

EDUARDO DE PRETTO STIVALE REGADA

Análise da reversão do fundo de latas de alumínio para bebidas - *Buckle*

EDUARDO DE PRETTO STIVALE REGADA

Análise da reversão do fundo de latas de alumínio para bebidas - *Buckle*

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.

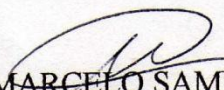
Orientador: Prof. Dr. Angelo Caporalli Filho

R333a	Regada, Eduardo De Pretto Stivale Análise da reversão do fundo de latas de alumínio para bebidas – Buckle / Eduardo De Pretto Stivale Regada – Guaratinguetá, 2014. 69 f. : il. Bibliografia : f. 66-68 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2014. Orientador: Prof. Dr. Angelo Caporalli Filho 1. Ligas de alumínio – Tratamento térmico 2. Conformação de metais 3. Latas I. Título CDU 669.715
-------	---

EDUARDO DE PRETTO STIVALE REGADA

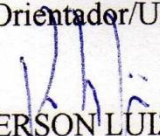
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

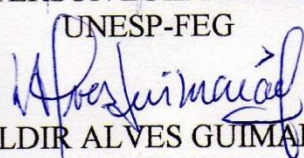
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA


Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. ANGELO CAPORALLI FILHO
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. PETERSON LUIZ FERRANDINI
UNESP-FEG


Prof. Dr. VALDIR ALVES GUIMARÃES
UNESP-FEG

Fevereiro de 2015

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Nelson e Fatima, que sempre incentivaram meus estudos.

À minha esposa Thaís e ao meu filho Davi por estarem presentes durante toda minha formação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Angelo Caporalli Filho que me incentivou, sem a sua orientação, auxílio e paciência, o estudo aqui apresentado não teria sido realizado.

Aos colegas da tecnologia da Novelis do Brasil, à equipe de assistência por coletar todas as amostras, e em especial a Felipe Pereira, Rosemberg Rutter e Matheus Guedes por estarem todos os dias ao meu lado, colaborando na solução de dúvidas pertinentes à fabricação de latas, além de permitirem a utilização do projeto de estágio como inspiração para a realização do presente trabalho.

REGADA, E. D. P. S. **Análise da reversão do fundo de latas de alumínio para bebidas - Buckle**. 2014. 69f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

RESUMO

Neste trabalho abordam-se os principais métodos de conformação plástica dos metais, com enfoque no processo de estampagem profunda. São abordadas as propriedades mecânicas avaliadas com o ensaio de tração. É apresentado como é feita a classificação das ligas de alumínio, seguido pelos tratamentos térmicos aplicáveis e como é feita a designação das condições metalúrgicas. A fabricação das latas de alumínio para bebidas é descrita passo a passo, em linhas gerais. Tem-se como objetivo analisar como diferentes geometrias do fundo das latas têm grande influência na reversão do fundo. Para que seja possível atingir o objetivo foi necessária a utilização de latas de diferentes fabricantes, com as quais foram realizados ensaios de *buckle* para obtenção das pressões de reversão e, ensaios de tração e análises geométricas. Por fim foram obtidas equações empíricas correlacionando essas variáveis, sendo observado que a conformação do *reforming* altera significativamente seu comportamento.

PALAVRAS-CHAVE: Fabricação de latas. Buckle. Pressão de reversão do fundo. *Reforming*.

REGADA, E. D. P. S. **Analysis of dome reversal of aluminum beverage cans – *Buckle***. 2014. 69f. Graduate Work (Graduate in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

ABSTRACT

This work approaches the main methods of plastic deformation of metals, with a focus on the deep drawing process. The mechanical properties were evaluated with the tension tests. It is presented the aluminum alloys designation, followed by applying heat treatments and the designation of tempers. The manufacture of aluminum beverage cans is described step by step, in general terms. The main objective is to analyze how different cans background geometries have great influence on the dome reversal. To be able to achieve the goal it was necessary to use cans of different manufacturers, which were used in buckle tests to obtain the reversal pressures, tensile tests and geometric analysis. Finally empirical equations were obtained correlating these variables, and it was observed that the conformation of reforming change significantly it's behavior.

KEYWORDS: Can manufacture. Buckle. Dome reversal pressure. Reforming.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	OBJETIVOS	9
2	CONFORMAÇÃO PLÁSTICA DOS METAIS	10
2.1	ESTAMPAGEM	12
3	PROPRIEDADES MECÂNICAS	14
3.1	LIMITE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	14
3.2	LIMITE DE ESCOAMENTO	15
3.3	ALONGAMENTO PERCENTUAL	16
3.4	MÓDULO DE ELASTICIDADE	16
4	CLASSIFICAÇÃO DAS LIGAS	17
4.1	LIGAS TRABALHÁVEIS	17
4.1.1	Designação das ligas trabalháveis por grupos	17
4.1.1.1	Grupo 1XXX	18
4.1.1.2	Grupos 2XXX a 8XXX	18
4.1.2	Ligas trabalháveis tratáveis termicamente	19
4.1.3	Ligas trabalháveis não tratáveis termicamente	19
4.2	LIGAS DE FUNDIÇÃO	19
4.2.1	Grupo 1XX.X	20
4.2.2	Grupos 2XX.X a 9XX.X	20
5	TRATAMENTOS TÉRMICOS	21
5.1	HOMOGENEIZAÇÃO	21
5.2	SOLUBILIZAÇÃO/ENVELHECIMENTO	21
5.3	RECOZIMENTO PLENO	22
5.4	RECOZIMENTO PARCIAL	23
5.5	ESTABILIZAÇÃO	24
6	CONDIÇÕES METALÚRGICAS	25
6.1	“F” – COMO FABRICADA	25
6.2	“O” – RECOZIDA	25
6.3	“H” – ENCRUADA	26
6.4	“T” – TRATADA TERMICAMENTE	27
6.5	“W” - SOLUBILIZADA	28
7	LIGA AA3104	29
8	PROCESSO DE FABRICAÇÃO DA LATA	30
8.1	REFORMING	38
9	REVERSÃO DO FUNDO DA LATA	39

10	MATERIAIS E MÉTODOS	40
10.1	AMOSTRAGEM	40
10.2	ENSAIO DE BUCKLE	42
10.2.1	Metodologia	42
10.3	ENSAIO DE TRAÇÃO	43
10.3.1	Metodologia	44
10.4	ANÁLISE GEOMÉTRICA	46
10.4.1	Metodologia	46
11	RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
11.1	ANÁLISE QUALITATIVA	54
11.2	ANÁLISE QUANTITATIVA	55
11.2.1	Latas após <i>bodymaker</i>	56
11.2.2	Latas após IBO	59
11.2.3	Latas após <i>necker</i>	60
11.2.4	Comparativo final	64
12	CONCLUSÃO	65
	REFERÊNCIAS	66
	GLOSSÁRIO	69

1 INTRODUÇÃO

As latas de bebidas podem ser fabricadas com dois materiais, aço ou alumínio. Neste trabalho será abordado a fabricação das latas com a liga de alumínio AA3104 H19, material produzido pela Novelis. No Brasil, a utilização da liga de alumínio é significativamente maior que o aço, geralmente estas são encontradas apenas na região nordeste.

A liga de alumínio apresenta diversas vantagens, dentre as quais podem ser destacadas o baixo peso, boa resistência mecânica, boa trabalhabilidade e ser 100% reciclável.

A quantidade de material utilizado na fabricação de latas é um fator decisivo no mercado, uma vez que o custo da lata é proporcional à quantidade de material utilizado. São realizadas pesquisas a fim de se obter variações na fabricação das latas para reduzir a quantidade de material utilizado, fator decisivo no custo e aumento da sustentabilidade.

Após serem envasadas com bebidas gaseificadas, as latas de bebidas se comportam como vasos de pressão. A pressão interna pode aumentar a níveis superiores às condições de resistência da lata, possibilitando que ocorra fratura da parede da lata ou da tampa.

Assim como todo vaso de pressão, as latas apresentam um dispositivo de segurança para reduzir a pressão. Este dispositivo é caracterizado pela reversão do fundo da lata, conhecido como *buckle* (Figura 1).

Figura 1 - Reversão do fundo da lata.



Fonte: Autoria própria.

As variáveis que afetam a reversão são inerentes ao material (espessura e propriedades mecânicas da chapa) e à geometria do fundo, sendo a geometria o foco de estudo do presente trabalho.

Uma técnica utilizada para aumentar a pressão de reversão do fundo é a conformação de um vinco na parede interna da ponta do fundo da lata, este é conhecido como *reforming*, não sendo utilizado por todos os fabricantes de latas.

1.1 OBJETIVOS

O trabalho tem como objetivo explicar o processo de embutimento de latas para bebidas e analisar os parâmetros que influenciam a pressão de reversão do fundo das latas com e sem a conformação do *reforming*. Esta análise empírica terá como resultado a obtenção de equações que relacionam todas as variáveis citadas.

2 CONFORMAÇÃO PLÁSTICA DOS METAIS

Conformação plástica dos metais pode ser definida como o processo de modificação da forma de um dado corpo metálico em outra forma definida. É classificada em dois tipos: processo mecânico e processo metalúrgico.

A seguir são apresentadas as principais características de cada tipo.

- Processo mecânico:
 - As alterações de forma são obtidas pela aplicação de forças externas.
 - Pode ser realizado a frio ou a temperaturas elevadas, sem que ocorra fusão do material.

O processo mecânico é dividido em conformação por deformação plástica e conformação por usinagem. No primeiro as tensões aplicadas são menores que o limite de resistência à ruptura e não há remoção de material, já no segundo as tensões aplicadas são maiores que o limite de resistência à ruptura e há remoção de material.

- Processo metalúrgico:
 - As alterações de forma podem ser obtidas pela aplicação de forças externas junto com elevadas temperaturas, podendo ser maior que a temperatura de fusão do material.

Os processos de conformação plástica dos metais permitem o controle de especificações geométricas, propriedades mecânicas e condições superficiais dos produtos finais. Estes processos têm como característica altas velocidades de produção e baixo custo, o que proporciona alta produtividade (BRESCIANI, 2011).

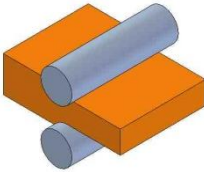
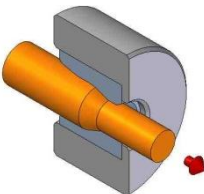
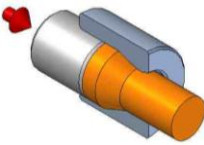
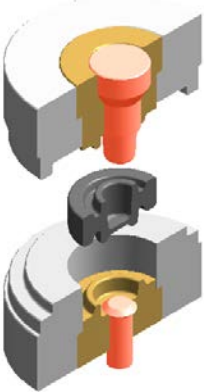
Quanto às designações, os processos podem ser classificados em relação aos critérios apresentados na Tabela 1, sendo os dois primeiros os mais comuns. A Tabela 2 apresenta um resumo das classificações.

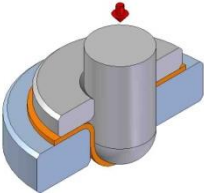
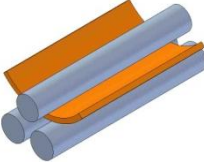
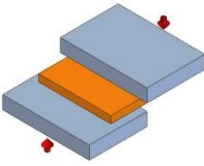
Tabela 1 - Classificações dos processos de conformação plástica.

Critério	Processo / Produto
Tipo de esforço predominante	Compressão direta, compressão indireta, conformação por tração, cisalhamento ou flexão
Temperatura de trabalho	A quente ou a frio

Critério	Processo / Produto
Forma do material trabalhado ou do produto final	Chapas, tubos, fios e outros
Tamanho da região de deformação	Localizada ou generalizada
Tipo de fluxo do material	Contínuos / quase estacionários ou intermitente
Tipo de produto obtido	Primário ou secundário

Tabela 2 - Processos e produtos típicos de conformação plástica.

Processo	Força predominante	Trabalho		Ilustração	Semi-produtos ou produtos	
		A quente	A frio		Aços	Não ferrosos
Laminação	Compressão direta	X			Placas Chapas Barras Perfis	Placas Chapas Barras
			X		Chapas	
Trefilação	Compressão indireta		X		Barras Arame Fios	Barras Arame Fios Tubos
Extrusão	Compressão indireta	X			Tubos	Barras Tubos Perfis
			X		Peças pequenas	Peças longas
Forjamento	Compressão direta	X			Peças forjadas	
			X		Peças pequenas forjadas	

Processo	Força predominante	Trabalho		Ilustração	Semi-produtos ou produtos	
		A quente	A frio		Aços	Não ferrosos
Estampagem (profunda)	Compressão indireta em parte	X			Peças grandes estampadas (a partir de placas)	
			X		Peças de chapas estampadas	
Calandragem	Flexão		X		Tubos	
Corte	Cisalhamento	X	X		Peças cortadas de chapas ou pequenos diversos	

Fonte: Adaptado de BRESCIANI, 2011.

O processo de conformação plástica executado na fabricação das latas de bebida é a estampagem profunda, e será abordado no item 2.1.

2.1 ESTAMPAGEM

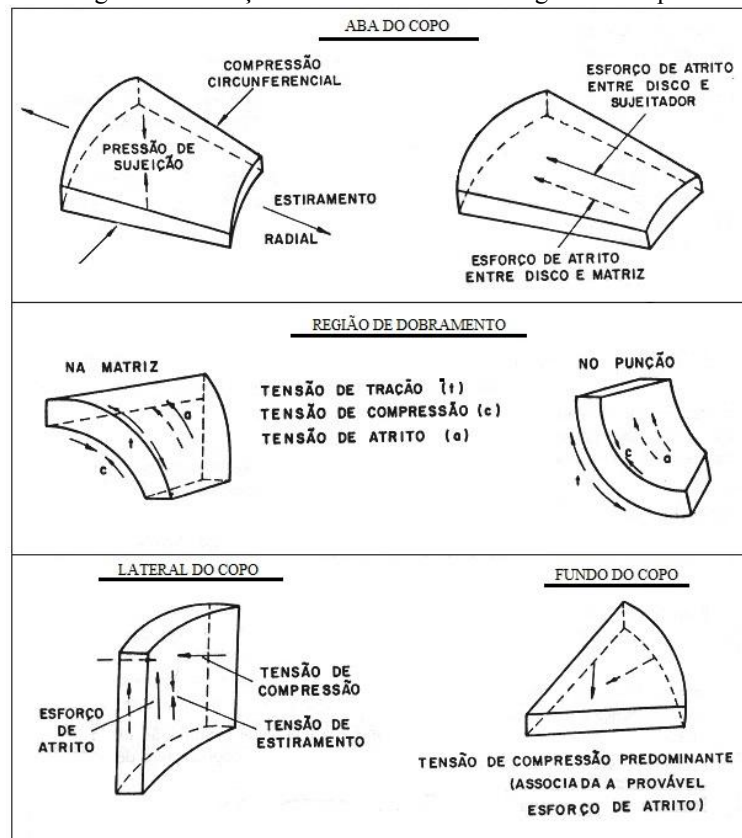
A conformação plástica de chapas pode ser classificada como estampagem profunda (também conhecido como embutimento ou estiramento) ou conformação em geral.

Para a conformação plástica de chapas é necessário que haja uma operação de corte para formar o *blank*, a partir do qual será realizado o processo de estampagem por prensas.

O grupo de estampagem profunda é constituído pelos seguintes processos: conformação por estampagem, reestampagem e reestampagem reversa de copos; conformação com estampagem e reestampagem de caixas; conformação rasa e reestampagem de painéis; conformação profunda com estampagem de painéis (BRESCIANI, 2011).

Os esforços típicos são complexos e variam no decorrer da conformação. De uma maneira geral, os esforços são devido à flexão nas regiões curvas, implicando em tensões trativas em uma superfície e compressivas na outra, separadas pela linha neutra da espessura da peça e além de tensões adicionais devido ao prensa chapas. Estes esforços são demonstrados na Figura 2.

Figura 2 - Esforços atuantes nas diversas regiões do copo.



Fonte: BRESCIANI, 2011.

Os produtos conformados a partir de *blanks* circulares formam figuras de revolução, ou seja, apresentam um eixo de simetria vertical. Essa característica geométrica implica que as tensões de qualquer plano vertical sejam iguais.

Como o objeto de estudo deste trabalho é a análise da reversão do fundo das latas, não há necessidade de aprofundamento na mecânica da estampagem, em que é abordado a influência das cargas e como se dá a fluência do material. O fundo é conformado no último estágio da prensa, como será melhor explicado no item 8, em que o processo de conformação é de estampagem rasa e não há variação de espessura.

3 PROPRIEDADES MECÂNICAS

As propriedades mecânicas são determinadas por ensaios rotineiros de amostras representativas do produto.

Os tipos de ensaio variam de acordo com o tipo de produto:

- **Peças fundidas:** são feitos em corpos-de-prova do mesmo vazamento do metal da peça fundida e elaborados ao mesmo tempo.
- **Peças forjadas:** são feitos em pedaços cortados do mesmo metal da peça.
- **Demais peças:** obtém-se corpos-de-prova de amostras que tenham sido elaboradas do mesmo modo que o produto.

Para os fins deste trabalho foram realizados ensaios de tração, uma vez que podem ser utilizados para avaliar as propriedades mecânicas importantes para o *buckle*.

Os valores das propriedades mecânicas podem dividir-se em dois grupos (ABAL, 2014):

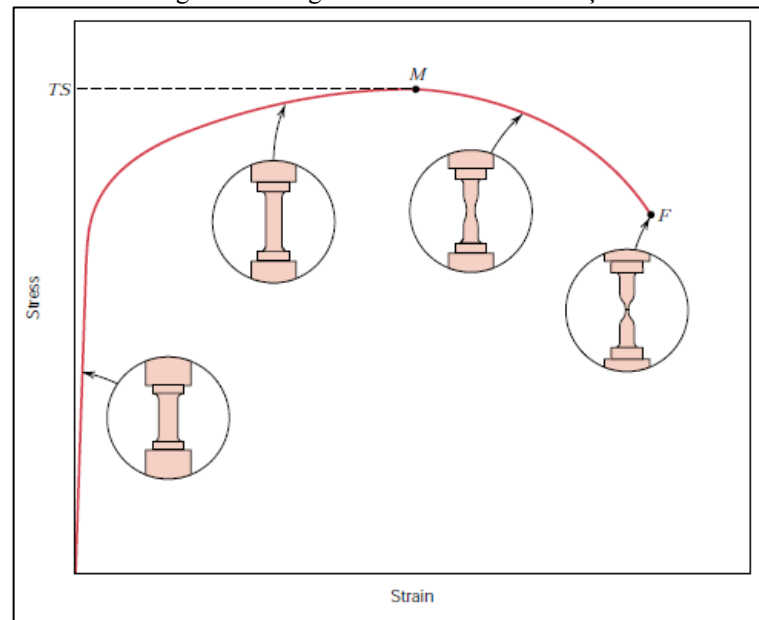
- **Valores garantidos:** parâmetros mínimos estabelecidos pelas especificações;
- **Valores típicos:** obtidos por meio de dados estatísticos propiciados por ensaios rotineiros, que garantem que o material obedece às especificações.

3.1 LIMITE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Designada como σ_t . É caracterizado como a máxima tensão observada no diagrama tensão-deformação de engenharia, ou seja, é a tensão correspondente ao início da estricção (ponto M da Figura 3).

Esta é definida como a razão entre a carga máxima e a área da seção transversal do corpo-de-prova. O alumínio puro recozido apresenta aproximadamente 48 MPa (4,9 kgf/mm²) (ABAL, 2014). O valor aumenta em função da liga e da condição metalúrgica.

Figura 3 – Diagrama tensão VS deformação.



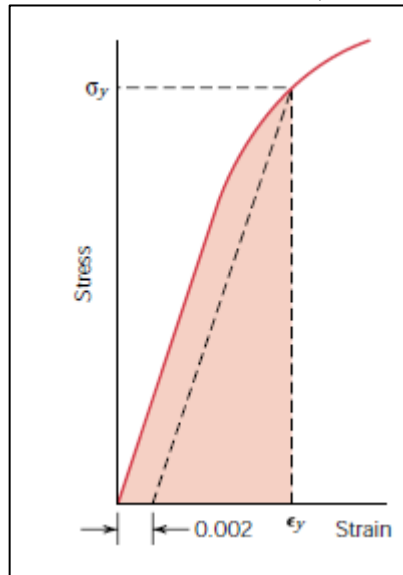
Fonte: CALLISTER, 2001.

3.2 LIMITE DE ESCOAMENTO

Designado como σ_e , pode ser determinada como sendo o ponto onde ocorre o afastamento inicial da linearidade na curva tensão-deformação (Figura 4). Como o alumínio não apresenta limite de escoamento bem definido, como alguns aços, foi estabelecida uma convenção em que o limite de escoamento é definido como sendo a tensão na qual o material sofre deformação de 0,2% do comprimento original medido em um corpo-de-prova normal (CALLISTER, 2002).

É importante definir o limite de escoamento para definir as tensões mínimas (caso seja necessário que ocorra deformação plástica) ou máximas (se for desejado apenas deformação elástica) que o material deve ser submetido. O tensão limite de escoamento do alumínio puro é de aproximadamente 12,7 MPa (1,3 kgf/mm²) (ABAL, 2014).

Figura 4 – Tensão de escoamento com 0,2% de deformação.



Fonte: CALLISTER, 2001.

3.3 ALONGAMENTO PERCENTUAL

É o valor percentual da deformação (ϵ) sofrida por um corpo de prova ao fim de um ensaio de tração em relação ao seu comprimento inicial. A deformação é calculada pela diferença entre pontos de referência, antes e após o ensaio de tração.

O alongamento indica a ductilidade do material. Uma vez que o alongamento depende da área transversal do corpo de prova, quanto menor a espessura, menor será o alongamento e vice-versa.

3.4 MÓDULO DE ELASTICIDADE

O módulo de elasticidade (E) é o fator de proporcionalidade entre a tensão de tração e a deformação. O módulo de elasticidade do alumínio é de 7030 kgf/mm². A adição de elementos de liga não altera esse valor consideravelmente, que pode chegar a até 7500 kgf/mm². Essa propriedade dá ao alumínio a vantagem de proporcionar elevada capacidade de absorver impactos e reduzir as tensões produzidas pela variação de temperatura (ABAL, 2014).

4 CLASSIFICAÇÃO DAS LIGAS

Devido o grande número de ligas de alumínio e tratamentos térmicos que existem, foi desenvolvida uma classificação que leva em consideração o processo de fabricação, condição metalúrgica e composição química, a qual foi desenvolvida pela *Aluminum Association* (AA). A norma brasileira compatível é a NBR 6834:2006, a qual foi substituída pela NBR ISO 209:2010.

Dependendo de como as ligas são fabricadas, desde o lingote até o produto final, podem ser classificadas em ligas trabalháveis e ligas de fundição.

4.1 LIGAS TRABALHÁVEIS

As ligas trabalháveis são as que adquirem a forma final do produto através da transformação de um semimanufaturado por meio de transformações mecânicas a quente ou a frio (ALCAN, 1993).

Os processos de transformação mecânica mais utilizados na obtenção dos semimanufaturados são a laminação, extrusão, trefilação e forjamento.

As ligas de alumínio trabalháveis são divididas convenientemente em dois grupos: as ligas tratáveis termicamente e as ligas não tratáveis termicamente.

4.1.1 Designação das ligas trabalháveis por grupos

É utilizado um sistema de quatro dígitos para classificar as ligas trabalháveis.

O primeiro dígito deve indicar o grupo de ligas, como mostrado na Tabela 3:

Tabela 3 - Grupos de ligas trabalháveis e principais elementos de liga.

Grupo	Principal elemento de liga
1XXX	Alumínio não ligado de, no mínimo, 99,00% de pureza.
2XXX	Cobre
3XXX	Manganês
4XXX	Silício
5XXX	Magnésio

Grupo	Principal elemento de liga
6XXX	Magnésio e Silício
7XXX	Zinco
8XXX	Outros elementos
9XXX	Série não utilizada

Fonte: ABAL, 2006.

O segundo dígito indica modificações na liga original ou dos limites de impurezas.

Os dois últimos dígitos identificam a liga de alumínio ou indicam a pureza do alumínio.

4.1.1.1 Grupo 1XXX

10XX – corresponde ao alumínio não ligado com impurezas em seus limites naturais.

11XX a 19XX – indica que houve controle especial de um ou mais elementos de ligas ou impurezas.

Os dois últimos dígitos indicam os valores decimais da porcentagem de alumínio, como exemplificados a seguir:

1060: alumínio não ligado com 99,60% de pureza;

1350: alumínio com controle de uma ou mais impurezas e 99,50% de pureza.

4.1.1.2 Grupos 2XXX a 8XXX

Se o segundo dígito for zero, corresponde ao alumínio não ligado com impurezas em seus limites naturais, liga original.

Quando o segundo dígito for de 1 a 9, há modificações da liga original, o valor do dígito é determinado pelo elemento de liga presente em maior quantidade. Se a maior quantidade for comum para mais de um elemento de liga, deve se obedecer a seguinte ordem sequencial: cobre, manganês, silício, silicato de manganês e zinco e outros.

Os dois últimos dígitos indicam as diferentes ligas do grupo.

As ligas tratáveis termicamente podem ser trabalhadas a frio e, posteriormente, sofrer o tratamento térmico para o aumento da resistência mecânica. As ligas não tratáveis termicamente podem ser submetidas a tratamentos térmicos como de estabilização e recozimentos plenos ou parciais.

4.1.2 Ligas trabalháveis tratáveis termicamente

Nas ligas trabalháveis tratáveis termicamente podem ser aplicados, além do trabalho a frio, tratamentos térmicos a fim de melhorar suas propriedades mecânicas.

Os tratamentos térmicos que proporcionam aumento das propriedades mecânicas são a solubilização e o envelhecimento (ALCAN, 1993).

As condições metalúrgicas serão tratadas no item 6.

4.1.3 Ligas trabalháveis não tratáveis termicamente

As ligas trabalháveis não tratáveis termicamente aceitam apenas trabalho a frio como método para aumentar suas propriedades mecânicas.

O aquecimento destas ligas acima de certas temperaturas reduzem as propriedades mecânicas, que podem ser restauradas apenas com posterior trabalho a frio.

Estas ligas são produzidas em diversas condições metalúrgicas e, em geral, são dos grupos 1XXX, 3XXX, 4XXX e 5XXX (ALCAN, 1993).

Assim como nas ligas tratáveis termicamente, as condições metalúrgicas serão explicadas no item 6.

4.2 LIGAS DE FUNDIÇÃO

São as ligas cujos produtos finais são obtidos pelo vazamento de metal líquido em moldes com a forma desejada.

Assim como nas ligas trabalháveis, a classificação se faz por meio de quatro dígitos.

O primeiro dígito deve indicar o grupo de ligas, como mostrado na Tabela 4:

Tabela 4 - Grupos de ligas de fundição e principais elementos de liga.

Grupo	Principal elemento de liga
1XX.X	Alumínio não ligado de, no mínimo, 99,00% de pureza.
2XX.X	Cobre
3XX.X	Silício com adições de Cobre e/ou Magnésio
4XX.X	Silício

Grupo	Principal elemento de liga
5XX.X	Magnésio
6XX.X	Série não utilizada
7XX.X	Zinco
8XX.X	Estanho
9XX.X	Outros elementos

Fonte: ABAL, 2006.

4.2.1 Grupo 1XX.X

Os dois dígitos após o 1 indicam os valores decimais da porcentagem de alumínio.

O último dígito, após o ponto, indica a forma do produto da seguinte forma:

1XX.0 – peças fundidas;

1XX.1 – lingotes.

4.2.2 Grupos 2XX.X a 9XX.X

Os dois dígitos antes do ponto identificam as diferentes ligas do grupo.

O último dígito, após o ponto, indica a forma do produto da seguinte forma:

XXX.0 – peças fundidas;

XXX.1 – lingotes;

XXX.2 – lingotes com composição química diferente dos limites estabelecidos para lingotes XXX.1.

Letras podem ser adicionadas antes da designação numérica para indicar modificação na liga original ou nos limites de impurezas.

Tais letras são utilizadas em ordem alfabética, omitindo-se I, O e Q. A letra X é utilizada para ligas experimentais.

5 TRATAMENTOS TÉRMICOS

As principais práticas de tratamento térmico são homogeneização, solubilização/envelhecimento, recozimento pleno, recozimento parcial e estabilização.

5.1 HOMOGENEIZAÇÃO

A microestrutura de tarugos e placas fundidas de ligas de alumínio é bastante heterogênea. É necessário, portanto, que se faça um tratamento térmico a fim de reduzir a variação de composição química, ou seja, torna a liga mais homogênea.

Esse processo tem como finalidade remover ou reduzir as segregações através de difusão, como consequência produz estruturas estáveis e controla certas características metalúrgicas para melhorar a trabalhabilidade, como propriedades mecânicas, tamanho de grão, entre outras (ABAL, 2014).

A temperatura de homogeneização varia entre as ligas de alumínio, mas são praticadas em temperaturas da ordem de 500°C, como pode ser visto na Tabela 5.

Tabela 5 - Práticas de homogeneização

Grupo	1XXX	2XXX	3XXX	4XXX	5XXX	6XXX	7XXX
Temperatura de homogeneização	530 –	485 –	570 –	450 –	520 –	530 –	460 –
(±10°C)	550	520	625	550	535	570	480

Fonte: Adaptado de ABAL, 2006.

5.2 SOLUBILIZAÇÃO/ENVELHECIMENTO

A solubilidade dos elementos de liga no alumínio aumenta com a temperatura, e ocorre saturação quando resfriada.

A solubilização consiste em aquecer o material uniformemente a temperaturas da ordem de 500°C, o valor exato depende de cada liga, para solubilizar os elementos de liga por toda a matriz de alumínio seguido de um resfriamento rápido, geralmente em água, para promover uma situação instável, na qual os elementos de liga tendem a precipitar.

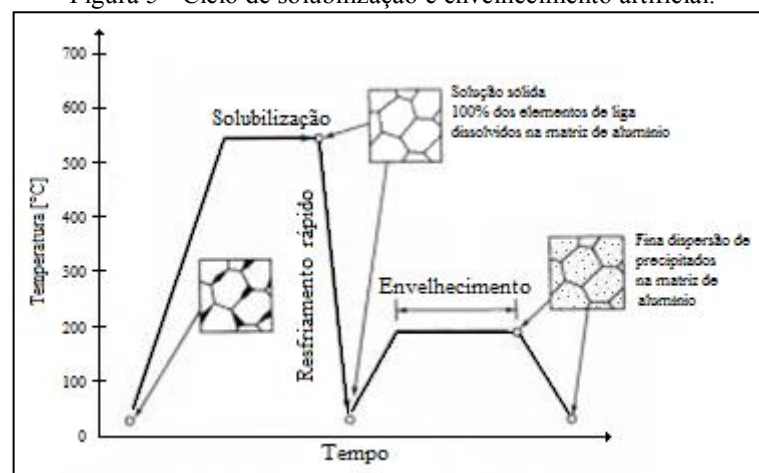
As ligas que respondem a esse tratamento térmico têm sua ductilidade diminuída e sua resistência mecânica aumentada, gradualmente. Esse aumento é conhecido como envelhecimento, no qual os elementos de liga precipitam-se de uma maneira extremamente fina, alcançando o máximo efeito de endurecimento. O tamanho dos precipitados devem ser grandes o suficientes para agir como obstáculos ao movimento das discordâncias, endurecendo a liga, bem como pequenos o suficiente para manter a coerência com a matriz, fundamental para manter o efeito de endurecimento (INFOMET, 2014).

O envelhecimento pode ocorrer de forma natural ou artificial.

O envelhecimento natural ocorre em algumas ligas depois de alguns dias. Em contrapartida, o envelhecimento artificial requer um reaquecimento por algumas horas a cerca de 175°C (Figura 5) (ABAL, 2014).

Normalmente, o tratamento térmico é precedido de uma operação de conformação. Porém, preferencialmente, a conformação deve ser feita imediatamente após o tratamento de solução, antes do envelhecimento.

Figura 5 - Ciclo de solubilização e envelhecimento artificial.



Fonte: Adaptado de FREITAS, 2014.

5.3 RECOZIMENTO PLENO

Este tratamento permite que a liga chegue na condição de menor resistência mecânica e máxima ductilidade (condição metalúrgica O), correspondendo a uma recristalização total do metal.

O tratamento consiste no aquecimento do metal em temperatura na faixa de 350°C e a manutenção a esta temperatura por tempo suficiente para garantir uniformidade térmica

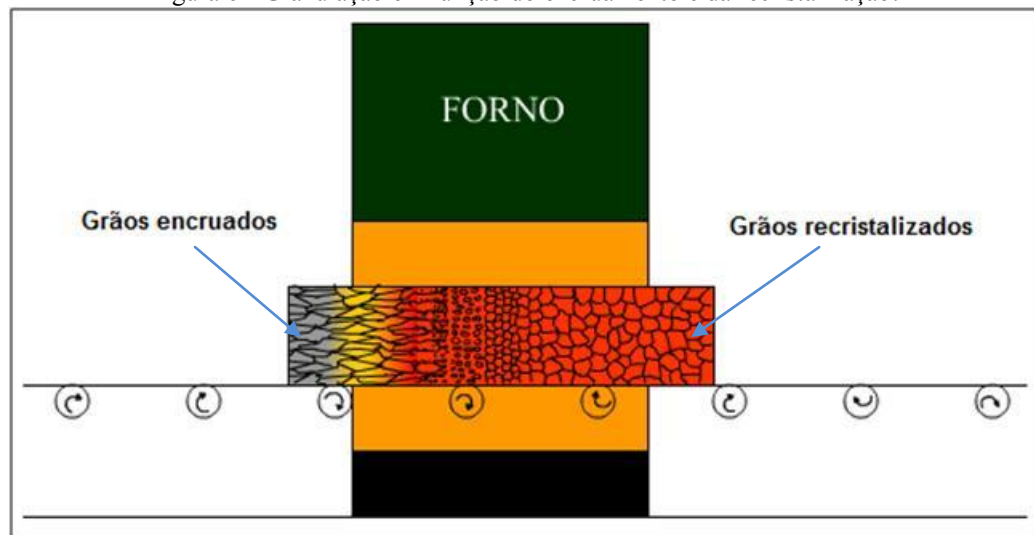
(ABAL, 2014). Quando todo o metal atinge a temperatura ocorre o rearranjo da rede cristalina, que passa a apresentar uma configuração não deformada (remove o efeito de encruamento).

O recozimento pode ser caracterizado pelo tipo de recristalização: primária ou secundária.

A recristalização primária consiste no aquecimento e manutenção do tempo corretos para a liga, garantindo que ocorra apenas a remoção do efeito de encruamento. Uma ilustração do processo é mostrada na Figura 6.

A recristalização secundária ocorre quando há superaquecimentos que causam coalescência e o crescimento exagerado dos grãos. Esse tipo de recristalização pode desenvolver o defeito "casca de laranja" nos trabalhos posteriores, principalmente de estampagem.

Figura 6 - Granulação em função do encruamento e da recristalização.



Fonte: Adaptado de CIMM, 2015.

5.4 RECOZIMENTO PARCIAL

Este tratamento térmico é similar ao recozimento pleno, diferenciando-se na temperatura que o metal é aquecido. A temperatura depende da porcentagem de redução aplicada na laminação a frio, podendo ser realizado na faixa de 200°C a 280°C (ABAL, 2014).

Este tratamento permite uma recristalização parcial do material, permitindo a obtenção de condições metalúrgicas com alongamentos maiores e com resistência mecânica superior ao recozimento pleno.

5.5 ESTABILIZAÇÃO

Consiste em um tratamento térmico executado para promover a estabilidade dimensional e das propriedades mecânicas, especialmente das ligas de alumínio-magnésio encruadas (série 5XXX).

Para a realização deste tratamento, o material é aquecido a temperaturas ao redor de 150°C para acelerar a recuperação (condição metalúrgica H3X). Este tratamento alivia a tensão residual dos materiais encruados e aumenta a resistência à corrosão das ligas de AlMg (ABAL, 2014).

6 CONDIÇÕES METALÚRGICAS

Segundo ABAL (2014), a condição metalúrgica das ligas de alumínio é também conhecida como *têmpera*. Este termo tem um significado diferente do utilizado nos produtos de aço (em que o material é tratado termicamente para alterar suas propriedades mecânicas). Esta é uma condição aplicada por deformação plástica a frio e/ou de tratamento térmico, o que proporciona estrutura e propriedades mecânicas características.

A condição metalúrgica é precedida pela designação da liga, conforme a norma NBR ISO 2107 e são classificadas por letras, de acordo com os processos que os produtos são submetidos, como a seguir (ABAL, 2014):

6.1 “F” – COMO FABRICADA

Não são especificados limites para as propriedades mecânicas. É aplicada a produtos fabricados por conformação em que não há controle especial sobre as condições térmicas ou de encruamento.

6.2 “O” – RECOZIDA

Condição utilizada aos produtos acabados que apresentam o menor valor de resistência mecânica e aos produtos fundidos para melhorar a ductilidade e estabilidade dimensional. A designação de um produto recozido com características especiais é feita acrescentando-se um dígito após a letra “O”. Se após processo de conformação o produto atingir propriedades na condição recozida, o mesmo pode receber designação como condição metalúrgica “O”. A classificação pode ainda ser seguida por um número, como a seguir:

- “O1” – recozimento em temperatura elevada e resfriamento lento;
- “O2” – processo termomecânico;
- “O3” – homogeneizado.

6.3 “H” – ENCRUADA

Indica que o aumento na propriedade mecânica ocorreu através de deformação plástica a frio. A letra “H” é seguida de dois dígitos, os quais permitem identificar o processo aplicado e o grau de encruamento, conforme indicado a seguir:

O primeiro dígito varia de 1 a 4 e indica o processo aplicado ao produto:

- H1X – Deformado plasticamente a frio. É aplicada aos produtos que sofrem apenas deformação plástica a frio.
- H2X – Deformado plasticamente a frio e parcialmente recozido. É aplicada aos produtos que sofrem deformação plástica a frio em um nível acima desejado, em seguida é recozida parcialmente até se obter as propriedades mecânicas requeridas.
- H3X – Deformado plasticamente a frio e estabilizado. É aplicada aos produtos que sofrem deformação plástica a frio e posteriormente suas propriedades mecânicas são estabilizadas por meio de um tratamento térmico a baixas temperaturas. Este processo reduz a resistência à tração, porém aumenta a ductilidade. Aplica-se somente às ligas que amolecem à temperatura ambiente.
- H4X – Deformado plasticamente a frio e pintado ou envernizado. É aplicada aos produtos que sofrem deformação plástica a frio e são submetidos a algum tratamento térmico durante posterior pintura ou envernizamento.

O segundo dígito pode ser 1 a 9 e indica o grau de encruamento em ordem crescente, como mostrado na Tabela 6.

Tabela 6 - Grau de encruamento das ligas de alumínio.

Grau	Termo comercial	Redução (%)
1	1/8 Duro	15
2	1/4 Duro	20
4	1/2 Duro	35
6	3/4 Duro	60
8	Duro	75
9	Extra duro	85

Fonte: PATROCINIO, 2011.

6.4 “T” – TRATADA TERMICAMENTE

Apenas as ligas tratáveis termicamente fazem uso desta designação que é definida pela letra “T” seguida de um dígito que varia de 1 a 10. Este dígito indica a sequência de tratamentos básicos aos quais a liga foi submetida, conforme Tabela 7:

Tabela 7 -Designações e tratamentos térmicos básicos das condições metalúrgicas “T”.

Designação	Tratamentos
T1	Resfriado bruscamente após um processo de conformação a uma temperatura elevada e envelhecido naturalmente até uma condição estável.
T2	Resfriado bruscamente após um processo de conformação a uma temperatura elevada, encruado e envelhecido naturalmente até uma condição estável.
T3	Solubilizado, encruado e envelhecido naturalmente até uma condição estável.
T4	Solubilizado e envelhecido naturalmente até uma condição estável.
T5	Resfriado bruscamente após um processo de conformação a uma temperatura elevada e envelhecido artificialmente.
T6	Solubilizado e envelhecido artificialmente.
T7	Solubilizado e estabilizado (superenvelhecimento).
T8	Solubilizado, encruado e depois envelhecido artificialmente.
T9	Solubilizado, envelhecido artificialmente e depois encruado.
T10	Resfriado bruscamente após um processo de conformação a uma temperatura elevada, encruado e depois envelhecido artificialmente.

As designações “T1” a “T10” podem ser seguidas de dígitos adicionais, dos quais o primeiro deve ser diferente de zero. São utilizados para indicar uma variação no tratamento que altera significativamente as características do produto em relação ao tratamento básico. Os dígitos podem ser referentes a um ou mais dos seguintes tópicos (ABAL, 2006):

- Tratamento térmico de solubilização e/ou envelhecimento;
- Quantidade de trabalho a frio após o tratamento térmico de solubilização;
- Alívio de tensões

- Por estiramento (T_51);
- Por compressão (T_52);
- Combinação de estiramento e compressão (T_54).

Não se utilizam dígitos adicionais para as variações no tratamento que não alteram as características do produto, esses são considerados tratamentos alternativos.

6.5 “W” - SOLUBILIZADA

É utilizado somente em ligas que envelhecem naturalmente à temperatura ambiente após o tratamento de solubilização. Esta classificação é especificada somente quando o período de envelhecimento natural, após o resfriamento brusco, é indicado.

Os mesmos dígitos adicionais definidos para as designações “T” podem ser adicionados às designações “W”.

7 LIGA AA3104

A liga utilizada na fabricação de latas de bebidas é a AA3104 H19. Os limites da composição química e massa específica da liga são mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 – Limites de composição química da liga AA3104.

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Ga	V	ρ [g/cm ³]
% p	0,6	0,8	0,05 – 0,15	0,8 – 1,4	0,8 – 1,3	0,25	0,1	0,05	0,05	2,72

Cada fabricante desenvolve práticas específicas na fabricação do metal, sendo que algumas informações são confidenciais. Portanto, os valores praticados de propriedades mecânicas e os resultados obtidos nos ensaios de tração não são divulgados.

Entretanto, podem ser encontrados valores de referência em artigos técnicos já publicados. A Tabela 9 relaciona os valores apresentados por KABIR et al. (2015), os quais podem ser tomados como limites inferiores.

Tabela 9 – Valores de referência das propriedades mecânicas da liga.

σ_t [MPa]	σ_e [MPa]	E [GPa]	ϵ [%]
262 ± 4	236 ± 3	$70 \pm 0,1$	$3,8 \pm 0,5$

8 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DA LATA

As bobinas de alumínio apresentam dimensões específicas para cada fabricante de latas. Em geral possuem aproximadamente 1700 mm de largura, a espessura e comprimento variam de acordo com o tipo de lata e o fabricante.

Para iniciar a produção, a bobina é posicionada em um equipamento chamado de tombador (Figura 7) para que possa ser colocada no mandril de um desbobinador, o qual é responsável por sustentar e girar a bobina durante seu consumo (Figura 8).

Figura 7 - Tombador



Fonte: RM3 FILMES, 2014.

Figura 8 - Desbobinador



Fonte: RM3 FILMES, 2014.

Primeiramente, a chapa passa por um sistema de lubrificação conhecido como lubrificador para que se tenha a lubrificação adequada durante a conformação.

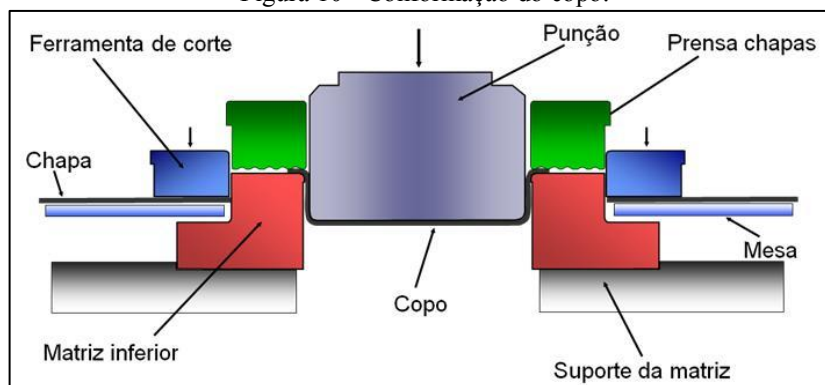
Após a lubrificação, a chapa entra na prensa de estampagem de dois estágios, conhecida como *cupper* (Figura 9), na qual o *blank* é cortado em formato circular no primeiro estágio, sucedido pela sua conformação no formato de copo (Figura 10). Nesta etapa o alumínio ainda apresenta a espessura original da chapa. Para as latas em estudo, de 12oz (350ml), a *cupper* possui 14 estações de conformação dos copos, cada estação tem uma identificação que é conformada no fundo dos copos, essas identificações permitem determinar a posição de cada copo na chapa.

Figura 9 – Cupper.



Fonte: IPS, 2015.

Figura 10 - Conformação do copo.



Fonte: Adaptado de NOVELIS, 2010a.

Em seguida os copos são enviados para prensas, conhecidas como *bodymakers*, através de esteiras a vácuo (Figura 11). Em geral são utilizados nove *bodymakers* no processamento de cada bobina.

Figura 11 - Esteira transportadora a vácuo



Fonte: RM3 FILMES, 2014.

Nos *bodymakers* (Figura 12) os copos são transformados em latas. A parede da lata é estirada e o fundo é formado, em um único movimento do punção.

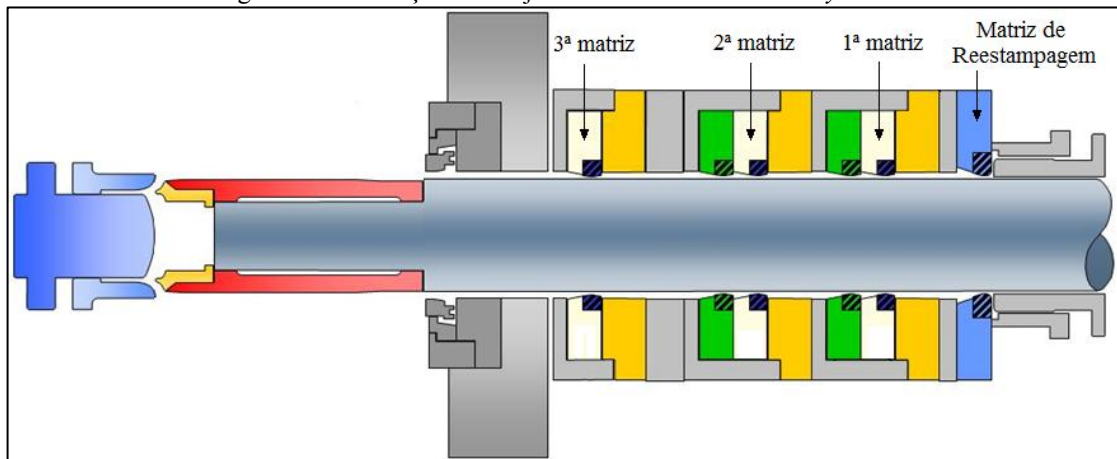
Figura 12 - Bodymaker



Fonte: STOLLE MACHINERY, 2014.

No estiramento, a parede da lata é formada em quatro estágios sequenciais, não simultâneos (Figura 13), como descritos a seguir:

Figura 13 - Ilustração do conjunto de matrizes de um *bodymaker*.



Fonte: Adaptado de NOVELIS, 2010d.

Reestampagem – Transforma o copo em uma lata de pequena altura, com diâmetro próximo ao final e a espessura pode sofrer ou não redução, dependendo do *set* utilizado na máquina;

1ª matriz – A parede da lata é estirada numa taxa de redução de aproximadamente 20%;

2ª matriz – A parede da lata é estirada numa taxa de redução de aproximadamente 25%;

3ª matriz – A parede da lata é estirada numa taxa de redução entre 35% e 40%. Neste estágio a parede da lata está completamente estirada. Taxas de redução inferiores a 35% não promovem brilho na superfície externa, enquanto que taxas maiores que 40% implicam numa elevada probabilidade de rompimento da parede (fratura).

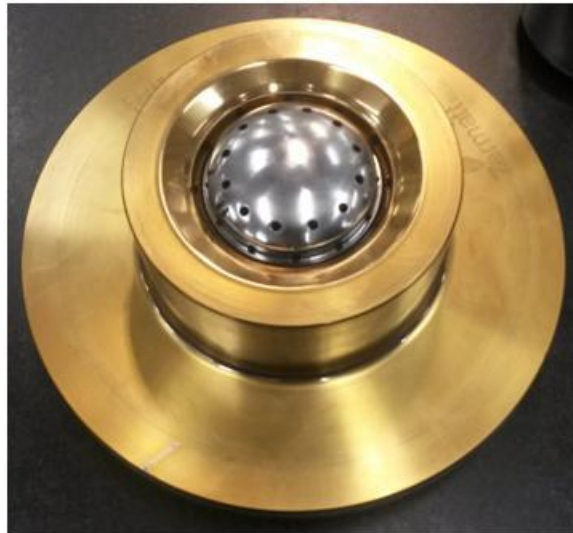
No final do curso do punção ocorre a formação do fundo da lata. O formato varia entre os fabricantes, sendo definido pela geometria do conjunto da ponta do punção (Figura 14) e do formador de fundo (Figura 15).

Figura 14 - Ponta do punção.



Fonte: Autoria própria.

Figura 15 - Formador de fundo.

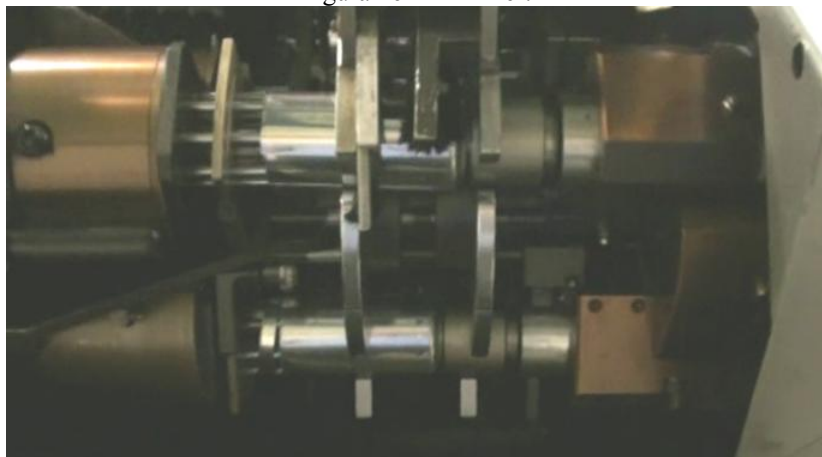


Fonte: Autoria própria.

Após os quatro estágios, a anisotropia é evidenciada através do orelhamento na aresta superior da lata.

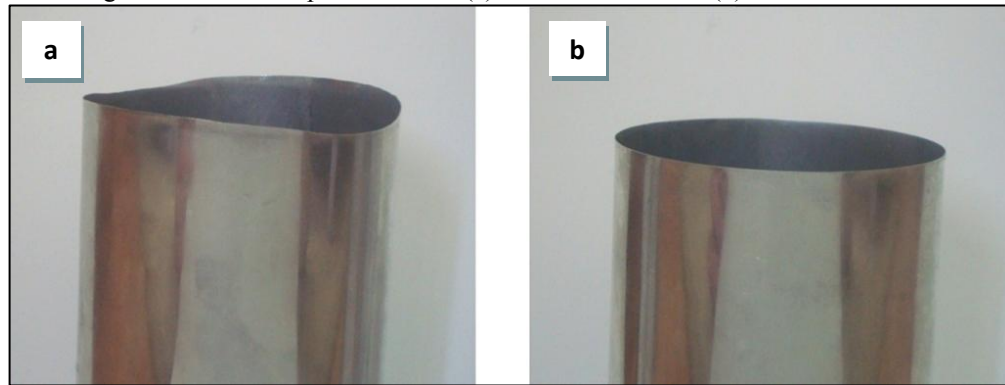
Todas as latas precisam ter a mesma altura, portanto se faz necessário o corte da aresta superior. Assim que as latas são liberadas do punção, são enviadas a um dispositivo na saída do *bodymaker*, conhecido como *trimmer*, no qual é realizado o corte da aresta (Figura 16). O resultado deste processo é mostrado na Figura 17.

Figura 16 – Trimmer.



Fonte: Novelis, 2011.

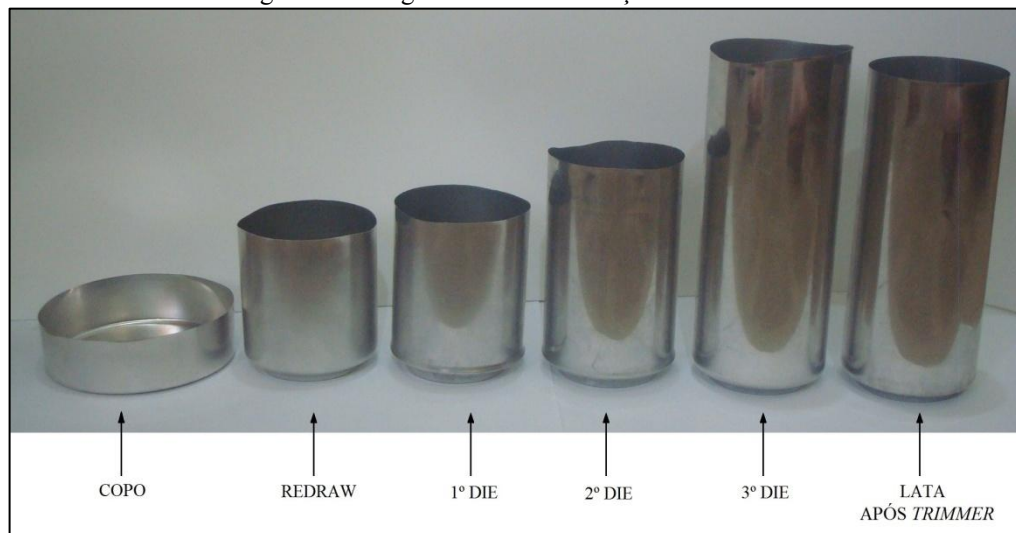
Figura 17 - Aresta superior de latas (a) com orelhamento e (b) sem orelhamento.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 18 são apresentadas todas as etapas de conformação de uma lata até o *trimmer*.

Figura 18 - Progressão da conformação de uma lata.

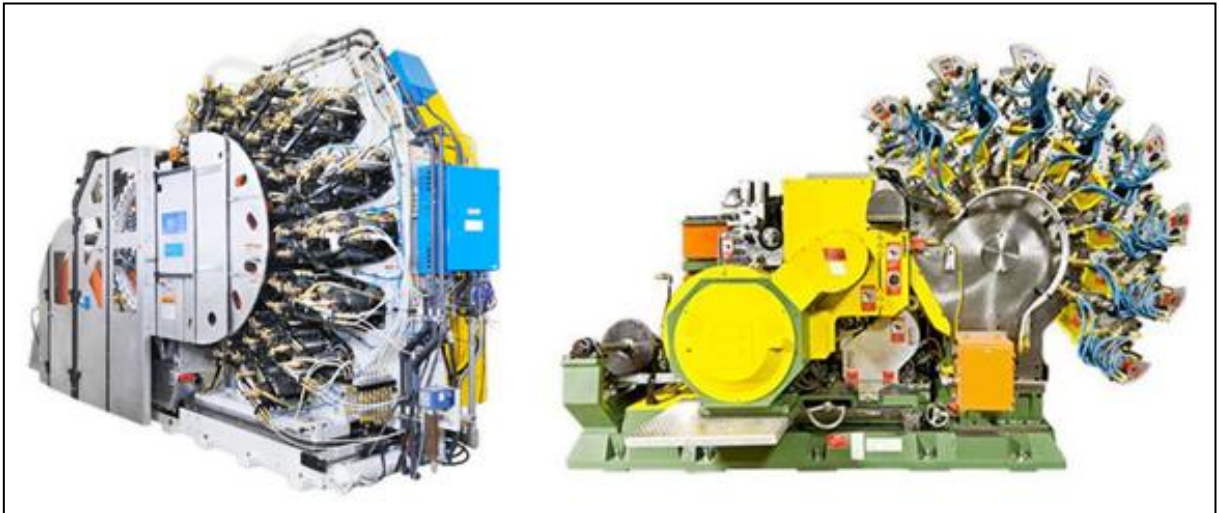


Fonte: Autoria própria.

Para que possa seguir no processo, as latas precisam estar isentas de impurezas que são provenientes da lubrificação utilizada nas etapas de conformação. A limpeza é realizada através de uma lavadora que utiliza uma combinação dos ácidos sulfúrico e fluorídrico em até sete estágios (PEACH, 2015). Após a lavagem, as latas seguem para um forno de secagem, no qual a temperatura pode chegar a 200°C (ABRALATAS, 2014).

Ao saírem do forno, as latas estão limpas, secas e esterilizadas, condição necessária para a impressão do rótulo, o qual é impresso por impressoras especiais através da técnica de flexografia (Figura 19).

Figura 19 - Dois tipos de impressoras de rótulo.



Fonte: STOLLE MACHINERY, 2014.

O passo seguinte é a aplicação de verniz nas superfícies internas (Figura 20). Este processo visa impedir o contato da bebida com o alumínio, garantindo que não haja contaminação do líquido nem que tenha pontos de exposição do metal, que ficam sujeitos à corrosão.

Figura 20 - Aplicação do verniz interno.



Fonte: (ABRALATAS, 2014).

O verniz é seco no segundo forno da linha de fabricação, conhecido como forno de secagem interna (IBO). A lata é exposta ao ambiente do forno por um tempo semelhante ao forno após a lavadora, porém o IBO apresenta a maior temperatura durante a fabricação, da ordem de 200°C, sendo importante seu controle, uma vez que tem grande influência na alteração das propriedades mecânicas da liga.

A última etapa do processo de fabricação é realizada no *necker* (Figura 21), no qual é conformado o “pescoço” e o perfil da borda da lata (flange) para posterior recravamento da tampa. O processo é obtido em 14 estágios, nos quais há a redução progressiva do diâmetro da parte superior da lata, o flange é conformado no último estágio. Este processo tem o intuito de diminuir o diâmetro da tampa, gerando assim uma economia de matéria prima e, consequentemente, uma redução no custo da embalagem.

Figura 21 - Necker.



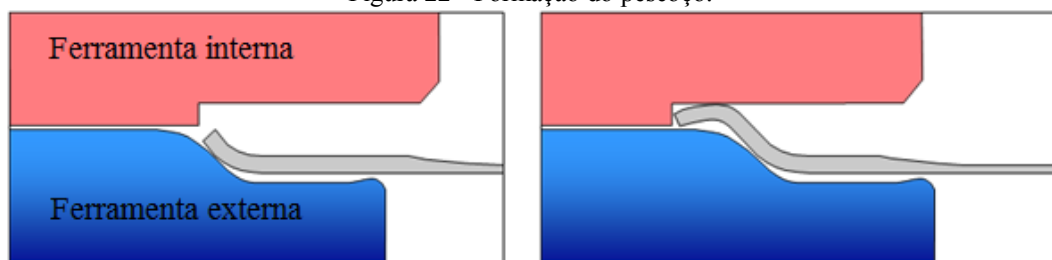
Fonte: (BELVAC, 2014).

A lata é empurrada até as ferramentas por um punção. Para que não ocorra o colapsamento da lata, ar comprimido é injetado em seu interior.

A ferramenta interna é móvel e a externa é fixa. O contato com a ferramenta externa faz com que o topo da lata mude a direção do deslocamento. Ao entrar em contato com a ferramenta interna, ocorre novamente uma mudança na direção, forçando o metal a seguir no espaço entre as ferramentas (Figura 22).

O espaço entre as ferramentas é um fator crítico nesta etapa, pois se for muito maior que a espessura do metal, haverá a formação de rugas no pescoço, se for menor poderá riscar o pescoço ou haverá seu colapsamento.

Figura 22 - Formação do pescoço.



Fonte: Adaptado de NOVELIS, 2010c.

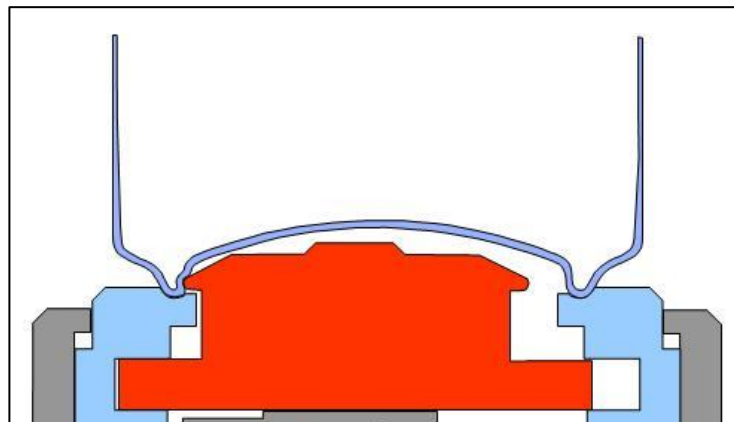
8.1 REFORMING

O *reforming* consiste na penetração de uma ferramenta no último estágio do *necker* na parede interna da ponta da lata (Figura 23). A utilização do *reforming* permite que se atinjam níveis de pressão de reversão de fundo superiores aos obtidos sem este.

Com a lata presa, a ferramenta é rotacionada ao longo do perímetro da parede interna da ponta do fundo da lata. Essa conformação altera significativamente a geometria.

Tal processo é realizado por ser conhecido que essa variação na geometria pode compensar reduções nas outras variáveis que impactam o *buckle*, que serão melhor explicadas posteriormente.

Figura 23 - Conformação do *reforming*.



Fonte: Adaptado de NOVELIS, 2010b.

9 REVERSÃO DO FUNDO DA LATA

As latas de bebidas se comportam como vasos de pressão quando preenchidas com bebidas gaseificadas. Devido a condições adversas de estocagem, a pressão interna pode aumentar a níveis superiores às condições de resistência da lata, permitindo que ocorra vazamento do líquido, seja pela fratura da parede da lata ou da tampa. Se ocorrer vazamento durante a estocagem, o prejuízo não se reflete apenas na lata afetada, mas principalmente à contaminação da superfície externa de latas próximas, o que favorece a corrosão secundária das mesmas, provocando uma reação em cadeia.

A reversão do fundo da lata é utilizada como um dispositivo de segurança. À medida que a pressão interna aumenta, o fundo da lata cresce, até que se atinja uma determinada pressão limite em que o fundo reverte, esta é conhecida no mercado de latas como Pressão de Reversão do Fundo (*Dome Reversal Pressure – DRP*) ou pressão de *buckle*. Usualmente a pressão de reversão do fundo está situada na faixa de 90 a 110 psi.

O entendimento da reversão do fundo da lata é fundamental para se garantir a integridade da lata, desde o envasamento até a utilização pelo usuário final.

Trabalho similar foi realizado por Guedes (2002) a fim de se obter uma equação empírica para o DRP apenas de latas sem *reforming*. Tais resultados foram utilizados como referência para a realização do presente trabalho, podendo ser destacadas as variáveis que influenciam o *buckle*: tensão de escoamento, espessura do metal e dimensões geométricas.

10 MATERIAIS E MÉTODOS

10.1 AMOSTRAGEM

As amostras foram coletadas uniformemente entre três fabricantes de latas, estes serão chamados de A, B e C. Os fabricantes A e B fazem uso de *reforming*, enquanto que o fabricante C não faz uso do mesmo.

Em cada um dos fabricantes, foram coletados 50 copos, 30 latas após o *trimmer*, 30 latas após o IBO e 30 latas após o *necker*. As foram coletadas de dois *bodymakers* de cada fabricante (15 latas de cada, a cada etapa).

Como os fundos dos copos possuem as mesmas espessuras e propriedades mecânicas das chapas originais, estes foram utilizados para se extrair os corpos de prova dos ensaios de tração e também obter as espessuras das chapas ao longo da largura (nas duas laterais e no centro).

Quando a bobina passa pelo laminador a frio, durante sua produção, ocorre o aquecimento da chapa a temperaturas entre 100°C e 200°C, característica intrínseca ao processo, sendo possível seu controle através da velocidade de laminação e da taxa de redução. Após bobinada, o gradiente de temperatura, devido ao resfriamento, se dá do interior (centro) para o exterior (superfície e bordas). Tal fato está associado à redução do número de discordâncias no metal, implicando em diferentes propriedades mecânicas ao longo da bobina.

Para que a análise seja confiável, foi tomado o devido cuidado durante a coleta das amostras a fim de se garantir que tanto os copos como as latas fossem retiradas da mesma região da bobina (mesmas propriedades mecânicas iniciais).

Primeiramente foram coletados os copos, após cerca de cinco minutos foram coletadas as quinze latas de cada *bodymaker*. Nesta etapa as latas apresentam as maiores propriedades mecânicas durante o processo.

Como há dois fornos no processo, após lavadora e IBO, outras quinze latas dos mesmos *bodymakers* foram coletadas cerca de 40 minutos após a coleta dos copos (tempo médio entre a conformação dos copos até a saída do IBO). Nesta etapa as latas apresentam as menores propriedades mecânicas durante o processo.

Por último, poucos minutos após a coleta do IBO, foi realizada a coleta das últimas quinze latas de cada *bodymaker*, as quais foram retiradas após o último estágio do *necker*. Para os fabricantes A e B esta etapa é importante, uma vez que é nesta que é conformado o *reforming*. Para o fabricante C esta etapa apresenta as mesmas condições da anterior.

Nas tabelas Tabela 10 e Tabela 11 são resumidas as distribuições da amostragem de copos e latas, respectivamente.

Tabela 10 – Distribuição da amostragem de copos por fabricante.

	Fabricante A	Fabricante B	Fabricante C
Copos	50	50	50

Tabela 11 – Distribuição da amostragem de latas por fabricante e bodymaker

	Fabricante A		Fabricante B		Fabricante C	
Bodymaker	A1	A2	B1	B2	C1	C2
Após trimmer	15	15	15	15	15	15
Após IBO	15	15	15	15	15	15
Após necker	15	15	15	15	15	15

Do total das quinze amostras de cada *bodymaker*, doze foram utilizadas para medir a pressão de reversão do fundo.

Para o fabricante A, que utiliza *reforming*, foram analisadas as geometrias de quatro latas, duas de cada *bodymaker*, uma antes e outra após o *reforming*.

Para o fabricante B, assim como o A, que utiliza *reforming*, foram analisadas as geometrias de quatro latas, duas de cada *bodymaker*, uma antes e outra após o *reforming*.

Como o fabricante C não utiliza *reforming*, foram utilizadas duas latas para a obtenção da geometria do fundo, uma de cada *bodymaker*.

As latas restantes, 14 latas do fabricante A, 14 latas do B e 16 latas do C, foram preservadas a fim de garantir amostras para o caso de haver necessidade de novas análises. Também não foram ensaiadas para manter o mesmo número de latas ensaiadas entre os três fabricantes.

10.2 ENSAIO DE BUCKLE

O equipamento utilizado para medir a pressão de reversão do fundo foi um Altek 9009F2 (Figura 24). A rede de ar comprimido utilizada manteve aproximadamente 120 psi, suficiente para reverter o fundo de todas as latas.

Do total das quinze latas de cada *bodymaker* e cada etapa, doze latas foram separadas aleatoriamente para se realizar os ensaios de *buckle*. Ao todo, foram ensaiadas 216 latas, 72 de cada fabricante.

Figura 24 - Equipamento de ensaio de *buckle*.



Fonte: ALTEK, 2014.

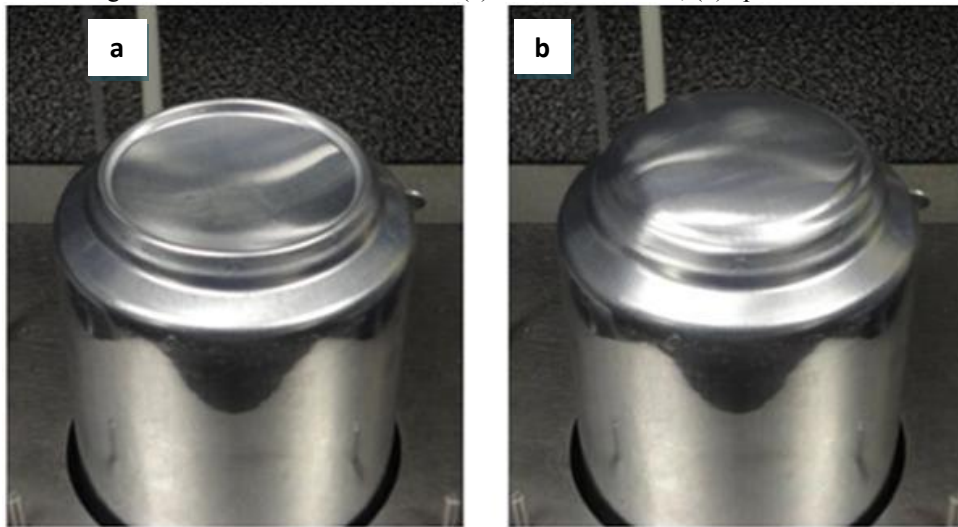
O modelo *9009F2 Can Growth/Buckling Test Station* é utilizado para medir o crescimento do fundo da lata relativo à pressão interna. O equipamento também é capaz de determinar a pressão na qual o domo do fundo da lata falha (ocorra reversão). O funcionamento de todo o sistema é pneumático.

10.2.1 Metodologia

Uma configuração apropriada das peças, determinada pelo tipo e tamanho da lata a ser testada, é instalada no equipamento. Para a completa vedação, é utilizado vaselina sólida no *o'ring* da base. A lata é travada na posição com o auxílio de garras. Para o crescimento do fundo da lata, um equipamento de medição é colocado acima da lata e a amostra é pressurizada a pressões específicas e o deslocamento do fundo é medido nesses pontos. Para o ensaio de *buckle*, não é utilizado o equipamento de medição e a lata é pressurizada à taxa

constante até que o fundo reverta (Figura 25 b). Em todos os momentos, a pressão interna na lata é indicada no display digital localizado na frente do equipamento.

Figura 25 - Ensaio de buckle. Lata (a) antes da reversão, (b) após reversão.

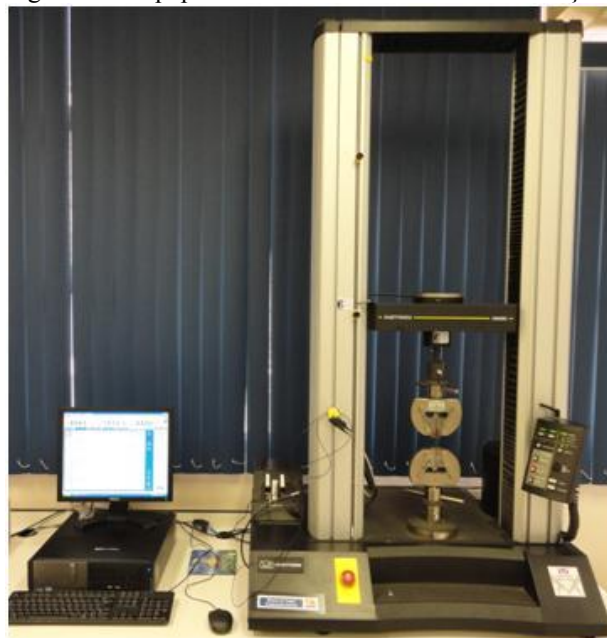


Fonte: Autoria própria.

10.3 ENSAIO DE TRAÇÃO

Os ensaios de tração foram realizados na máquina de tração/compressão Instron 5565, com extensômetro Instron 2630 e *software* do fabricante (Figura 26).

Figura 26 - Equipamentos utilizados no ensaio de tração.



Fonte: Autoria própria.

Com a realização dos ensaios foram obtidos:

- Limite de resistência à tração (LRT);
- Limite de escoamento (LE);
- Módulo de elasticidade (E);
- Alongamento percentual (ϵ).

Apesar dos corpos de prova não serem normalizados, estes seguem as mesmas proporções dos corpos de prova estabelecidos na norma ASTM B557.

Os ensaios foram realizados com uma taxa de deslocamento de 7,5 mm/min.

Os corpos de prova utilizados possuem as seguintes dimensões:

- Comprimento útil: 15,00mm;
- Comprimento de referência do extensômetro: 10,00mm;
- Largura na região útil: 6,03mm.

10.3.1 Metodologia

Foram confeccionados corpos de prova no fundo dos copos. Primeiramente é cortada a lateral do copo, restando apenas o fundo. Este, então, foi marcado com dimensões suficientes para se obter os corpos de prova a 0°, 45° e 90° em relação à direção de laminação.

Com os pedaços dos fundos devidamente identificados, foram posicionados, individualmente, na prensa pneumática (Figura 27) que possui matrizes de estampagem nas dimensões próprias para o ensaio, sendo obtido o corpo de prova da Figura 28.

Ao todo foram nove ensaios para cada fabricante, sendo três em cada lateral e três no centro da chapa.

Figura 27 - Prensa de estampagem dos corpos de prova.



Fonte: Autoria própria.

Figura 28 - Corpo de prova para ensaio de tração.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 29 apresenta um corpo de prova devidamente posicionado para o ensaio.

Figura 29 - Ensaio de tração.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 30 é mostrado um corpo de prova após a realização de um ensaio.

Figura 30 - Corpo de prova após ensaio de tração.



Fonte: Autoria própria.

Os ensaios foram gerenciados pelo *software* do fabricante do equipamento. Após os ensaios de cada fabricante, todos os resultados foram compilados e inseridos uma tabela para posterior análise.

10.4 ANÁLISE GEOMÉTRICA

O intuito da análise geométrica do fundo das latas é avaliar como a pressão de reversão do fundo é influenciada pelas variáveis geométricas.

10.4.1 Metodologia

As latas foram cortadas a aproximadamente 17 mm de altura, suficiente para determinar todas as curvaturas do fundo. Com todas as latas cortadas, foi utilizado o Micro VU (Figura 31) para determinar o centro geométrico das latas, tal ação foi tomada a fim de auxiliar o posterior lixamento da amostra, uma vez que as análises necessitam ser realizadas ao longo do diâmetro do fundo.

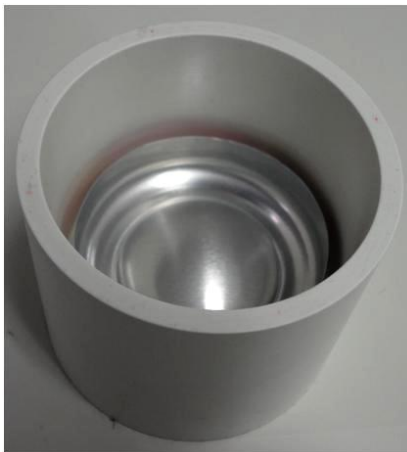
Figura 31 - Micro VU.



Fonte: Autoria própria.

Foi utilizado um suporte de PVC usinado (Figura 32) que possui encaixe para o fundo das latas. Para se realizar o embutimento a frio com resina poliéster, é necessário untar a superfície interna do suporte com vaselina sólida a fim de evitar que a resina grude no suporte. Para a obtenção do molde completo foram necessárias duas etapas de embutimento, uma na parte superior e outra na parte inferior do fundo da lata.

Figura 32 - Suporte de PVC usinado com o fundo de uma lata no interior.



Fonte: Autoria própria.

Como é necessário que seja feito um corte vertical ao longo do diâmetro, após a cura da resina as duas superfícies de cada amostra (Figura 33) foram lixadas para retirar os cantos vivos das bordas e deixar as superfícies planas.

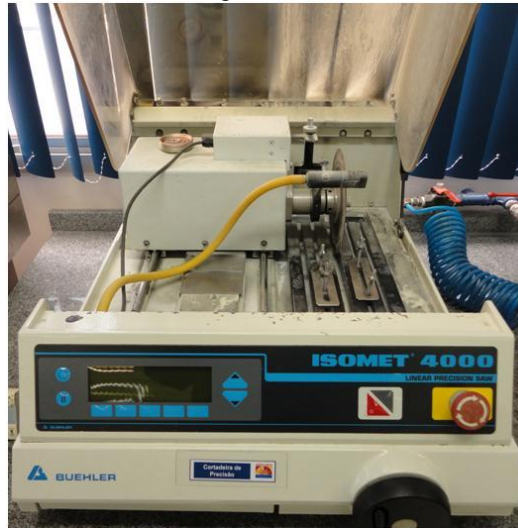
Figura 33 - Peça obtida após a cura da resina.



Fonte: Autoria própria.

Todas as amostras foram cortadas na cortadeira de precisão BUEHLER Isomet 4000 (Figura 34) distante cerca 1mm do centro geométrico da lata para garantir que o perfil ao longo do diâmetro fosse obtido com maior precisão durante o lixamento posterior.

Figura 34 - Cortadeira de precisão BUEHLER Isomet 4000.



Fonte: Autoria própria.

Após o corte, as mesmas foram lixadas na seguinte sequência de granulação: 200, 400 e 600 até chegar ao diâmetro do fundo da lata. Foi utilizado neste processo uma lixadeira/politriz Arotec Arapol-2V (Figura 35). Durante o lixamento, houve a necessidade de se manter uma única face normal ao corte em toda a superfície a ser analisada. Caso a superfície ficasse inclinada, a análise do perfil do fundo seria realizada com dimensões diferentes das reais, pois não estariam compreendidas no diâmetro.

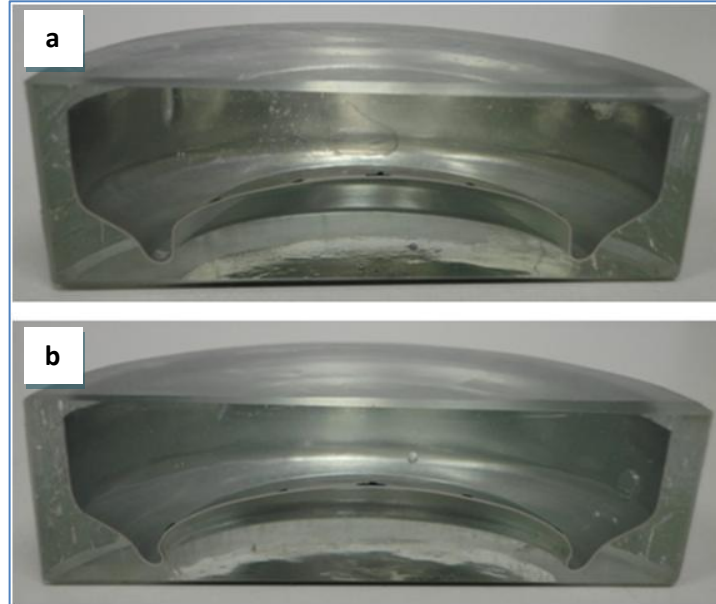
Figura 35 - Arotec Arapol 2V.



Fonte: Autoria própria.

Após lixadas, as amostras foram polidas numa politriz universal com pasta de diamante a fim de revelar o contorno do perfil, sem a presença de rebarbas (Figura 36). Após o polimento as amostras estavam prontas para a digitalização.

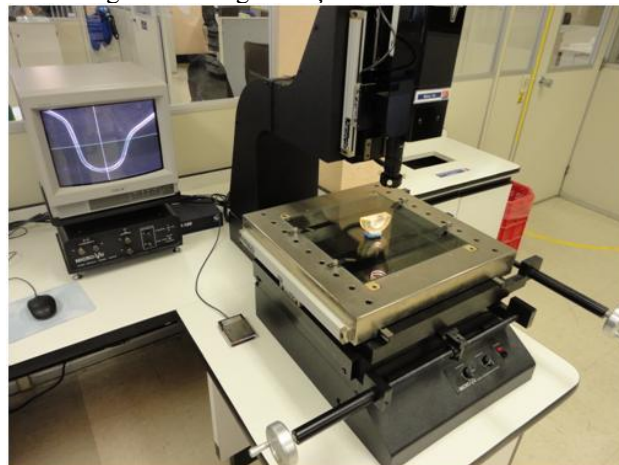
Figura 36 - Amostras após polimento da superfície analisada (a) sem *reforming*, (b) com *reforming*.



Fonte: Autoria própria.

A digitalização foi realizada no Micro VU com auxílio do *software* InSpec. Este foi utilizado para unir os pontos dos contornos das superfícies interna e externa de cada lata (Figura 37). Após a digitalização de cada fundo, foi gerado um arquivo no formato .dxf, o qual pode ser exportado para o AutoCad™ 2010.

Figura 37 - Digitalização com o Micro VU.



Fonte: Autoria própria.

11 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com os resultados dos ensaios de *buckle*, tração e os valores dimensionais, foram realizadas análises quantitativas e qualitativas para determinar a influência das variáveis na pressão de reversão do fundo das latas (espessura, tensão de escoamento e dimensões geométricas).

Os valores das pressões dos ensaios de *buckle* são mostrados nas Tabelas 12 a 14:

Tabela 12 – Valores de pressão na etapa após *bodymaker*.

Após Bodymaker						
Bodymaker	Fabricante A		Fabricante B		Fabricante C	
	A1	A2	B1	B2	C1	C2
Pressão [psi]	98,4	98,0	92,2	92,9	97,3	98,9
	98,8	99,0	91,5	92,3	96,9	97,0
	98,4	97,9	91,9	93,6	97,6	97,2
	98,6	97,5	91,2	92,9	99,5	96,5
	97,9	98,4	91,7	93,5	97,8	96,0
	98,6	97,0	92,1	93,1	97,4	96,0
	99,4	98,7	91,9	93,0	98,9	98,7
	98,4	97,5	92,4	92,5	97,3	97,0
	98,3	97,6	93,0	93,0	99,4	97,0
	98,6	98,9	91,4	91,8	96,8	99,0
	99,1	98,4	91,2	93,0	97,0	99,1
	98,3	97,6	92,2	92,9	97,3	95,9
Média	98,3		92,4		97,6	
Desvio Padrão	0,58		0,71		1,10	

Tabela 13 – Valores de pressão na etapa após IBO.

Após IBO						
Bodymaker	Fabricante A		Fabricante B		Fabricante C	
	A1	A2	B1	B2	C1	C2
Pressão [psi]	96,7	95,6	90,3	91,4	95,7	94,4
	96,0	95,8	91,1	90,7	94,0	96,3
	96,2	97,2	90,2	91,2	94,1	97,6

Após IBO						
<i>Bodymaker</i>	Fabricante A		Fabricante B		Fabricante C	
	A1	A2	B1	B2	C1	C2
	96,8	95,6	91,3	90,4	96,2	94,6
	96,7	96,8	90,0	90,5	94,5	92,9
	96,7	95,6	90,5	91,3	94,8	96,7
	95,9	96,4	91,1	91,9	95,7	94,7
	96,4	95,8	90,4	92,5	97,7	94,5
	96,7	95,8	89,9	91,0	94,0	95,7
	96,1	96,2	90,3	91,6	93,7	96,1
	95,4	95,9	90,2	91,8	95,1	96,4
	96,7	94,9	91,3	91,3	96,4	96,4
Média	96,2		90,9		95,3	
Desvio Padrão	0,56		0,67		1,25	

Tabela 14 – Valores de pressão na etapa após *necker*.

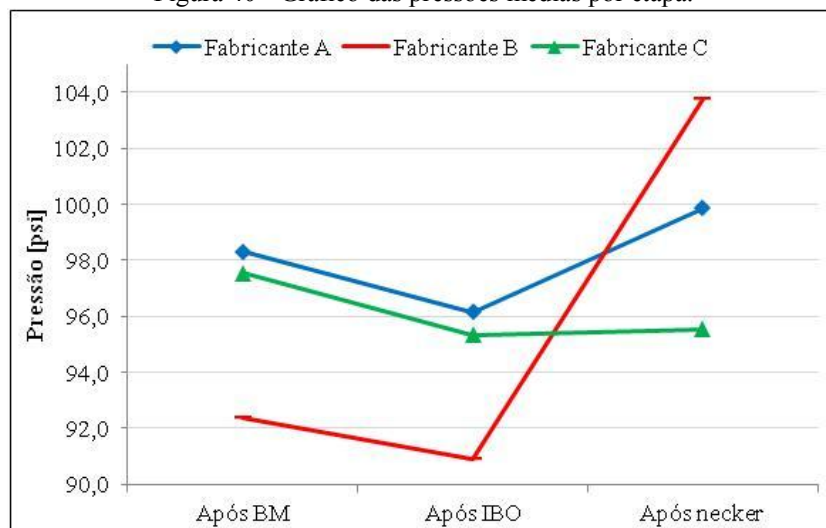
Após Necker						
<i>Bodymaker</i>	Fabricante A		Fabricante B		Fabricante C	
	A1	A2	B1	B2	C1	C2
	100,0	101,1	101,9	109,8	93,9	94,4
	98,9	104,3	100,5	101,9	94,5	97,8
	95,7	104,1	99,5	106,8	97,3	96,5
	102,4	101,4	110,8	105,4	97,9	94,6
	105,2	105,6	108,0	107,3	95,3	97,4
Pressão	101,3	95,6	107,8	108,4	94,2	92,6
[psi]	102,7	92,1	100,1	102,2	97,9	93,9
	103,6	96,2	98,4	101,0	94,8	94,8
	98,3	98,9	109,9	98,8	96,7	97,0
	95,4	104,3	97,2	106,9	95,7	94,8
	99,1	95,3	100,4	101,7	94,6	96,4
	98,1	97,3	107,0	98,8	95,0	95,1
Média	99,9		103,8		95,5	
Desvio Padrão	3,72		4,27		1,48	

Na Tabela 15 são mostrados apenas os valores médios das pressões em cada etapa. Para auxiliar a visualização das diferenças foi construído o gráfico apresentado na Figura 40.

Tabela 15 - Pressões médias dos ensaios de *buckle*.

Pressões médias [psi]			
Etapa	Fabricante A	Fabricante B	Fabricante C
Após Bodymaker	98,3	92,4	97,6
Após IBO	96,2	90,9	95,3
Após Necker	99,9	103,8	95,5

Figura 40 - Gráfico das pressões médias por etapa.



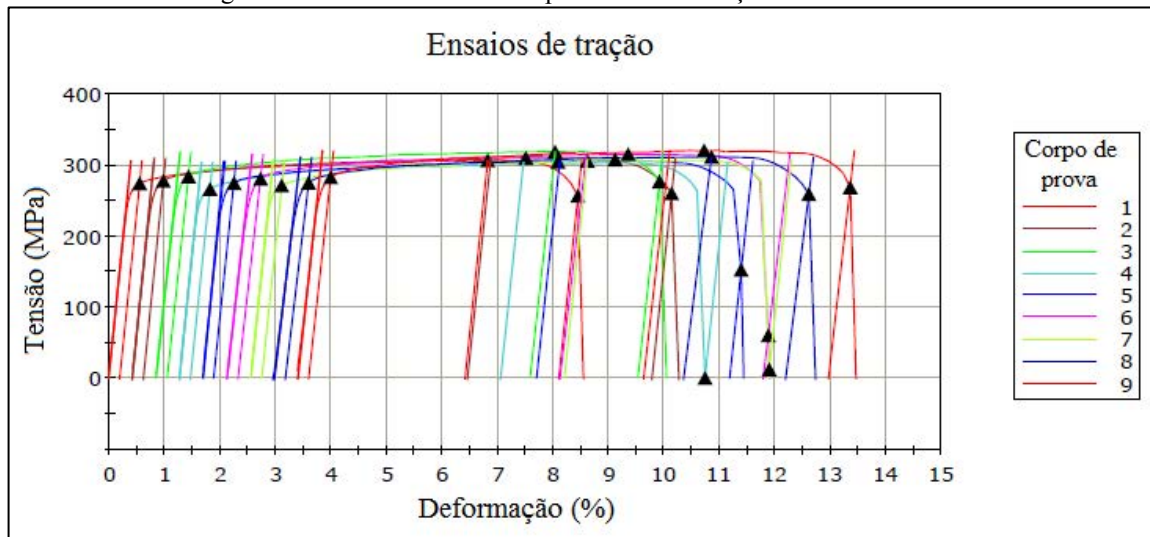
Fonte: Autoria própria.

Utilizando o fabricante B como referência, por apresentar a menor pressão de *buckle* na etapa “após BM”, verifica-se diferença de 5,9 psi nas pressões médias em relação ao fabricante A, com diferença mínima (mínimo A – máximo B) de 3,4 psi e máxima (máximo A – mínimo B) de 8,2 psi.

Já em relação ao fabricante C, na mesma etapa, verifica-se diferença de 5,2 psi nas pressões médias, com diferença mínima (mínimo C – máximo B) de 2,3 psi e máxima (máximo C – mínimo B) de 8,3 psi.

Os diagramas tensão vs deformação de um fabricante são mostrados na Figura 41.

Figura 41 - Resultados obtidos após ensaios de tração de um fabricante.



Fonte: Autoria própria.

11.1 ANÁLISE QUALITATIVA

A partir dos valores médios das pressões observa-se o comportamento esperado dos valores de pressão para cada etapa.

Na etapa inicial, após BM, as latas apresentam geometria sem *reforming*, com propriedades mecânicas iguais às da chapa.

Na etapa seguinte, após IBO, as latas ainda apresentam geometria sem *reforming*. A queda de pressão se dá devido à alteração das propriedades mecânicas após os fornos da linha de produção. Pode ser verificado que os três fabricantes se utilizam de práticas de fornos semelhantes, já que as tendências de reduções de pressões apresentam valores próximos, cerca de 2 psi.

Na última etapa, após *necker*, os fabricantes A e B aumentam significativamente suas pressões de *buckle*. Dentre as variáveis que afetam o *buckle*, a única que sofre variação nesta etapa é a geometria do fundo, ou seja, o aumento de aproximadamente 4 psi e 13 psi para os fabricantes A e B, respectivamente, são devido exclusivamente à conformação do *reforming*. O fabricante C, por não utilizar *reforming*, permanece com a mesma média da etapa anterior, a pequena variação é devido à aleatoriedade das amostras de latas.

Sabe-se, de acordo com Guedes (2002), que a pressão de *buckle* para latas sem *reforming* é diretamente proporcional à tensão de escoamento e ao quadrado da espessura.

As tensões de escoamento para os três fabricantes são similares, com diferença máxima de 0,1 kgf/mm². Este valor é equivalente a 0,36% das tensões de escoamento,

variação que pode ser considerada insignificante para as análises qualitativas deste trabalho, portanto as propriedades mecânicas nos três fabricantes serão consideradas iguais.

As espessuras utilizadas são as médias entre as duas laterais e centro da chapa, as quais foram obtidas previamente ao ensaio de tração. Como resultado, os fabricantes A e B utilizam a mesma espessura, enquanto a espessura do fabricante C é 2,7% superior. Diferentemente das tensões de escoamento, a diferença de espessura é significativa.

Ao fazer uma análise preliminar da primeira etapa de fabricação, considerando apenas espessura e tensão de escoamento, espera-se que as latas do fabricante C apresentem as maiores pressões de *buckle*, por apresentar a maior espessura, seguidas igualmente por A e B. Porém esta análise representa apenas uma expectativa que seria válida somente para latas com a mesma geometria de fundo, ou seja, é válida apenas para diferentes bobinas sendo processadas por um único fabricante.

Portanto, a análise anterior justifica a necessidade de se analisar a geometria do fundo das latas, e implica que o projeto da geometria do conjunto da ponta do punção e formador de fundo é fundamental para que a lata apresente características adequadas à sua utilização.

11.2 ANÁLISE QUANTITATIVA

Contrariamente à análise qualitativa, para a obtenção das equações de DRP para cada etapa, as pequenas variações de tensão de escoamento são necessárias para se obter as correlações da mesma, caso fossem consideradas iguais, não seriam observadas correlações.

Uma importante observação é que os valores dimensionais encontrados não representam os valores de projeto dos fabricantes.

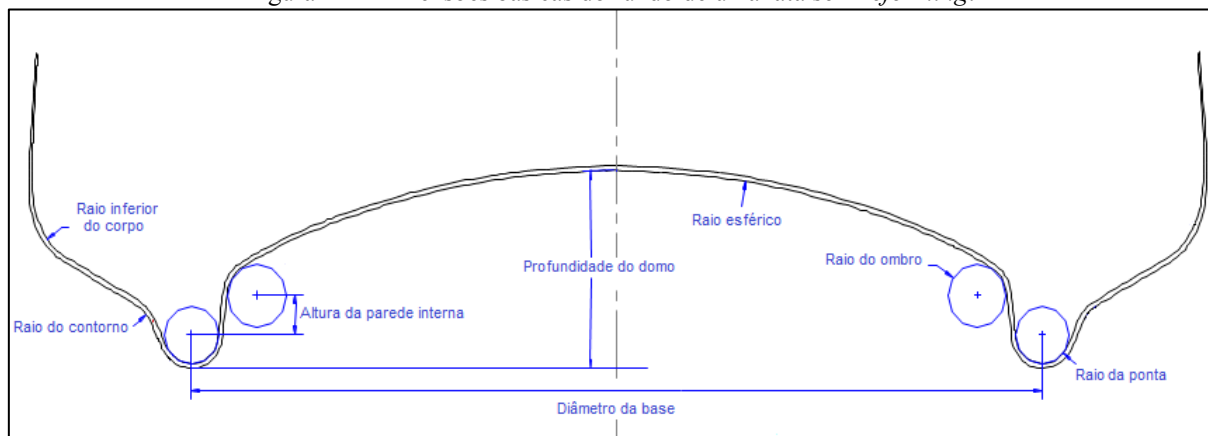
Os valores de uma dimensão variam, mesmo que pouco, entre *bodymakers* de um mesmo fabricante. Essas variações podem ocorrer por alguns motivos, como por exemplo: desgaste das ferramentas, variação de espessura da chapa e desalinhamento do punção.

Para a obtenção das equações de DRP, foram utilizadas regressões múltiplas no Excel, uma em cada etapa com a unidade das dimensões em polegadas e da tensão limite de escoamento em ksi.

11.2.1 Latas após *bodymaker*

As identificações das variáveis e respectivas posições no fundo da lata são mostradas na Figura 42.

Figura 42 - Dimensões básicas do fundo de uma lata sem *reforming*.



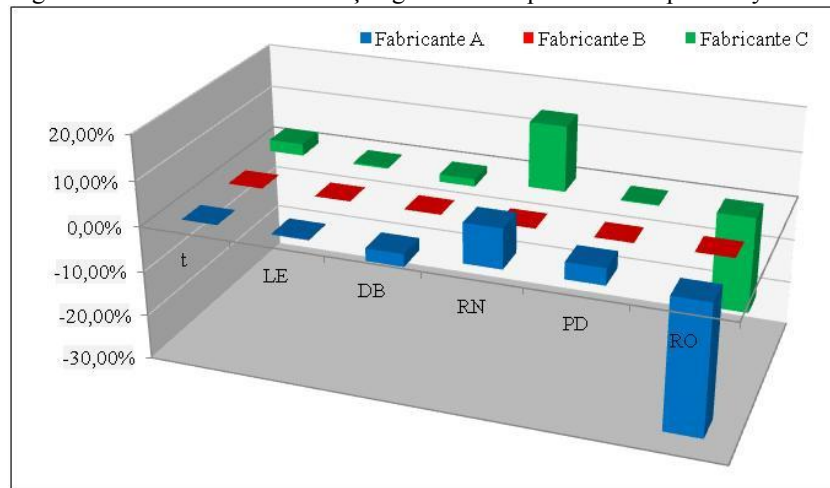
Fonte: Adaptado de GUEDES, 2002.

Ainda utilizando o fabricante B como referência, são apresentadas na Tabela 16 as diferenças percentuais de todas as variáveis necessárias para a obtenção da equação do DRP, na Figura 43 essas diferenças são apresentadas graficamente.

Tabela 16 - Diferenças percentuais das variáveis em relação ao fabricante B após o *bodymaker*.

Variável	Fabricante A	Fabricante C
Espessura (t)	0,00	2,70%
Limite de escoamento (LE)	- 0,22%	- 0,36%
Diâmetro da base (DB)	- 2,75%	- 1,69%
Profundidade do domo (PD)	3,61%	- 0,23%
Raio da ponta (RP)	8,58%	14,67%
Raio do ombro (RO)	- 29,08%	- 21,71%

Figura 43 - Gráfico com diferenças geométricas percentuais após bodymaker.



Fonte: Autoria própria.

Os valores apresentados na Tabela 17 são as dimensões médias entre os dois *bodymakers* e entre as dimensões diametralmente opostas.

Tabela 17 - Médias das dimensões geométricas para regressões sem *reforming*.

Dimensões após BM e após IBO (sem <i>reforming</i>) [mm]			
Variável	Fabricante A	Fabricante B	Fabricante C
Diâmetro da base (DB)	47,444	48,783	47,958
Profundidade do domo (PD)	10,933	10,552	10,528
Raio da ponta (RP)	1,431	1,318	1,512
Raio do ombro (RO)	1,330	1,876	1,469

Na Tabela 18 é apresentada a classificação das variáveis para realizar a regressão múltipla na etapa “após BM”.

Tabela 18 - Variáveis utilizadas para as regressões múltiplas de latas sem *reforming*.

Variável dependente	Variáveis independentes
– Pressão	– Espessura;
	– Tensão de escoamento;
	– Diâmetro da base;
	– Raio da ponta;
	– Profundidade do domo;
	– Raio do ombro.

O coeficiente de determinação R^2 é uma medida que diz quão bem a reta de regressão da amostra se ajusta aos dados, ou seja, mede a proporção ou a porcentagem da variação total das variáveis independentes explicada pelo modelo de regressão. Seus limites são 0 e 1. Quanto mais próximo de 1, maior a correlação dos dados com a reta obtida.

O valor de p representa a probabilidade do efeito observado entre as variáveis (dependente e independente) ser devido ao acaso, e não aos fatores que estão sendo estudados. Considera-se um valor crítico como sendo $p \leq 0,05$.

Foram obtidos os seguintes dados estatísticos:

$$R^2 = 0,9211$$

Tabela 19 - Valores de p observados com a regressão múltipla após BM.

Variável	Valor de p
t^2	1,78E-08
LE	1,16E-12
$(BD-2.NR)^2$	2,87E-05
DD	5,65E-06
SR	3,37E-04

Sendo obtida a seguinte equação:

$$DRP = -54,62 + 456632,12.t^2 + 2,11.LE - 9,99.(DB-2.RP)^2 + 133,87.PD - 83,89.RO \quad (1)$$

A equação 1 é válida nos seguintes intervalos:

$$\left[\begin{array}{l} 0,259 \leq t \leq 0,268 \text{ mm} \\ 38,12 \leq LE \leq 40,21 \text{ ksi} \\ 47,39 \leq DB \leq 48,80 \text{ mm} \\ 1,31 \leq RP \leq 1,53 \text{ mm} \\ 10,25 \leq PD \leq 10,94 \text{ mm} \\ 1,32 \leq RO \leq 1,90 \text{ mm} \end{array} \right]$$

11.2.2 Latas após IBO

A única variação das latas após os *bodymakers* e as latas após o IBO são as propriedades mecânicas. Estas foram estimadas através da equação 1 com as pressões médias após IBO sendo conhecidas e fazendo a tensão limite de escoamento como incógnita. Os valores das reduções são mostrados na Tabela 20.

Tabela 20 - Redução percentual no limite de escoamento.

Redução no LE	
Fabricante A	2,50%
Fabricante B	1,81%
Fabricante C	2,79%

A Tabela 21, assim como na etapa anterior, apresenta as diferenças percentuais de todas as variáveis necessárias. As identificações das variáveis são as mesmas da Figura 42.

Tabela 21 - Diferenças percentuais das variáveis em relação ao fabricante B após o IBO.

Variável	Fabricante A	Fabricante C
Espessura (t)	0,00	2,70%
Limite de escoamento (LE)	- 0,92%	- 1,36%
Diâmetro da base (DB)	- 2,75%	- 1,69%
Profundidade do domo (PD)	3,61%	- 0,23%
Raio da ponta (RP)	8,58%	14,67%
Raio do ombro (RO)	- 29,08%	- 21,71%

As variáveis utilizadas na regressão múltipla são as mesmas da Tabela 18.

Foram obtidos os seguintes dados estatísticos:

$$R^2 = 0,9201$$

Tabela 22 - Valores de p observados com a regressão múltipla após IBO.

Variável	Valor de P
t^2	1,87E-18
LE	2,02E-59
$(BD-2.NR)^2$	2,33E-09
DD	3,10E-13
SR	1,67E-05

Sendo obtida a seguinte equação:

$$DRP = -57,01 + 467989,39.t^2 + 2,07.LE - 10,65.(DB-2.RP)^2 + 142,99.PD - 68,67.RO \quad (2)$$

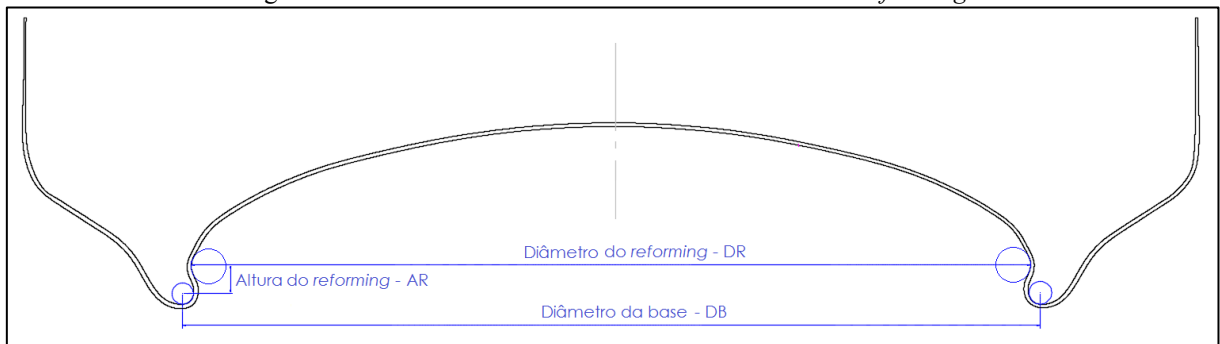
A equação 2 é válida nos seguintes intervalos:

$$\left[\begin{array}{l} 0,259 \leq t \leq 0,268 \text{ mm} \\ 38,12 \leq LE \leq 40,21 \text{ ksi} \\ 47,39 \leq DB \leq 48,80 \text{ mm} \\ 1,31 \leq RP \leq 1,53 \text{ mm} \\ 10,25 \leq PD \leq 10,94 \text{ mm} \\ 1,32 \leq RO \leq 1,90 \text{ mm} \end{array} \right]$$

11.2.3 Latas após *necker*

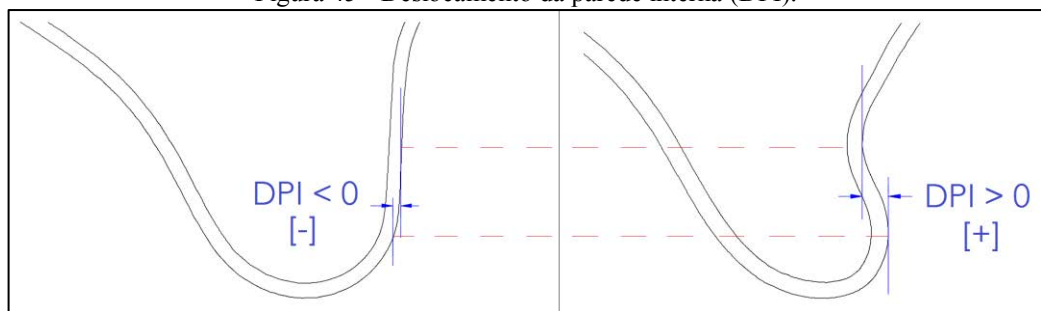
Como não há referências sobre o comportamento das latas com *reforming*, foi necessária a aquisição do maior número possível de dimensões para que fossem feitas regressões múltiplas até que se chegasse num resultado satisfatório. Os resultados aqui apresentados foram os melhores obtidos para as condições existentes.

As identificações das variáveis e respectivas posições no fundo da lata são mostradas nas Figura 44 e Figura 45.

Figura 44 - Dimensões básicas do fundo de uma lata com *reforming*.

Fonte: Autoria própria.

Figura 45 - Deslocamento da parede interna (DPI).



Fonte: Autoria própria.

São apresentadas na Tabela 23 as diferenças percentuais de todas as variáveis necessárias para a obtenção da equação do DRP após *necker*. Diferentemente das etapas anteriores, cada fabricante tem como referência as dimensões de suas respectivas latas após IBO. Como o fabricante C não utiliza *reforming*, não será apresentado na tabela abaixo por não apresentar variações dimensionais.

Tabela 23 - Diferenças percentuais das variáveis em relação ao fabricante B com *reforming*.

Variável	Fabricante A	Fabricante B
Espessura (t)	0,00%	0,00%
Limite de escoamento (LE)	0,00%	0,00%
Diâmetro da base (DB)	- 0,29%	- 1,22%
Raio da ponta (RP)	- 13,74%	- 54,43%
Diâmetro do <i>reforming</i> (DR)	1,94%	2,74%
Altura do <i>reforming</i> (AR)	- 41,03%	- 24,70%
Deslocamento da parede interna (DPI)	120,51%	119,54%

É apresentado na Tabela 24 **Erro! Auto-referência de indicador não válida.** as dimensões das latas sem *reforming*, e na Tabela 25 as latas com *reforming*. Assim como nas outras

etapas, os valores apresentados são as dimensões médias entre os dois *bodymakers* e entre as dimensões diametralmente opostas.

Tabela 24 - Médias das dimensões geométricas sem *reforming*.

Dimensões antes do necker (sem <i>reforming</i>) [mm]			
Variável	Fabricante A	Fabricante B	Fabricante C
Diâmetro da base (DB)	47,444	48,783	47,958
Raio do ponta (RP)	1,431	1,318	1,512
Diâmetro do <i>reforming</i> (DR)	43,996	45,547	44,206
Altura do <i>reforming</i> (AR)	2,359	2,083	2,174
Deslocamento da parede interna (DPI)	-0,050	-0,146	-0,179

Tabela 25 - Médias das dimensões geométricas com *reforming*.

Dimensões após necker (com <i>reforming</i>) [mm]			
Variável	Fabricante A	Fabricante B	Fabricante C
Diâmetro da base (DB)	47,306	48,187	47,958
Raio da ponta (RP)	1,240	0,586	1,512
Diâmetro do <i>reforming</i> (DR)	44,850	47,431	44,206
Altura do <i>reforming</i> (AR)	1,406	1,552	2,174
Deslocamento da parede interna (DPI)	0,242	0,452	-0,179

A regressão múltipla “após *necker*” foi realizada com a classificação das variáveis conforme Tabela 26:

Tabela 26 - Variáveis utilizadas para as regressões múltiplas de latas com *reforming*.

Variável dependente	Variáveis independentes
– Pressão	– Espessura;
	– Tensão de escoamento;
	– Diâmetro da base;
	– Raio da ponta;
	– Diâmetro do <i>reforming</i> ;
	– Altura do <i>reforming</i> ;
	– Deslocamento da parede interna.

Foram obtidos os seguintes dados estatísticos:

$$R^2 = 0,7841$$

Tabela 27 - Valores de p observados com a regressão múltipla após *necker*.

Variável	Valor de P
t	7,51E-33
LE	1,26E-21
(BD-2.NR) ²	5,34E-08
DR ²	2,88E-09
AR	5,91E-05
DPI	7,18E-32

Sendo obtida a seguinte equação:

$$DRP = -125,52 + 14910,20.t + 1,95.LE - 91,37.(DB-2.RP)^2 - 96,73.DR^2 + 65,71.AR + 1225,24.DPI \quad (3)$$

A equação 3 é válida nos seguintes intervalos:

$$\left[\begin{array}{l} 0,259 \leq t \leq 0,268 \text{ mm} \\ 38,12 \leq LE \leq 40,21 \text{ ksi} \\ 47,22 \leq DB \leq 48,80 \text{ mm} \\ 0,58 \leq RN \leq 1,53 \text{ mm} \\ 43,92 \leq DR \leq 47,42 \text{ mm} \\ 1,34 \leq AR \leq 2,37 \text{ mm} \\ -0,19 \leq DPI \leq 0,47 \text{ mm} \end{array} \right]$$

Foi realizada uma análise da equação 3 para se observar a influência da variação de suas variáveis na pressão do *buckle*. A análise consistiu em utilizar os valores médios de cada variável dos três fabricantes, para essa condição foi calculada uma pressão do *buckle* igual a 94,96 psi.

A partir desse resultado foram calculadas as pressões ao variar $\pm 1\%$ de cada uma das variáveis, mantendo as outras constantes, os valores das variações são apresentados na Tabela 28. As variações da pressão de *buckle* são apresentadas na Tabela 29.

Tabela 28 - Valores correspondentes a 1% dos valores médios das variáveis da equação 3.

Valores correspondentes a 1% das variáveis						
t	LE	DB	RP	DR	AR	DPI
0,003 mm	0,383 ksi	0,481 mm	0,014 mm	0,455 mm	0,017 mm	0,002 mm

Tabela 29 - Variações da pressão de *buckle*.

Variação da pressão de <i>buckle</i> [psi]							
Variação percentual da variável	t	LE	DB	RP	DR	AR	DPI
+1%	1,54	0,75	6,19	-0,36	-6,23	0,05	0,08
-1%	-1,53	-0,75	-6,12	0,37	6,17	-0,04	-0,08

11.2.4 Comparativo final

Uma última análise pertinente a fim de validar as equações obtidas é um comparativo entre as pressões reais obtidas no ensaio de *buckle* e as pressões obtidas utilizando as equações 1, 2 e 3 nas etapas “após *bodymaker*”, “após IBO” e “após *necker*”, respectivamente. Os valores são apresentados nas Tabelas 30 e 31.

Tabela 30 - Valores médios das pressões do ensaio de *buckle*.

Pressões de buckle reais [psi]			
Etapas	Após bodymaker	Após IBO	Após Necker
Fabricante A	98,30	96,16	99,87
Fabricante B	92,38	90,93	103,77
Fabricante C	97,56	95,34	95,55

Tabela 31 - Valores de pressões obtidos com as equações.

Pressões de buckle teóricas [psi]			
Etapas	Após bodymaker	Após IBO	Após Necker
Fabricante A	98,24	96,15	99,70
Fabricante B	92,41	90,93	103,99
Fabricante C	97,64	95,30	95,12

A conformação plástica dos metais está presente em um ou mais estágios da maioria dos produtos metálicos produzidos atualmente. Apesar de complexo, o processo de conformação mecânica apresenta alguns aspectos que o tornam um bom processo de fabricação, como a economia de matéria-prima, capacidade de alterar significativamente as propriedades mecânicas, boa qualidade final com elevadas velocidades de produção e baixos custos de fabricação.

Para fabricação de latas de bebida são necessárias diversas etapas de conformação mecânica: laminação a quente e a frio, corte da chapa, conformação do copo, embutimento do corpo da lata, formação do pescoço e conformação do *reforming*.

Os resultados dos ensaios de *buckle* se mostraram bastante satisfatórios, apresentando os resultados esperados: redução de pressão entre as etapas “após BM” e “após IBO” que indica a queda na tensão limite de escoamento devido a passagem das latas por dois fornos, e o aumento da pressão das latas com *reforming* entre as etapas “após IBO” e “após *necker*”.

Como as variações de pressão entre as etapas após BM e IBO se devem às temperaturas dos fornos e aos tempos em que as latas ficam expostas ao ambiente dos mesmos, verifica-se que os três fabricantes fazem uso de práticas similares de fornos.

A análise qualitativa se mostra útil apenas para latas com a mesma geometria de fundo, sendo necessária que seja realizada a análise quantitativa, que envolve todas as variáveis.

As equações 1 e 2 se mostram como uma excelente aproximação para descrever os fatores importantes à reversão do fundo das latas sem *reforming*. Seus resultados se mostram divergentes das pressões médias reais apenas a partir da segunda casa decimal.

A obtenção da equação 3 se mostrou como um grande desafio, pois não havia referência anterior que relacione as variáveis que influenciam a reversão do fundo das latas com *reforming*. O fato de se observar uma divergência máxima de 0,43psi (0,45% da pressão de *buckle*) demonstra que apesar do coeficiente de determinação R^2 encontrado não ser muito alto, a correlação encontrada é a correta. Uma solução seria utilizar uma amostragem maior.

Pode ser observado nas três equações obtidas que os diâmetros são os fatores que mais impactam na pressão de *buckle*, seguidos por espessura e tensão limite de escoamento.

REFERÊNCIAS

ABAL. **Guia técnico do alumínio:** características físico-químicas. São Paulo: ABAL, 2006. 183p.

ABAL. **Características Físicas e Químicas.** Disponível em: <<http://www.abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/>>. Acesso em: 15 out. 2014.

ABRALATAS. **Abralatas - Processo produtivo da latinha.** Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=EYu0NGGV0jk>>. Acesso em: 28 out. 2014.

ALCAN. **Manual de Soldagem.** [S.l.]: ALCAN, 1993.

ALTEK. **Can/End Buckling Test Stations.** Disponível em: <<http://www.altekcompany.com/tech/products.html>>. Acesso em: 15 set. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 2107:** alumínio e suas ligas - produtos trabalháveis - designações das têmperas. Rio de Janeiro, 2000. Disponível em: <<http://www.abntcolecao.com.br/java/viewnormajava.aspx?Q=1524F7AE1BFE475C96BED819113598E264FB615B4D5CFACD&Req=>>>. Acesso em: 10 dez. 2014.

BELVAC. **Neckers.** Disponível em: <<http://www.belvac.com/index.php/neckers/the-belvac.html>>. Acesso em: 20 dez. 2014.

BRESCIANI FO., E. (Coord). **Conformação plástica dos metais.** São Paulo: EPUSP, 2011. Disponível em: <http://www.ocw.unicamp.br/fileadmin/user_upload/cursos/EM730/CONFORMACAOPLASTICADOSMETAIS_comficha.pdf>. Acesso em: 28 abr. 2014.

CALLISTER JR., W. D. **Fundamentals of Materials Science and Engineering**. 5. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2001.

CALLISTER JR., W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

CIMM. **Processos de Recuperação e Recristalização**. Disponível em: <http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6473-processos-de-recuperacao-e-recristalizacao#.VOcrTebF_n8>. Acesso em: 20 fev. 2015.

FREITAS, R. **PME 2310- endurecimento por precipitação**. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAAhUAE/pme-2310-endurecimento-por-precipitacao?part=2>>. Acesso em: 15 dez. 2014.

GUEDES, M. **Fatores determinantes do DRP**. Pindamonhangaba: Novelis do Brasil, CTL, 2002. 12 p.

INFOMET. **Tratamentos térmicos de ligas de alumínio**. Disponível em: <<http://www.infomet.com.br/site/metais-e-ligas-conteudo-ler.php?codAssunto=57>>. Acesso em: 18 out. 2014.

IPS. **Past Projects**. Disponível em: <<http://www.intpacsol.com/past-projects.html>>. Acesso em: 05 jan. 2015.

KABIR, K. VODENITCHAROVA, T. HOFFMAN, M. Response of aluminium foam-cored sandwich panels to bending load. **Composites: Part B**, Sidney, v. 64, apr. 2014. Disponível em: <http://ac.els-cdn.com/S1359836814001462/1-s2.0-S1359836814001462-main.pdf?_tid=b52c986e-ada6-11e4-8b94-00000aab0f6b&acdnat=1423189404_d828af325faf64db84be74fd90ef2381>. Acesso em: 10 jan. 2015.

NOVELIS. **Cup forming basics**. Pindamonhangaba: Novelis do Brasil, CTL, 2010a. 11 p.

NOVELIS. **Inside reform & reprofiling**. Pindamonhangaba: Novelis do Brasil, CTL, 2010b. 6 p.

NOVELIS. **Necker flanger**. Pindamonhangaba: Novelis do Brasil, CTL, 2010c. 7 p.

NOVELIS. **Toolpack and ironing**. Pindamonhangaba: Novelis do Brasil, CTL, 2010d. 25 p.

NOVELIS. **Trimmer w cans**. Pindamonhangaba: Novelis do Brasil, CTL. 2011. 1 filme (7 seg), color.

PATROCINIO, P. R. G. Caracterização **da textura e do orelhamento (“earring”) da liga AA3104 após a redução a frio**. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2011. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/97/97134/tde-23082013-105827/es.php>>. Acesso em: 31 mai. 2014.

PEACH, M. **Learn from Lieb**. Disponível em: <http://www.canmakingnews.com/b/003_backissue/content/feat_liebpart2.html>. Acesso em: 10 jan. 2015.

RM3 FILMES. **RM3 - Crown (Versão em Português)**. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=YK4Rw5ZdQ2M>>. Acesso em: 28 out. 2014.

STOLLE MACHINERY. **Latas para bebidas**. Disponível em: <<http://www.stollemachinery.com/pt-br/machine-selector>>. Acesso em: 20 dez. 2014.

GLOSSÁRIO

Blank – Peça de chapa cortada no formato adequado para a estampagem.

Bodymaker – Prensa de conformação das latas.

Buckle – Reversão do fundo da lata.

Cupper – Prensa de conformação dos copos.

Necker – Equipamento que conforma o pescoço da lata.

Reforming – Vinco conformado na parede interna da ponta do fundo da lata.

Trimmer – Equipamento que corta a aresta superior das latas.