

LUCAS YUJI GARCIA SUZUKI

**Análise da variação da anisotropia de propriedades mecânicas de uma chapa de
alumínio em diversas posições de sua largura**

Guaratinguetá - SP

2020

Lucas Yuji Garcia Suzuki

Análise da variação da anisotropia de propriedades mecânicas de uma chapa de alumínio em diversas posições de sua largura

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador (a): Prof. Dr. Peterson
Luiz Ferrandini

Guaratinguetá - SP
2020

S968a	<p>Suzuki, Lucas Yuji Garcia</p> <p>Análise da variação da anisotropia de propriedades mecânicas de uma chapa de alumínio em diversas posições de sua largura / Lucas Yuji Garcia Suzuki – Guaratinguetá, 2020.</p> <p>41 f : il.</p> <p>Bibliografia: f. 41</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2020.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Peterson Luiz Ferrandini</p> <p>1. Anisotropia. 2. Chapas de alumínio. 3. Laminação (Metalurgia).</p> <p>I. Título.</p> <p>CDU 669.71</p>
-------	---

Luciana Máximo

Bibliotecária CRB-8/3595

LUCAS YUJI GARCIA SUZUKI

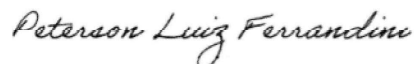
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

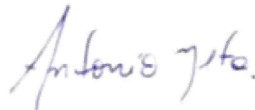


Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. PETERSON LUIZ FERRANDINI
Orientador/UNESP-FEG



Prof. Ms. ANTONIO DOS REIS DE FARIA NETO
UNESP-FEG



Prof. Ms. EVERTON COELHO DE MEDEIROS
UNESP-FEG

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos;

ao meu orientador, Prof. Dr. Peterson Luiz Ferrandini que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível;

aos meus pais Eyji Suzuki e Juliana Garcia Suzuki, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos;

às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar;

aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento.

RESUMO

A produção de latas de alumínio para bebidas ocorre em quantidades extremamente altas no Brasil, motivo pelo qual qualquer perda e descarte de material durante sua fabricação deve ser minimizada a fim de alcançar uma maior eficiência produtiva e redução do custo final do produto. Dentre os descartes de alumínio durante a produção das latas de alumínio para bebidas, destaca-se o corte da porção superior da lata após a estampagem, a fim de eliminar o defeito conhecido como orelhamento. Tal defeito ocorre devido à anisotropia de propriedades mecânicas do alumínio laminado, que está relacionada a diferentes níveis de deformação direcional após o processo de estampagem da lata. Já que a anisotropia está diretamente ligada a características microestruturais do material e tendo conhecimento de que a temperatura de operação na laminação a quente pode variar de acordo com a distância em relação ao lado motor da máquina – e conseqüentemente resultar em diferenças microestruturais –, o estudo realizado verifica a variação dos graus de anisotropia ao longo da largura da chapa de alumínio laminada, o que impacta no defeito de orelhamento após a estampagem da lata. Segundo os resultados obtidos, o lado mais aquecido durante a laminação a quente promove graus de anisotropia mais brandos, resultando em uma chapa com menor altura média estampável e menor tendência ao orelhamento.

PALAVRAS-CHAVE: Anisotropia. Orelhamento. Chapas de alumínio. Laminação. Produção de latas.

ABSTRACT

The production of aluminum beverage cans occurs in extremely high quantities in Brazil, which is why any loss and disposal of material during manufacture must be minimized in order to achieve greater production efficiency and reduce the final product cost. Among the aluminum discards during the production of aluminum beverage cans, the trimming of the top portion on cans after stamping stands out, in order to eliminate the defect known as earing. Such defect occurs due to the anisotropy of mechanical properties on laminated aluminum, which is related to different levels of directional deformation after the can stamping process. Since anisotropy is directly linked to microstructural characteristics of the material and knowing that the operational temperature in hot rolling can vary according to the distance from the motor side of the machine – and consequently result in microstructural differences –, the study carried out verify the variation of the degrees of anisotropy along the width of a laminated aluminum sheet, which impacts the earing defect after stamping the can. According to the results obtained, the warmer side during hot lamination promotes milder degrees of anisotropy, resulting in a plate with a lower average stamping height and less tendency to earing.

KEYWORDS: Anisotropy. Earing. Aluminum sheets. Lamination. Beverage can production.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Número de latas de alumínio vendidas no Brasil anualmente	10
Figura 2 – Eliminação do topo da lata devido ao orelhamento	11
Figura 3 – Esquema do processo de laminação de chapas de alumínio	12
Figura 4 – Elementos de liga da AA3104.....	16
Figura 5 – Célula unitária CFC, típica de ligas de alumínio	18
Figura 6 – Alguns exemplos de planos cristalográficos.....	19
Figura 7 – Orelhamento causado pela estampagem de uma chapa anisotrópica.....	21
Figura 8 – Microestrutura característica do alumínio laminado.....	21
Figura 9 – Parâmetros analisados no estudo da anisotropia.....	24
Figura 10 – Direções preferenciais à formação de orelhas na lata estampada.....	25
Figura 11 – Recristalização durante a laminação a quente	27
Figura 12 – Etapas da laminação a quente.....	28
Figura 13 – Lados operador (LO), centro (C) e motor (LM) de uma chapa laminada	29
Figura 14 – Etapas da conformação da lata, sendo (a) o produto da estampagem.....	30
Figura 15 – Gráfico tipicamente obtido pelo ensaio de tração	32
Figura 16 – Ligas de alumínio não-encruadas (1xxx e 7xxx, respectivamente).....	32
Figura 17 – Comportamento da liga AA 3104 H19 (encruada) sob tração.....	32
Figura 18 – Corpo de prova retirado na empresa laminadora de alumínio.....	35
Figura 19 – Traçador de altura (à esquerda) e projetor de perfis (à direita)	35
Figura 20 – Corpo de prova com comprimento útil de 50 mm marcado.....	36
Figura 21 – Máquina de ensaio de tração utilizada	36
Figura 22 – Gráfico gerado no ensaio do lado operador à 0°	40
Figura 23 – Gráfico gerado no ensaio do lado operador à 45°	40
Figura 24 – Gráfico gerado no ensaio do lado operador à 90°.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação das ligas de alumínio segundo a <i>Aluminum Association</i>	15
Tabela 2 – Classificação adicional referente ao estado da liga.....	17
Tabela 3 – Módulo de elasticidade do alumínio em várias orientações cristalográficas	20
Tabela 4 – Espaço amostral da pesquisa realizada, total de 27 amostras	34
Tabela 5 – Média das dimensões iniciais dos corpos de prova e seus desvios padrões.....	39
Tabela 6 – Médias das dimensões finais dos corpos de prova ensaiados.....	41
Tabela 7 – Desvios padrões das medições finais.....	42
Tabela 8 – Resultados finais calculados	42

LISTA DE SÍMBOLOS

r_m	índice de anisotropia média normal
Δr	índice de anisotropia planar
r	Fator de anisotropia de Lankford
r_{0°	Fator de anisotropia de Lankford a 0° em relação a direção de laminação
r_{45°	Fator de anisotropia de Lankford a 45° em relação a direção de laminação
r_{90°	Fator de anisotropia de Lankford a 90° em relação a direção de laminação
ε_w	deformação verdadeira na largura da amostra
ε_t	deformação verdadeira na espessura da amostra
w	largura final da amostra
w_0	largura inicial da amostra
t	espessura final da amostra
t_0	espessura inicial da amostra
l	largura final da amostra
l_0	largura inicial da amostra

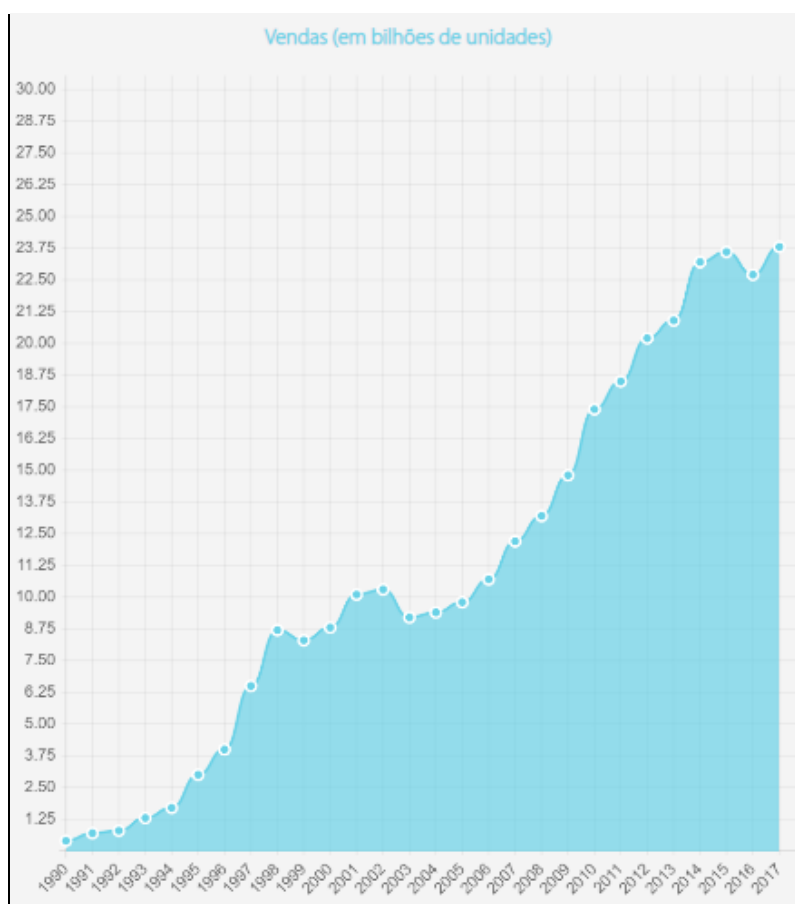
SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	OBJETIVO	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	O ALUMÍNIO E SUAS LIGAS	14
2.2	ESTRUTURA DE SÓLIDOS CRISTALINOS	18
2.3	ANISOTROPIA	20
2.4	PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO E MICROESTRUTURA	26
2.5	LAMINAÇÃO A QUENTE E A FRIO EM CHAPAS PARA PRODUÇÃO DE LATAS PARA BEBIDAS.....	27
2.6	ESTAMPAGEM E ESTIRAMENTO NA PRODUÇÃO DE LATAS PARA BEBIDAS	29
2.7	ENSAIO DE TRAÇÃO	31
3	MATERIAIS E MÉTODOS	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
5	CONCLUSÃO	45
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	45
	REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

Como evidenciado pela Figura 1, a produção de latas de alumínio para comercialização de bebidas ocorre em quantidades extremamente altas no Brasil. Segundo a Associação Brasileira dos Fabricantes de Latas de Alumínio, uma unidade fabril é capaz de produzir mais de 3 milhões de latas em apenas 24 horas de operação, sendo que existem 16 fabricantes espalhados pelo país. A associação informou, ainda, que o setor produziu mais de 25 bilhões de latas de alumínio em 2017, apresentando um crescimento de 5% em relação ao ano anterior e evidenciando a crescente demanda pelo produto (ABRALATAS, 2019).

Figura 1 - número de latas de alumínio vendidas no Brasil anualmente.

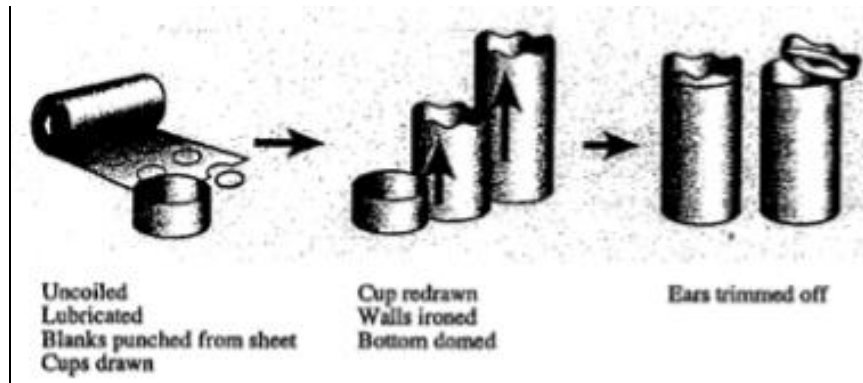


Fonte: ABRALATAS (2019).

Por se tratar de um produto fabricado em larga escala, são grandes os esforços dos fabricantes de latas de alumínio em diminuir os desperdícios operacionais, dentre os quais se destaca a perda de alumínio devido à eliminação da porção superior da lata após sua estampagem: como apresenta imperfeições e variação de altura nas diferentes direções radiais, defeito conhecido no setor como “orelhamento” (ou *earing*), o topo de todas latas de alumínio

estampadas é cortado (Figura 2) e retorna à empresa laminadora de alumínio, juntamente com os demais retalhos da bobina, para reutilização na produção de novas bobinas.

Figura 2 - eliminação do topo da lata devido ao orelhamento.

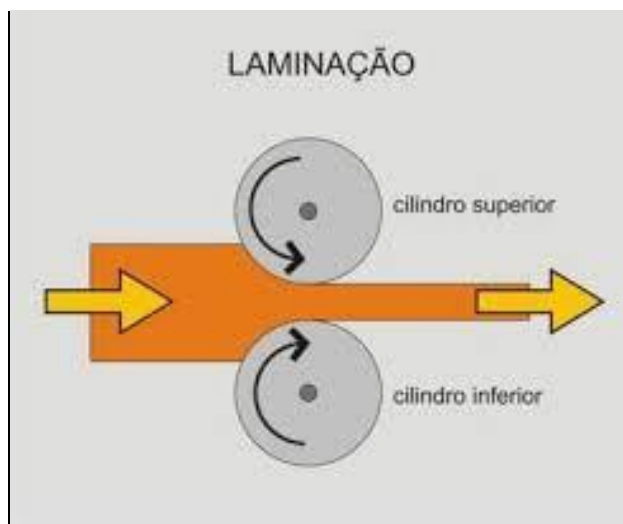


Fonte: Martins (2014).

O orelhamento das latas de alumínio estampadas ocorre devido à anisotropia de propriedades mecânicas da chapa de alumínio laminada. Ao ser estampada por um molde cilíndrico com o formato do corpo da lata, a pressão exercida na chapa de alumínio ocorre com mesma intensidade em todas as direções radiais. Porém, por apresentar anisotropia, isto é, diferentes resistências mecânicas de acordo com o a direção do esforço, o material sofre deformação em maior ou menor escala de acordo com a direção em que for tracionado, o que ocasionará a deformidade na porção superior do produto.

Durante a laminação de uma chapa de alumínio (Figura 3), o grau de encruamento e direcionamento dos grãos do material cresce conforme a placa vai sendo deformada pelos rolos laminadores (DIETER, 1976). Ao final do processo de laminação, uma placa de alumínio com algumas dezenas de centímetros de espessura e metros de comprimento dá origem a uma chapa laminada (em formato de bobina) de décimos de milímetros de espessura e quilômetros de comprimento. Após tal deformação plástica, a chapa de alumínio se encontra em estado encruado, com grãos direcionados no sentido de laminação, o que intensifica a característica anisotrópica das propriedades mecânicas da liga.

Figura 3 - esquema do processo de laminação de chapas de alumínio.



Fonte: PHOTOBUCKET (2020).

Sabe-se que o material encruado pode ser recristalizado caso seja submetido a processos térmicos (CALLISTER, 2007). É sabido, ainda, que ao longo da extensão do rolo do laminador a quente, cujo comprimento é de aproximadamente 2,5 metros, os ciclos térmicos de aquecimento e resfriamento aos quais a chapa é submetida variam de acordo com a distância da chapa em relação ao “lado enclausurado” da máquina. Por apresentar um lado geometricamente mais fechado e abafado (chamado de lado motor do laminador, ou LM), a porção da chapa mais próxima ao motor da máquina de laminação a quente sofre um acréscimo em sua temperatura média de operação. Tendo isso em vista, acredita-se que, por apresentar variação em seus ciclos térmicos nas diferentes regiões de sua largura, o material laminado a quente sofre diferentes níveis de recristalização, apresentando assim diferenças microestruturais. Por consequência, os lados opostos da chapa apresentam diferentes características, se destacando nesse sentido a anisotropia, que será potencializada posteriormente pelo processo de laminação a frio.

Como não são submetidas a qualquer processo térmico de alívio de tensões posterior à laminação, essas bobinas de alumínio laminado seguem para as empresas produtoras de latas (onde serão estampadas) em uma condição encruada. Portanto, o estudo e acompanhamento preciso da anisotropia do alumínio laminado é relevante: por meio do controle dessa característica na bobina de alumínio, é possível reduzir desperdícios de produção, tanto em relação à quantidade de alumínio descartado quanto aos custos relacionados à operação e desgaste dos equipamentos industriais. Visa-se, com esse trabalho, verificar a variação das anisotropias média normal e planar do alumínio laminado nas diferentes regiões da largura da

chapa, de modo a possibilitar um maior entendimento sobre como essas características variam de acordo com a alteração da temperatura ao longo do rolo do laminador a quente.

1.1 Objetivo

Além de proporcionar um maior entendimento sobre o processo produtivo de laminação de chapas metálicas para a produção de latas para bebidas, objetiva-se com esse trabalho analisar a variação da anisotropia de propriedades mecânicas de uma chapa da liga de alumínio AA3104 laminada, de espessura nominal 0,27 mm, destinada à fabricação de latas para bebidas, em diversas posições de sua largura.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O Alumínio e suas ligas

O alumínio (*Al*) é o segundo elemento metálico mais abundante da Terra, sendo ferro (*Fe*) o primeiro na lista (ASM HANDBOOK VOLUME 2, 1992). Por se tratar de um elemento bastante reativo, o alumínio possui grande importância econômica devido sua versatilidade. Suas propriedades podem variar de acordo com os elementos de liga aos quais é combinado, apresentando assim uma variada gama de aplicações na Engenharia. Segundo a *Aluminum Association*, existem hoje mais de 300 ligas distintas de alumínio, cujas aplicações variam desde simples embalagens para alimentos a ligas extremamente tecnológicas utilizadas no setor aeroespacial.

Por ser um metal, o alumínio pode ser reciclado infinitamente sem sofrer deterioração, o que o torna uma boa alternativa para produção de recipientes para bebidas. Além disso, as ligas de alumínio apresentam algumas vantagens em relação aos demais metais quando se trata desse ramo industrial, dentre as quais se destacam a aparência lustrosa, leveza, boa formabilidade, elevada resistência à corrosão, entre outras. Porém, vale ressaltar que seu custo tende a ser mais elevado quando comparado a seus concorrentes, já que seu processo de obtenção primário envolve elevados custos: o beneficiamento da bauxita (minério que contém o elemento em forma de óxidos) e a redução da alumina (produto intermediário, Al_2O_3) ocorrem através de intensas descargas elétricas durante o processo eletrolítico (MARTINS, 2014).

Para classificar os diferentes tipos de ligas de alumínio, a *Aluminum Association* propõe uma nomenclatura baseada em 4 dígitos (Tabela 1), sendo o primeiro dígito referente ao principal elemento de liga daquela série.

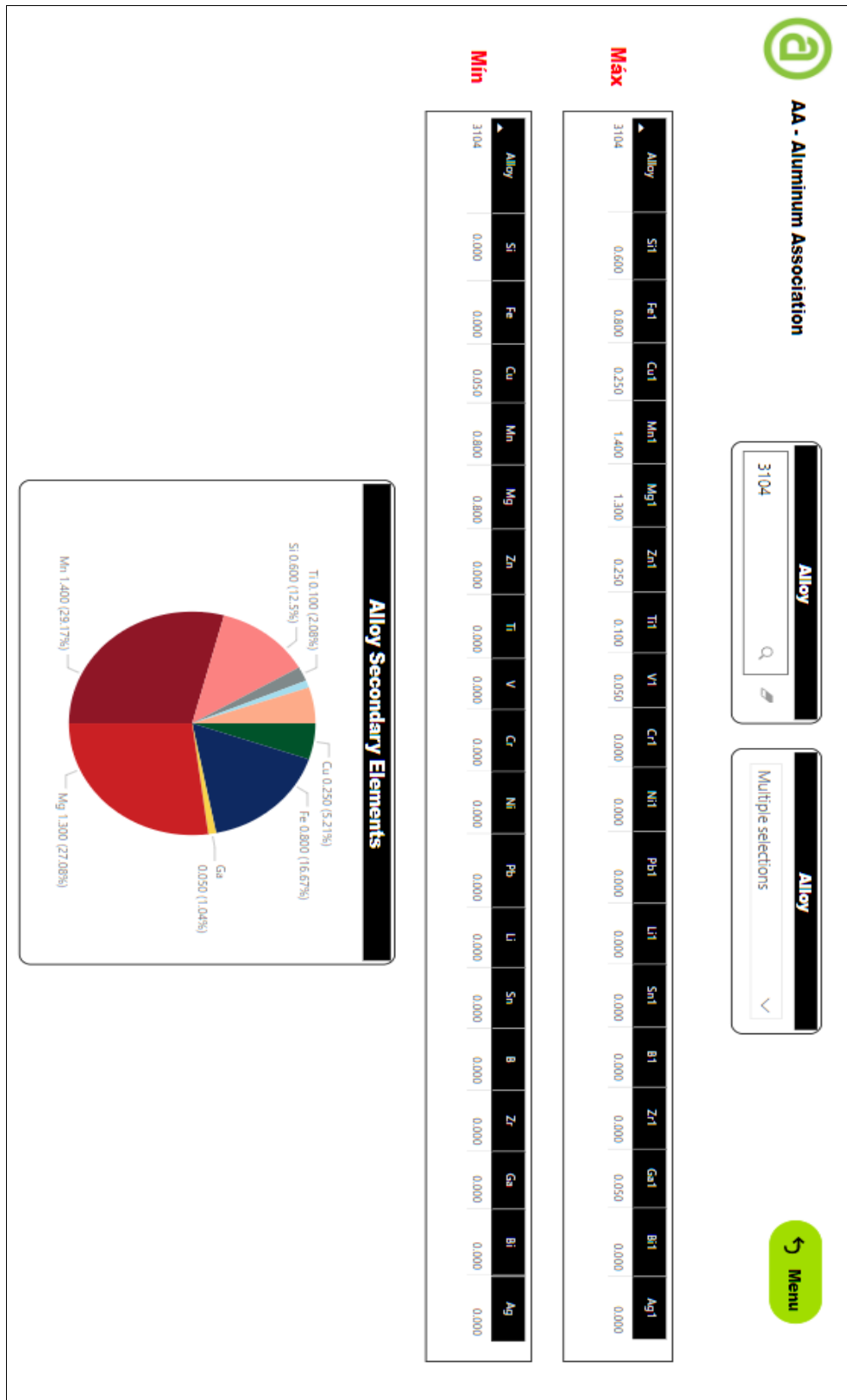
Tabela 1 - classificação das ligas de alumínio segundo a Aluminum Association.

Série	Elemento(s) de liga principal(is)	Outros elementos de liga
1xxx	Alumínio puro	-
2xxx	Cu	Mg , Li
3xxx	Mn	Mg
4xxx	Si	-
5xxx	Mg	-
6xxx	Mg , Si	-
7xxx	Zn	Cu, Mg, Cr, Zr
8xxx	Sn, Li, Fe, Cu, Mg	-
9xxx	Reservado para uso futuro	-

Fonte: Adaptado de ASM Handbook Vol. 2 (1992).

De forma simplificada, o elemento de liga “dominante” ditará as propriedades físico-químicas gerais daquele grupo (CALLISTER, 2007). Neste trabalho, serão estudadas propriedades relacionadas à anisotropia da liga AA3104, ou seja, que pertence à série 3xxx da classificação proposta pela *Aluminum Association*. Como mostrado pela Figura 4, seu principal elemento de liga é o manganês (*Mn*), também apresentando quantidades relevantes de magnésio (*Mg*), o que lhe confere boa formabilidade e estampabilidade em baixas temperaturas, sendo comumente aplicada na indústria de embalagens alimentícias e produtos de uso geral. Vale ressaltar que a série 3xxx não é tratável termicamente, sendo necessário trabalho a frio para endurecê-la (ASM HANDBOOK VOLUME 2, 1992).

Figura 4 - elementos de liga da AA3104.



Fonte: Autor (2020).

Além da classificação em 4 dígitos, a nomenclatura da liga pode receber códigos adicionais referentes ao estado e tratamentos aplicados, assim como mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 - classificação adicional referente ao estado da liga.

Letra	1º dígito	2º dígito
F (como fabricado)	-	-
O (recozido)	-	-
H (encruado)	1 (somente encruado)	2 (1/4 duro)
	2 (encruado e parcialmente recozido)	4 (1/2 duro)
	3 (encruado e estabilizado)	6 (3/4 duro)
	4 (encruado e pintado)	8 (duro)
		9 (extra duro)
W (solubilizado)	-	-
T (tratado termicamente)	1 (solubilizado parcial + envelhecido natural)	-
	2 (solubilizado parcial + encruado + envelhecido natural)	-
	3 (solubilizado + encruado + envelhecido natural)	-
	4 (solubilizado + envelhecido natural)	-
	5 (envelhecido artificial)	-
	6 (solubilizado + envelhecido artificial)	-
	7 (solubilizado + estabilizado)	-
	8 (solubilizado + encruado + envelhecido artificial)	-
	9 (solubilizado + envelhecido artificial + encruado)	-

Fonte: Adaptado de ASM Handbook Vol. 2 (1992).

Para a liga estudada, o estado da chapa fornecida pela empresa laminadora de alumínio é H19, que caracteriza uma liga que sofreu intenso encruamento.

Por ser um metal com estrutura CFC, cúbica de face centrada, o alumínio mantém sua ductilidade em baixas temperaturas (CALLISTER, 2007), o que o torna um bom material para ser estampado em forma de latas para bebidas. Além disso, sua utilização na produção de embalagens alimentícias se deve ao fato de a liga não ser tóxica, possuir alta resistência à corrosão, retardar a proliferação de bactérias, ter baixa adsorção, ser infinitamente reciclável e

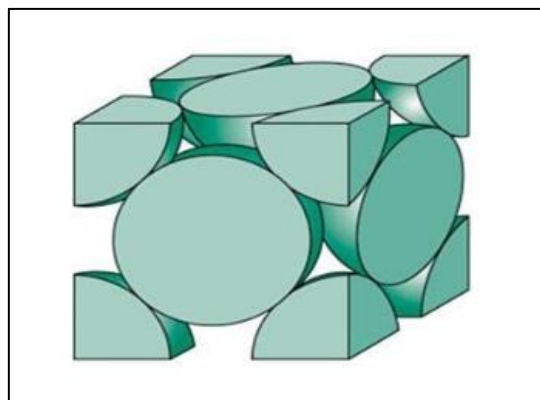
possuir baixo calor específico, facilitando e minimizando custos com a refrigeração dos alimentos (ASM HANDBOOK VOLUME 2, 1992).

2.2 Estrutura de sólidos cristalinos

O material sólido considerado como cristalino é aquele que possui um arranjo de átomos periódico e repetitivo ao longo de grandes distâncias atômicas, formando uma malha conhecida como retículo cristalino. Qualquer outro tipo de estrutura atômica sem unidade de repetição a longo alcance é característica dos sólidos amorfos (CALLISTER, 2007). Em outras palavras, um sólido cristalino nada mais é do que um conjunto de pequenos arranjos atômicos que se repetem por grandes distâncias atômicas e compõem uma estrutura ordenada de longo alcance. Tais unidades atômicas de repetição, conhecidas com células unitárias, variam de acordo com as características físico-químicas dos elementos que a compõem e são determinantes nas propriedades do material. Por exemplo, ao se considerar um mesmo elemento químico de formação, uma célula unitária mais compacta tende a originar materiais com maior densidade.

Segundo Callister (2007), todos os metais são materiais cristalinos sob condições normais de solidificação. No caso do alumínio, a estrutura cristalina é formada pela repetição de células unitárias CFC, isto é, cúbicas de face centrada. Como o próprio nome já sugere, nesse tipo de arranjo atômico, cujo fator de empacotamento é 0,74 (ou seja, 74% do espaço do “cubo” está preenchido por átomos), cada face da célula unitária possui em seu centro um hemisfério de átomo de alumínio, assim como evidenciado pela Figura 5.

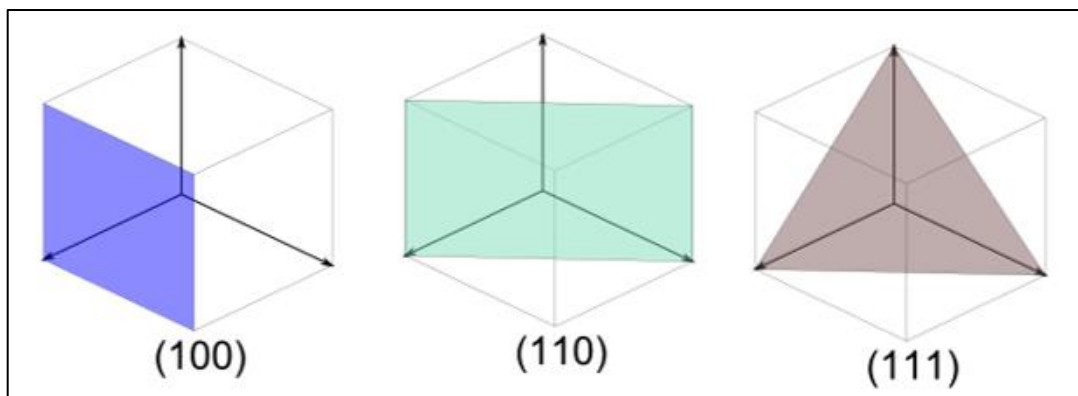
Figura 5 - célula unitária CFC, típica de ligas de alumínio.



Fonte: Adaptado de Callister (2007).

Para a caracterização de algumas das propriedades desses diversos arranjos atômicos, é uma prática comum analisar-se as estruturas cristalinas sob uma visão cartesiana. Para isso, orienta-se as arestas da célula unitária em um sistema cartesiano x, y e z , e então são analisadas as diversas propriedades de acordo com a orientação de crescimento desse sólido. A nomenclatura dos diferentes planos cristalográficos se dá pelo vetor normal a ele. Por exemplo, como mostrado na Figura 6, o plano (111) é o plano cujo vetor normal a ele é o vetor $[xyz] = [111]$, ou seja, a própria diagonal do cubo.

Figura 6 - alguns exemplos de planos cristalográficos.



Fonte: Adaptado de Callister (2007).

A multiplicidade de planos cristalográficos é importante no entendimento de sua estrutura e propriedades. De acordo com a direção de solidificação, ou seja, da própria direção de formação de seus cristais, o metal sofrerá deformações em maior ou menor escala segundo a direção do esforço aplicado. Isso ocorre devido ao mecanismo de deformação conhecido como “escorregamento de planos cristalográficos”. Por meio desse mecanismo, a quebra de ligações atômicas que mantém os planos coesos entre si ocorre antes da quebra de ligações atômicas entre os átomos de um mesmo plano, ocasionando o deslizamento de um plano atômico inteiro sobre o outro. Uma analogia para simples entendimento de tal mecanismo de deformação é o deslizamento ocorrido entre as cartas de um baralho: cada carta corresponderia a um plano cristalográfico, e o empilhamento que forma o baralho inteiro seria a estrutura cristalina do metal (DIETER, 1976).

2.3 Anisotropia

As propriedades físicas dos materiais cristalinos podem variar de acordo com a direção na qual são analisadas, como por exemplo o módulo de elasticidade, condutividade elétrica, entre outras (CALLISTER, 2007). Essa “direcionalidade” nas propriedades é conhecida como anisotropia e pode estar diretamente relacionada às características microestruturais do material, assim como evidencia a Tabela 3.

Tabela 3 - módulo de elasticidade do alumínio em várias orientações cristalográficas.

Módulo de elasticidade (GPa)			
Metal	[100]	[110]	[111]
Alumínio	63,7	72,6	76,1

Fonte: Callister (2007).

Como mostrado, a rigidez do alumínio varia de acordo com a direção de solicitação, sendo o valor catalogado de módulo de elasticidade do metal uma média. Em outras palavras, o alumínio (e conseqüentemente suas ligas) é naturalmente anisotrópico. Porém, vale ressaltar que, mesmo sendo naturalmente anisotrópico, o alumínio das chapas laminadas possui essa característica não devido a sua estrutura cristalina, e sim majoritariamente devido ao intenso direcionamento de suas fibras segundo a direção de laminação.

Como são posteriormente estampadas em forma de latas para bebidas, a anisotropia da chapa laminada está diretamente relacionada à eficiência industrial, já que o defeito de orelhamento (Figura 7) só é solucionado por descarte da porção superior da lata. Por esse motivo, o estudo e entendimento dessa característica no alumínio laminado é bastante relevante: qualquer diminuição de perda em uma produção de larga escala promove redução de custos operacionais, o que impacta no preço do produto final comercializado.

Figura 7 - orelhamento causado pela estampagem de uma chapa anisotrópica.



Fonte: TOTAL MATERIA (2008).

Existem dois tipos de anisotropia: a de orientação preferencial e a de fibramento mecânico. A anisotropia de orientação preferencial é causada pelo alinhamento dos grãos segundo o sentido da deformação aplicada. Esse é o tipo de anisotropia existente nas chapas de alumínio laminado, que apresentam grãos dispostos na mesma direção da laminação (Figura 8). A orientação dos grãos segundo a direção de laminação é tão intensa que pode ser verificada sem o auxílio de microscópio em uma lata de bebida, por exemplo. Vale ressaltar que esse tipo de anisotropia pode ser reduzido por processos térmicos como o recozimento. Já a anisotropia de fibramento mecânico ocorre devido ao alinhamento de impurezas ou defeitos – como inclusões ou vazios – durante a deformação, sendo muito comum em metais e ligas de baixa qualidade (ASM HANDBOOK VOLUME 8, 2000).

Figura 8 - microestrutura característica do alumínio laminado.



Fonte: Yu (2003).

Algumas são as formas de se analisar o grau anisotrópico de um material, existindo inclusive ensaios mecânicos específicos para determinados estudos. De forma geral, o estudo da anisotropia de propriedades mecânicas para processos de estampagem envolve a análise de dois principais parâmetros: a anisotropia média normal (r_m) e a anisotropia planar (Δr). Enquanto a anisotropia média normal está relacionada à altura média estampável da chapa – ou seja, a profundidade de estampagem que ela suporta sem romper –, a anisotropia planar indica a tendência ao orelhamento do material e qual a direção preferencial de formação desse defeito. De maneira geral, um material com boa estampabilidade apresentará valor elevado de r_m e Δr próximo a zero (ASM HANDBOOK VOLUME 8, 2000).

Para o cálculo desses dois parâmetros, utiliza-se o fator de anisotropia (r), ou fator de Lankford. Esse parâmetro pode ser encontrado pela razão entre a deformação verdadeira na largura (*width*) e a deformação verdadeira na espessura (*thickness*) da chapa, relação expressa pela Equação 1:

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\ln(w/w_0)}{\ln(t/t_0)} \quad (1)$$

Em que:

r : fator de anisotropia de Lankford

ε_w : deformação real na largura da amostra

ε_t : deformação real na espessura da amostra

w_0 : largura inicial da amostra

t_0 : espessura inicial da amostra

w : largura final da amostra

t : espessura final da amostra

Devido à grande parte das chapas laminadas destinadas a processos de estampagem possuírem espessuras reduzidas, o que dificultaria a medição da variação dessas dimensões antes e após a deformação, é prática comum readequar a equação do fator de Lankford de forma

a eliminar a espessura da expressão matemática (Equação 2). Para isso, parte-se do pressuposto que não há variação de volume durante o processo de conformação plástica.

$$l_o \cdot w_o \cdot t_o = l \cdot w \cdot t$$

$$\frac{t}{t_o} = \frac{l_o \cdot w_o}{l \cdot w} \quad (2)$$

Em que:

w_o : largura inicial da amostra

t_o : espessura inicial da amostra

l_o : comprimento inicial da amostra

w : largura final da amostra

t : espessura final da amostra

l : comprimento final da amostra

Substituindo a Equação 2 na Equação 1, obtém-se a Equação 3:

$$r = \frac{\ln(w / w_o)}{\ln(l_o \cdot w_o / l \cdot w)} \quad (3)$$

Em que:

r : fator de anisotropia de Lankford

w_o : largura inicial da amostra

t_o : espessura inicial da amostra

l_o : comprimento inicial da amostra

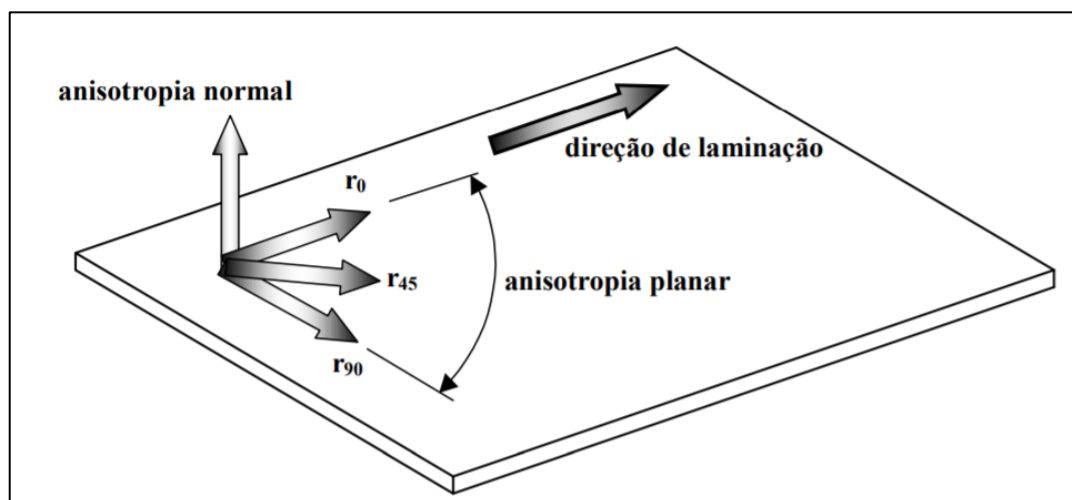
w : largura final da amostra

t : espessura final da amostra

l : comprimento final da amostra

O fator de Lankford deverá ser calculado em três direções em relação à laminação: 0°, 45° e 90°. Dessa forma, serão analisadas as propriedades desde a direção de laminação até a direção transversal a ela, como mostrado pela Figura 9.

Figura 9 - parâmetros analisados no estudo da anisotropia.



Fonte: Faria (2009).

Uma vez calculados os fatores de Lankford para as três direções, a determinação da anisotropia média normal e anisotropia planar se dá pelas Equações 4 e 5:

$$r_m = \frac{r_{0^\circ} + 2 \cdot r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{4} \quad (4)$$

$$\Delta_r = \frac{r_{0^\circ} - 2 \cdot r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{2} \quad (5)$$

Nas quais:

r_m : índice de anisotropia média normal

Δ_r : índice de anisotropia planar

r_{0° : fator de anisotropia de Lankford a 0° em relação à direção de laminação

r_{45° : fator de anisotropia de Lankford a 45° em relação à direção de laminação

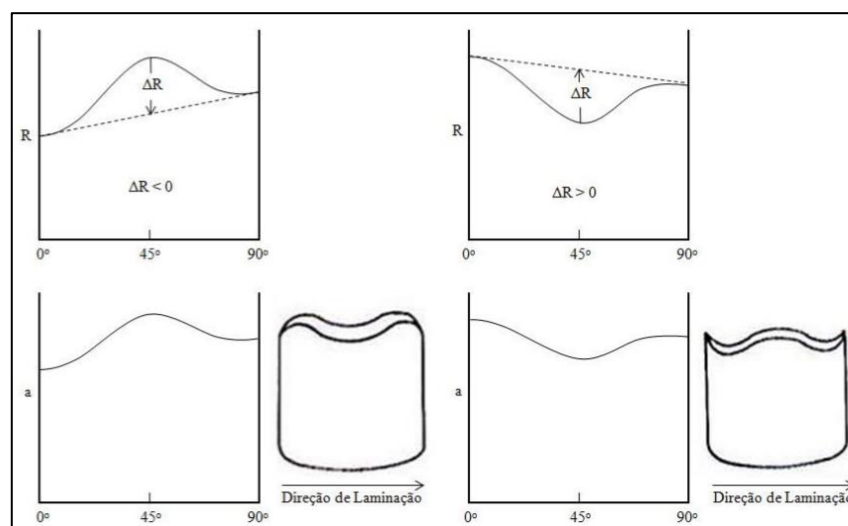
r_{90° : fator de anisotropia de Lankford a 90° em relação à direção de laminação

Pela análise das expressões acima, pode-se perceber que a anisotropia média normal apresenta caráter quantitativo, já que é uma média dos fatores de Lankford nas diferentes direções, sendo desejável o maior valor possível para os materiais a serem estampados. Esse parâmetro se relaciona diretamente à altura média estampável da chapa: quanto maior a anisotropia média normal da chapa laminada, mais profundas poderão ser as estampagens nela empregadas.

Já anisotropia planar apresenta caráter também qualitativo. Pode-se perceber pela Equação 5 que, dependendo do valor calculado para esse parâmetro, haverá uma maior tendência de criação de orelhas a 0° e 90° ou a 45° e 135° . De maneira geral, tem-se que:

- $\Delta_r > 0$ —————> orelhamento preferencialmente a 0° e 90°
- $\Delta_r = 0$ —————> sem formação de orelhas, material isotrópico
- $\Delta_r < 0$ —————> orelhamento preferencialmente a 45° e 135°

Figura 10 - direções preferenciais à formação de orelhas na lata estampada.



Fonte: Martins (2014).

A liga AA 3104 H19, utilizada para a produção de latas para bebidas, apesar de apresentar um conjunto de características propício ao processo de estampagem, não é completamente isotrópica. Segundo Martins (2014), essa liga apresenta anisotropia média

normal de aproximadamente 0,78 e anisotropia planar de -0,23, o que indica a tendência de formação de orelhas a 45° e 135° em relação à direção de laminação.

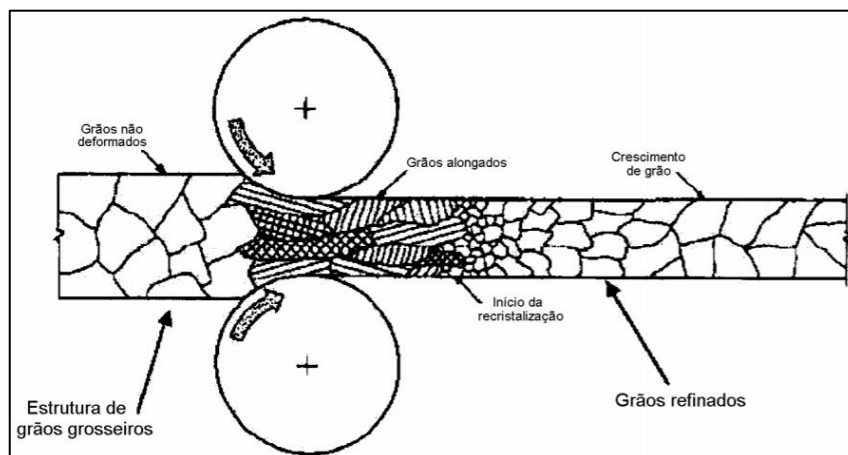
2.4 Processos de conformação e microestrutura

Segundo Dieter (1976), os processos de conformação mecânica são aqueles que visam à aplicação de deformações plásticas ao material, dando-lhes forma permanentemente. Esses processos são comumente divididos em duas categorias: *trabalho a quente* e *trabalho a frio*. É considerado trabalho a quente toda deformação realizada sob condições de temperatura e taxa de deformação que permitem a ocorrência da recuperação simultaneamente à conformação do material. Já o trabalho a frio ocorre sob temperaturas significativamente mais baixas, impossibilitando o processo dinâmico de recuperação.

Ou seja, devido a elevada temperatura de operação no trabalho a quente, geralmente limitada a 38 °C abaixo da temperatura de fusão da liga (evitando sua fusão ou excesso de oxidação), o encruamento e a distorção da estrutura de grãos causados pela deformação são eliminados pela formação de novos grãos livres de deformação, como resultado da recristalização. Vale ressaltar que a recristalização, processo pelo qual ocorre a criação e crescimento de novos grãos na microestrutura da liga metálica, possui influência da temperatura de operação: de acordo com a temperatura do material, um maior o menor grau de recristalização e crescimento de grãos poderá ser observado em uma peça recém-conformada.

Trabalhos a quente são amplamente utilizados na indústria, uma vez que permitem a aplicação de níveis de deformação superiores aos observados nos trabalhos a frio. Além de um aumento na temperatura do material causar a diminuição de sua tensão de escoamento, diminuindo por consequência a energia necessária a ser aplicada na conformação, o processo de recristalização que ocorre simultaneamente à deformação possibilita a obtenção de um produto deformado com microestrutura composta por grãos equiaxiais refinados, assim como mostrado pela Figura 11.

Figura 11 - recristalização durante a laminação a quente.



Fonte: Maxwell (2005).

Por sua vez, o trabalho a frio assume relevância ao possibilitar o aumento da resistência e dureza da liga, diminuindo sua ductilidade. Ao deformar o material sob uma temperatura abaixo de seu patamar recristalizador, a conformação a frio distorce os grãos segundo o sentido da conformação, aumentando o número de discordâncias em sua microestrutura. Como o movimento de discordâncias é um dos mecanismos de deformação dos materiais, uma estrutura com alta densidade desse tipo de descontinuidade se tornará mais rígida e resistente, apesar de menos dúctil.

Na produção de chapas de alumínio para latas de bebidas, ambos os tipos de conformação (a quente e a frio) são aplicados ao material. A laminação a quente permite, por exemplo, que lingotes de alumínio fundido, de aproximadamente 600 mm de altura, sejam transformados em chapas de aproximadamente 3 mm de espessura, enquanto a laminação a frio possibilita a finalização do produto, que apresentará o acabamento superficial e resistência mecânica necessários à produção de latas para bebidas.

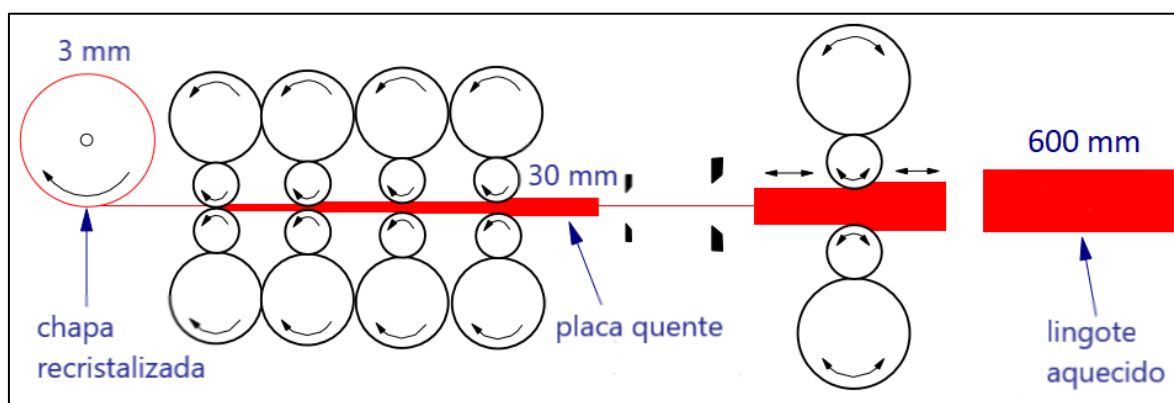
2.5 Laminação a quente e a frio em chapas para produção de latas para bebidas

Os esforços envolvidos no processo de laminação são elevados, podendo atingir milhares de toneladas de carga (DIETER, 1976). Como já citado, são utilizados ambos os tipos de laminação, a quente e a frio, na fabricação de chapas de alumínio para a estampagem de latas. Cada um desses processos confere uma série de propriedades requeridas ao metal bobinado como, por exemplo, a espessura de chapa desejada, qualidade superficial dentro dos padrões

aceitos pelo mercado, resistência mecânica necessária para suportar a pressão exercida pelo líquido armazenado, entre outras.

Por ocorrer a temperaturas elevadas, a laminação a quente é o processo que aplica a maior diminuição absoluta de espessura no alumínio. Por exemplo, lingotes aquecidos com cerca de 600 mm de altura saem dos laminadores a quente em forma de chapas de aproximadamente 3 mm de espessura. Vale ressaltar que tal redução ocorre em diversos “passes”, ou passagens pelos rolos laminadores: alguns desses laminadores possuem reversão em seu sentido de laminação e outros possuem apenas um sentido de processamento, assim como mostrado pela Figura 12.

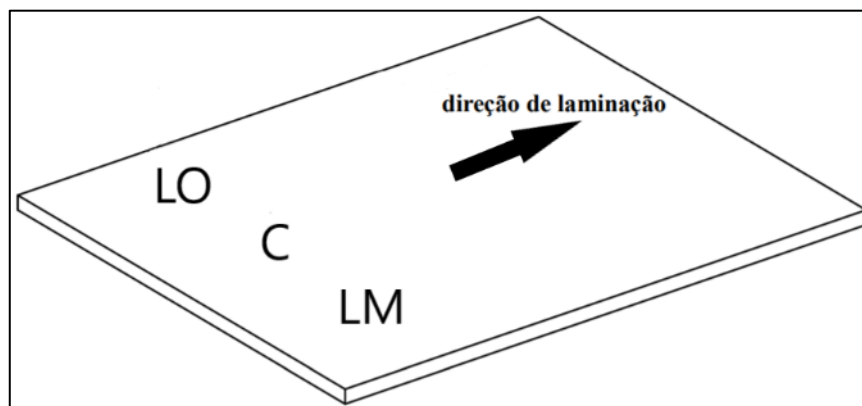
Figura 12 - etapas da laminação a quente.



Fonte: Autor (2020).

Durante o processo de laminação a quente, há um acréscimo de temperatura na região da chapa próxima ao motor do laminador (chamado de lado motor, ou LM). Decorrente de uma geometria mais fechada e abafada, essa porção do laminador a quente está menos exposta ao resfriamento por convecção com o ar ambiente. Vale lembrar que, durante o processo de laminação a quente, a microestrutura do material sofre recristalização dinâmica, processo diretamente relacionado à temperatura a que o material está submetido. Tendo isso em vista, presume-se que, devido à variação da temperatura de acordo com a proximidade ao lado motor do laminador a quente, a chapa de alumínio sofrerá diferentes graus de recristalização ao longo de sua largura, apresentando diferenças microestruturais. Objetiva-se, com esse trabalho, verificar se essa variação de temperatura ao longo da largura do rolo do laminador a quente afeta o grau de anisotropia no produto final.

Figura 13 - lados operador (LO), centro (C) e motor (LM) de uma chapa laminada.



Fonte: Autor (2020).

O processo que sucede a laminação a quente é a laminação a frio. Nesse processo de conformação, a temperatura de operação é substancialmente menor, o que impossibilita a ocorrência de recuperação da microestrutura. Ao aplicar-se a redução a frio da espessura, por exemplo, de 3 mm para aproximadamente 0,3 mm, os grãos, que anteriormente se encontravam em estado refinado e equiaxial, sofrem deformação e orientação segundo a direção de laminação. O material que sai dos rolos do laminador a frio se encontra em estado extremamente encruado (H19), com resistência mecânica elevada e boa qualidade superficial, características necessárias para a fabricação de latas de bebidas. A alta direcionalidade da microestrutura, atrelada à anisotropia intrínseca do metal, faz com que a bobina de alumínio apresente caráter anisotrópico, responsável pelo orelhamento durante o processo de estampagem e estiramento do corpo da lata.

2.6 Estampagem e estiramento na produção de latas para bebidas

O processo de conformação plástica por estampagem é aplicado amplamente pela Engenharia Industrial. Por meio dele, chapas finas de diversos materiais – sendo relevantes nesse grupo os metais – tomam a forma da ferramenta utilizada no golpe do punção. Pode ser citado, por exemplo, que a estampagem é o principal processo utilizado na indústria automobilística para a conformação das peças de lataria dos carros, sendo também presente na produção de utensílios domésticos e latas para bebidas. Neste último caso, a estampagem corresponde à primeira etapa de conformação (Figura 14), sendo seguida pelo processo de estiramento (ou estampagem profunda), que dará o formato característico do corpo da lata.

Figura 14 - etapas da conformação da lata por estampagem.



Fonte: Regada (2015).

Para que o material apresente boa estampabilidade, dois são os fatores a serem respeitados: primeiramente, a borda da chapa deverá ser capaz de deslizar sobre a superfície da ferramenta, de forma a sofrer a correta deformação durante o golpe. Além disso, o material deve ser capaz de resistir à diminuição de espessura, de forma a não rasgar durante a conformação ou apresentar variações de espessura na parede do produto estampado (ASM HANDBOOK VOLUME 14, 1988), sendo esse segundo fator diretamente relacionado à anisotropia do material.

A análise conjunta de ambos os parâmetros anisotrópicos, média normal e planar, são indicativos de uma boa estampabilidade do material. De maneira geral, quanto maior a anisotropia média normal, maior será a altura estampável da chapa, isto é, mais profunda poderá ser a lata de bebida. Já a anisotropia planar está relacionada ao fenômeno de orelhamento, que está ligado a perdas de material por descarte do topo da lata estampada, sendo desejável valor mais próximo de zero possível ($\Delta_r = 0$ corresponde aos materiais totalmente isotrópicos, que não sofrem deformações direcionais distintas).

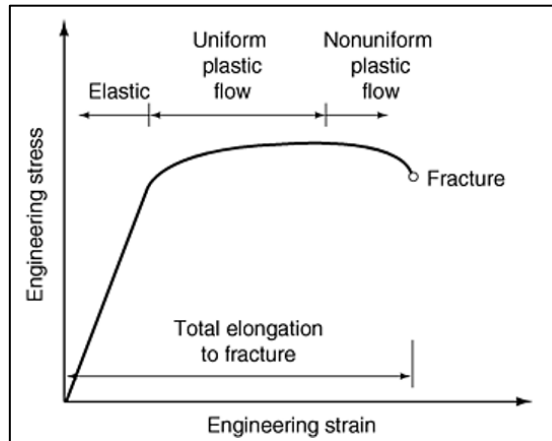
2.7 Ensaio de tração

O conhecimento sobre as propriedades de um material é de importante para a Engenharia. Pelo domínio das propriedades dos diversos materiais existentes na natureza, o engenheiro é capaz de prever comportamentos, realizar e aprimorar projetos já existentes, inovar e, de forma geral, avançar a fronteira do conhecimento humano, possibilitando o desenvolvimento e melhoria de vida da sociedade.

Para que tal estudo de propriedades ocorresse sob uma base comum de comparação, diversos ensaios – padronizados mundialmente – foram criados durante a história. Por meio deles, é possível analisar o comportamento de um determinado material sob condições pré-estabelecidas de análise. Atualmente, é possível analisar uma vasta gama de propriedades por meio dos ensaios de Engenharia, como por exemplo a resistência mecânica de um metal, sua resistência ao impacto, dureza, condutividade térmica e elétrica, poder calorífico de um combustível, tratabilidade térmica de uma resina, entre muitas outras.

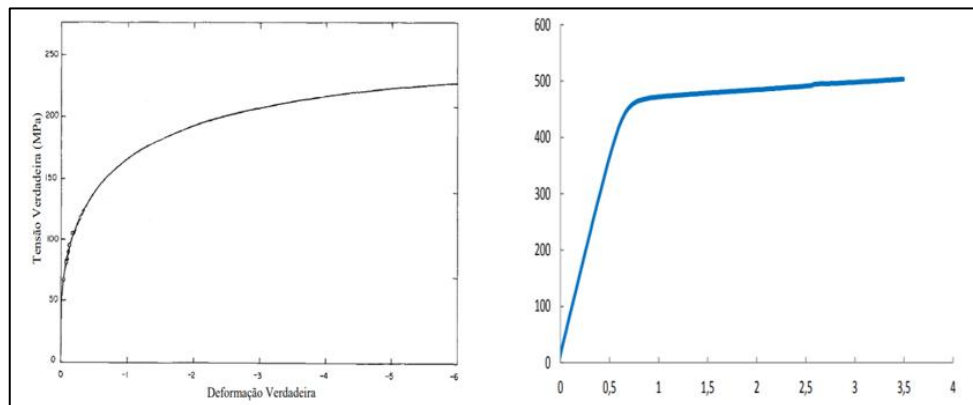
Quando se considera as áreas estudadas pela Engenharia Mecânica, é inegável que um dos ensaios mais utilizados é o ensaio de tração, que consiste em fixar um corpo de prova de determinado material entre duas garras e solicitar mecanicamente essa amostra sob um esforço de tração crescente, acompanhando a evolução de aplicação da força e deslocamento das garras da máquina até a fratura da amostra (ASM HANDBOOK VOLUME 8, 2000). Os gráficos tipicamente gerados por esse ensaio (Figuras 15 e 16) são capazes de fornecer uma série de informações importantes sobre o material estudado, como por exemplo sua tensão de escoamento, módulo de elasticidade, tensão máxima de tração, tensão de ruptura, deformação máxima etc. Por meio dele, ainda é possível verificar a natureza desse material quanto a sua plasticidade, isto é, capacidade de se deformar permanentemente sem sofrer ruptura.

Figura 15 - gráfico tipicamente obtido pelo ensaio de tração.



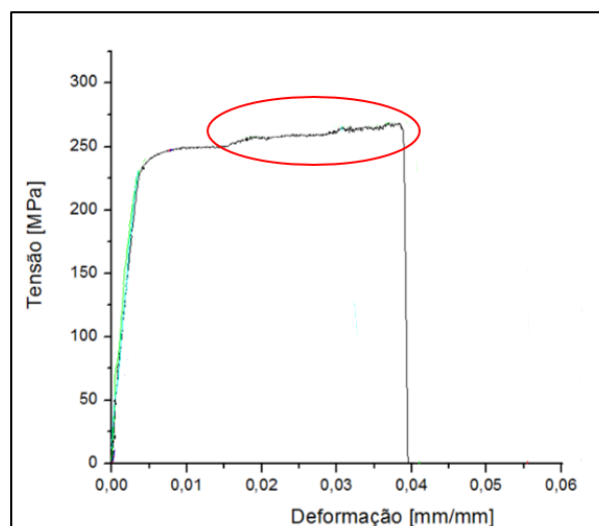
Fonte: ASM Handbook Vol.8 (2000).

Figura 16 - ligas de alumínio não-encruadas (1xxx e 7xxx, respectivamente).



Fonte: Adaptado de Granato e Hernandez (2016).

Figura 17 - comportamento da liga AA 3104 H19 (encruada) sob tração.



Fonte: Adaptado de Martins (2014).

É importante pontuar que, devido ao caráter extremamente encruado do material (H19), a sua curva “tensão x deformação” apresenta uma região de instabilidade no regime plástico antes de sua ruptura (destacada em vermelho na Figura 17), não verificada nos ensaios das ligas de alumínio não encruadas (a Figura 16 mostram dois exemplos citados na literatura).

Apesar de comumente ser realizada a deformação do corpo de prova até a sua ruptura, para o estudo da anisotropia direcional, que envolve em seus cálculos a variação das medidas de largura e espessura da amostra após a conformação, a máquina de ensaio de tração deve ser utilizada apenas para aplicar uma deformação plástica não-ruptiva ao corpo de prova. Por meio dessa deformação permanente, medir-se-á a variação das dimensões de largura em relação à espessura, como expresso pela Equação 1.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

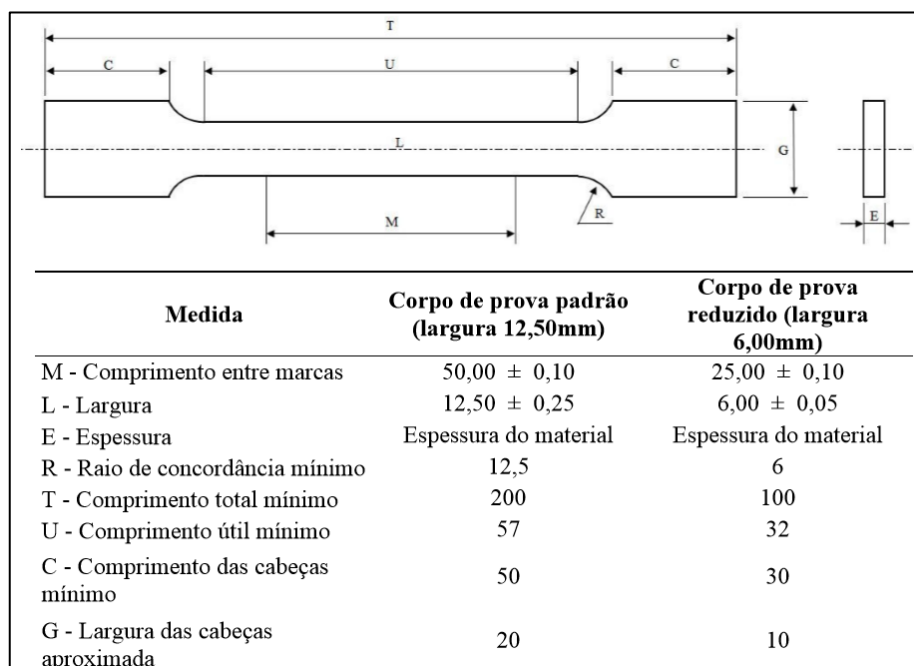
Para a realização desse estudo, foram retirados corpos de prova padrões segundo a NBR 7549:2001 (Figura 18) a 0°, 45° e 90° em relação à direção de laminação nas três posições explicitadas pela Figura 13: lado operador, centro e lado motor (LO, C e LM, respectivamente). Portanto, para cada bobina utilizada, foram retiradas um total de nove amostras. Como foram analisadas três bobinas diferentes, o espaço amostral do trabalho foi de vinte e sete amostras (Tabela 4). Foram cortados, ainda, seis corpos de prova adicionais para a realização do setup da máquina de ensaio de tração, para que desse modo nenhum corpo de prova do estudo fosse perdido enquanto os parâmetros de ensaio estivessem sendo escolhidos empiricamente. Vale ressaltar que, por questões de confidencialidade empresarial, os equipamentos utilizados para retirada e corte das amostras dos corpos de prova não puderam ser fotografados.

Tabela 4 - espaço amostral da pesquisa realizada, total de 27 amostras.

	Direção de corte	Quantidade de amostras
Lado Motor	0°	3
	45°	3
	90°	3
Lado Centro	0°	3
	45°	3
	90°	3
Lado Operador	0°	3
	45°	3
	90°	3

Fonte: Autor (2020).

Figura 18: corpo de prova padrão segundo a NBR 7549:2001.



Fonte: Martins (2014).

Como mostrado pelas Equações 4 e 5, os índices de anisotropia média normal e planar são calculados com base no fator de Lankford, que por sua vez é calculado pela Equação 3. Pela observação da Equação 3, pode-se perceber que os dados experimentais necessários para esse trabalho são as medidas inicial e final do comprimento e largura dos corpos de prova de tração.

Para a marcação do comprimento útil e medição das dimensões iniciais dos corpos de prova, foram utilizados, respectivamente, o traçador de altura digital e o projetor de perfis do Laboratório de Metrologia da FEG/UNESP (Figura 19).

Figura 19: traçador de altura (à esquerda) e projetor de perfis (à direita).



Fonte: Autor (2020).

Figura 20: corpo de prova com comprimento útil de 50 mm marcado.



Fonte: Autor (2020).

Para a realização das deformações plásticas não-ruptivas, isto é, que são interrompidas antes da ruptura do corpo de prova, foi utilizada a máquina de ensaio de tração da FEG/UNESP (Figura 21). Como o material a ser deformado plasticamente se encontrava em um estado extremamente encruado (H19), foi utilizada a menor célula de carga disponível (5.000 N) e velocidade de avanço da garra igual a $1,0 \text{ mm/min}$, de modo a proporcionar um carregamento lento e uniforme sem aplicações de esforços que proporcionassem a ruptura prematura da amostra.

Figura 21: máquina de ensaio de tração utilizada.



Fonte: Autor (2020).

Após os ensaios de tração ruptivos dos seis corpos de prova adicionais para *setup* da máquina, percebeu-se que um valor razoável para deslocamento da garra seria de $2,80\text{ mm}$, no qual todos os ensaios seriam interrompidos: dessa forma, assegurava-se que nenhum corpo de prova sofreria ruptura e que seria aplicada deformação plástica para posterior medição das dimensões finais das amostras.

Em posse dos vinte e sete corpos de prova deformados plasticamente, foi novamente utilizado o projetor de perfis óptico para a aferição das dimensões finais das amostras. Com esses resultados, foi possível realizar os cálculos expressos pelas Equações 3, 4 e 5.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Por meio de uma revisão da literatura disponível sobre as ligas de alumínio e suas características, processos de conformação plástica e consequentes alterações desses arranjos, bem como os processos industriais utilizados atualmente para a produção de latas para bebidas, pode-se inferir o seguinte:

- A natureza microestrutural do alumínio, bem como a orientação de seus grãos após o processo de laminação, tornam o material das chapas anisotrópico;
- Um metal anisotrópico que for conformado por estampagem apresentará o defeito conhecido como orelhamento, causado pela deformação desigual das fibras nas diversas direções radiais do esforço aplicado;
- Os índices de anisotropia possuem dependência direta do tamanho, formato e direção dos grãos do material analisado;
- Durante o processo de laminação a quente, o fenômeno de recristalização dinâmica ocorre no alumínio que está sendo laminado. Esse fenômeno depende diretamente da temperatura do metal durante a laminação;
- O equipamento da empresa produtora de chapas de alumínio laminadas apresenta diferentes temperaturas ao longo do rolo do laminador a quente: quanto mais próximo ao lado motor da máquina, maior é a temperatura durante o processo de laminação.

A partir do exposto acima, a seguinte hipótese foi criada: como há uma variação de temperatura ao longo do rolo do laminador a quente, ocorrerão diferentes níveis de recristalização no material trabalhado a quente e, conseqüentemente, serão apresentadas diferenças microestruturais ao longo da largura da chapa, ocasionando diferentes graus de anisotropia no material. O presente trabalho procura analisar como os índices de anisotropia variam ao longo da largura da chapa laminada, visando à possibilidade de mudanças dos parâmetros de produção para um menor descarte de material devido o defeito de orelhamento.

Após os comprimentos úteis dos corpos de prova terem sido traçados com o traçador de altura digital, mediu-se no projetor de perfis suas dimensões iniciais (Tabela 5), que seriam utilizadas nos cálculos dos fatores de Lankford. Dessa forma, qualquer erro sistêmico de medição seria carregado a todas as medidas (inclusive iniciais).

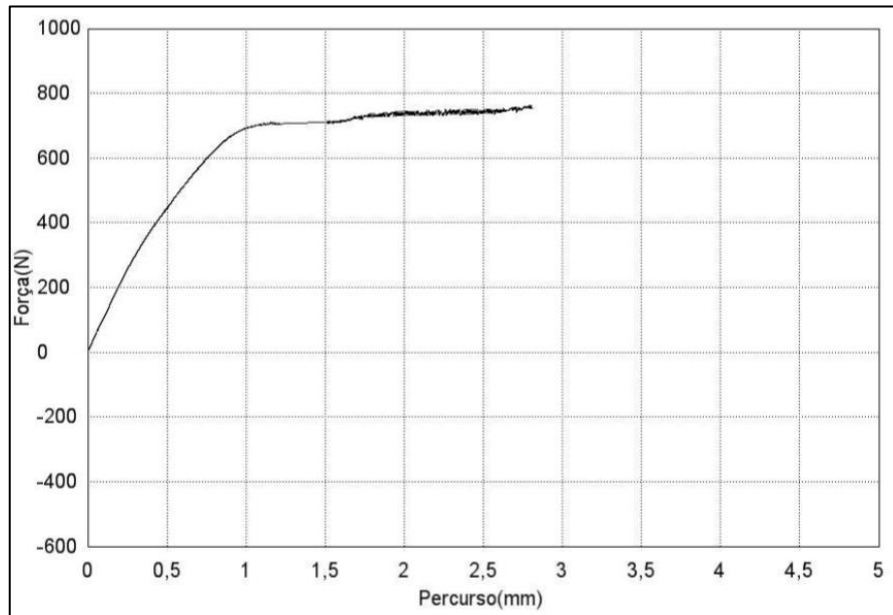
Tabela 5: média das dimensões iniciais dos corpos de prova e seus desvios padrões.

Comprimento inicial Lo [mm]	Desvio padrão Lo [mm]	Largura inicial Wo [mm]	Desvio padrão Wo [mm]
49,708	0,061	12,531	0,013

Fonte: Autor (2020).

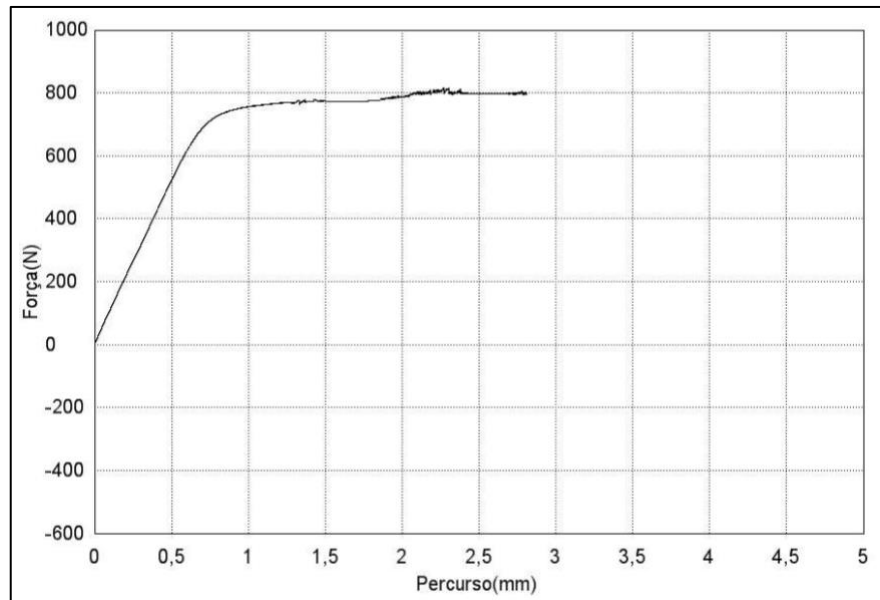
Em posse das dimensões iniciais, foram realizados os vinte e sete ensaios de tração não-ruptivos, correspondentes às direções 0° , 45° e 90° em relação à laminação, nas três posições da chapa a serem analisadas: lado motor, centro e lado operador. Todos os ensaios foram interrompidos no deslocamento igual a $2,80\text{ mm}$, sendo que nenhum sofreu ruptura prematura, confirmando a boa escolha dos parâmetros de ensaio. O gráfico gerado pela captação de dados do equipamento se assemelhou bastante ao comportamento esperado pelo estudo da literatura, exposto na Figura 17, sendo também verificada a região serrilhada de instabilidade devido ao alto grau de encruamento das amostras. A seguir, são mostrados alguns gráficos resultantes dos ensaios do lado operador (Figuras 22, 23 e 24), a título de ilustração.

Figura 22: gráfico gerado no ensaio do lado operador à 0°.



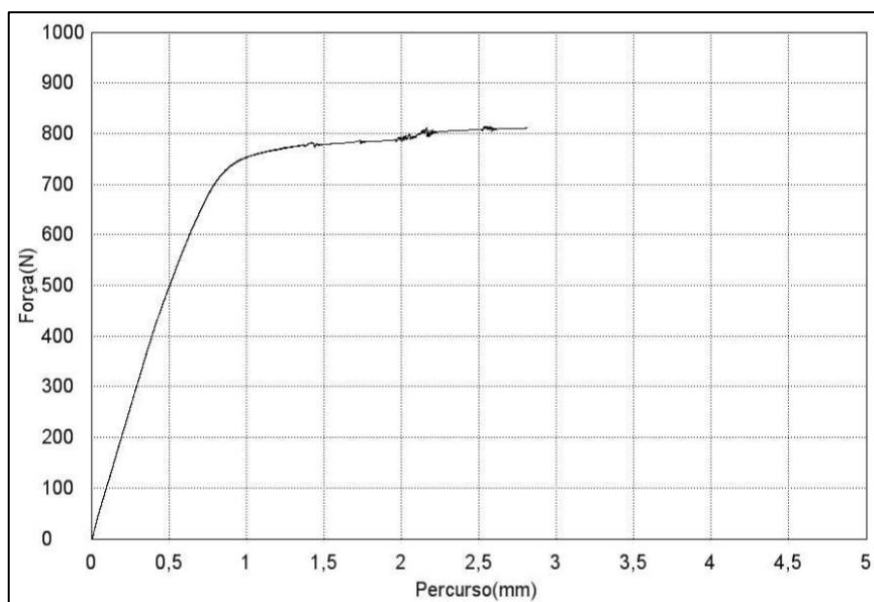
Fonte: Autor (2020).

Figura 23: gráfico gerado no ensaio do lado operador à 45°.



Fonte: Autor (2020).

Figura 24: gráfico gerado no ensaio do lado operador à 90°.



Fonte: Autor (2020).

Vale ressaltar que todos as deformações apresentaram bastante similaridade entre si quanto ao esforço máximo do regime elástico do material: a curva para todos os corpos de prova entrou no regime plástico no esforço em torno de 750 N, independentemente da posição de retirada da amostra. Tal fato pode ser verificado pela comparação das Figuras 22, 23 e 24, que evidenciam o comportamento uniforme e a boa repetibilidade das deformações aplicadas.

Com os vinte e sete corpos de prova deformados plasticamente, utilizou-se novamente o projetor de perfis para a medição das dimensões finais das amostras (Tabela 6) e calculou-se, ainda, os desvios padrões dessas medições (Tabela 7), a fim de se verificar a confiabilidade dos resultados obtidos.

Tabela 6: médias das dimensões finais dos corpos de prova ensaiados.

Direção de corte	Lado Motor		Centro		Lado Operador	
	L [mm]	W [mm]	L [mm]	W [mm]	L [mm]	W [mm]
0°	51,273	12,415	51,266	12,420	51,154	12,408
45°	51,849	12,273	51,647	12,279	51,026	12,341
90°	50,951	12,364	51,423	12,290	51,297	12,293

Fonte: Autor (2020).

Tabela 7: desvios padrões das medições finais.

Direção de corte	Lado Motor		Centro		Lado Operador	
	Desvio padrão L [mm]	Desvio Padrão W [mm]	Desvio padrão L [mm]	Desvio Padrão W [mm]	Desvio padrão L [mm]	Desvio Padrão W [mm]
0°	0,059	0,028	0,043	0,018	0,055	0,008
45°	0,096	0,013	0,058	0,054	0,097	0,075
90°	0,044	0,063	0,089	0,065	0,025	0,042

Fonte: Autor (2020).

Com os dados das dimensões iniciais (Tabela 5) e finais (Tabela 6) das amostras, pôde-se calcular os fatores de Lankford, os índices de anisotropia média normal e índices de anisotropia planar a partir das Equações 3, 4 e 5, respectivamente.

Tabela 8: resultados finais calculados.

	Direção de corte	r	r_m	Δr
Lado Motor	0°	0,386		
	45°	0,936	0,843	-0,185
	90°	1,116		
Centro	0°	0,363		
	45°	1,086	0,954	-0,264
	90°	1,280		
Lado Operador	0°	0,473		
	45°	1,331	1,160	-0,343
	90°	1,504		

Fonte: Autor (2020).

Pela análise dos resultados mostrados na Tabela 7, pode-se constatar o seguinte:

- Como citado na Seção 3.3, os valores dos índices de anisotropia esperados para o estudo eram de aproximadamente 0,78 para a anisotropia média normal e -0,23 para anisotropia planar. Portanto, os valores dos índices calculados neste trabalho se aproximaram dos valores citados na literatura disponível;

- Pode-se afirmar que existe, de fato, uma tendência de mudança dos valores de anisotropia ao longo da largura da chapa de alumínio devido à variação de temperatura ao longo do rolo do laminador a quente: Ambos os índices aumentam em módulo no sentido do lado motor para a o lado operador da bobina;
- No sentido do lado motor para o lado operador da bobina laminada, os valores dos índices de anisotropia média normal aumentaram cerca de 38% (0,843 no LM e 1,160 no LO). Isso indica que a altura média estampável é maior no lado operador (lado mais frio), apesar de esse não ser um fator crítico para a indústria de latas, visto que já são estampadas latas de diferentes tamanhos e formatos atualmente;
- No sentido do lado motor para o lado operador, os valores dos índices de anisotropia planar aumentaram cerca de 85% em módulo (-0,185 no LM e -0,343 no LO). Isso indica que a tendência de formação de orelhas a 45° e 135° na lata estampada é maior no lado operador (lado mais frio). Pode-se dizer, portanto, que quanto menor a temperatura de operação durante a laminação a quente, maior será a anisotropia planar da chapa final, sendo esse um resultado importante do estudo realizado: caso seja aumentada a temperatura da laminação a quente, pode-se diminuir o descarte de alumínio devido ao orelhamento excessivo da borda da lata;

A partir do pontuado acima, pode-se perceber que o aumento da temperatura de operação durante a laminação a quente devido à proximidade ao lado motor do equipamento causa mudanças benéficas na microestrutura do alumínio laminado, diminuindo o índice de anisotropia planar da chapa e, conseqüentemente, diminuindo seu grau de orelhamento após a estampagem. Tal constatação traz à tona a necessidade de um estudo aprofundado sobre a homogeneização e aumento da temperatura na laminação a quente, de modo a diminuir o descarte de alumínio por corte da borda deformada.

O fato de a chapa de alumínio laminada apresentar variação em seus índices de anisotropia devido a parâmetros térmicos durante a laminação a quente, mesmo sofrendo posteriormente uma redução significativa a frio de espessura – que é responsável pelo alto grau de encruamento do produto laminado –, mostra a importância e grande necessidade de controle desses parâmetros durante o trabalho a quente.

Vale lembrar que a variação verificada na altura média estampável (representada pelo índice de anisotropia média normal) entre os lados opostos da chapa não é um fator crítico para a produção de latas: afinal, hoje já são produzidas latas de diferentes tamanhos e formatos. O fator crítico a ser pontuado e analisado é a variação da anisotropia planar e, conseqüentemente, da tendência de formação de orelhas nas latas estampadas.

5 CONCLUSÃO

A partir do estudo realizado, pode-se concluir que a variação de temperatura ao longo do rolo do laminador a quente – devido ao maior aquecimento do lado motor da máquina – promove alteração no grau de recristalização do alumínio durante seu processo de conformação. Por apresentar diferenças microestruturais ao longo de sua largura, a chapa laminada apresenta diferentes níveis de anisotropia, que persistem mesmo após a grande quantidade de trabalho a frio realizada. Como consequência dessa variação, uma mesma chapa de alumínio laminada apresentará diferentes graus de orelhamento quando estampadas em forma de latas para bebidas, o que promoverá um maior descarte de material após o recorte do defeito e, conseqüentemente, diminuição da eficiência da linha de produção e aumento do preço final do produto.

Ambos os índices de anisotropia, média normal e planar, aumentam em módulo no sentido do lado motor para o lado operador da chapa (38% e 85% de aumento dos respectivos índices). Portanto, apesar de apresentar maior altura média estampável no lado operador (caracterizada pelo aumento da anisotropia média normal), a chapa de alumínio laminada também tende a sofrer maior orelhamento (caracterizada pelo aumento da anisotropia planar) após a estampagem nessa região. Como a altura média estampável da lata não se mostra como um fator limitante na produção atual de latas (afinal, são produzidas hoje latas de diferentes formatos e tamanhos), os esforços devem ser focados na diminuição da variação da anisotropia planar e, conseqüentemente, do descarte de material devido ao orelhamento das latas.

Finalmente, pôde ser concluído que a porção mais quente chapa laminada (próxima ao lado motor do rolo de laminação a quente) apresentou menor índice de anisotropia planar, o que resulta em um menor grau de orelhamento e, conseqüentemente, menor descarte de alumínio. Devido a isso, é recomendável que seja realizado um estudo aprofundado sobre a homogeneização e aumento da temperatura na laminação a quente, de modo a diminuir o descarte de alumínio por corte da borda deformada.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Por meio do trabalho apresentado, foi possível validar preliminarmente algumas hipóteses criadas devido à variação de temperatura ao longo do rolo do laminador a quente. De fato, há uma tendência à diminuição em módulo dos índices de anisotropia, tanto média normal quanto planar, conforme a temperatura média de operação durante a laminação a quente aumenta. Para complementar este estudo, portanto, seria interessante a realização de algumas outras análises relacionadas ao tema, como por exemplo:

- Análise metalográfica e de microdureza ao longo da largura de uma chapa de alumínio laminada, de modo a verificar a variação de microestrutura e demais propriedades de acordo com o acréscimo de temperatura devido à proximidade ao lado motor do laminador a quente;
- Análise de viabilidade do aumento da temperatura média de operação durante a laminação a quente de chapas de alumínio;
- Análise da viabilidade de alteração de parâmetros de utilização de líquidos refrigerantes durante a laminação a quente, de forma a homogeneizar a temperatura ao longo de todo o comprimento do rolo laminador.

REFERÊNCIAS

ABRALATAS - Associação Brasileira dos Fabricantes de Latas de Alumínio. **Brasil: vendas de latas de alumínio para bebidas e taxa de crescimento anual – 1990 a 2017.** Disponível em: <http://www.abralatas.org.br>. Acesso em: 18 abr. 2020.

ASM INTERNATIONAL HANDBOOK COMMITTEE. **Forming and forging.** Ohio: The Materials Information Company, 1988. v. 14.

ASM INTERNATIONAL HANDBOOK COMMITTEE. **Mechanical testing and evaluation.** Ohio: The Materials Information Company, 2000. v.8.

ASM INTERNATIONAL HANDBOOK COMMITTEE. **Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials.** Ohio: The Materials Information Company, 1990. v. 2.

CALLISTER, JÚNIOR, W. D. **Materials science and engineering: an introduction.** 7. ed. New York: John Wiley & Sons, 2007. 705 p.

DIETER, G. E. **Mechanical metallurgy.** 2. ed. New York: Mcgraw-hill, 1976. 653 p.

HERTZBERG, R. W. **Deformation and fracture mechanics of engineering materials.** 4. ed. New York: John Wiley & Sons, 1996. 786 p.

MARTINS, A. L.T. **Estudo comparativo de propriedades mecânicas e textura de laminados da liga de alumínio 3104-H19.** 2014. 174 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2014. Disponível em: <http://tede.mackenzie.br/jspui/handle/tede/1345>. Acesso em: 13 jul. 2020.

YU, T. M. **The effect of cold working and annealing practice on earing in 3104 Al alloy sheet.** Knoxville: The University Of Tennessee, 2003. 9 p. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1044580393900724>. Acesso em: 07 ago. 2020.