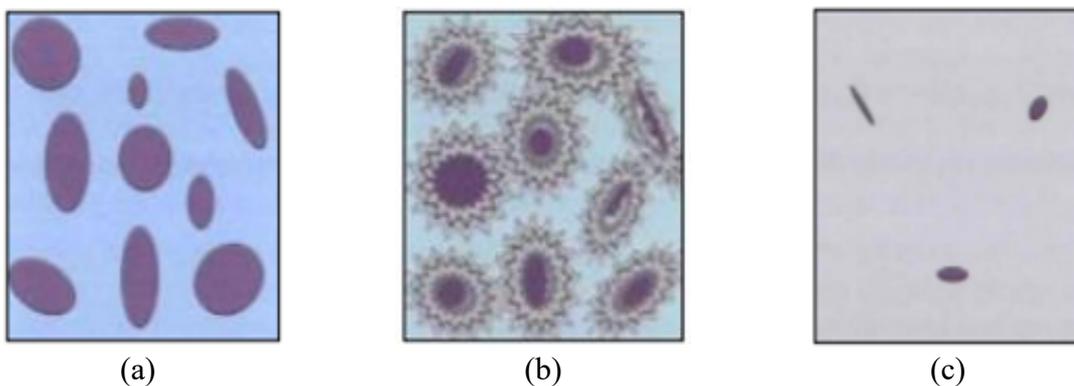
Fonte: CZERWINSKI, 2020.

Dessa forma, a alteração de propriedades do alumínio varia de acordo com sua composição química e microestrutura inicial, a qual pode ser controlada após o processo de fabricação. Outro fator importante a ser considerado, além da temperatura exposta, é o intervalo de tempo em que ocorre a exposição, pois isso determinará as mudanças microestruturais que afetam diretamente as propriedades do material (CZERWINSKI, 2020).

Se tratando da aplicação de tratamentos térmicos para otimização de propriedades mecânicas, o processo feito com as ligas que são submetidas ao tratamento térmico passa, basicamente, por três etapas sendo elas: (1) Solubilização das fases solúveis entre si; (2) Resfriamento brusco e (3) Envelhecimento.

A solubilização consiste em aquecer a liga que inicialmente apresenta mais de uma fase com precipitado, até a temperatura em que se observa somente uma fase (todos os elementos em solução sólida) e posteriormente aplicar um processo de resfriamento, em geral brusco para evitar precipitação, formando uma solução denominada de supersaturada. Ao fim do processo, caso sejam proporcionadas as condições termodinâmicas, a liga tende a voltar para seu estado original, formando o precipitado. A figura 4 a seguir ilustra a microestrutura de uma liga durante as etapas do processo descrito (SILVA, 2017).

**Figura 4 - Processo de solubilização com resfriamento brusco.**



(a) Microestrutura com precipitados, (b) Dissolução dos precipitados (c) Após o resfriamento brusco.

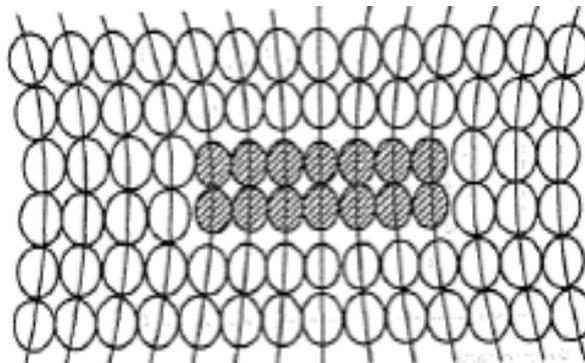
Fonte: Adaptado de SILVA, 2017.

Em relação ao processo de precipitação ou envelhecimento, este é muito utilizado ao se aplicar endurecimento por precipitação, apresentando duas variáveis importantes: tempo e

temperatura, os quais são definidos de acordo com a composição química da liga e com a natureza do composto químico que se deseja precipitar. Após a etapa de solubilização, o envelhecimento ocasionará a precipitação de elementos previamente determinados que exercerão impacto nas propriedades mecânicas da liga, de forma a aumentar sua resistência mecânica e fluência.

Durante o processo, a movimentação dos átomos ocorre no sentido de formar as zonas denominadas "Guinier-Preston", que são átomos que se aglomeram de forma coerente, formando o pré-precipitado. Em seguida, aquece-se o material de forma que ocorra a solubilização dessas zonas formando agrupamentos maiores e de composição definida e distinta da composição de equilíbrio. Após isso, ocorre a precipitação do composto coerente e semi-coerente, e consequente distorção da rede cristalina, promovendo o surgimento de tensões internas que ocasionam o endurecimento do material. A figura 5 apresenta esquematicamente o precipitado coerente em que é possível identificar que manteve o mesmo arranjo cristalino do alumínio, sem grandes distorções como o precipitado incoerente (SILVA; 2017).

**Figura 5 - Composto coerente ao fim do processo de envelhecimento.**



Fonte: SILVA, 2017.

Pode ocorrer de, intencionalmente, ocorrer a precipitação de compostos incoerentes pois eles vão conferir maior resistência à corrosão sob tensão da liga e otimizar a condução elétrica, mesmo que ocasione uma leve perda das propriedades mecânicas (SILVA, 2017).

Além desses processos, podem ser aplicados o recozimento pleno ou parcial, o primeiro promoverá uma recristalização completa da microestrutura, conferindo um aumento da tenacidade e o segundo promoverá uma recristalização parcial permitindo a obtenção de uma microestrutura endurecida com maiores alongamentos de grão. Por fim, em algumas ligas da família 5xxx, é feita a estabilização para impedir o processo de envelhecimento natural, com mudanças de propriedades mecânicas, à temperatura ambiente (ABAL; 2007).

### 3.4 Características Gerais da Microestrutura das Ligas de Alumínio

Todo alumínio utilizado passa pelos processos de fundição e de conformação mecânica, ou ainda tratamento térmico, levando a uma série de alterações microestruturais. As alterações comumente encontradas consistem em:

- Alteração de composição ou da estrutura cristalina das fases devido às reações peritéticas;
- Solução ou mais fases solúveis e esferoidização ou coalescência que ocasionam a redução da energia superficial;
- Precipitação de elementos de liga devido ao aquecimento da solução supersaturada;
- Fragmentação mecânica das fases intermetálicas frágeis e alinhamento dessas partículas na direção do trabalho da força;
- Deformação do contorno de grão e subsequente recuperação ou recristalização (ASM, 1993).

Cada liga de alumínio apresenta características microestruturais distintas devido aos elementos de liga. Por isso, cada análise deve levar em consideração a composição química que o material apresenta.

A liga pertencente à família 1xxx, alumínio puro (99%), apresenta inclusões de Ferro e Silício que estão sempre presentes, sendo que o primeiro apresenta baixa solubilidade no alumínio. Podem ser identificadas fases de alumínio-ferro ou alumínio-ferro-silício, sendo elas  $\text{FeAl}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{SiAl}_{12}$ , ou  $\text{Fe}_2\text{Si}_2\text{Al}_9$ , respectivamente (ASM; 1997).

As ligas de cobre-alumínio (2xxx) são mais complexas de identificação devido aos diferentes aditivos utilizados para controle da estrutura de grão, resistência a corrosão e tensão. Devido à solução, a temperatura de tratamento térmico se aproxima da linha de equilíbrio com a fase sólida.

Nas ligas de alumínio-manganês (3xxx), as fases dominantes são  $(\text{Mn,Fe})_6$  e  $(\text{Fe,Mn})_3\text{SiAl}_{12}$ . O manganês encontra-se como solução supersaturada no núcleo da estrutura dendrítica primária e após o ciclo térmico, de forma precipitada. No geral, são estruturas mais achatadas ou alongadas, quando comparadas à família 1xxx. Algumas ligas podem apresentar Magnésio em sua composição química devido à sua afinidade com o Silício (ASM; 1997).

A microestrutura das ligas de alumínio-Silício (4xxx) depende da sua uniformidade inicial, quando no estado fundido. Nesse estado, apresenta silício elementar e a fase  $Fe_2Si_2Al_9$ . Ao aplicar tratamento térmico na liga, ocorre a coalescência e esferoidização do silício enquanto que o ferro insolúvel permanece inalterado.

O Magnésio aparece como solução sólida na maioria das ligas, mas nas ligas da família 5xxx, aparece como fase eutética  $Mg_2Al_3$ . Quando a composição de Mg ultrapassa 3,5% ocorre a precipitação da fase  $Mg_2Al_3$  no interior dos grãos ou em seu contorno. Cromo é frequentemente adicionado nessas ligas e aparece disperso na estrutura (ASM; 1997).

As ligas de alumínio-magnésio-silício (6xxx) foram feitas para utilizar da solubilidade do composto  $Mg_2Si$  e assim, realizar o endurecimento por precipitação. Se não apresentar cromo ou magnésio, a fase rica em ferro são  $Fe_2SiAl_{12}$  e  $Fe_2Si_2Al_9$  ou a mistura delas dependendo da composição da liga. São comumente utilizadas para fins elétricos, pois, quando excitadas, há bandas de energia no contorno de grão causada por um precipitado livre.

Ao se tratar das ligas de alumínio-zinco, ressalta-se a alta solubilidade do Zinco no Alumínio. Normalmente, as ligas apresentam também cobre e magnésio solubilizado e alguns aditivos como cromo ou manganês.

Destaca-se que não se pode caracterizar as ligas somente com o aspecto microestrutural pois ele apresenta variações de acordo com a composição química e a aplicação de diferentes processos. (ASM, 1997).

### **3.5 Breve Resumo do Mercado Brasileiro de Latas**

De acordo com a Associação Brasileira dos Fabricantes de Latas de alumínio (ABRALATAS), o Brasil está entre um dos maiores mercados de latas do mundo, sendo que nos últimos dez anos houve um crescimento de 80% das vendas deste produto. Em 2021, o consumo de 33,4 bilhões de latinhas colocou o Brasil como terceiro no cenário mundial, atrás somente da China e dos EUA.

Além disso, a perspectiva de o alumínio ser 100% reciclável, a reutilização das latinhas injeta atualmente 6 bilhões anualmente na economia brasileira. Em 2021, de acordo com a Associação Brasileira dos Fabricantes de Latas de alumínio (ABRALATAS), o índice de reciclagem deste produto chegou a 98,7%.

Desde então, a busca por tecnologias de verniz, de estampagem e novas tecnologias possibilitou uma ampla gama de produção de diferentes formatos e características. A figura 6 apresenta os formatos de latas produzidas, por diferentes marcas, no Brasil (ABRALATAS, 2022).

**Figura 6 - Formatos de lata de alumínio produzidos no Brasil.**



Fonte: ABRALATAS.

### 3.6 Processo de Fabricação das Latas de Alumínio para Bebidas

No caso de latas utilizadas como embalagem para bebidas, a matéria prima é a bobina de alumínio laminado a frio, variando suas dimensões e revestimentos de acordo com o modelo de lata/tampa a ser fabricado. Soma-se a isso o fato de que as ferramentas e parâmetros do processo também são relativos ao modelo a ser produzido. Considerando os modelos comuns de lata, utiliza-se as bobinas da liga 3104 H19 produzidas tanto nacionalmente quanto de outros países como a China.

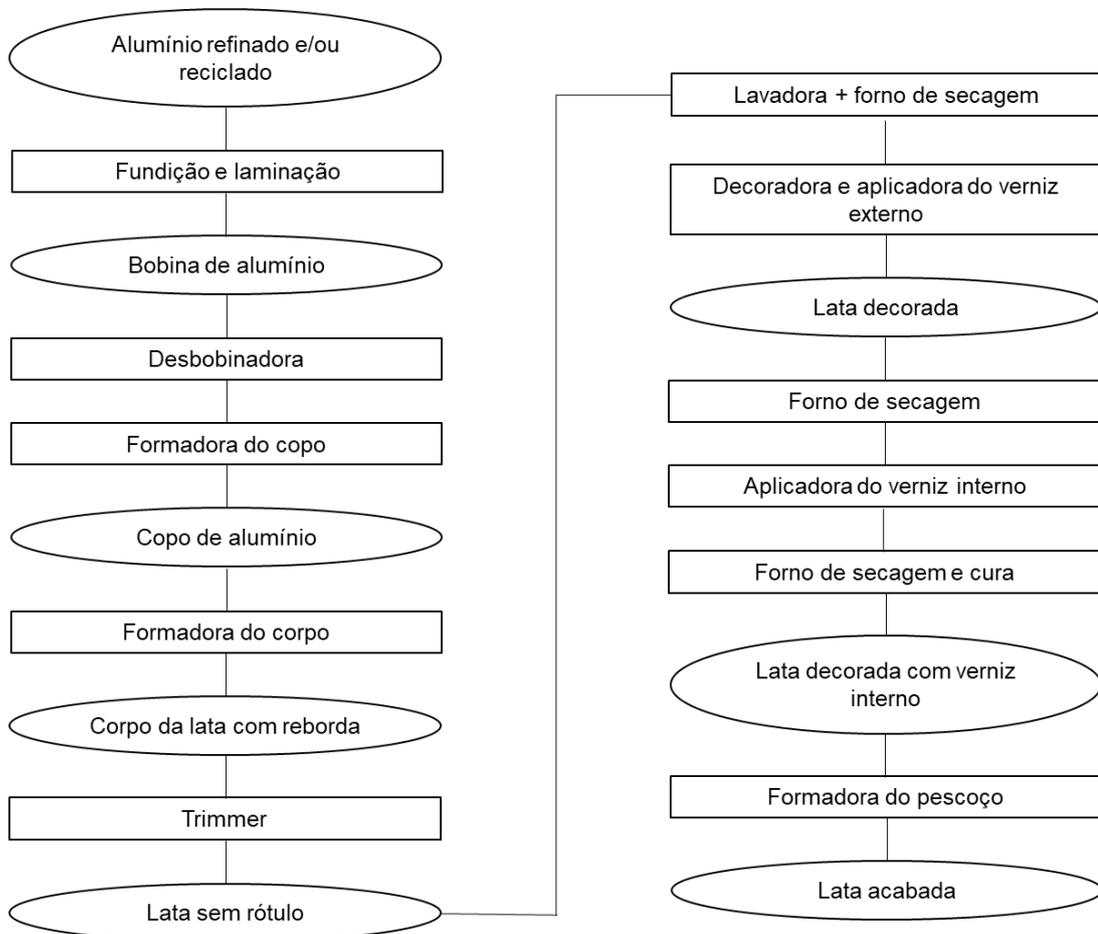
Essa liga é utilizada devido às propriedades físicas e químicas como alta resistência à corrosão, baixa densidade e elevada resistência mecânica que garante também boa conformabilidade. O termo H19 se refere à têmpera e também é laminado a frio previamente, contribuindo para o acréscimo da resistência mecânica, por meio de uma série de alterações microestruturas que proporcionam. Por fim, ressalta-se que a matéria prima apresenta relativa estabilidade dimensional pois o processo de produção de latas de bebidas apresenta baixa variabilidade e tolerâncias pequenas, logo, o retorno elástico deve ser dimensionado (WEDRYCHOWICZ et al, 2021).

O processo em si consiste de várias etapas que envolve a estampagem, corte e retirada de rebarbas, decoração com o rótulo, impermeabilização interna e externa com verniz e

conformação do pescoço e reforço do fundo da lata para enfim seguir para a disposição das latas em paletes.

Na figura 7 a seguir é apresentado um fluxograma simplificado da evolução do processo de fabricação de acordo com as alterações das características do produto, levando em consideração etapas de conformação mecânica, impressão do rótulo, disposição de vernizes e ciclos térmicos de secagem e cura. Nesse fluxograma, os retângulos representam etapas do processo e as elipses o resultado do produto.

**Figura 7 - Fluxograma do processo de fabricação.**



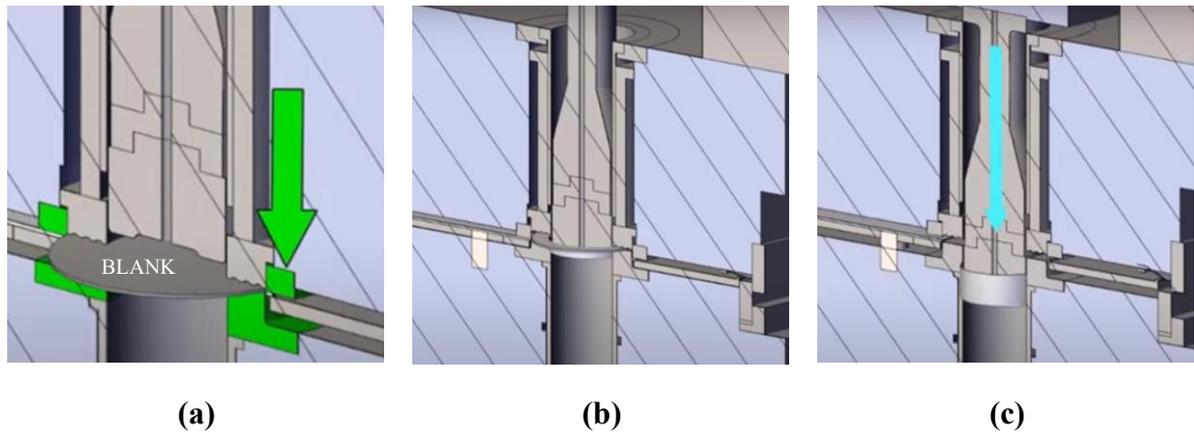
Fonte: Próprio autor.

Inicialmente, a bobina é corretamente posicionada por meio do equipamento chamado tombador, garantindo sua instalação no desbobinador que irá sustentar e girar a bobina durante o seu consumo no processo.

Após passar por um sistema de lubrificação, a chapa passa pela prensa chamada *cupper* para que ocorra a estampagem de dois estágios. Nessa etapa ocorre o primeiro processo de

conformação do material: o corte do *blank* (figura 8a) e a formação do copo (figura 8b) e ejeção (figura 8c). Há muitas variáveis que irão contribuir para o formato final do copo, a distribuição de material ao longo da sua espessura, como por exemplo, a folga entre o punção e a matriz para controle de carga e desgaste de ferramentas (WEDRYCHOWICZ et al, 2021).

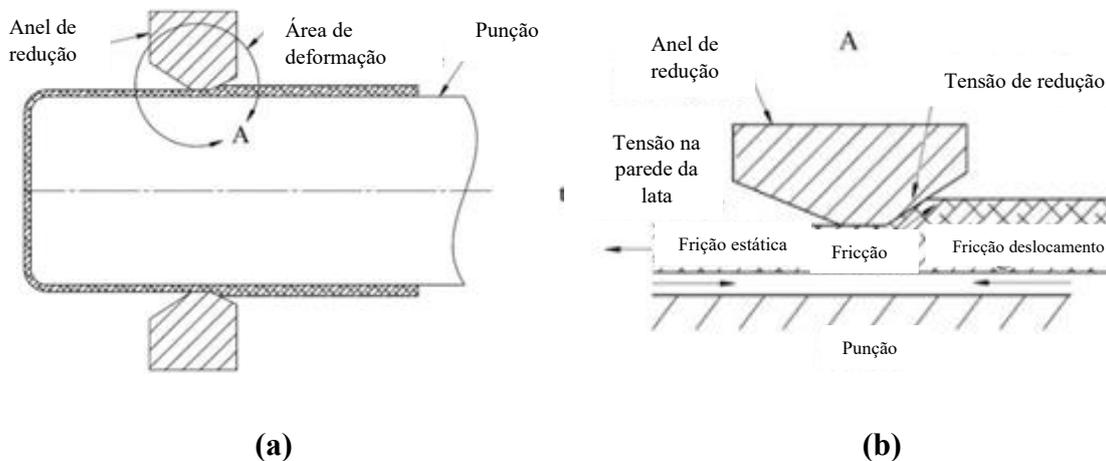
**Figura 8 - Processo de estampagem do copo.**



(a) Corte do blank (b) Início da estampagem do copo e (c) Ejeção do copo para o sistema de transporte  
 Fonte: IPSCanmaking, 2024 (a).

Em seguida, os copos são enviados pelo transporte de esteiras com sistema a vácuo, para as formadoras do corpo, onde ocorre o processo de estampagem esquematizado na figura 9a em que o diâmetro é reduzido para o valor final do produto e a parede é alongada, reduzindo a sua espessura por meios dos esforços apresentados na figura 9b.

**Figura 9 - Máquina Bodymaker.**

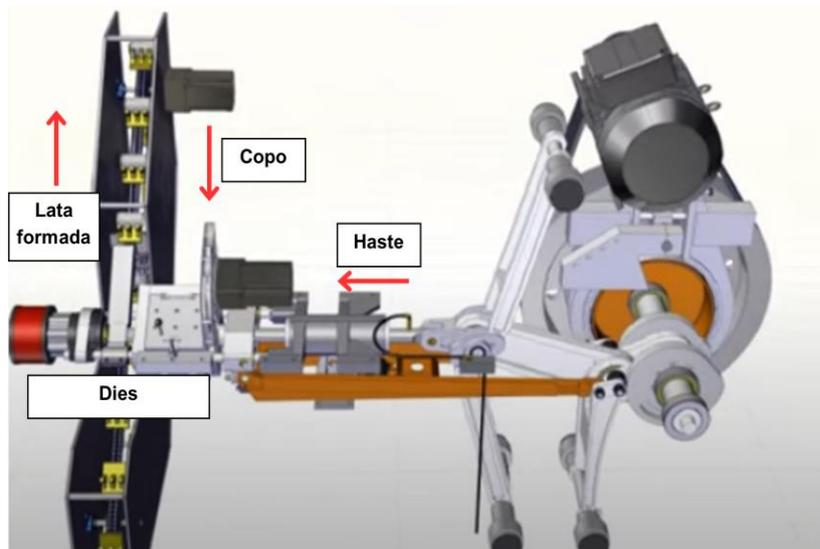


(a) Esquema da estampagem (b) visão de tensões sofridas pela parede da lata

Fonte: WEDRYCHOWICZ et al, 2021.

A conformação em si ocorre pelo deslocamento da haste (punção): que coordena o movimento do material através do conjunto de matrizes. Para que esse movimento ocorra de forma mais homogênea possível, o copo é fixado na entrada do conjunto de matrizes e o deslocamento da haste força o deslocamento do material por entre as matrizes, ocorrendo a conformação (figura 10).

**Figura 10 - Sistema de conformação da formadora do corpo.**

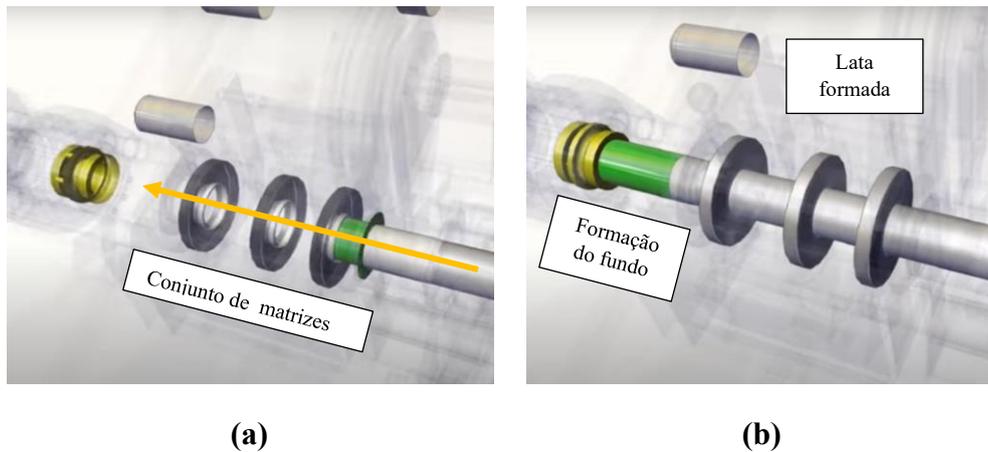


Fonte: Adaptado de IPSCanmaking, 2024 (b).

O processo possui óleo lubrificante e consiste em quatro estágios sequenciais e não simultâneos para completar o estiramento das latas:

- 1ª matriz: Redução da espessura de parede de 20%.
- 2ª matriz: Redução da espessura de parede de 25%.
- 3ª matriz: Redução da espessura de parede de 35 a 40%, completando o movimento de estiramento de forma que se tenha brilho na superfície externa e sem rompimento de parede (REGADA, 2015). No final do curso ocorre a formação do fundo da lata, todo esse processo está ilustrado na figura 11 em que a seta em amarelo representa o movimento da haste.

**Figura 11 - Dinâmica de estiramento do copo na bodymaker.**



(a) A haste percorre os ferramentais de formação do corpo e (b) a formação do fundo  
 Fonte: IPSCanmaking, 2024 (b).

Importante ressaltar que um alumínio com limite de escoamento adequado, nessa etapa, define se o processo de estiramento vai ter êxito ou não, devido ao limite do estiramento. Em caso de não concluído, ocorre a lata curta (*short can*), que é quando não ocorre o processo de formação total do corpo e pode ser ocasionado tanto pelas propriedades do material, quanto por falha de posicionamento, velocidade dos componentes envolvidos e/ou alimentação do copo (IPSCan making (b), 2024).

Para estabelecer um controle de altura de todas as latas, ocorre o corte da aresta superior em seguida ao processo de estiramento na *Bodymaker*, no equipamento denominado *Trimmer*, no qual a lata é posicionada de forma que uma ferramenta faça o corte e padronização da altura da lata.

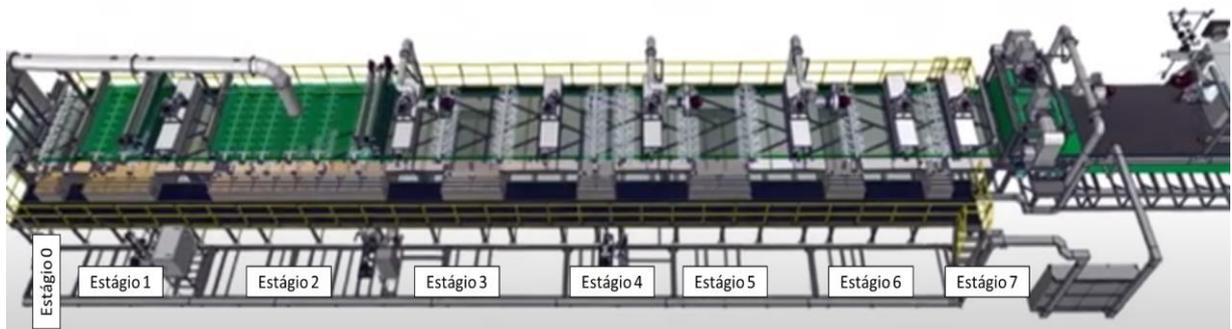
Ao fim dessa etapa, tem-se algumas propriedades importantes da lata que devem ser analisadas como: resistência de coluna (aplicação de força de compressão axial) e dimensionais. Tais características vão influenciar não só nas demais etapas do processo quanto vão contribuir de forma importante para as propriedades do produto final, podendo qualificá-lo como conforme ou não conforme.

Finalizada a formação e padronização do corpo, a lata passa por um processo de lavagem com substâncias químicas para a completa retirada de óleo utilizado na formadora do corpo e remoção total de sujidades interna e externamente. Essa etapa ocorre na lavadora e possui até sete estágios para a retirada total dos lubrificantes usados nas etapas iniciais, a figura 12 apresenta o equipamento esquematicamente. Logo após, é enviada aos fornos a temperaturas

de até 200°C para realizar a secagem completa, condição necessária para a posterior impressão dos rótulos (REGADA, 2015). O número de etapas nesse processo pode variar, mas a função de cada etapa geralmente são as seguintes:

- Etapa 0: Pré lavagem;
- Etapa 1: Aquecimento e pré lavagem em alta pressão;
- Etapa 2: Aquecimento e lavagem de alta pressão;
- Etapa 3: Primeiro jato;
- Etapa 4: Tratamento de aquecimento;
- Etapa 5: Segundo jato;
- Etapa 6: Jato de água deionizada;
- Etapa 7: Aplicação do intensificador de mobilidade (IPSCanmaking (c), 2024)

**Figura 12 - Esquema da lavadora e os estágios.**

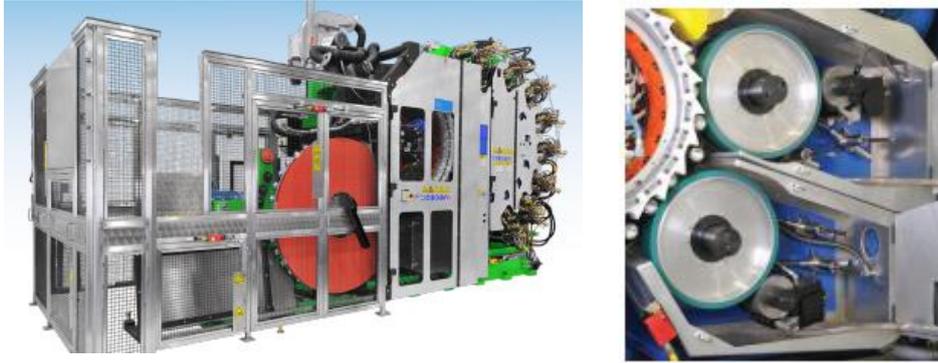


Fonte: IPSCanmaking, 2024 (c).

Em seguida ocorre a estampagem do rótulo pelo sistema *Dry offset*, o qual permite a aplicação de diversas cores ao mesmo tempo (ABRALATAS, 2012). Nessa etapa, um equipamento denominado *Printer* ou Decoradora, apresenta uma série de cilindros com placas em que cada cor do rótulo apresenta uma placa específica. Por meio dessas placas e das pistolas alimentadas pelos tinteiros, presentes também no equipamento, o rótulo é impresso na lata.

No fim desse ciclo, o verniz externo também é aplicado de acordo com o rótulo, podendo ser fosco, brilhante, etc. Assim, por meio de correias de transferência, as latas passam pelo forno denominado *Pin Oven*, que fará a secagem das tintas e verniz, bem como sua cura. A figura 13 apresenta a foto de um dos modelos do equipamento e os rolos que irão auxiliar na gravação do rótulo.

**Figura 13 - Decoradora do rótulo e s rolos de impressão.**



**(a)**

**(b)**

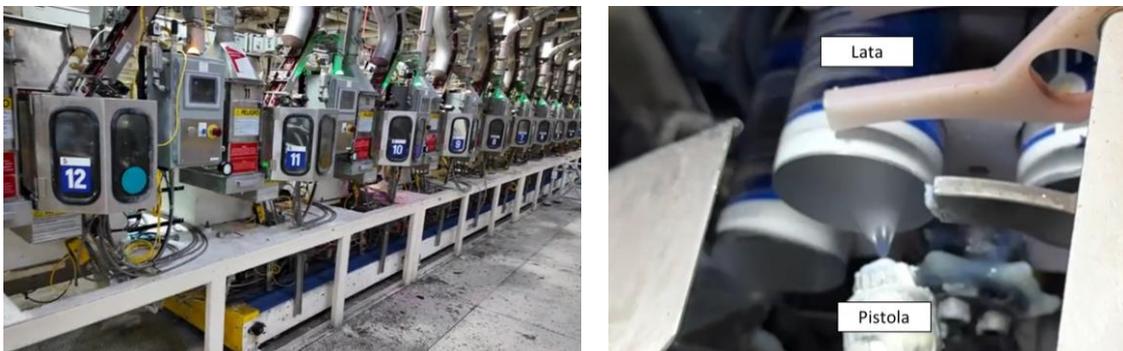
(a) Equipamento que ocorre a decoração (b) Alguns dos rolos aplicadores de tinta.

Fonte: Stolle machinery, 2024 (b).

A etapa seguinte corresponde à aplicação do verniz interno, sendo importante para garantir a proteção da bebida que armazenará, fazendo uma barreira para impedir contato com o metal e restringir processos corrosivos e contaminações por migração de metais da liga de alumínio.

Essa aplicação ocorre a partir de duas pistolas, uma cobrirá o topo da lata e a outra o fundo. Em seguida seguem para um forno de cura que usa ar circulante para o aquecimento e geralmente alcança temperaturas próximas de 150°C. A figura 14 apresenta a imagem do equipamento e da aplicação de verniz interno por jato de uma das pistolas (WORLD OF CANS, 2024 (a)).

**Figura 14 - Aplicação do verniz interno.**



**(a)**

**(b)**

(a) Vários equipamentos em linha e (b) imagem da pistola de aplicação de verniz interno.

Fonte: World of cans, 2024 (a).

A última etapa do processo consiste na formação do pescoço e flange da lata, no equipamento chamado *Necker*, apresentado na figura 15, além da alteração do perfil do fundo da lata. O processo se inicia na entrada da máquina, quando uma cera de grau alimentício é aplicada na parte superior da lata, em pequena quantidade, para facilitar o processo de conformação.

Em seguida, nas próximas estações ocorre a formação progressiva do pescoço por meio de duas ferramentas chamadas de matriz de pescoço e o knockout (figura 16). O controle do espaço entre a ferramenta interna e externa, nesse estágio, é essencial pois se ele for maior que a espessura do metal, ocorre a formação de rugas no pescoço e, se for menor, poderá riscar ou colapsar a lata. Posteriormente forma-se o flange, o qual receberá posteriormente a tampa e onde essa será selada. A última etapa de conformação é a de alteração do perfil do fundo da lata, a fim de aumentar a resistência à pressão de líquidos, sem romper.

Por fim, a última seção do equipamento corresponde à inspeção por meio de câmeras e aplicação de feixes de luz para identificar problemas internos, microfuros, entre outros problemas possíveis (WORLD OF CANS, 2024 (b)).

**Figura 15 - Necker: Equipamento de formação do pescoço.**



Fonte: D.I.E.C, 2024.

**Figura 16 - Ferramentas usadas na conformação do pescoço e flange.**



(a)

(b)

(a) Ferramentas desmontadas e (b) Ferramentas montadas e já posicionadas na máquina

Fonte: World of cans, 2024 (b).

Terminado esse processo, novamente é feito testes para validação das características do produto final. É importante ressaltar que o processo de conformação do pescoço só ocorre se as dimensões da lata estiverem devidamente dentro do padrão.

Em suma, tem-se a evolução dimensional total da lata, até à formação do flange, apresentada na figura 17. Uma única planta produtora de latas, possui a capacidade de manufaturar mais de 3 milhões de latas por dia, sendo que uma única bobina produz cerca de um milhão de latas (variável de acordo com a geometria da lata) (ABRALATAS).

**Figura 17 - Evolução global da lata em seu processo de fabricação.**



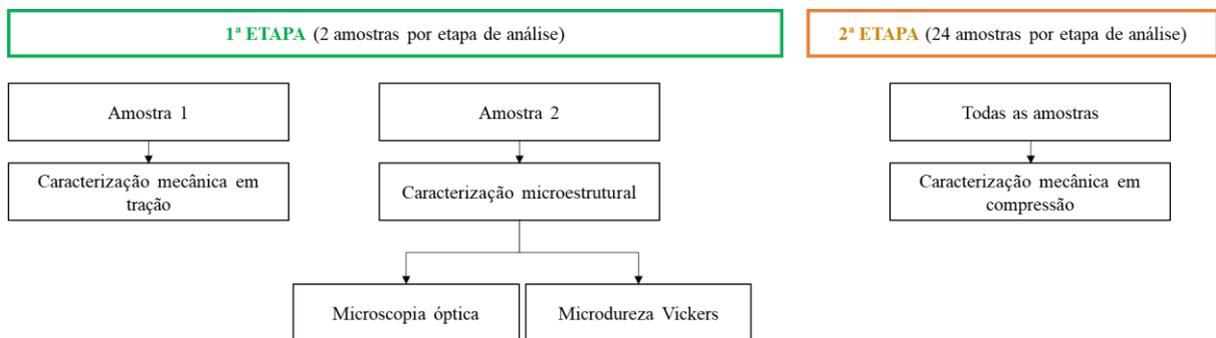
Fonte: Próprio do autor.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Descrição geral do trabalho desenvolvido

O presente trabalho trata de dados obtidos por meio de ensaios mecânicos e caracterização microestrutural do material nas etapas de fabricação de uma lata em que ocorreu deformação plástica e/ou ciclos térmicos. A figura 18 são apresentadas as duas etapas de análise realizadas e o trabalho que envolveu cada uma.

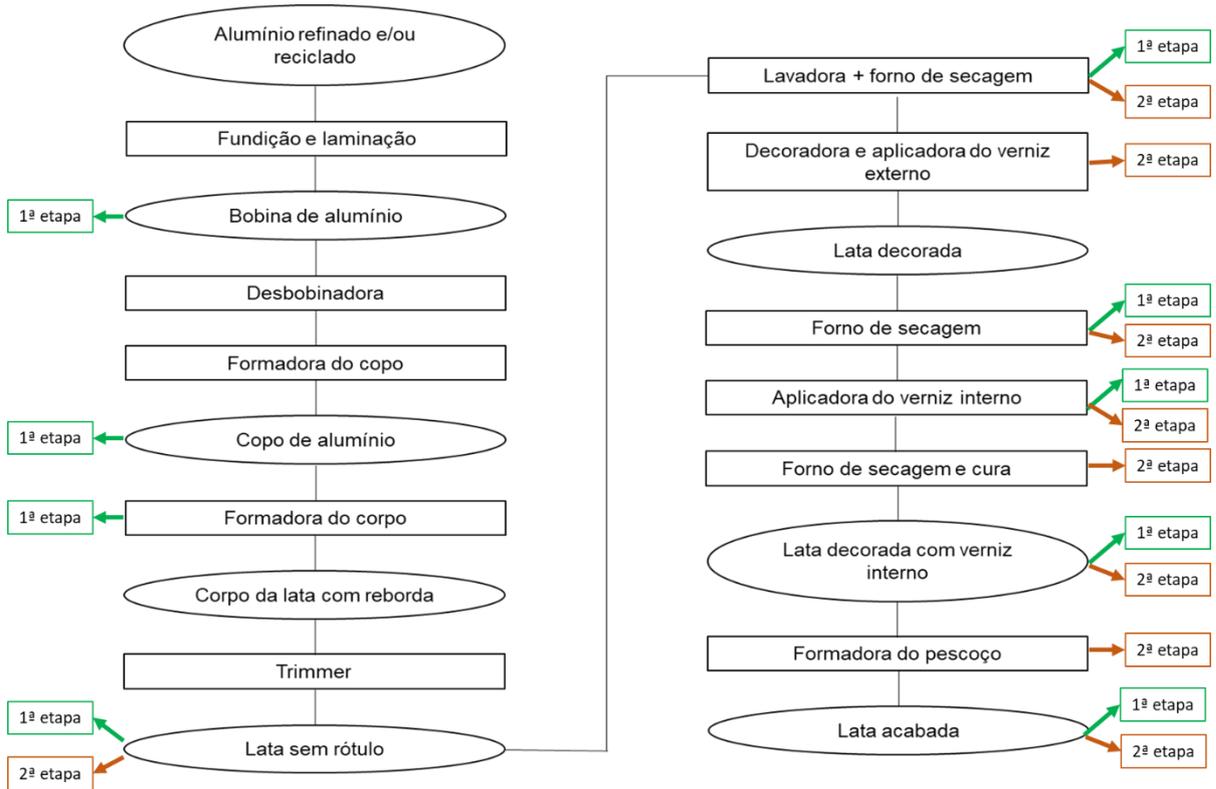
**Figura 18 - Fluxograma do processo de análise das amostras de cada etapa.**



Fonte: Próprio autor.

A partir disso, a forma de coleta das amostras das etapas envolvidas em cada análise, é apresentada de maneira esquemática na figura 19, sendo as amostras da primeira etapa representadas de verde e as da segunda etapa as de laranja. Nem todos os ensaios contemplaram todas as etapas por viabilidade da construção do corpo de prova no caso do ensaio de tração e pelos requisitos do ensaio no caso de compressão, que deve ser feito com a lata e altura e diâmetro finais (após a estampagem).

**Figura 19 - Esquema de retirada de amostra para cada etapa de análise.**



Fonte: Próprio autor.

## 4.2 Materiais

Para a produção das amostras, determinou-se uma única bobina, fornecida por uma empresa nacional e que tem tradição nesse mercado. A composição química da chapa de alumínio laminada da bobina é apresentada na tabela 6.

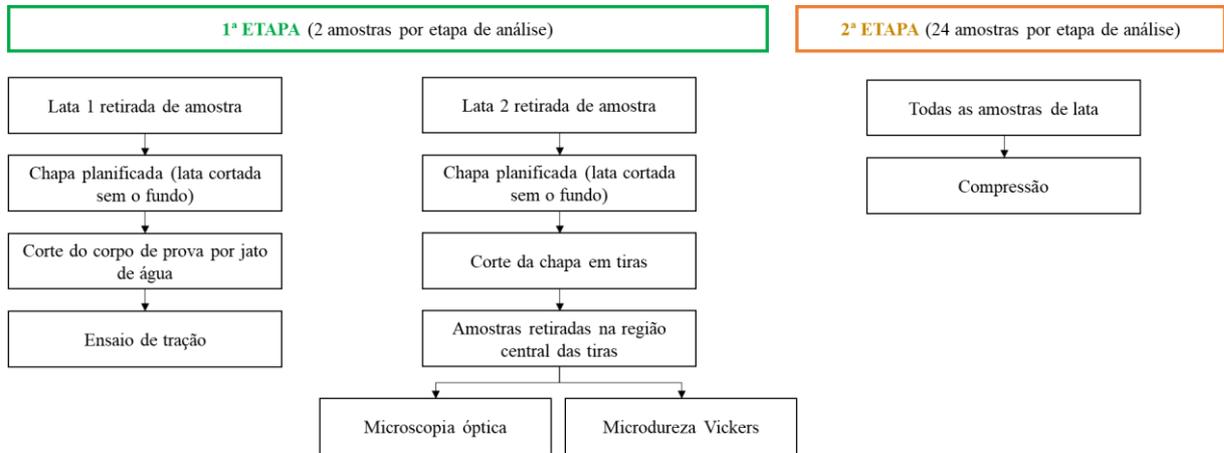
**Tabela 6 - Composição química dos elementos da liga AA3104.**

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ga	V	Ti
0,176 +/- 0,009	0,431 +/- 0,003	0,129 +/- 0,001	0,833 +/- 0,005	1,191 +/- 0,020	0,032 +/- 0,001	0,009 +/- 0,001	0,031 +/- 0,002	0,015 +/- 0,002

Fonte: WEDRYCHOWICZ et al, 2021.

Assim, foram coletadas as amostras da bobina e das latas conforme a necessidade de cada etapa e seguido o fluxo de confecção dos corpos de prova, exceto para o ensaio de compressão, conforme apresentado no fluxograma da figura 20.

**Figura 20 - Fluxograma do processo de retirada das amostras de alumínio.**



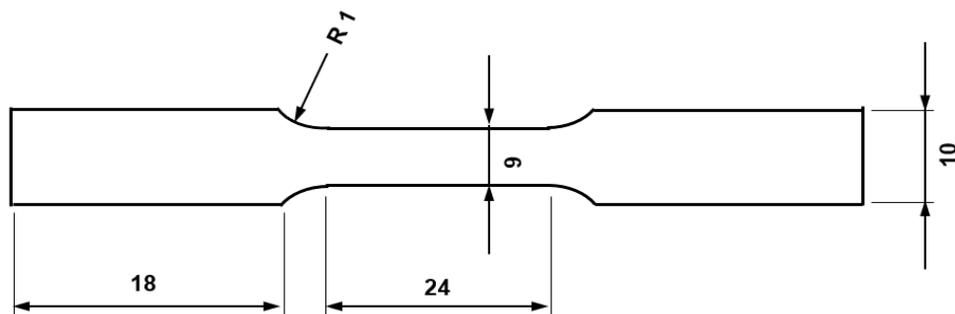
Fonte: Próprio autor.

## 4.3 Métodos

### 4.3.1 Caracterização mecânica por tração

Para a construção do corpo de prova de tração, pegou-se uma amostra de cada etapa a ser analisada. Um recorte retangular da bobina e as latas a partir da progressão 1, que precisaram ser preparadas. Planificou-se então a parede das latas coletadas a partir da progressão 1, fazendo um primeiro corte no sentido vertical e ao redor do fundo da lata separando-os, com o auxílio de uma tesoura. Em seguida, as chapas planificadas foram enviadas para uma empresa parceira fazer o recorte dos corpos de prova, considerando a direção vertical da parede da lata, por jato de água nas dimensões apresentadas na figura 21. Foram produzidos três corpos de prova na região central da chapa planificada.

**Figura 21 - Dimensões do corpo de prova de tração em milímetros.**

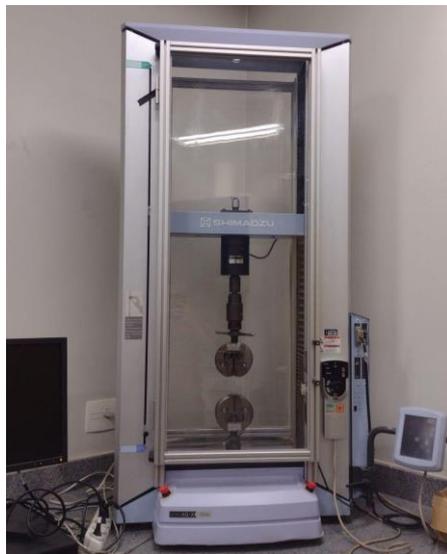


Fonte: Próprio autor.

Importante reforçar que a espessura do corpo de prova oscilou em no máximo 0,2 milímetros devido a variações no processo de estiramento e conformação. Essas variações foram consideradas na execução do ensaio de tração, para calcular os dados de área e tensão.

A partir dos corpos de prova prontos, o ensaio de tração foi executado em triplicata no equipamento de ensaio universal, da fabricante Shimadzu, modelo AG-X e capacidade de 10kN (figura 22), devidamente configurado com as garras de tração.

**Figura 22 - Equipamento de ensaio de tração: SHIMADZU AG-X 10kN.**



Fonte: Próprio autor.

Ao final, os dados foram coletados, informações de tensão e deslocamento obtidas transformando em deformação a partir da área inicial da seção transversal das amostras, sendo então plotados os gráficos Tensão (MPa) x Deformação (%) para a análise de cada condição. A partir disso, definiu-se o limite de resistência à tração para cada uma das três amostras de cada condição e em seguida a média e desvio padrão entre elas.

Por fim, foram analisados os limites de escoamento a partir da curva pelo seguinte método: traçou-se uma reta paralela à reta da região elástica, deslocou-se essa reta até o ponto de deformação igual a 0,2% ou 0,002 milímetros e identificou-se o ponto de interseção entre a reta e a curva, determinando então o limite de escoamento como o valor de tensão nesse ponto. Além disso, determinou-se o alongamento uniforme deslocando a reta com a mesma inclinação do item anterior, até o ponto de tensão máxima, lendo também o ponto de interseção

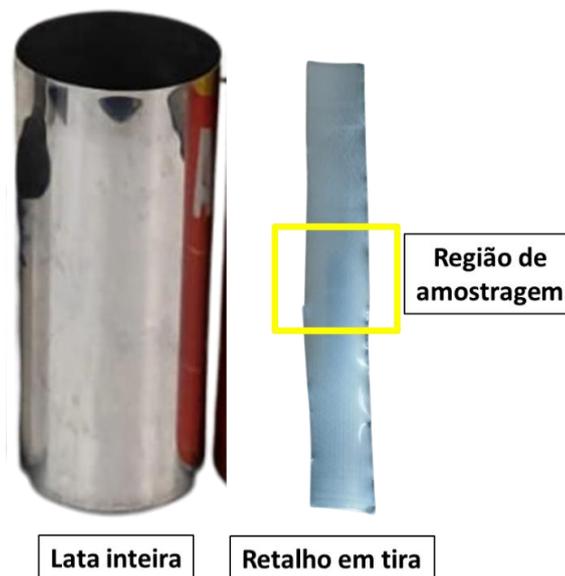
com o eixo de deformação, e, por fim, o alongamento total, identificado como o último ponto de deformação, antes do rompimento.

Ressalta-se que este método não apresenta a exatidão correta para determinar os limites de escoamento e deformação do material, porém como o processo de análise seguiu o mesmo método para todas as etapas analisadas, considera-se que a proporção de desvio se manteve em toda a análise, sendo possível uma observação comparativa entre essas propriedades no estudo em questão.

#### 4.3.2 Caracterização microestrutural

Para a construção do corpo de prova, pegou-se uma amostra de cada etapa a ser analisada. A partir disso, planificou-se a parede, recortando-a e separando-a do fundo da lata, com o auxílio de uma tesoura. Feito isso, foram cortados retalhos em tira a partir da parede da lata e retiradas amostras da região do meio da tira para preparação para as análises de micrografia e microdureza Vickers. A figura 23 ilustra a lata e a retirada das amostras.

**Figura 23 - Amostra a partir do comprimento da lata.**



Fonte: Próprio autor.

Após a segmentação da amostra, iniciou-se o processo de embutimento com a resina acrílica autopolimerizável. Em seguida, para as amostras da bobina até a etapa da terceira

progressão (formadora do corpo), foi feito o lixamento em sequência com as lixas de #800, #1000 e #2000 respectivamente.

Para as etapas seguintes em que foram coletadas as amostras, as lâminas foram colocadas dentro de um béquer de 500ml com água destilada e fechados com papel kraft com auxílio de um elástico, como mostrado na figura 24b. Em seguida foi colocado na autoclave vertical (figura 24a e 24c) por 20 minutos à temperatura de 120°C, para a remoção do verniz externo. Feito isso, a remoção da camada de tinta que estava abaixo do verniz foi feita por meio de um algodão embebido em acetona P.A.

**Figura 24 - Lâminas para autoclavagem.**



**(a)**



**(b)**



**(c)**

(a) Modelo da autoclave, (b) Amostras para autoclavagem e (c) Disposição no equipamento.

Fonte: Próprio autor.

A última etapa do processo de preparação, foi realizada de forma igual em todas as amostras, de todas as etapas. Dessa forma, foram polidas utilizando-se pasta de diamante de 3, 1 e  $\frac{1}{4}$  micron, respectivamente, com os devidos panos de polimento. Em seguida, realizou-se o ataque químico na superfície das amostras, com o auxílio de um algodão embebido com a solução de ácido fluorídrico 5%.

Com as amostras preparadas, a caracterização microestrutural foi realizada por meio do microscópio óptico do modelo KONTROL, da empresa Fortel com câmera, apresentado na figura 25. Foram registradas imagens de duas áreas distintas, para cada amostra, utilizando

ampliações distintas. Posteriormente foi selecionada a área que possibilitou melhor análise e caracterização da microestrutura, bem como a ampliação adequada para a discussão.

**Figura 25 - Microscópio óptico Fortel KONTROL.**



Fonte: Próprio autor.

#### ***4.3.3 Caracterização por microdureza Vickers***

Nesse ensaio, as amostras utilizadas foram as mesmas em que se caracterizou a microestrutura. Logo, não houveram processos adicionais de preparação. O equipamento utilizado foi o microdurômetro da marca SHIMADZU modelo HV- 2 apresentado na figura 26 a seguir. Com relação aos parâmetros de ensaio: carga, tempo de execução, entre outros, estão descritos na tabela 7.

**Figura 26 - Microdurômetro Vickers SHIMADZU HV-2.**



Fonte: Próprio autor.

**Tabela 7 - Parâmetros do ensaio de caracterização por microdureza.**

Carga	200 gF
Tempo de execução	15 segundos
Quantidade de análise por amostra	10 áreas distintas
Ampliações	Distintas

Fonte: Próprio autor.

Ao analisar áreas distintas de uma mesma amostra, tomou-se o cuidado de distanciar pelo menos três vezes o tamanho da indentação, entre uma área e outra. A partir dos resultados de dureza, plotou-se o gráfico de dureza média com os respectivos desvios padrão.

#### **4.3.4 Caracterização mecânica por compressão**

Esse processo aconteceu a fim de se obter a tensão máxima de compressão da lata formada e, portanto, não houve preparação específica das amostras: durante a coleta das amostras foi assegurada a integridade das latas de alumínio (sem amassos, vincos e outras irregularidades) e, em seguida, já foram submetidas ao ensaio, sem nenhum processo a mais de preparação. Para a execução, foi utilizado o equipamento próprio, chamado “*axial load tester*” modelo AXL-3050 do fabricante CMC KUHNKE, com encaixes adequados ao diâmetro da lata como apresenta a figura 27.

**Figura 27 - Axial load tester , AXL 3050.**



Fonte: PHYSICS, 2024.

Nesse ensaio a lata foi posicionada com a parte superior do flange na parte inferior do equipamento, ficando de cabeça para baixo. Em seguida, após iniciar o ensaio, a parte superior do equipamento deslocou exercendo uma carga sobre a lata até que houvesse o primeiro vinco ou amassamento em sua parede. O deslocamento do cabeçote em média é de 10mm/ min, dentro da recomendação do fabricante e a carga máxima desse modelo é de até 500 kgf. Essa carga foi considerada o valor máximo suportado pela lata em compressão e, assim, utilizando a área em contato com o cabeçote, foi calculado o valor de tensão máxima em compressão.

Esse processo foi aplicado para as 24 amostras de cada etapa analisada e calculada a tensão média de compressão em MPa e o respectivo desvio padrão. Para compilar os dados das etapas e analisar de forma comparativa, plotou-se um gráfico com os dados médios encontrados e os respectivos desvios padrão.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Caracterização Mecânica por Tração

Nesta sessão, são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir do ensaio de tração, com ênfase nos valores de limite de escoamento (LE), limite de resistência à tração (LRT), alongamento total (AT) e alongamento uniforme (AU). Os dados obtidos encontram-se consolidados na Tabela 8, a seguir, servindo de base para a análise crítica e interpretação dos comportamentos observados.

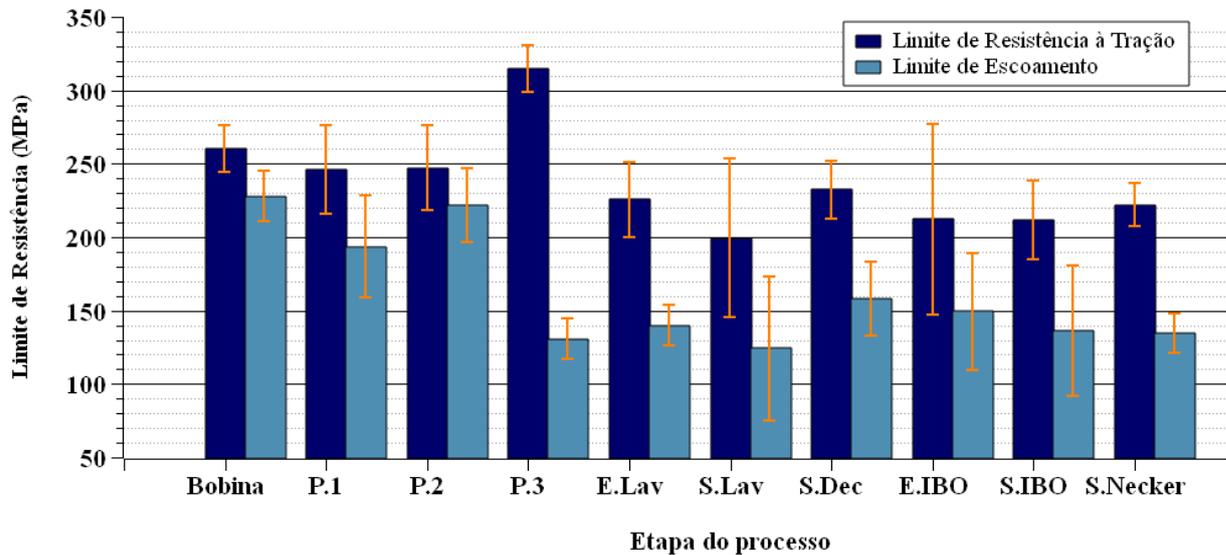
**Tabela 8 - Propriedades mecânicas em tração.**

<b>Etapa</b>	<b>LE (MPa)</b>	<b>LRT (MPa)</b>	<b>AU (%)</b>	<b>AT (%)</b>
<b>Bobina</b>	228,0 +/- 17,1	260,5 +/- 16,0	3,94 +/- 2,9	8,50 +/- 3,0
<b>P.1</b>	193,7 +/- 34,7	246,0 +/- 29,9	0,88 +/- 0,6	1,10 +/- 0,7
<b>P.2</b>	222,0 +/- 25,2	247,0 +/- 28,9	0,44 +/- 0,3	2,02 +/- 1,7
<b>P.3</b>	130,7 +/- 13,7	314,7 +/- 16,2	1,84 +/- 0,4	4,97 +/- 0,7
<b>E.Lav</b>	139,7 +/- 13,8	225,6 +/- 25,7	2,05 +/- 0,8	5,18 +/- 1,1
<b>S.Lav</b>	124,3 +/- 49,0	199,5 +/- 54,0	2,41 +/- 1,0	5,28 +/- 1,6
<b>S.Dec</b>	158,3 +/- 25,2	232,4 +/- 19,7	4,37 +/- 0,8	7,85 +/- 0,4
<b>E.IBO</b>	149,5 +/- 39,9	212,4 +/- 74,9	4,50 +/- 0,1	7,62 +/- 0,2
<b>S.IBO</b>	136,3 +/- 44,2	211,8 +/- 26,8	3,20 +/- 1,0	6,21 +/- 0,9
<b>S.Necker</b>	134,7 +/- 13,7	222,2 +/- 14,7	3,92 +/- 1,1	7,0 +/- 1,4

Fonte: Próprio autor.

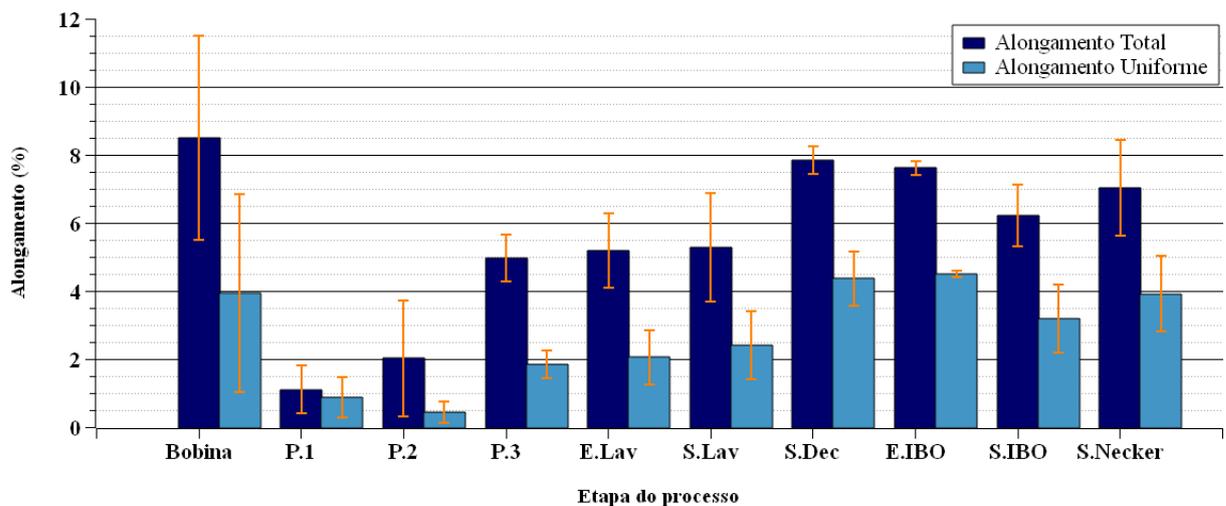
Nesse sentido, a figura 28 são apresentados os dados plotados em um gráfico com os resultados dos limites de resistência à tração e escoamento e a figura 29 os dados de alongamentos total e uniforme.

**Figura 28 - Avaliação da resistência mecânica do material a cada etapa do processo.**



Fonte: Próprio do autor.

**Figura 29 - Avaliação da ductilidade do material a cada etapa do processo.**



Fonte: Próprio do autor.

Inicialmente, é possível identificar uma tendência de redução do valor de tensão de limite à tração das etapas Bobina, Progressão 1 (P1) e Progressão 2 (P2) aumentando consideravelmente na Progressão 3 (P3). O fato da matéria prima (alumínio 3104 H19) vir de uma bobina produzida por laminação a frio leva a sua microestrutura inicial a apresentar um nível de encruamento elevado e alta densidade de discordâncias. Dessa forma, os estágios iniciais de estampagem que se seguem podem sofrer alguns mecanismos que podem explicar o fato da redução inicial dos limites de resistência à tração.

Em primeiro lugar, a geração de calor por fricção e deformação localizada podem induzir um recozimento parcial, que promoveria uma redução parcial das discordâncias e assim ocasionaria a queda do limite de resistência à tração, por outro lado a redução abrupta dos alongamentos pode estar relacionada a elevadas deformações localizadas. Isso ocorre também em paralelo com o aumento do limite de escoamento que pôde ser observado de P1 para P2, associado a esse calor que auxilia à reorganização microestrutural, aumentando a restrição ao movimento das discordâncias nessa microestrutura (DAVIS, 1999).

Além disso, a deformação plástica intensa pode promover rearranjos das discordâncias presentes na microestrutura e alívio parcial das tensões internas, contribuindo para a mobilidade dos grãos (CALLISTER & RETHWISCH, 2021). Deve-se considerar por fim, algum dano microestrutural das amostras durante a sua confecção e/ou da matéria prima estudada, que pode ter gerado algum ponto de fragilidade na microestrutura e comprometeu suas propriedades mecânicas.

O incremento percebido do LRT quando se chega à Progressão 3 (P3) pode ser entendido como resultado do processo de encruamento, que pode ter ocorrido devido à magnitude da deformação final do processo de estampagem que pode ter gerado um aumento da densidade de discordâncias, as quais formam pontos de concentração de tensão na microestrutura e exigem maior carga para que ocorra o rompimento (CALLISTER & RETHWISCH, 2021).

Porém, nota-se um comportamento de redução do limite de escoamento, o que não sugere uma reação convencional, mas pode ser explicada pela possibilidade de ocorrer dois fenômenos de forma localizada e em áreas distintas: a redistribuição das discordâncias e o encruamento. Hatch (1984) destaca que processos de conformação intensa podem induzir heterogeneidade na deformação e redistribuição interna de tensões, influenciando a resistência final do material.

Com relação aos alongamentos de P1 a P3, tendeu-se a aumentar de forma progressiva, sendo o alongamento uniforme (AU) de 0,88% (P1) para 1,84% (P3) e o alongamento total (AT) de 1,10% (P1) PARA 4,97% (P3). Isso sugere que o processo de estampagem promoveu uma reorganização das discordâncias reduzindo as tensões residuais. Ao final do processo de estampagem profunda, a superfície da lata apresentou um aspecto superficial mais brilhante em relação ao aspecto visual da bobina. Esse fenômeno pode ser atribuído à deformação plástica intensa, que provoca reorientação cristalográfica e alisamento mecânico microscópico da

camada externa, favorecendo a reflexão uniforme da luz (DIETER, 1986; CALLISTER; RETHWISCH, 2021).

Relacionando agora a entrada (E.Lav) com a saída (S.Lav), é possível perceber um decréscimo de LE e LRT, ou seja, de resistência mecânica. Esse comportamento pode ser explicado porque ao final do processo de lavagem, a lata passa por um forno de secagem que submete o material a um aquecimento leve, mas suficiente para iniciar fenômeno termicamente ativado de recuperação: reorganização parcial das discordâncias, em posições de menor energia, aliviando tensões residuais (CALLISTER, 2021). Soma-se a isso, o leve acréscimo nos valores de alongamentos total e uniforme demonstram a tendência de recuperação térmica, com o aumento da ductilidade.

De acordo com Hatch (1984), mesmo temperaturas na faixa de 100 a 150 °C podem ser suficientes para ativar o fenômeno de recuperação em ligas de alumínio altamente encruadas, como é o caso da AA3104, resultando em alteração parcial das propriedades mecânicas obtidas anteriormente por deformação plástica a frio.

Ao final do processo de impressão do rótulo e aplicação do verniz externo, a lata seguiu para o forno de secagem e cura do verniz externo, por um intervalo de tempo curto e temperaturas moderadas. Era esperado que, na saída desse forno, houvesse continuidade do processo de recuperação térmica, reduzindo os limites de resistência em tração e escoamento, mas houve um comportamento contrário.

Esse comportamento pode ser explicado pela ocorrência de envelhecimento natural ou artificial em baixa temperatura, promovido pela presença de elementos como magnésio e manganês, capazes de formar precipitados secundários finos durante o aquecimento leve, reforçando a matriz metálica (HATCH, 1984; DIETER, 1986), mas que nesse ensaio não é possível afirmar. Além disso, os valores de alongamentos total e uniforme continuaram a aumentar, corroborando para a hipótese de algum processo de recuperação térmica localizada.

A etapa seguinte envolveu a aplicação do verniz interno e secagem no forno que possui duas zonas: a primeira com temperatura de aproximadamente 108 °C e a segunda de 231 °C. Nessa etapa, os limites de resistência a tração não sofreram alterações, mas o de escoamento (E.IBO e S.IBO), nota-se uma variação, mas não pode ser afirmada devido ao desvio padrão dos resultados.

Essa resposta pode ser atribuída à ocorrência de recuperação térmica, fenômeno característico de materiais previamente encruados expostos a temperaturas abaixo da recristalização. A recuperação promove a reorganização das discordâncias e o alívio parcial das tensões internas, o que reduz a tensão necessária para o início da deformação plástica, sem, contudo, alterar substancialmente a capacidade de resistência à carga máxima (CALLISTER; RETHWISCH, 2021; DIETER, 1986).

Em contrapartida, os alongamentos total e uniforme pode-se perceber que reduziram, sendo que o último se comportou ao contrário do que se esperava e por isso, é mais coerente com o LRT.

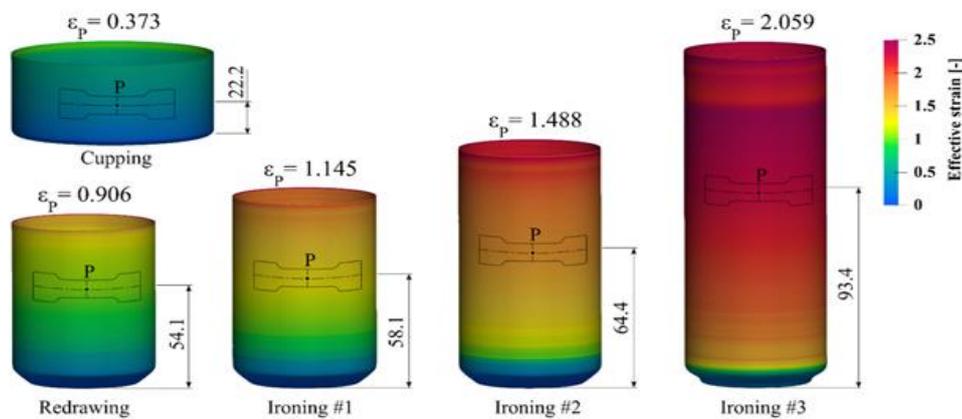
Em seguida, a lata passou pelo processo de conformação do pescoço e reforço do fundo, no Necker, processo que ocasionou um aumento do limite de resistência em tração e manteve o limite de escoamento e os alongamentos praticamente inalterados, salvo os valores de desvio padrão. Essa etapa envolve deformação plástica localizada a frio, a qual promove novo encruamento nas regiões conformadas, aumentando a densidade de discordâncias e, conseqüentemente, o LRT. Por outro lado, o LE tendeu a não se alterar, o que indica que deformações localizadas e moderadas podem elevar a resistência máxima sem necessariamente alterar a tensão necessária para o início do escoamento (CALLISTER, RETHWISCH, 2021; DIETER, 1986).

Por se tratar de uma matéria prima inicialmente laminada, endurecida à frio, alguns estudos e informações técnicas da etapa inicial desse estudo foram levantadas. De acordo com Martins (2014), relacionando-se três laminados diferentes, desse mesmo material Al 3104-H19, obteve os resultados de 265 MPa para tensão de escoamento (LE), 285 MPa para o limite de resistência à tração (LRT) e 4,7% para o alongamento percentual (AT), considerando a espessura do material 0,270 mm. Analisando também informações técnicas fornecidas pelo banco de dados de materiais Matweb, caracteriza as propriedades mecânicas dessa liga como LE = 260 MPa, LRT = 290 MPa e AT = 4,0% (Espessura de 1,60 mm).

O resultado obtido para o LRT = 260,5 MPa da etapa da bobina apresenta um desvio em relação aos estudos citados anteriormente que apresentaram o valor de 285-290 MPa. Da mesma, forma o limite de escoamento encontrado LE = 228,0 MPa também não está compreendido no intervalo de outros estudos de 260-265 MPa. Nesse mesmo sentido o AT = 8,50 % não está compreendido no intervalo das referências citadas.

Em relação à progressão dessas propriedades, Wedrychowicz et al. (2021) apresentou uma simulação utilizando método dos elementos finitos (MEF) para analisar a tensão efetiva na parede da lata, durante o estiramento que ocorre na formação do copo e do corpo. A abordagem das amostras foi diferente do trabalho em discussão, sendo que para MEF ele utilizou corpos de prova orientados horizontalmente. Para tanto, a figura 30 apresenta a imagem da simulação das etapas copo, redução do diâmetro e progressão 1, 2 e 3. E os resultados de tensão estão apresentados na tabela 9.

**Figura 30 - Análise MEF das etapas de estampagem do alumínio.**



Fonte: WEDRYCHOWICZ, et al., 2021.

**Tabela 9 - Resultados da análise MEF.**

<b>Etapa de formação</b>	<b>LE (MPa)</b>	<b>LRT (MPa)</b>	<b>Alongamento (%)</b>
Copo	293,65 +/- 1,05	328,10 +/- 0,60	2,46 +/- 0,06
Redução do diâmetro	290,15 +/- 0,85	325,95 +/- 0,85	1,52 +/- 0,48
Progressão 1	301,20 +/- 5,92	330,97 +/- 0,33	1,41 +/- 0,33
Progressão 2	320,70 +/- 0,20	351,00 +/- 0,60	0,92 +/- 0,08
Progressão 3	345,80 +/- 2,60	374,05 +/- 2,65	0,72 +/- 0,12

Fonte: Adaptado de WEDRYCHOWICZ, et al., 2021.

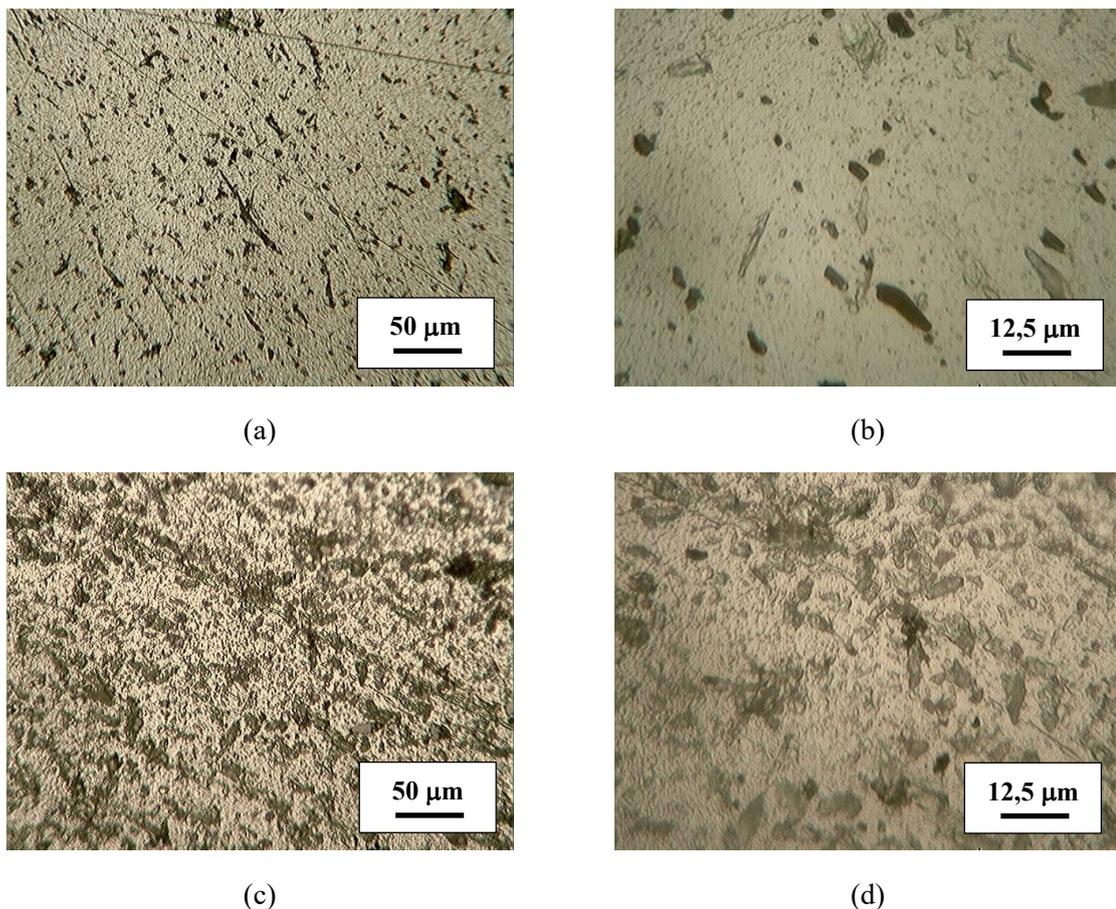
Quanto à influência do processo nas propriedades mecânicas do material, a deformação plástica ou permanente é promovida no processo de conformação em que parte dessa energia é dissipada e outra parte ocasiona defeitos no sistema cristalino. Quanto maior o nível de discordâncias e quanto menor a mobilidade, maior o nível de encruamento do material pois

interagem umas com as outras e cm outras barreiras, tendo sua movimentação dificultada (OTOMAR, 2010).

## 5.2 Caracterização Microestrutural

A análise microestrutural por microscopia óptica constitui uma etapa fundamental para compreender os efeitos das diferentes etapas do processo, no material. Os aspectos da morfologia, tamanho e distribuição de grãos e fases secundárias, estão diretamente relacionados aos mecanismos de endurecimento e recuperação que ocorrem ao longo do processo. A figura 31 se trata das primeiras etapas, sendo a bobina e o copo (primeira fase de estampagem).

**Figura 31 - Microscopia óptica da bobina e copo formado.**



(a) e (b) Bobina com ampliações diferentes, (c) e (d) copo com ampliações diferentes.

Fonte: Próprio autor.

Na figura 31a, correspondente à bobina, identifica-se claramente a matriz, de cor mais clara e uma fase contendo precipitados. Com a ampliação na figura 31b, é possível perceber

que a fase de precipitados apresenta pelo menos dois compostos diferentes, sendo um mais claro e outro mais escuro. Soma-se a isso o formato variado, porém alongado desses precipitados atribuindo ao efeito do processo de laminação.

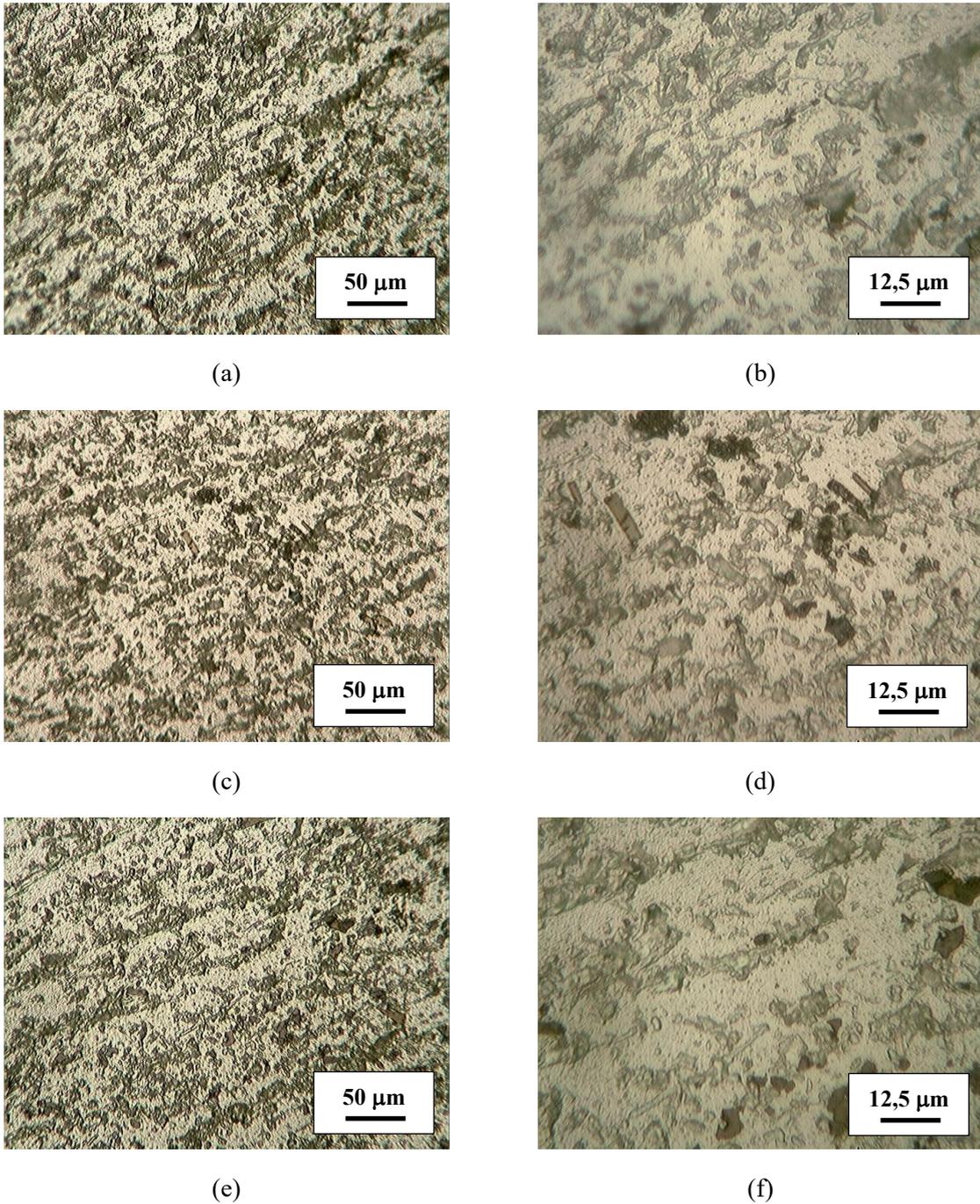
Em seguida, a figura 31c apresenta a micrografia da parede após a formação do copo, primeiro processo de estampagem. Nota-se uma maior tendência de direcionamento dos precipitados que a partir da ampliação na figura 31d, conclui-se que houve uma fragmentação dos precipitados que agora não apresentam um formato tão alongado, mas angular, resultado do processo de estampagem.

De acordo com Fogazzi et. al. (2007), a liga de alumínio utilizada na fabricação de latas de bebida (AA3104-H19) foi obtida a partir da liga AA 3004, são classificadas como ligas não tratáveis termicamente. Segundo a mesma fonte, a matriz é composta pela fase sólida de alumínio de estrutura cúbica de face centrada com um pequeno percentual de elementos dissolvidos em solução sólida.

Os principais constituintes de fase formados correspondem à fase ortorrômbica formada pela  $Al_6(Fe,Mn)$  e à fase cúbica  $\alpha-Al_{12}(Fe,Mn)_3Si$ , com as proporções são definidas pela taxa de resfriamento (CALÇADA, 2018). O processo de solubilização e, principalmente deformação plástica à frio (laminação, por exemplo) é o que confere as propriedades mecânicas da liga (FERRI et al., 2005). A partir disso, sugere-se que os compostos citados anteriormente, correspondem aos precipitados identificados na micrografia da bobina.

Na figura 32 é possível perceber a progressão do processo de estampagem com uma permanência de orientação dos grãos no sentido de aplicação da força, de acordo com as figuras 32a, 32c e 32e. Com uma ampliação maior, nota-se uma reorganização desses precipitados de forma progressiva entre 32b, 32d e finalmente em 32f, reduzindo a predominância, tornando a matriz mais perceptível.

**Figura 32 - Microscopia óptica progressões (P1, P2 e P3) em duas ampliações.**



(a) e (b) Progressão 1, (c) e (d) Progressão 2 e (e) e (f) Progressão 3 em diferentes ampliações  
Fonte: Próprio autor.

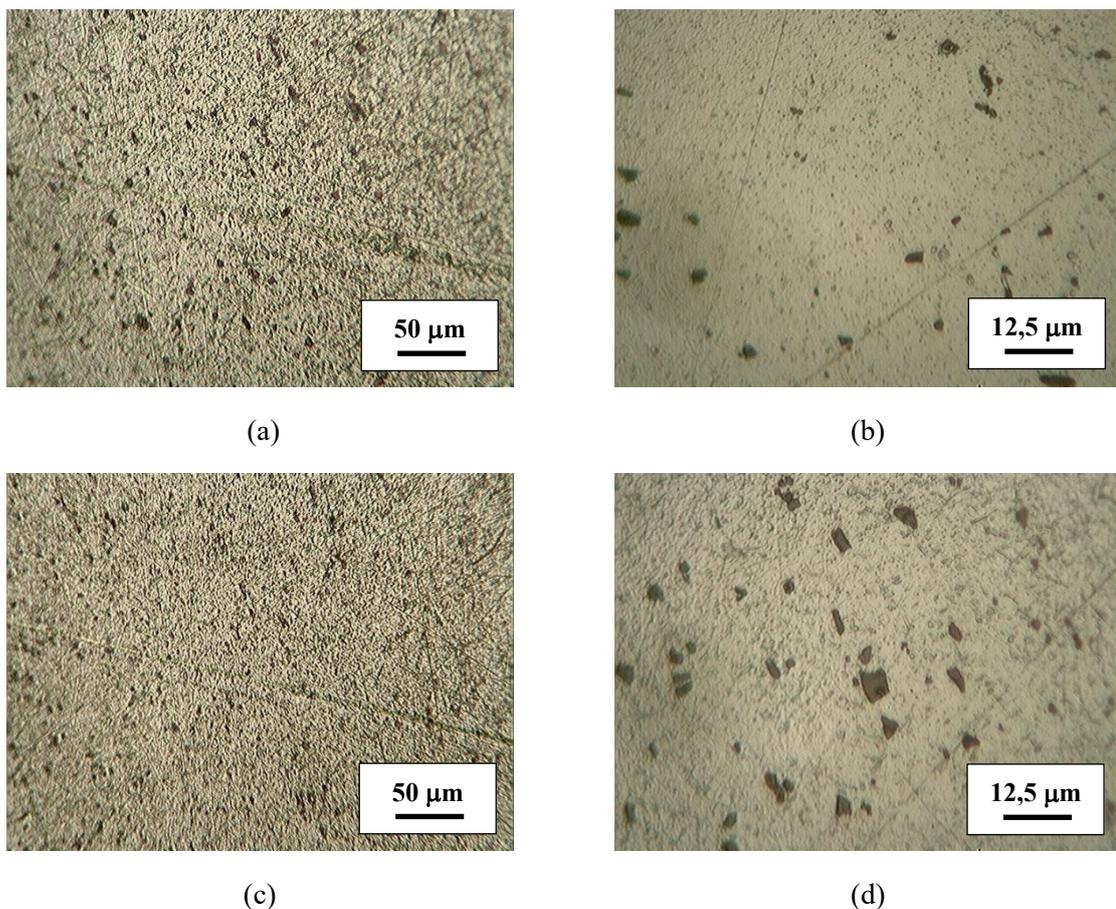
Segundo Callister e Rethwisch (2021), durante processos de conformação plástica, como a estampagem profunda e a laminação a frio, as partículas de segunda fase tendem a sofrer alongamento e alteração em sua morfologia, acompanhando a direção do fluxo do material.

Esse processo de conformação deixa as partículas orientadas e com o formato mais alongado, o que garante maior resistência mecânica na direção de deformação (anisotropia). Pode-se relacionar com a hipótese para o resultado das propriedades mecânicas observadas no ensaio de tração, em que o processo de progressão final (P3) indica um aumento do limite de resistência a tração.

Conforme Callister e Rethwisch (2021), durante a deformação plástica a frio, como nos processos de estampagem profunda, ocorre o alongamento dos grãos e das partículas de segunda fase, o que promove aumento da resistência mecânica e da dureza por encruamento. No entanto, essa modificação estrutural reduz a ductilidade do material e gera anisotropia, fazendo com que suas propriedades mecânicas passem a depender da direção do carregamento.

A figura 33 apresenta as próximas etapas do processo, que consiste na entrada e saída da lavadora, sendo as micrografias em diferentes ampliações.

**Figura 33 - Microscopia óptica entrada e saída da lavadora.**



(a) e (b) Entrada da Lavadora e (c) e (d) Saída da Lavadora e ampliações diferentes.

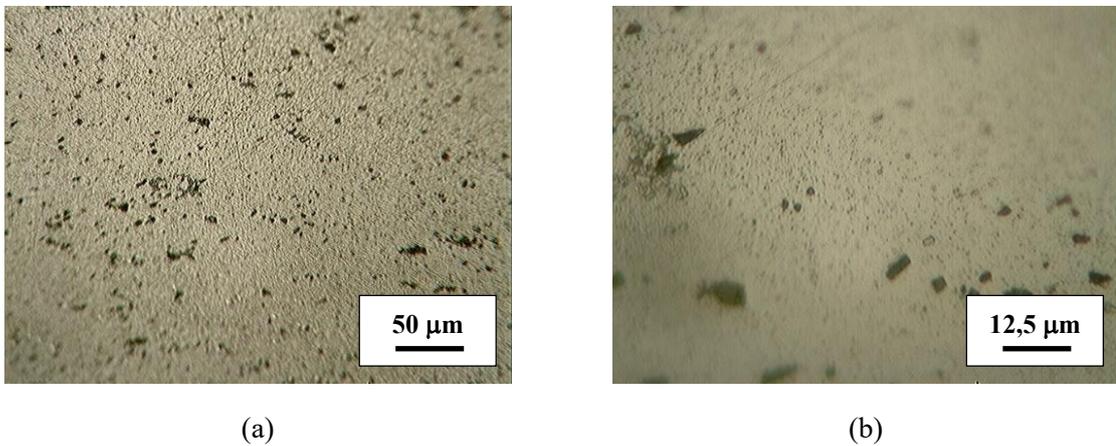
Fonte: Próprio do autor.

Na etapa da lavadora, apresentada com menor ampliação na figura 33a e 33c, constata-se uma tendência de redução da densidade de precipitados entre a entrada e saída da lavadora. Ampliando mais (figura 33b e 33d) é possível notar que os precipitados que permaneceram, tenderam a crescer e aumentar a área. Essa alteração está alinhada à hipótese de que o forno de secagem inicia um processo de recuperação leve que, em relação à microestrutura, favorece a difusão atômica que auxilia no crescimento das partículas de precipitado além do rearranjo das discordâncias.

Ligas de alumínio contendo manganês e ferro, como a série 3xxx, apresentam partículas de  $Al_6Mn$  ou  $Al_{12}(Fe,Mn)_3Si$ . Essas fases são termodinamicamente estáveis, mas podem sofrer redistribuição morfológica por mecanismos de difusão, mesmo em temperaturas moderadas (DAVIS, 1993).

A próxima etapa se trata da entrada na decoradora e saída após o forno de secagem e cura do verniz e tinta externos, sendo as micrografias respectivas a esse processo apresentadas na figura 34, em diferentes ampliações.

**Figura 34 - Microscopia óptica saída da Decoradora.**



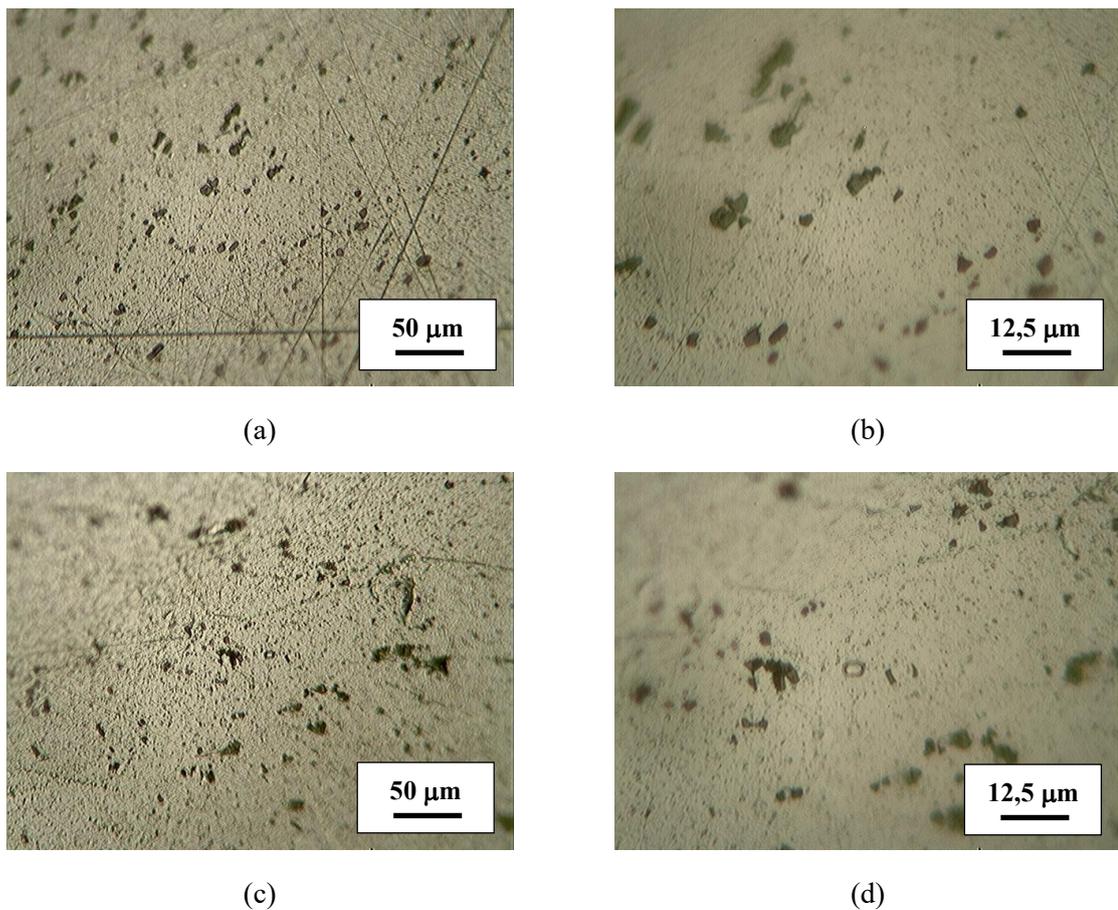
Fonte: Próprio autor.

Avaliando então a evolução entre a saída da lavadora e a saída da decoradora, onde a lata passa por um processo de secagem da tinta e verniz externo. É possível identificar que, comparando as figuras 34a com a figura 33c, há uma alteração em que a primeira apresenta uma quantidade menor de precipitados com o mesmo tamanho do que a imagem da etapa anterior. Ademais, avaliando as figuras 34b e 33d, é possível notar uma redução da densidade

de precipitados maiores, mas não se é possível afirmar a cerca do fenômeno de precipitação, sendo necessário técnicas mais específicas.

A próxima etapa consiste na aplicação do verniz interno e a passagem da lata pelo forno de cura e secagem desse verniz, que consiste em duas zonas de aquecimento. A figura 35 apresenta as micrografias do alumínio na entrada e saída desse forno.

**Figura 35 - Microscopia óptica entrada e saída do IBO.**



(a) e (b) Entrada do IBO e (c) e (d) Saída do IBO em ampliações diferentes.

Fonte: Próprio autor.

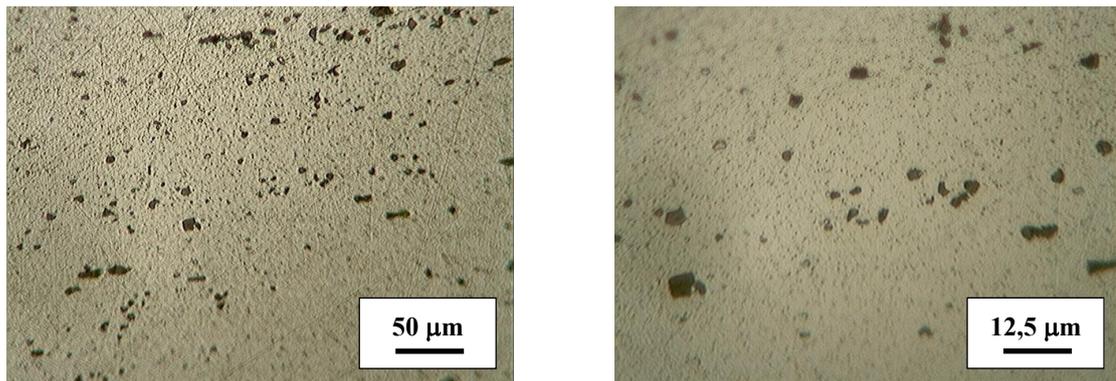
Nas figuras 35a e 35c, percebe-se uma pequena redução da densidade de precipitados maiores, sem grandes alterações na matriz. As figuras 35b e 35d também apresentaram uma tendência parecida, reduzindo a proporção dos precipitados maiores.

Nesse sentido, as imagens de microestrutura corroboram com os resultados de propriedades mecânica em que houve a redução do limite à tração, em relação à etapa anterior, de saída do forno da lavadora. Isso porque o aquecimento dos dois estágios do forno e o tempo de permanência levaram a um processo de recuperação térmica e difusão dos átomos. Caso

semelhante ao que ocorre no processo do forno da lavadora, porém agora em uma proporção maior.

Por fim, o último processo de conformação é a formação do pescoço, que é um processo localizado, mas que afeta as propriedades do produto. Assim, a figura 36 apresenta as micrografias do alumínio na saída do equipamento que ocorre esse processo.

**Figura 36 - Microscopia óptica saída do Necker.**



(a)

(b)

(a) e (b) Microscopia da saída do Necker em ampliações diferentes.

Fonte: Próprio autor.

Por fim, o último processo de conformação é a formação do pescoço, que é um processo localizado, mas que pode afetar as propriedades final do produto. Entre a etapa anterior figura 35c e essa etapa figura 36a, houve uma evolução reduzindo o volume ocupado por precipitados maiores, que não corrobora com os resultados de aumento do limite de resistência à tração. Uma hipótese é que a deformação localizada não impactou tanto na microestrutura da região central, porém pode ter impactado na região superior próxima ao pescoço de forma que pôde contribuir para a alteração das propriedades mecânicas do produto.

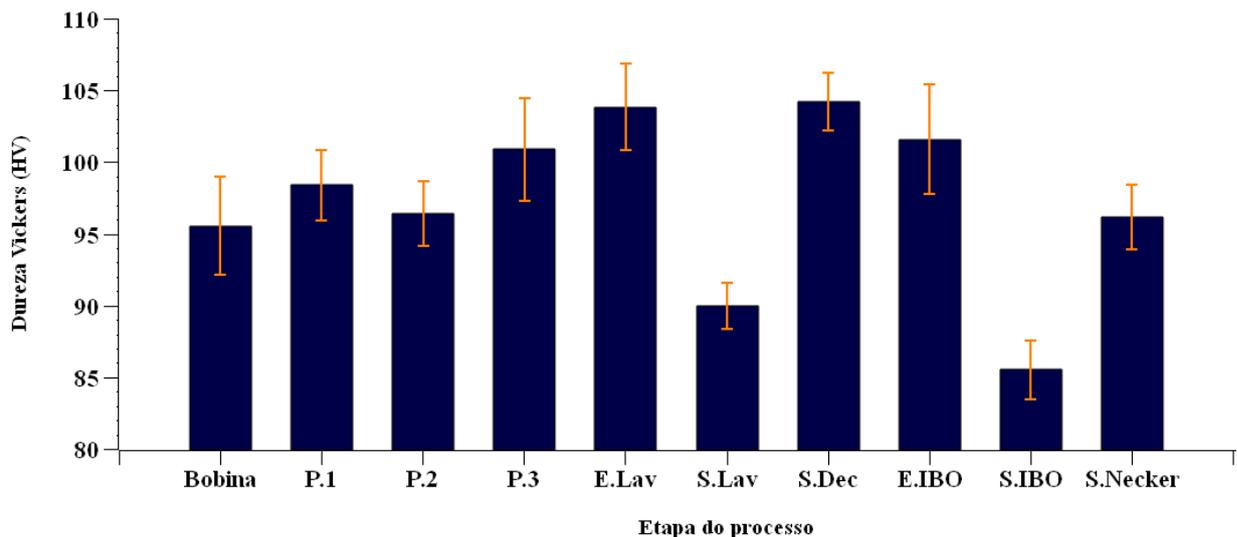
### 5.3 Caracterização por Microdureza

A análise dos valores de microdureza obtidos ao longo das diferentes etapas do processo de fabricação da lata permite relacionar de forma indireta os efeitos das etapas de conformação e ciclos térmicos, considerando que a dureza está diretamente relacionada à densidade de discordâncias, ao grau de encruamento e aos mecanismos de recuperação e recristalização. Na tabela 10 são apresentados os valores encontrados e os respectivos desvios padrão. Esses dados foram tratados graficamente e são apresentados na figura 37.

**Tabela 10 - Microdureza Vickers a cada etapa do processo.**

<b>Etapa</b>	<b>Microdureza Vickers (HV)</b>	<b>Desvio Padrão</b>
<b>Bobina</b>	95,55	3,44
<b>Copo</b>	98,40	2,44
<b>P.1</b>	96,42	2,23
<b>P.2</b>	100,88	3,60
<b>P.3</b>	103,84	3,02
<b>S.Lav</b>	89,97	1,58
<b>S.Dec</b>	104,20	1,99
<b>E.IBO</b>	101,59	3,84
<b>S.IBO</b>	85,51	2,03
<b>S.Necker</b>	96,18	2,26

Fonte: Próprio autor.

**Figura 37 - Gráfico das médias de Microdureza Vickers.**

Fonte: Próprio autor.

Avaliando o comportamento entre a bobina e as progressões, esperava-se que seguisse o mesmo comportamento dos limites de resistência, apresentando uma redução até o P2 e

devido a uma recuperação dinâmica e em P3 um aumento significativo, devido ao encruamento. No entanto P1 aumentou, que pode ser explicado por um encruamento superficial, devido a deformações localizadas. A redução em P2, pode ser ocasionada pelo calor gerado no atrito entre a ferramenta e o material no processo que provocou uma recuperação superficial. Hatch (1984) e ASM (2000) destacam que deformações intensas, mas difusas, ou com leve aquecimento superficial, podem reduzir temporariamente a dureza por alívio de tensões. Seguida pelo aumento na última etapa de progressão (P3), devido a um novo processo de encruamento e elevação da dureza superficial.

Em relação à diferença entre a saída da formadora do corpo e a entrada da lavadora, pode ser explicada pelo processo de nivelamento da altura da lata, processo que envolve corte e pode influenciar nas propriedades do material, como microtrincas. Seguindo para o comportamento entre a entrada e saída da lavadora, condiz com o início da recuperação térmica, quando a lata passa pelo forno de secagem. Esse processo promove o alívio de algumas tensões que resultam na redução da dureza superficial.

Na etapa seguinte, na saída da decoradora, a qual possui um forno como fase final, foi observado um acréscimo da dureza superficial, condizente com o comportamento em tração. A hipótese é que durante a passagem no forno, ao invés da continuidade no processo de recuperação térmica, ele favoreceu o processo de precipitação de fases secundárias. Esse processo dificulta o movimento das discordâncias e promove um aumento da microdureza superficial, sendo mais notável nas superfícies do produto pois é a região onde a transferência de calor é mais intensa, e a difusão atômica é mais favorecida (CALLISTER; RETHWISCH, 2021; HATCH, 1984).

Em seguida, a lata é direcionada para a aplicação do verniz interno e para o IBO, forno de cura e secagem do verniz, processo que acontece em duas etapas. Observa-se uma redução expressiva no valor da dureza superficial que, assim como no comportamento em tração, pode ser explicada pelo tempo de exposição e a temperatura dos dois estágios, que são suficientes para promover um processo de recuperação e reorganização das discordâncias, principalmente na superfície, em que a temperatura permanece mais alta durante quase todo o tempo de exposição.

Por conseguinte, a etapa que envolve a formação do pescoço (S.Necker) houve um aumento da dureza superficial. Mesmo que esse processo ocorra na parte superior da lata, a redistribuição de tensões ao longo do corpo pode ser afetada, principalmente porque a lata é um produto delgado. De acordo com Dieter (1986) e Callister (2021), a propagação de tensões

internas e a sensibilidade da dureza à densidade de discordâncias explicam a variação de propriedades mecânicas superficiais fora da zona deformada.

Em um estudo análogo, Martins (2014) caracterizou a dureza superficial de três laminados, da mesma liga de alumínio em análise, 3104-H19, e concluiu que a microdureza Vickers média foi de 98 HV, bem próximo do valor encontrado para a bobina no presente trabalho (95,5 HV).

#### 5.4 Caracterização Mecânica por Compressão

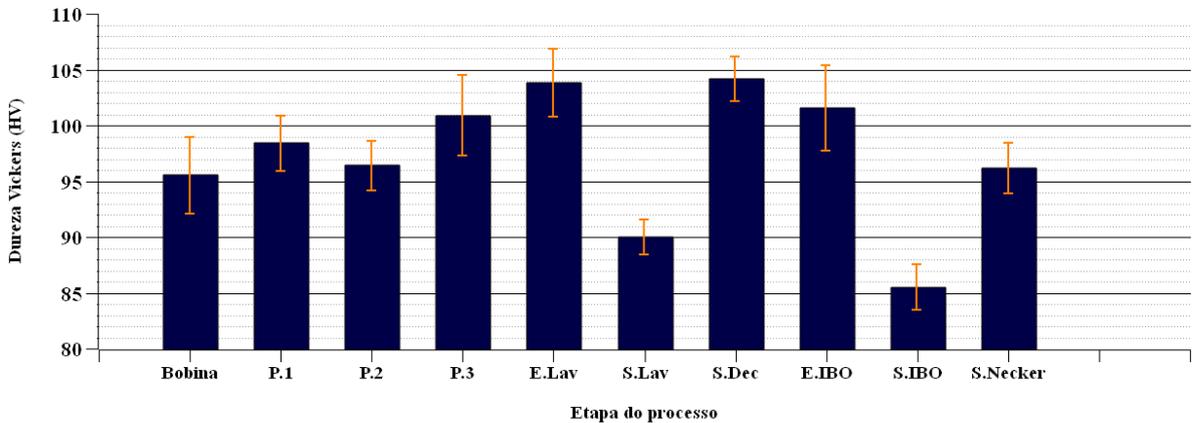
Nesse ensaio o propósito é definir a carga de compressão que a parede da lata suporta até o primeiro vinco ou amassamento, sendo um controle de qualidade que garante a integridade da lata nos processos posteriores à sua fabricação. Nesse sentido os resultados apresentados na tabela 11 e representados no gráfico da figura 38, foram interpretados de forma a entender a estabilidade desse valor e possíveis influências.

**Tabela 11 - Tensão de compressão por etapa do processo e desvio padrão.**

<b>Etapa</b>	<b>Tensão de compressão (MPa)</b>	<b>Desvio Padrão</b>
<b>Entrada Lavadora</b>	2,72	0,29
<b>Saída da Lavadora</b>	2,68	0,22
<b>Entrada Decoradora</b>	2,71	0,21
<b>Saída Decoradora</b>	2,67	0,17
<b>Entrada ISM</b>	2,67	0,17
<b>Saída ISM</b>	2,68	0,16
<b>Saída IBO</b>	2,54	0,17
<b>Entrada Necker</b>	2,56	0,11
<b>Saída Necker</b>	2,33	0,20

Fonte: Próprio autor.

**Figura 38 - Avaliação mecânica em compressão a cada etapa do processo.**



Fonte: Próprio autor.

Essa análise, diferente das demais, inicia-se pela entrada da lavadora, pois só é feita com a lata em suas dimensões de altura e diâmetros finais. Sendo assim, o primeiro comportamento a ser avaliado é entre a entrada e saída da lavadora. Novamente, nota-se um decréscimo da tensão de compressão necessária para comprometer a estrutura da lata. Esse resultado corrobora para as hipóteses anteriores que indicam que o forno de secagem inicia o processo de recuperação do material, com alívio parcial das tensões, impactando negativamente na resistência mecânica do produto.

Em seguida, entre a saída da lavadora e a entrada da decoradora, a tendência de aumento observada pode ter sido ocasionada pela própria variabilidade do processo, já que não há nenhum trabalho mecânico ou térmico nesse intervalo.

O comportamento seguinte entre a entrada e saída da decoradora vai de encontro com as análises anteriores, dessa vez apresentando uma redução na tensão de compressão. Uma hipótese é que o processo de precipitação que pode ser gerado pelo forno, ocasiona pontos de elevada tensão residual e assim fragilidade estrutural para resistir à compressão.

O passo seguinte é a entrada do ISM, em que não houve variação entre o processo anterior de saída da decoradora. Além disso, entre a entrada do ISM e a saída desse mesmo equipamento também não houve variação, o que era esperado pois nessa etapa ocorre somente a aplicação do verniz interno. No entanto, comparando essa última etapa com a saída do forno

IBO, nota-se uma redução, porém, considerando o desvio padrão, não se pode classificar como significativa.

Por fim, a etapa de entrada e saída do Necker identifica-se novamente um decréscimo da tensão de compressão. Considerando que nessa etapa ocorre a conformação localizada do pescoço, o mecanismo de transmissão das tensões ao longo do corpo, pode ocasionar áreas com elevadas tensões residuais que compromete estruturalmente o produto. Dieter (1986) descreve que tensões de compressão superficiais são comuns após conformações localizadas podem influenciar o comportamento mecânico subsequente do material.

Nesse ensaio, não foram identificadas referências bibliográficas de análises próximas, sendo utilizada apenas para compreender melhor as hipóteses dos ensaios anteriores e corroborar para uma visão mais completa do processo de fabricação e os efeitos de cada etapa, em relação ao material. Porém, para o processo produtivo de latas, é desejável que ela chegue à etapa final

## 6 CONCLUSÃO

- Em cada etapa de fabricação da lata, foi possível identificar a influência nas propriedades e aspectos do material, principalmente nos processos que envolveram conformação mecânica e a aplicação de ciclos térmicos. Porém, a amostragem foi insuficiente para quantificar de forma mais aproximada de modelos reais, a proporção de cada uma delas, devido aos valores de desvio padrão. Por isso, sugere-se ampliação dos estudos para compreender melhor e quantificar essa evolução das propriedades do material ao longo do processo de fabricação de latas de bebidas.
- O processo de estampagem e formação do corpo da lata exerce grande influência nas propriedades mecânicas do produto que são perceptíveis visualmente por meio da microscopia óptica e possível de ser identificada por meio dos ensaios de microdureza e compressão. A evolução das propriedades entre a bobina, as progressões e a conformação do pescoço, puderam ser identificadas dentre outros aspectos: o encruamento, anisotropia e a redistribuição de tensões que podem gerar pontos de fragilidade na estrutura do produto.
- As etapas que envolvem forno para secagem e/ou cura, mesmo em temperaturas inferiores à temperatura de cristalização (200-300°C), exerceram influência sob as características microestruturais e propriedades mecânicas do material. Mesmo com os desvios padrão, a micrografia apresentou alguns aspectos de alteração voltado para fenômenos termicamente ativados como recuperação e precipitação/ envelhecimento.
- Entre os ensaios, foi possível relacionar os resultados em quase todas as etapas com hipótese semelhantes: somente em relação à etapa da lavadora, a análise de microscopia óptica não foi possível identificar a formação de precipitados secundários. As demais convergiram em relação às hipóteses do fenômeno ocorrido, após o material ser submetido a cada etapa do processo de fabricação da lata de bebidas. Mas deve-se ressaltar que o ensaio de compressão apresenta somente algumas das etapas, por ser um ensaio feito somente a partir da lata com altura e diâmetros finais.

## REFERÊNCIAS

ABAL – Associação Brasileira de Alumínio. **Fundamentos e aplicações do alumínio**. São Paulo: ABAL, 2007. 68p. Disponível em: <http://abal.org.br/downloads/publicacoes/aluminio-brasileiro-solucoes-para-uma-vida-sustentavel-port.pdf>. Acesso 01 abr 2023.

ABRALATAS. **Amazonas e Minas Gerais se tornam polos mundiais na produção de latas**. Revista da Lata. 2022. 60p. Associação Brasileira dos fabricantes de latas de alumínio. Disponível em: [https://www.abralatas.org.br/wp-content/uploads/2022/12/Revista\\_da\\_Lata\\_ABRALATAS.pdf](https://www.abralatas.org.br/wp-content/uploads/2022/12/Revista_da_Lata_ABRALATAS.pdf). Acesso em 9 abr 2023.

ASM, International. **Alumínio e Ligas de Alumínio**. The Materials information Society. United States. 1993. 793p. ISBN: 0-87170-496-X.

ASM INTERNATIONAL. **ASM Handbook. Volume 8: Mechanical Testing and Evaluation**. Materials Park, OH: ASM International, 2000. ISBN 978-0871703897.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Fundamentos da ciência e engenharia dos materiais: uma introdução**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021. 944 p. ISBN 978-85-216-2714-9.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4ª Ed (Revista e atualizada por André L. V. da Costa). Villares Metals. São Paulo: Blucher, 2004. ISBN 978-85-2120449-7.

CZERWINSKI, F. **Estabilidade térmica das Ligas de Alumínio**. *Materials* **2020**, 13, 3441; doi:10.3390/ma13153441. Disponível em: [www.mdpi.com/journal/materials](http://www.mdpi.com/journal/materials). Acesso em 15 fev 2023.

DAVIS, J. R. **ASM specialty handbook: aluminum and aluminum alloys**. Materials Park, OH: ASM International, 1999. ISBN: 9780871704962. Disponível em: <https://www.scribd.com/document/464455138/asm-specialty-handbook-aluminum-and-aluminum-alloys-by-j-r-davis>. Acesso em: 28 jun. 2025.

D.I.E.C. **Products: The belvac necker**. D.I.E.C. SINGAPORE PTE. LTD . Disponível em: <https://diec.sg/products/the-belvac-necker/>.

DIETER, G. E. **Mechanical metallurgy**. 3rd ed. Boston: McGraw-Hill, 1986. 751 p. ISBN 978-0070168930.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime A.; SANTOS, Carlos A. **Ensaio do Materiais**. 2ª Ed (Reimp.). LTC. Rio de Janeiro, 2014. ISBN 978-85-216-2067-9.

HATCH, J. E. **Aluminum: properties and physical metallurgy**. Metals Park, OH: American Society for Metals, 1984. 424 p. ISBN 978-0871701763.

IPSCANMAKING. “**What happens inside a cupper? (Part 2) IPS CanSCHOOL**”. abr 2024. 2 minutos e 20 segundos. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=4L0VhHRS3c8> (a).

IPSCANMAKING. “**What happens inside a bodymaker? (Part 1) IPS CanSCHOOL**”. abr 2024. 2 minutos e 22 segundos. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=4L0VhHRS3c8> (b).

IPSCANMAKING. “**What happens inside a washer? (Part 2) IPS CanSCHOOL**”. abr 2024. 2 minutos e 22 segundos. Disponível em: IPSCANmaking. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=SnwNF5ASGUw&feature=youtu.be> (c).

JIMA Aluminum. **Têmpera H19 de alumínio do estoque 3104 da bobina ade 405mm para o corpo da lata. Aluminum plate. 2024**. Xangai, China. Disponível em: <https://portuguese.aluminumalloyplate.com/sale-18597164-405mm-aluminum-coil-stock-3104-h19-temper-for-can-body.html>

MARTINS, André L. T. **Estudo comparativo de propriedades mecânicas e textura de laminados da liga de alumínio 3104-H19**. Dissertação de mestrado em Engenharia de Materiais da Universidade Presbiteriana Mackenzie. 2014. São Paulo, SP. Disponível em: <https://dspace.mackenzie.br/items/ca91a686-851f-40cf-afac-5688ce358794>.

OTOMAR, Heber P. **Estudo comparativo da estampabilidade da liga de alumínio AA1050 partindo de placas obtidas por vazamento direto e bobinas obtidas por vazamento contínuo**. Dissertação de mestrado em Engenharia metalúrgica e materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP. 2010. Disponível em: [https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-12082010-172944/publico/Dissertacao\\_Heber\\_Pires\\_Otomarl.pdf](https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-12082010-172944/publico/Dissertacao_Heber_Pires_Otomarl.pdf)

PHYSICS, Industrial. CMC-KUHNKE. **Masters in metal testing**. 2024. Disponível em: [https://industrialphysics.com/brands/cmc-kuhnke/?gad\\_source=1&gclid=Cj0KCQjwsoe5BhDiARIsAOXVoUtP8MXdlsykWIc5r1DW6CvafKiDsjE9I3JJn1rx79wgoW8ntmyTYtgaAoRyEALw\\_wcB#products](https://industrialphysics.com/brands/cmc-kuhnke/?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwsoe5BhDiARIsAOXVoUtP8MXdlsykWIc5r1DW6CvafKiDsjE9I3JJn1rx79wgoW8ntmyTYtgaAoRyEALw_wcB#products). Acesso em 30 out 2024.

REGADA, E. P. S. **Análise de reversão do fundo de latas de alumínio para bebidas- Buckle**. Universidade Estadual Paulista. UNESP. Guaratinguetá, SP. 2015. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/124172?locale-attribute=es>. Acesso em 09 fev 2023.

SILVA, Carlos F. **Efeito dos parâmetros de processamento térmico na microestrutura e na resistência mecânica da liga de alumínio A319**. Dissertação de mestrado, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, MG, 2017. Disponível em:

<https://sig.cefetmg.br/sigaa/verArquivo?idArquivo=2020741&key=531ac1d4657949d1cdb34b546940a31a> Acesso em: 06 mar 2023.

SOUZA, Lucas X. S. **Obtenção de espuma de alumínio**: avaliação da influência da granulometria dos pós de metal base, da pressão de compactação e do tempo de encharque do tratamento térmico. Dissertação de mestrado, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, MG, 2018. Disponível em: <https://sig.cefetmg.br/sigaa/verArquivo?idArquivo=2200674&key=b64a64ab23fc972192f9043e8f41b760> Acesso em: 27 mar 2023.

STOLLE MACHINERY. **Product information: Stolle Standun Bodymakers**. Stolle Machinery Company. Disponível em: [https://www.stollemachinery.com/sites/default/files/uploads/sales-sheets/Stolle\\_Standun\\_Bodymakers.pdf](https://www.stollemachinery.com/sites/default/files/uploads/sales-sheets/Stolle_Standun_Bodymakers.pdf) (a).

STOLLE MACHINERY. **Product information: Stolle concord decorator and basecoater**. Stolle Machinery Company. Disponível em: [https://www.stollemachinery.com/sites/default/files/uploads/sales-sheets/Stolle\\_Concord\\_Decorator\\_and\\_Basecoater.pdf](https://www.stollemachinery.com/sites/default/files/uploads/sales-sheets/Stolle_Concord_Decorator_and_Basecoater.pdf) (b).

WEDRYCHOWICZ, ET AL. **A Flow Stress Model of the AA3104-H19 Alloy for the FEM Simulation of the Beverage Can Manufacturing Process under Large Plastic Deformations**. Materials 2021, 14, 6408. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma14216408>.

WORLD OF CANS. **IC spray and IBO**. Can plant tour. maio 24. 3 minutos e 8 segundos. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=EutF8GdPghc> (a).

WORLD OF CANS. **O Necker**. Can plant tour. maio 24. 3 minutos e 8 segundos. Disponível em: <https://worldofcans.com/pages/the-necker> (b).

YU et al. **The effect of Cold Working and Annealing Practice on Earing in 3104 Al Alloy Sheet**. Departamento de Engenharia e Ciências dos materiais e centro de processamento de materiais. Universidade de Tennessee. 1993. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/1044580393900724>.