

BRUNO PRESTES PEREIRA

Análise e Comparação de Orelhamento na Liga AA3104 após Laminação a Quente

BRUNO PRESTES PEREIRA

Análise e Comparação de Orelhamento na Liga AA3104 após Laminação a Quente

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em **Engenharia Mecânica Integral** 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. Peterson Luiz Ferrandini

P436a	Pereira, Bruno Prestes Análise e comparação de orelhamento na liga AA3104 após laminação a quente / Bruno Prestes Pereira – Guaratinguetá, 2015.
	38 f. : il.
	Bibliografia : f. 37-38
	Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2015.
	Orientador: Prof. Dr. Peterson Luiz Ferrandini
	1. Ligas de alumínio 2. Laminação (Metalurgia) 3. Estampagem (Trabalhos em metal) I. Título
	CDU 669.715

unesp  **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

Bruno Prestes Pereira

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. PETERSON LUIZ FERRANDINI
Orientador/UNESP-FEG

Prof. Dr. JOSÉ VITOR CANDIDO DE SOUZA
UNESP-FEG

Prof. Dr. SÉRGIO FRANCISCO DOS SANTOS
UNESP-FEG

Janeiro de 2016

de modo especial, aos meus pais, pelo incentivo e todo sacrifício em prol da minha formação, aos meus familiares que direta ou indiretamente contribuíram para realização do mesmo, e aos meus amigos da República Ama-Zonas, que sempre me apoiaram, me incentivaram e me deram força para conclusão deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, *Marisa Prestes dos Santos Pereira e Valdemir Lima Pereira*, pela paciência, compreensão, todo amor e carinho e principalmente pelos incentivos, os quais me possibilitaram o início e a conclusão deste trabalho,

à Novelis do Brasil Ltda. pelo incentivo, apoio e estrutura para o desenvolvimento deste trabalho,

aos colegas da Novelis do Brasil que me proporcionaram um imenso aprendizado e desenvolvimento profissional, em especial o Eng. Luiz Alberto Murad Veiga e Eng. José Luciano Gouveia da Silva pelo apoio e todo suporte para a conclusão deste trabalho, a Eng. Amélia Alik Zumba, Eng. Ana Elisa Sorrilha por todo apoio e incentivo, aos operadores da laminação a quente e técnicos dos laboratórios que me ajudaram na preparação das amostras e nos ensaios mecânicos realizados neste trabalho,

ao meu orientador, *Prof. Dr. Peterson Luiz Ferrandini* pela cooperação, auxílio e toda orientação durante a execução deste trabalho, fazendo com que ele fosse realizado com sucesso,

aos meus irmãos da República Ama-Zonas, os quais convivi durante todos os anos da graduação, que me apoiaram, auxiliaram, dividiram conhecimentos e principalmente me ajudaram a me tornar uma pessoa de caráter.

PEREIRA, B. P. **Análise e Comparação de Orelhamento na Liga AA3104 após Laminação a Quente**. 2016. 38 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

RESUMO

O alumínio vem sendo muito utilizado na conformação e fabricação de latas de bebidas, especificamente a liga de alumínio AA3104, fabricantes os quais estão cada vez mais exigentes em relação as propriedades mecânicas, qualidade e redução de desperdícios. Este trabalho descreve a análise e comparação do comportamento de orelhamento na liga de alumínio AA3104 para amostras de espessuras finais de 1,80 e 2,10 mm. Foram obtidas após um processo de laminação a quente, um universo total de 86 amostras para as duas diferentes espessuras, sendo 23 amostras de 1,80 mm e 63 amostras para 2,10 mm. Após retirada das amostras, foi realizado um ensaio mecânico de embutimento, caracterizando então o orelhamento nas mesmas. Os resultados de orelhamento para as espessuras de 1,80 e 2,10 mm foram analisados e comparados estatisticamente, dando 7,1% e 7,4% na média respectivamente, correlacionados com as variáveis de processo da laminação a quente, mostrando que eles são iguais estatisticamente e que as variáveis de processo não alteram o resultado final desejado, que varia de 7,0 a 7,5%.

PALAVRAS-CHAVE: Alumínio. Liga AA3104. Orelhamento. Laminação.

PEREIRA, B. P. **“Earing” analysis and comparison in AA3104 alloy after hot rolling.** 2016. 38 f. Graduate Work (Graduate in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

ABSTRACT

Aluminum has been widely used in the forming and manufacture of beverage cans, specific aluminum alloy AA3104, which manufacturers are increasingly demanding as to mechanical properties, quality and reducing waste. This work describes the analysis and comparison of the behavior of "earing" AA3104 aluminum alloy samples of final thicknesses of 1.80 and 2.10 mm. Were obtained after a hot rolling process, a total population of 86 samples for the two different thicknesses, of which 23 samples of 1.80 mm and 2.10 mm 63 samples. After removal of samples, there was a mechanical test inlay, then characterizing the “earing” in them. The results “earing” to the thicknesses of 1.80 and 2.10 mm were analyzed and compared statistically to give 7.1% and 7.4% on average, respectively, correlated with the hot rolling process variables, showing that they are statistically equal and that the process variables do not affect the end result desired, ranging from 7.0 to 7,5%.

KEYWORDS: Aluminum. Alloy AA3104. Earing. Rolling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Latas de alumínio da liga AA3104	13
Figura 2 – Orelhamento nos corpos de prova	13
Figura 3 – Principais elementos por grupo de liga	15
Figura 4 – Limites de composição química da liga AA3104, especificados pela Aluminium Association	15
Figura 5 – Textura de laminação: a) estado inicial b) laminado	16
Figura 6 – Processo da laminação a quente	18
Figura 7 – Bobinas de alumínio	18
Figura 8 – Etapa de estampagem do corpo de lata	19
Figura 9 – Etapas da formação de copos durante a estampagem profunda	19
Figura 10 – Perfil da lata de bebidas após estampagem	20
Figura 11 – Amostra retirada na laminação a quente	21
Figura 12 – Ensaio mecânico de embutimento	22
Figura 13 – Equipamento Huxley Bertram para medição de orelhamento	23
Figura 14 – Interface do programa com os resultados obtidos no equipamento Huxley Bertram	23
Figura 15 – Curva do orelhamento ao longo da largura para amostras de espessura 1,80mm	25
Figura 16 – Curva do orelhamento para as duas amostras	26
Figura 17 – Resultados de tamanho de grão (ASTM)	27
Figura 18 – a) Ilustra micrografia realizada na superfície com grãos equiaxiais e tamanho médio de 5.0 ASTM, b) Ilustra micrografia realizada no centro com grãos equiaxiais e tamanho médio de 4.0 ASTM (aumento 100x) e c) Ilustra micrografia realizada em toda espessura do material (aumento 50x)	27
Figura 19 – a) Ilustra micrografia realizada na superfície com grãos equiaxiais e tamanho médio de 5.0 ASTM, b) Ilustra micrografia realizada no centro com grãos equiaxiais e tamanho médio de 4.0 ASTM (aumento 100x) e c) Ilustra micrografia realizada em toda espessura do material (aumento 50x)	28
Figura 20 – a) Ilustra micrografia realizada na superfície com grãos equiaxiais e tamanho médio de 5.0 ASTM, b) Ilustra micrografia realizada no centro com grãos equiaxiais e tamanho médio de 4.0 ASTM (aumento 100x) e c) Ilustra micrografia realizada em toda espessura do material (aumento 50x)	28

Figura 21 – a) Ilustra micrografia realizada na superfície com grãos equiaxiais e tamanho médio de 5.0 ASTM, b) Ilustra micrografia realizada no centro com grãos equiaxiais e tamanho médio de 4.0 ASTM (aumento 100x) e c) Ilustra micrografia realizada em toda espessura do material (aumento 50x)	29
Figura 22 – a) Ilustra micrografia realizada na superfície com grãos equiaxiais e tamanho médio de 5.0 ASTM, b) Ilustra micrografia realizada no centro com grãos equiaxiais e tamanho médio de 4.0 ASTM e presença de grãos orientados (aumento 100x) e c) Ilustra micrografia realizada em toda espessura do material (aumento 50x)	29
Figura 23 – a) Ilustra micrografia realizada na superfície com grãos equiaxiais e tamanho médio de 5.0 ASTM, b) Ilustra micrografia realizada no centro com grãos equiaxiais e tamanho médio de 4.0 ASTM (aumento 100x) e c) Ilustra micrografia realizada em toda espessura do material (aumento 50x)	30
Figura 24 – Comportamento do orelhamento ao longo do projeto para as duas espessuras ..	31
Figura 25 – Comportamento e comparação do orelhamento entre as espessuras de 1,80 e 2,10 mm ao longo do projeto	31
Figura 26 – Correlação entre o orelhamento e a temperatura de entrada do laminador a quente	32
Figura 27 – Correlação entre o orelhamento e a temperatura de saída do laminador a quente	32
Figura 28 – Correlação entre o orelhamento e a composição química	33
Figura 29 – Correlação do orelhamento e as espessuras de 1,80 e 2,10 mm no MINITAB ..	34
Figura 30 – Histograma dos valores de orelhamento para as espessuras finais	34
Figura 31 – Variabilidade e a tendência de orelhamento para as espessuras de 1,80 e 2,10 mm	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados de orelhamento nas amostras de espessura 1,80 mm	25
Tabela 2 – Resultados de orelhamento obtidos para as duas amostras	26

LISTA DE SÍMBOLOS

AA	Aluminium Association
%E	Orelhamento calculado
hp	Altura de pico
hv	Altura de vale
ln	logaritmo natural
r	Coefficiente de anisotropia (Coefficiente de Lankford)
Δr	Anisotropia planar
lf	Comprimento final
lo	Comprimento inicial
r_{0°	Coefficiente de anisotropia a 0° da direção de laminação
r_{45°	Coefficiente de anisotropia a 45° da direção de laminação
r_{90°	Coefficiente de anisotropia a 90° da direção de laminação
wf	Largura final
wo	Largura inicial

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	A LIGA AA3104	14
2.2	ANISOTROPIA	15
2.3	PROCESSO DE CONFORMAÇÃO	17
2.3.1	Laminação	17
2.3.2	Conformação de lata	18
3	MÉTODOS EXPERIMENTAIS	21
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
4.1	COMPARAÇÃO DA MICROESTUTURA	26
4.2	ANÁLISE E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS	30
5	CONCLUSÃO	36
	REFERÊNCIAS	37

1 INTRODUÇÃO

O alumínio vem sendo muito utilizado na conformação e fabricação de latas de bebidas, especificamente a liga de alumínio AA3104, devido as suas propriedades mecânicas, leveza e qualidade, e principalmente pela reciclabilidade, já que o alumínio é um metal reciclável Figura 1. A textura do material é uma das propriedades importantes e vem sendo muito estudada, pois a mesma controla o orelhamento formado no corpo das latas de bebidas. Estas orelhas são indesejáveis no processo de conformação da lata, pois geram retrabalhos e custos para as fábricas produtoras de latas.

O comportamento de orelhamento é um clássico exemplo do efeito da textura cristalográfica não-uniforme nas propriedades do material (HOUTTE, 1987). A evolução da microestrutura e textura durante a laminação a quente é largamente controlada pelo processo de recristalização, o qual depende da temperatura de deformação, quantidade de redução, quantidade de recuperação e da recristalização entre os passes da laminação a quente (ENGLER, 2007). Após a recristalização durante a laminação a quente, as orelhas são produzidas em $0^\circ/90^\circ$ da direção de laminação, devido a baixa rotação da orientação da textura cubo.

A fabricação de latas para bebidas utiliza chapas de alumínio laminadas, que apresentam certo grau de anisotropia, levando a formação de orelhamento durante a conformação das latas.

As variáveis de processo durante a laminação da chapa são determinantes para o grau de anisotropia final, portanto elas determinam o maior ou menor nível de orelhamento observado na fabricação das latas. Assim, quantificar a influência das variáveis de laminação no orelhamento é fundamental para a máxima produtividade do processo.

As propriedades do alumínio e suas ligas, são como a maioria dos metais, não são completamente uniformes em todas as direções – um certo grau de anisotropia sempre está presente.

A natureza exata desta anisotropia depende tanto da composição química da liga quanto da história do processo (ex. fundição, laminação, extrusão, recozimento, etc.).

Propriedades anisotrópicas podem ter um efeito importante sobre as etapas subsequentes do processo, especialmente em processo de chapa, tais como estampagem, estiramento e também influenciar no seu desempenho em uso (CIMM, 2015).

Figura 1 – Latas de alumínio da liga AA3104



Fonte: (NOVELIS, 2015).

Anisotropia nas propriedades mecânicas pode causar o orelhamento em corpos de latas de bebidas Figura 2. As orelhas formadas devem ser aparadas, o que ocasiona em um desperdício.

Figura 2 – Orelhamento nos corpos de prova



Fonte: (LOMAS, 2015).

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo analisar e comparar estatisticamente a formação de orelhamento para as diferentes espessuras de 1,80 mm e 2,10 mm após o processo de laminação a quente em chapas de alumínio de liga AA3104.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As características do alumínio permitem que ele tenha uma diversa gama de aplicações. Por isso, o metal é um dos mais utilizados no mundo todo. Material leve, durável e bonito, o alumínio mostra um excelente desempenho e propriedades superiores na maioria das aplicações. Produtos que utilizam o alumínio ganham também competitividade, em função dos inúmeros atributos que este metal incorpora, principalmente sua infinita reciclabilidade (ABAL, 2016).

2.1 A liga AA3104

Devido o aspecto de o alumínio ser totalmente reciclado, o estudo do mesmo vem sendo muito valorizado, pois estamos sofrendo com a escassez energética no país e no mundo. A fundição de sucatas de alumínio demanda apenas 5% da energia necessária para a produção do alumínio primário e conseqüentemente minimiza a geração de resíduos (PATROCÍNIO, 2011). Com isso as indústrias de vários setores, como transporte, energia, construção civil e bens de consumo vêm exigindo um padrão de qualidade muito grande em relação aos materiais e ligas de alumínio utilizado na sua produção.

Com isso foi elaborado uma classificação para as ligas de alumínio, a AA - *Aluminium Association* classifica as mesmas com relação a três critérios, processo, têmpera e composição química.

A classificação do alumínio e suas ligas, designada pela ANSI H35.1 da *Aluminium Association* e adotada pela ABNT (NBR 6834), é constituída de 4 dígitos, abrangendo tanto as ligas não-trabalháveis, quanto as trabalháveis por processo de conformação mecânica (PATROCÍNIO, 2011).

A Figura 3 mostra a classificação do alumínio quanto a composição química, onde o primeiro dígito corresponde ao principal elemento de liga.

Figura 3 – Principais elementos por grupo de liga.

GRUPO	DESIGNAÇÃO
Alumínio (mín. 99,00% de pureza)	1XXX
Cobre	2XXX
Manganês	3XXX
Silício	4XXX
Magnésio	5XXX
Magnésio e Silício	6XXX
Zinco	7XXX
Outros elementos	8XXX
Séries não utilizadas	9XXX

Fonte: (THE ALUMINUM, 1990).

A liga de alumínio AA3104 faz parte do Grupo 3XXX e vem sendo muito utilizada na manufatura de conformação do corpo das latas de bebidas.

Tem como seu principal elemento de liga o Manganês, além de conter pequenas quantidades de Silício, Magnésio e Ferro Figura 4. Apenas para níveis acima de 1,5% de Mn, torna-se viável tratar termicamente.

Uma das mais conhecidas ligas do Grupo 3XXX é a liga 3003, onde se requer moderada resistência e boa trabalhabilidade, aplicada em utensílios domésticos.

Figura 4 – Limites de composição química da liga AA3104, especificados pela Aluminium Association.

Liga	Mg	Mn	Fe	Si	Cu
AA3104	0,8-1,3	0,8-1,4	0,8 máx.	0,6 máx.	0,05-0,25

Fonte: (THE ALUMINUM, 2009).

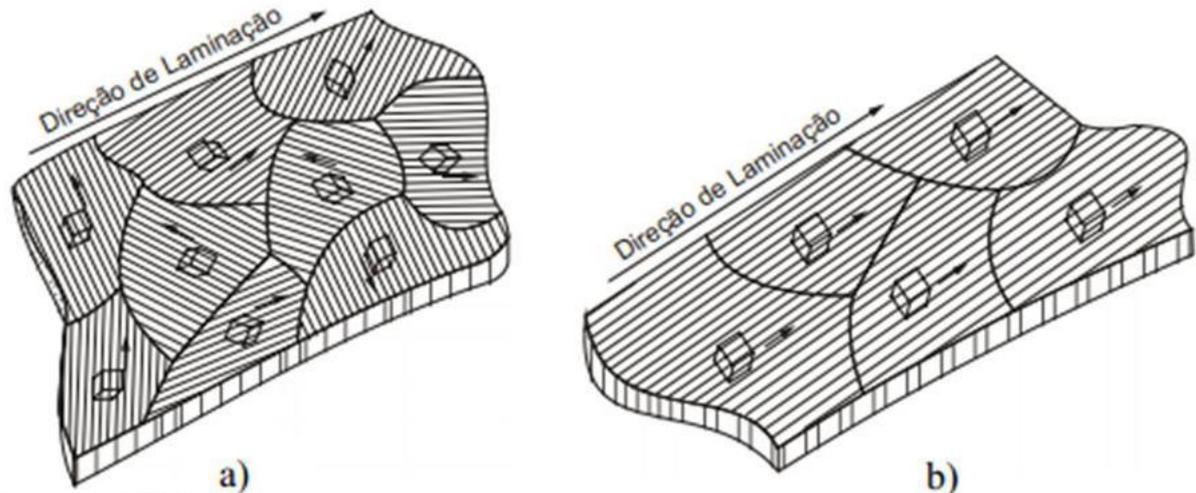
2.2 Anisotropia

É um fenômeno que aparece por causa da orientação preferencial dos planos e direções cristalinas do metal após uma grande deformação por trabalho mecânico, ou alinhamento de uma segunda fase precipitada.

Neste processo a orientação cristalográfica muda durante a deformação, o reticulado cristalino sofre rotação, via escorregamento de planos para orientações mais favoráveis, estabelecendo a chamada textura de deformação (HUMPHREYS, 1995). Ilustrada abaixo na Figura 5.

A textura está em função de vários parâmetros de processo: composição química, tempo de forno na homogeneização, temperatura de bobinamento após laminação a quente, quantidade de redução a frio (PATROCINIO, 2011).

Figura 5 – Textura de laminação: a) estado inicial b) laminado



Fonte: (MARTINS, 2005).

A anisotropia é avaliada segundo o coeficiente de anisotropia ou coeficiente de Lankford (r), que é a razão entre a deformação no sentido da largura x deformação no sentido da espessura.

Dois parâmetros são definidos considerando a anisotropia no plano da chapa:

Anisotropia Normal – Habilidade de certa chapa metálica resistir ao afinamento, quando a chapa é submetida a forças de tração ou compressão no plano.

$$r = \frac{r_{0^\circ} + 2.r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{4} \quad (2.1)$$

Anisotropia Planar – Indica a diferença de comportamento mecânico que o material pode apresentar no plano da chapa, além de indicar a tendência ao orelhamento (JONAS, 1994).

Coefficiente de anisotropia planar (Δr) positivo indica a formação de orelhas à 0° e 90° com a direção de laminação, e um coeficiente negativo indica a formação de orelhas a 45° da direção de laminação (JONAS, 1994).

$$r = \frac{\ln(w_o/w_f)}{\ln(l_f w_f / l_o w_o)} \quad (2.2)$$

$$\Delta r = \frac{r_{0^\circ} - 2.r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{2} \quad (2.3)$$

Onde:

- a) w_o e w_f são as larguras inicial e final;
- b) l_o e l_f são os comprimentos inicial e final;
- c) r_{0° , r_{45° e r_{90° são os valores de Lankford (r) medidos a 0° , 45° e 90° com a direção de laminação;

2.3 Processo de Conformação

É um processo de conformação mecânica onde através de uma deformação plástica na matéria-prima ocorre o escorregamento de planos cristalinos, formando assim a textura de deformação. O processo de conformação a quente é utilizado para modificar as características mecânicas da peça final e com o controle de temperatura a estrutura se recristaliza simultaneamente com a deformação sofrida (WIKIPÉDIA, 2015).

2.3.1 Laminação

Na laminação o material passa através da abertura de cilindros que giram de modo a modificar (reduzir) sua seção transversal, os produtos gerados podem ser placas, chapas, trilhos, entre outros.

Primeiramente há um processo de homogeneização das placas antes da laminação a quente, onde dentro de fornos são submetidas a um aumento de temperatura para reduzir a quantidade de manganês em solução sólida, para diminuir o orelhamento. Essas placas possuem aproximadamente 620 mm de espessura e 5000 mm de comprimento.

A laminação a quente é um ponto crítico no processo de fabricação de chapas de alumínio para latas. Ela tem uma relação direta com o orelhamento final, pois é onde se controla a textura cristalográfica e a microestrutura da liga através da conformação mecânica sofrida pelas placas (PATROCÍNIO, 20011).

Ela possui um laminador desbastador reversível e um laminador de quatro cilindros, chamado “*Tandem Mill*” Figura 6.

Figura 6 – Processo da laminação a quente



Fonte: (ABAL, 2015).

A laminação a frio é um processo posterior ao da laminação a quente, e tem como função principal aumentar a resistência mecânica e balancear a anisotropia. A lâmina sai da redução a frio com sua espessura final em torno de $260 \mu\text{m}$, diretamente para o fabricante de latas Figura 7.

Figura 7 – Bobinas de alumínio



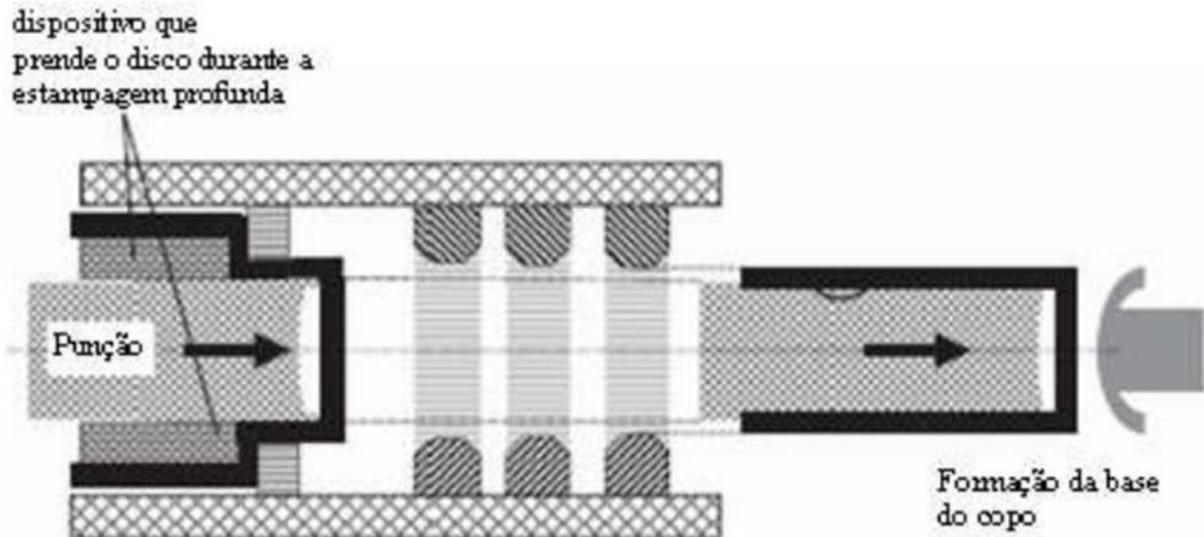
Fonte: (SOMETAIS, 2015).

2.3.2 Conformação de lata

Para conformação de corpos de latas, é utilizado de bobinas de alumínio laminado de grande porte, aproximadamente com peso de 10 toneladas cada. Já nas indústrias de fabricação de latas, as bobinas entram numa prensa de estampagem, onde são cortados vários discos dando forma a um copo.

Posteriormente com um punção Figura 8, o copo é formado no processo de estampagem, sendo realizadas mais três etapas deste mesmo procedimento através do mesmo material, dando origem ao corpo da lata na espessura final Figura 9.

Figura 8 – Etapa de estampagem do corpo de lata



Fonte: (VERLINDEN, 2007).

Figura 9 – Etapas da formação de copos durante a estampagem profunda

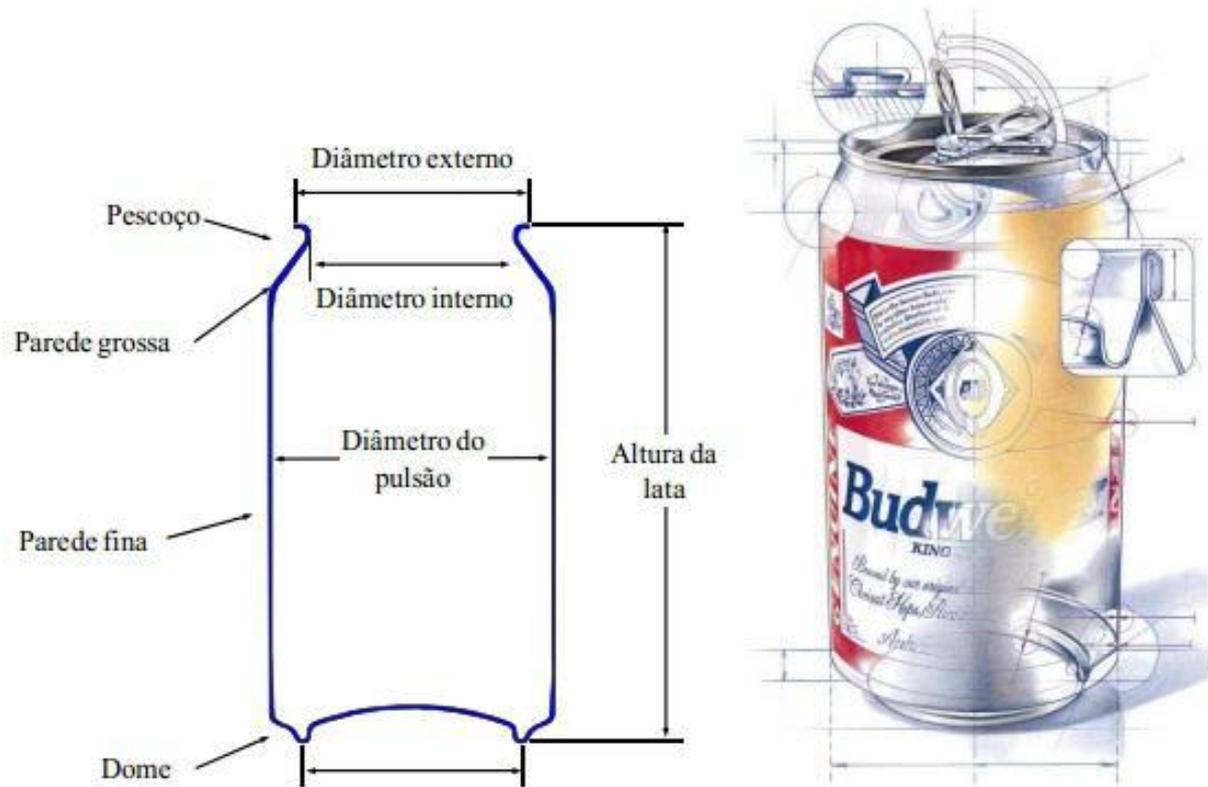


Fonte: (ALUMATTER, 2011).

Na saída do equipamento de estampagem, os corpos da lata precisam ter suas bordas superiores aparadas, para que o corpo dos copos fique com a mesma altura. Os corpos das latas passam por uma lavagem e posteriormente por uma secagem em fornos, para garantir sua limpeza e esterilização.

Após o processo de secagem, através de máquinas modernas é impresso no corpo da lata a estampa final com o rótulo desejado pelos clientes. Um último processo antes da fixação da tampa da lata é realizado, processo o qual consiste na moldagem do “pescoço” e no perfil da borda, como mostra a Figura 10.

Figura 10 – Perfil da lata de bebidas após estampagem



Fonte: (HOSFORD; DUNCAN, 1994).

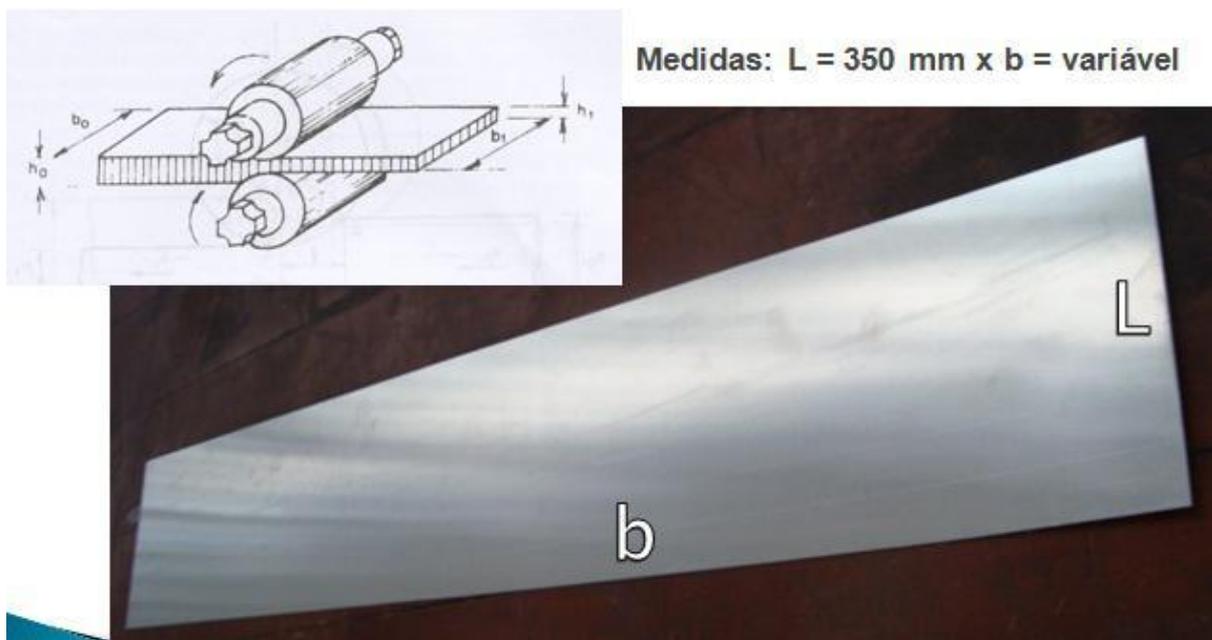
3 MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Para realização deste trabalho foram utilizadas amostras fornecidas pela Novelis do Brasil Ltda. (Pindamonhangaba-SP). As placas são vazadas no processo de Refusão, onde a sucata de alumínio é novamente fundida e reaproveitada, e essas placas da liga AA3104 saem com dimensões de 648 x 1840 x 5100 mm. As mesmas são faceadas para retiradas de óxidos da superfície de laminação e enforçadas para pré-aquecimento num intervalo de 560 a 600°C de temperatura, por um tempo total de 10 horas. Após sofrer a homogeneização, onde tem com objetivo remover micro segregações, reduzir o manganês em solução sólida, o qual influencia na redução do orelhamento, as placas são levadas para um laminador desbastador a quente, onde sofrem uma redução na sua espessura de 95%, chegando a 30 e 33 mm. Após essa redução as placas entram num laminador de quatro cadeiras, e saem com uma temperatura que varia entre 330 a 350°C, e espessuras finais de 1,80 e 2,10 mm. Foram coletadas diversas amostras durante o período do presente trabalho, com um universo de 86 amostras para as duas espessuras estudadas, sendo 23 amostras de 1,80 mm e 63 amostras de 2,10 mm de espessura, as mesmas foram coletadas com dimensões (1,80 ou 2,10) de espessura x largura variável x 350 mm de comprimento como observado Figura 11.

Foram realizadas as seguintes etapas para confecção do trabalho:

Etapa 1 - Retirada de amostras de bobinas laminadas a quente.

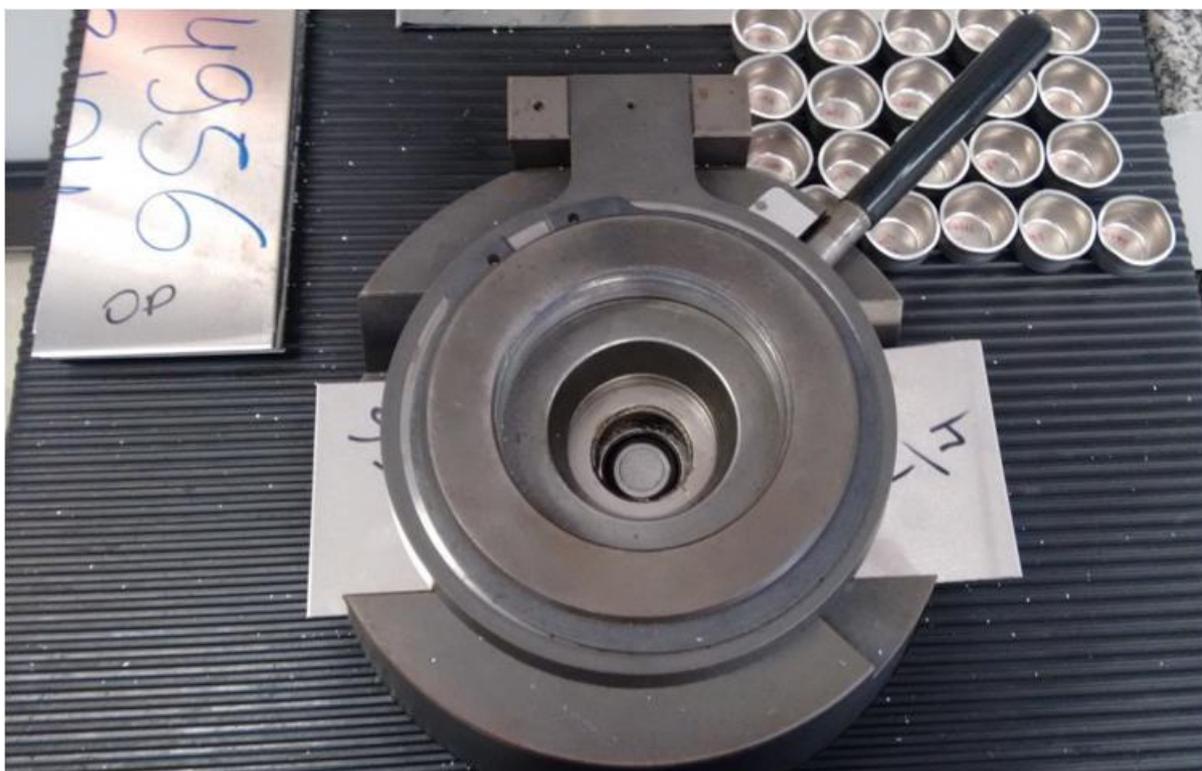
Figura 11 – Amostra retirada na laminação a quente



Fonte: (Autoria própria, 2015).

Etapa 2 - Consiste na confecção de discos a partir das espessuras em estudo, para formar os copos no ensaio de embutimento. As chapas foram cortadas em tiras de 350 x 150 mm aproximadamente ao longo da largura devido a limitação do equipamento. As amostras cortadas foram presas, e com um punção os copos foram formados Figura 12.

Figura 12 – Ensaio mecânico de embutimento



Fonte: (Autoria própria, 2015).

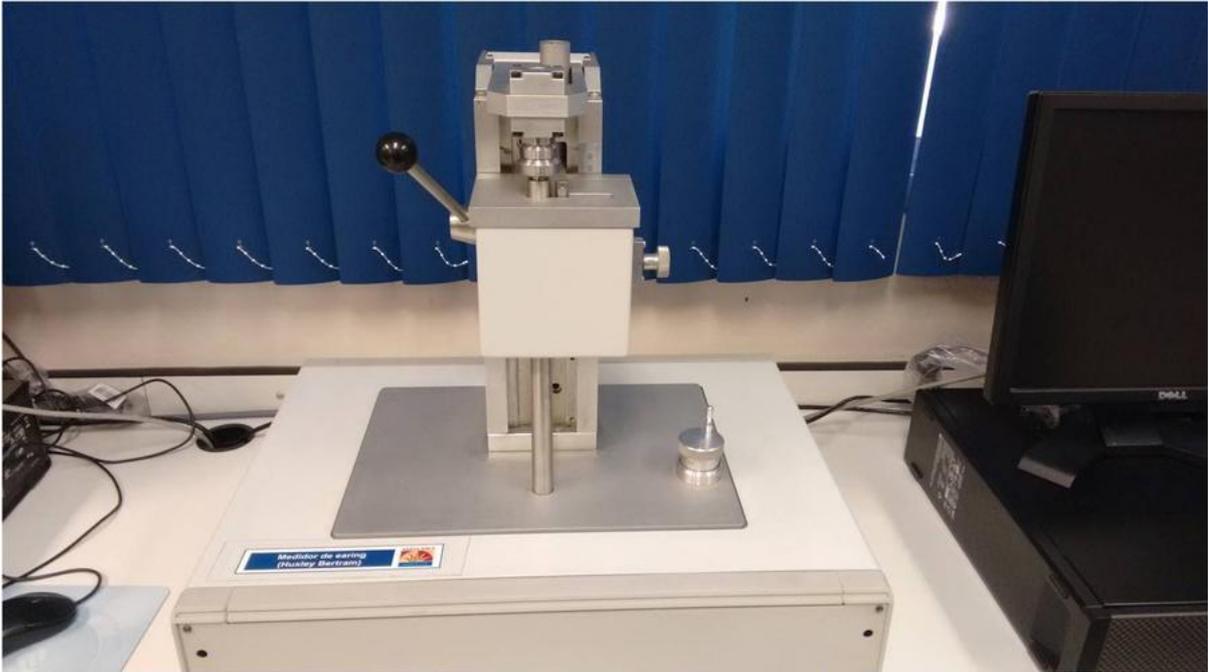
Etapa 3 - Medição em laboratório do orelhamento formado nos copos embutidos, o qual foi quantificado por meio de sua variação de altura de pico e altura de vale através de um relógio comparador. Esta medição foi realizada através do equipamento Huxley Bertram Figura 13 fornecido pela Novelis do Brasil (Pindamonhangaba - SP), os dados foram tratados e calculados através da equação (3.1) (PATROCÍNIO, 2011), em seguida são apresentados na interface do software *Review Earing Analysis* Figura 14, o qual nos mostra valores dos ângulos onde ocorreram os orelhamentos referente ao sentido de laminação, as alturas de pico e vale e o valor do orelhamento.

$$\%E = \frac{hp - hv}{\frac{1}{2}(hp + hv)} \cdot 100 \quad (3.1)$$

Onde:

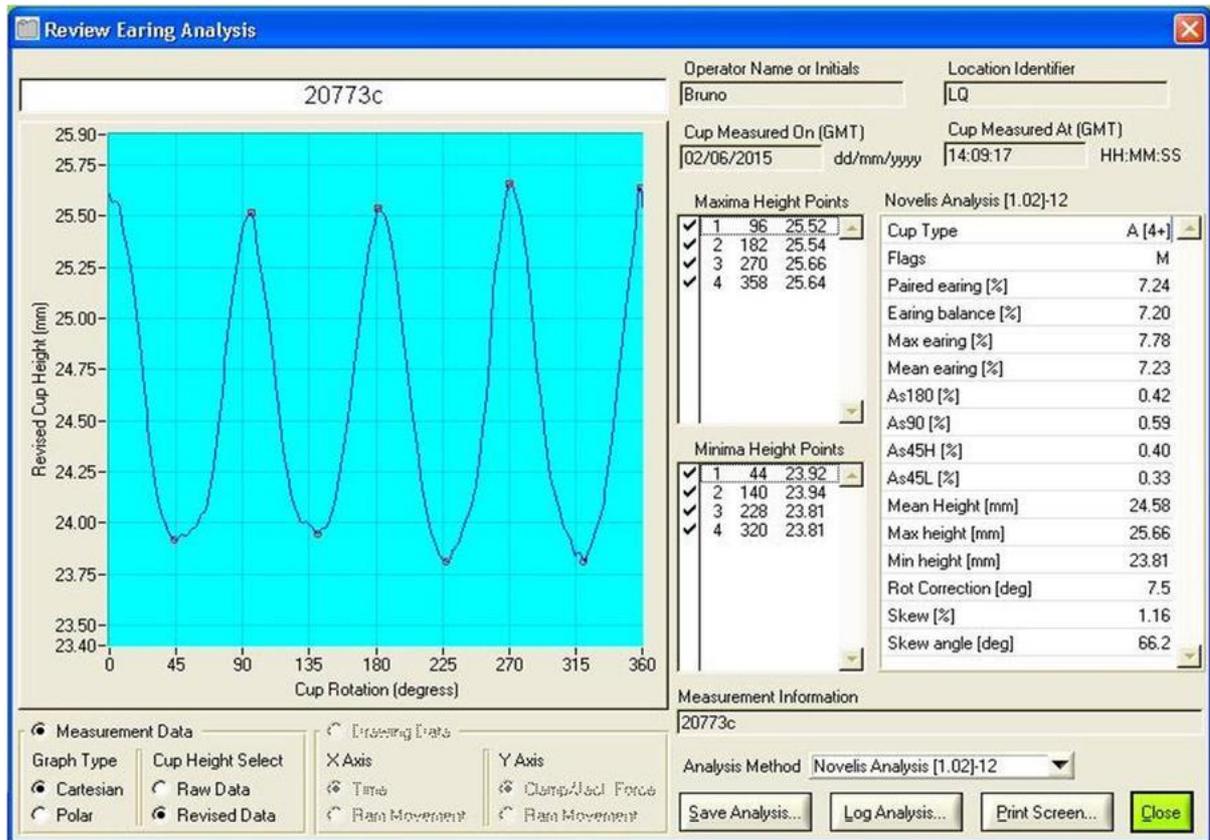
- a) %E é o valor do orelhamento;
- b) hp e hv são as alturas de pico e vale respectivamente;

Figura 13 – Equipamento Huxley Bertram para medição de orelhamento



Fonte: (Autoria própria, 2015).

Figura 14 – Interface do programa com os resultados obtidos no equipamento Huxley Bertram



Fonte: (Autoria própria, 2015).

Etapa 4 - Dentre o universo de amostras duas de espessuras 1,80 e 2,10 mm foram utilizadas para caracterizar a microestrutura através de microscopia ótica com luz polarizada, as amostras foram polidas e anodizadas para revelar a microestrutura da distribuição dos grãos ao longo da espessura, e seis amostras de espessura 1,80 mm para análise das curvas do perfil do orelhamento ao longo da largura.

Etapa 5 - Foi feito um tratamento estatístico dos dados obtidos com o auxílio do Microsoft Excel e o programa MINITAB versão 17, programa que produz curvas, gráficos onde todos os valores medidos do orelhamento para as duas espessuras podem ser comparados e analisados com relação aos parâmetros de processo da laminação a quente, sendo muito utilizado e adequado para comparação de dois a mais conjuntos de dados. A técnica ANOVA do programa foi utilizada para comparar estatisticamente os resultados obtidos para as espessuras de 1,80 e 2,10 mm.

Variáveis de processo da laminação a quente a serem correlacionadas com o orelhamento para as espessuras de 1,80 e 2,10 mm:

- Temperatura de Entrada do laminador
- Temperatura de Bobinamento do laminador
- Composição química da liga
- Espessura e largura após a laminação a quente (ANOVA)

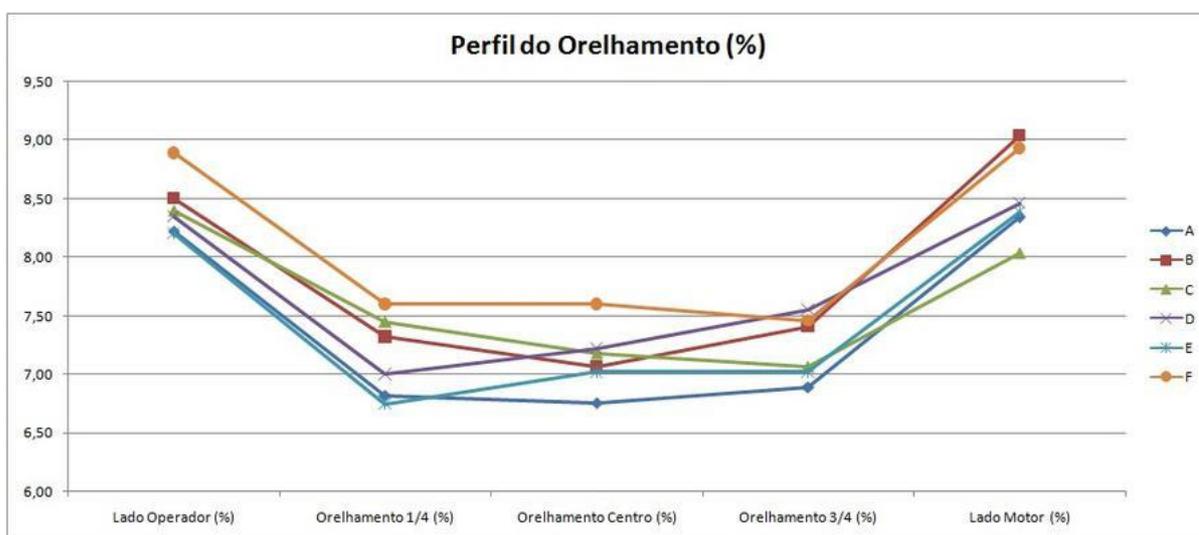
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados serão apresentados em tabelas e gráficos gerados durante a execução do trabalho, primeiramente serão apresentados os resultados de orelhamento para as amostras de lâmina de espessura 1,80 mm Tabela 1, as quais foram traçadas curvas do perfil ao longo da largura Figura 15, tomando como referência cinco pontos, lado operador, 1/4 da lâmina, centro, 3/4 da lâmina e lado motor.

Tabela 1 – Resultados de orelhamento nas amostras de espessura 1,80 mm

Amostra	Lado				
	Operador (%)	Orelhamento 1/4 (%)	Orelhamento Centro (%)	Orelhamento 3/4 (%)	Lado Motor (%)
A	8,22	6,82	6,76	6,89	8,34
B	8,50	7,32	7,06	7,41	9,04
C	8,40	7,45	7,18	7,07	8,04
D	8,35	7,00	7,22	7,55	8,46
E	8,20	6,75	7,02	7,02	8,39
F	8,89	7,60	7,60	7,46	8,93

Figura 15 – Curva do orelhamento ao longo da largura para amostras de espessura 1,80 mm



Fonte: (Autoria própria, 2015).

4.1 Comparação da microestrutura

Durante o processo de conformação na laminação a quente, os grãos tendem a seguir a direção de laminação, o tamanho e a forma dos precipitados influenciam diretamente na homogeneização, recristalização e na textura do material.

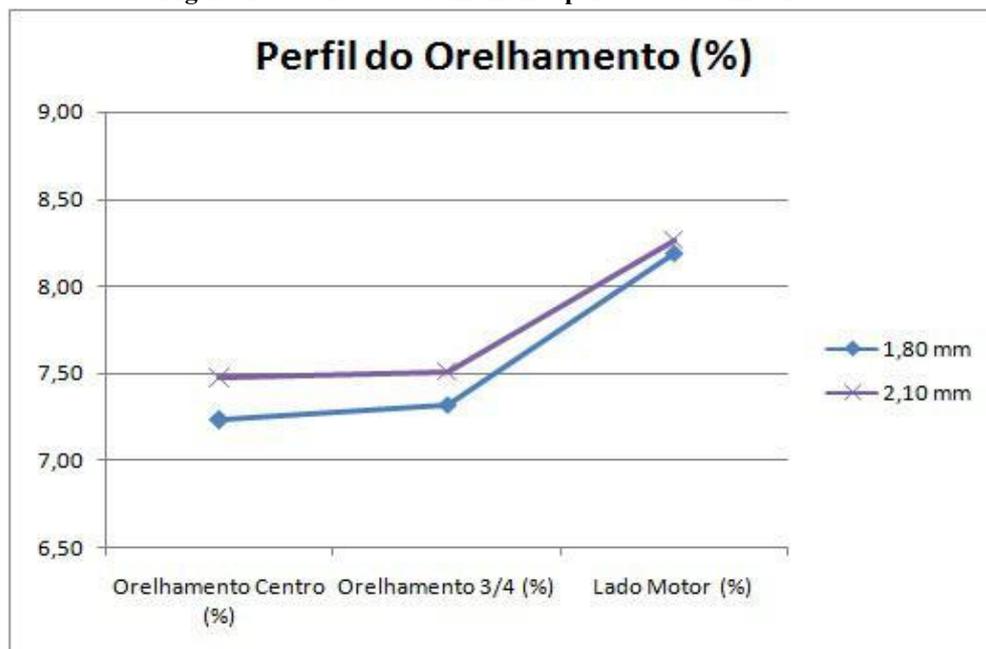
Com o auxílio do microscópio ótico fornecido pelo laboratório metalográfico da Novelis do Brasil Ltda., pudemos observar e comparar a microestrutura dos materiais utilizados na confecção deste trabalho. Para realização do mesmo foram utilizadas duas amostras, de espessura 1,80 e 2,10 mm, onde após serem polidas e anodizadas para revelar sua estrutura no microscópio ótico de luz polarizada, conseguimos obter os resultados do tamanho de grão (ASTM - *American Society for Testing and Materials*) na superfície e no centro da seção transversal Figura 17.

Foram tomados como posição de referência a análise no centro, 3/4 e lado motor das chapas para confecção e comparação das curvas do perfil Tabela 2 e Figura 16, e da caracterização da microestrutura para análise e comparação Figura 18 a Figura 23.

Tabela 2 – Resultados de orelhamento obtidos para as duas amostras

Amostra	Orelhamento Centro (%)	Orelhamento 3/4 (%)	Lado Motor (%)	Espessura Final (mm)	Largura Final (mm)
1,80	7,23	7,32	8,19	1,80	1750
2,10	7,47	7,51	8,26	2,10	1750

Figura 16 – Curva do orelhamento para as duas amostras



Fonte: (Autoria própria, 2015).

Resultados do tamanho de grão na superfície e no centro da seção transversal para as posições tomadas como referência nas amostras para as espessuras de 1,80 e 2,10 mm:

Figura 17 – Resultados de tamanho de grão (ASTM)

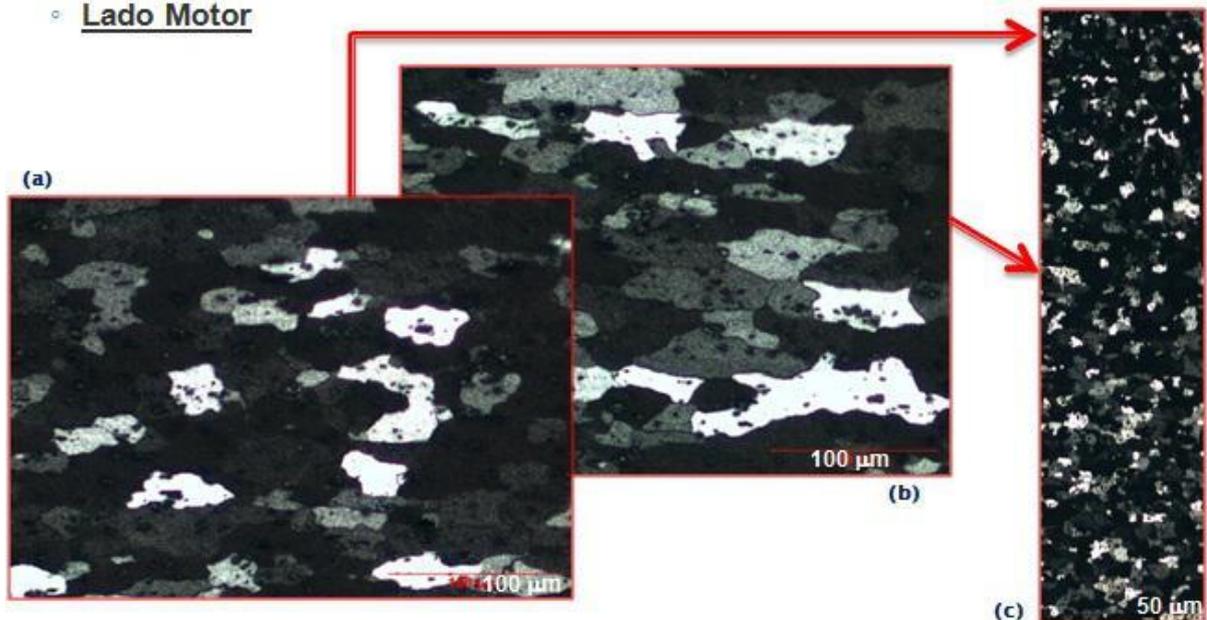
Amostra	Posição	Tamanho de Grão (ASTM)	
1,80 mm	Lateral	Superfície	5.0
		Centro	4.0
	Centro	Superfície	5.0
		Centro	4.0
	Interior	Superfície	5.0
		Centro	4.0
2,10 mm	Lateral	Superfície	5.0
		Centro	4.0
	Centro	Superfície	5.0
		Centro	4.0
	Interior	Superfície	5.0
		Centro	4.0

Fonte: (Autoria própria, 2015).

Figura 18 – a) Ilustra micrografia realizada na superfície com grãos equiaxiais e tamanho médio de 5.0 ASTM, b) Ilustra micrografia realizada no centro com grãos equiaxiais e tamanho médio de 4.0 ASTM (aumento 100x) e c) Ilustra micrografia realizada em toda espessura do material (aumento 50x).

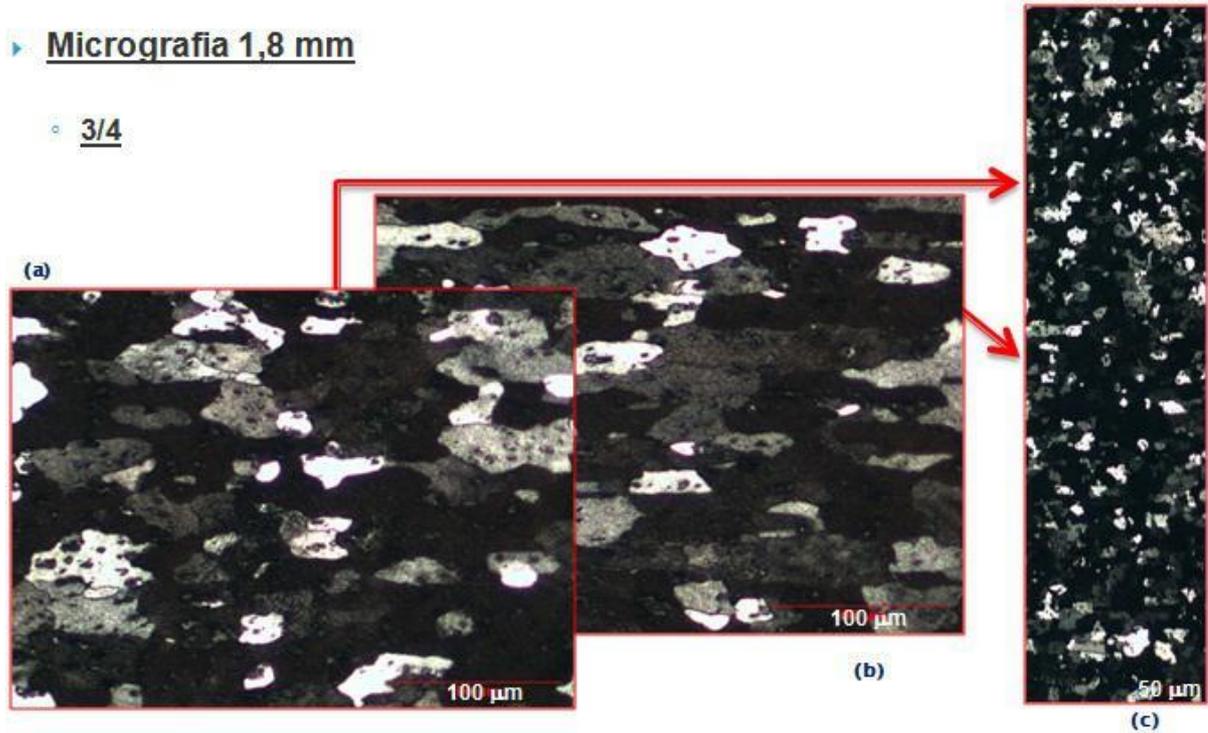
▶ Micrografia 1,8 mm

◦ Lado Motor



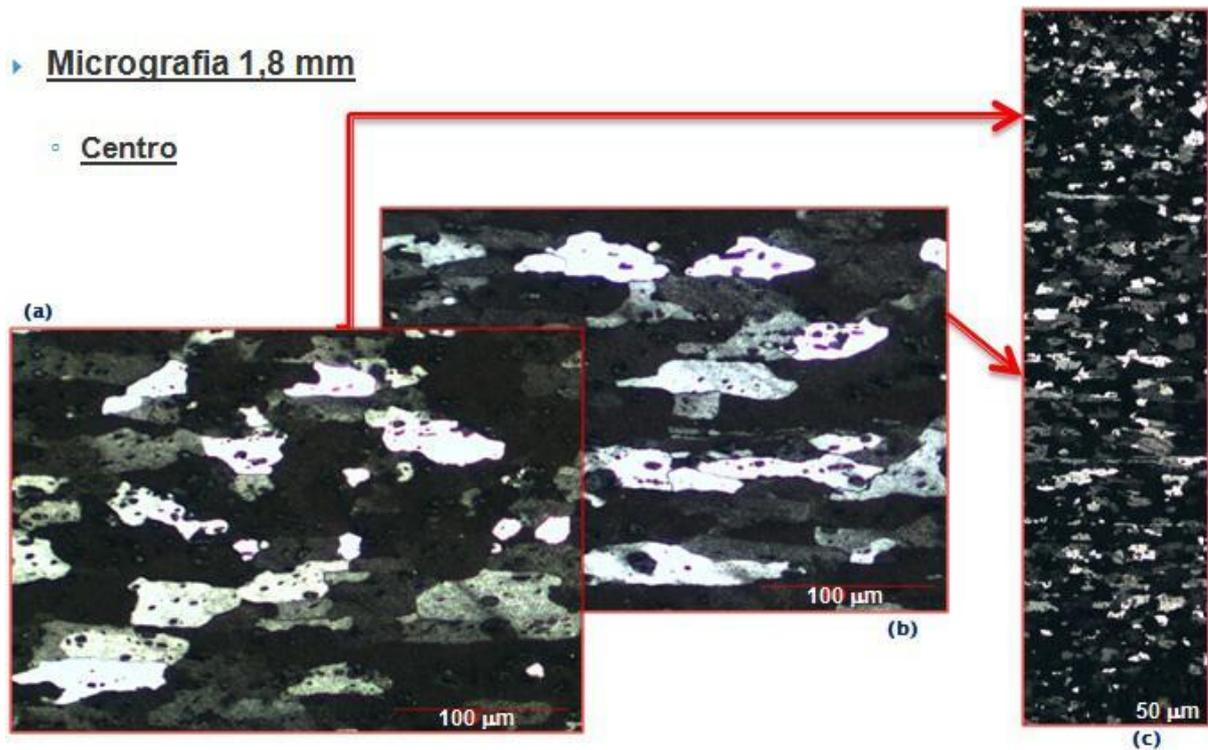
Fonte: (Autoria própria, 2015).

Figura 19 – a) Ilustra micrografia realizada na superfície com grãos equiaxiais e tamanho médio de 5.0 ASTM, b) Ilustra micrografia realizada no centro com grãos equiaxiais e tamanho médio de 4.0 ASTM (aumento 100x) e c) Ilustra micrografia realizada em toda espessura do material (aumento 50x).



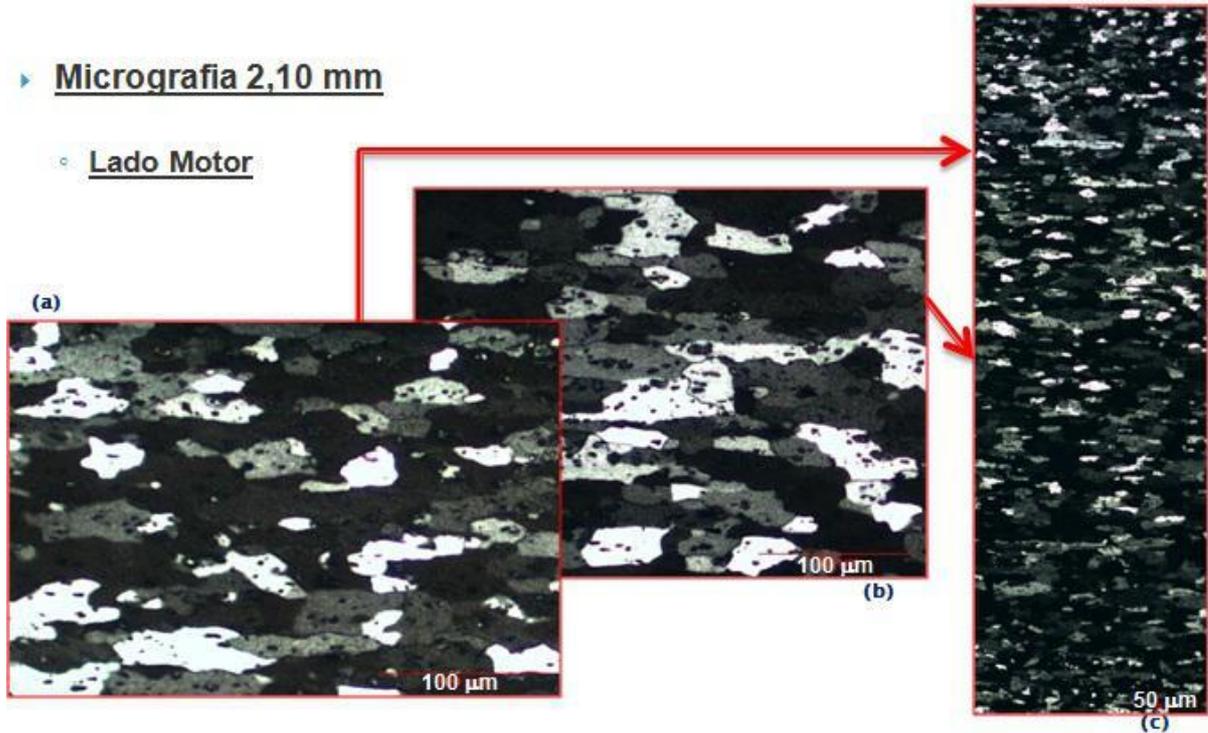
Fonte: (Autoria própria, 2015).

Figura 20 – a) Ilustra micrografia realizada na superfície com grãos equiaxiais e tamanho médio de 5.0 ASTM, b) Ilustra micrografia realizada no centro com grãos equiaxiais e tamanho médio de 4.0 ASTM (aumento 100x) e c) Ilustra micrografia realizada em toda espessura do material (aumento 50x).



Fonte: (Autoria própria, 2015).

Figura 21 – a) Ilustra micrografia realizada na superfície com grãos equiaxiais e tamanho médio de 5.0 ASTM, b) Ilustra micrografia realizada no centro com grãos equiaxiais e tamanho médio de 4.0 ASTM (aumento 100x) e c) Ilustra micrografia realizada em toda espessura do material (aumento 50x).



Fonte: (Autoria própria, 2015).

Figura 22 – a) Ilustra micrografia realizada na superfície com grãos equiaxiais e tamanho médio de 5.0 ASTM, b) Ilustra micrografia realizada no centro com grãos equiaxiais e tamanho médio de 4.0 ASTM e presença de grãos orientados (aumento 100x) e c) Ilustra micrografia realizada em toda espessura do material (aumento 50x).

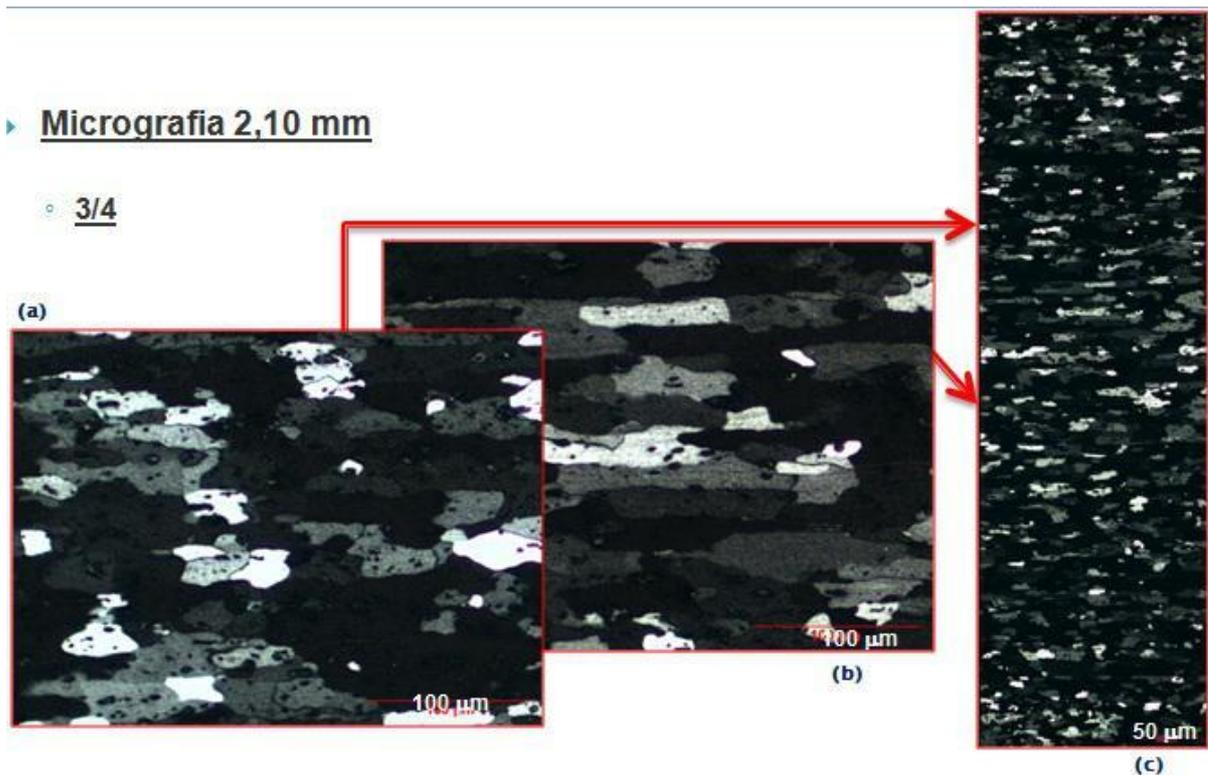
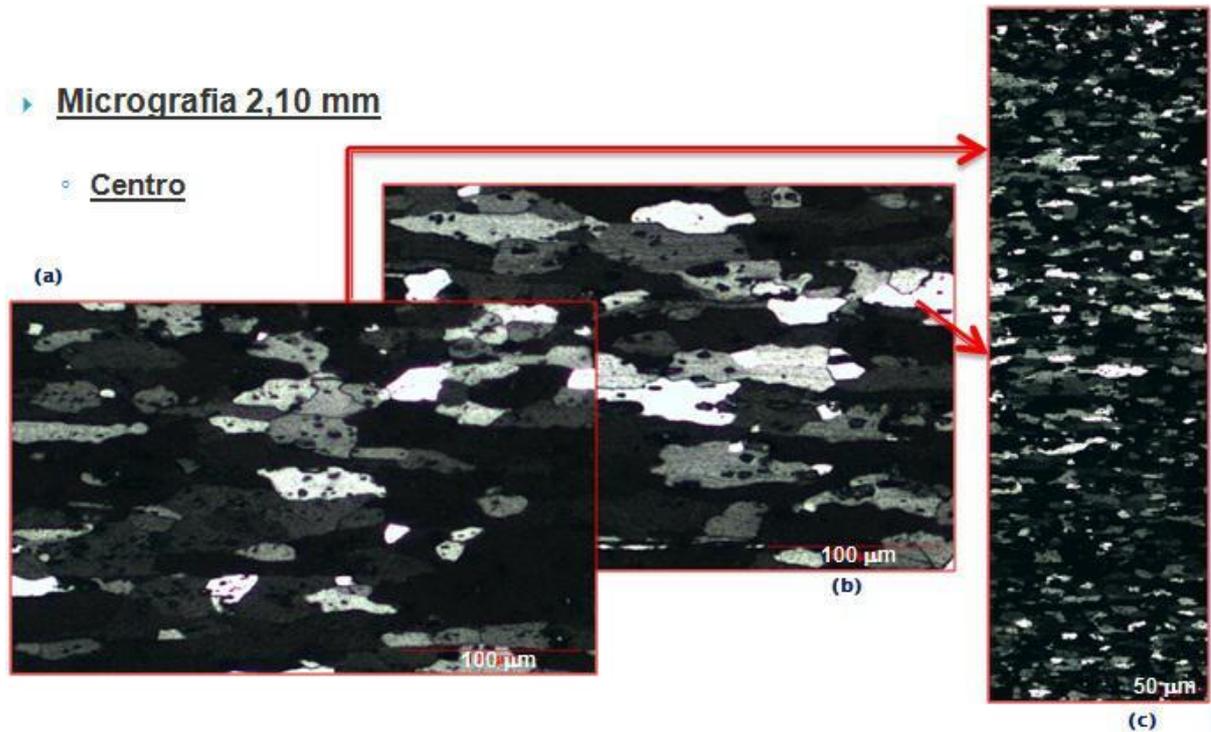


Figura 23 – a) Ilustra micrografia realizada na superfície com grãos equiaxiais e tamanho médio de 5.0 ASTM, b) Ilustra micrografia realizada no centro com grãos equiaxiais e tamanho médio de 4.0 ASTM (aumento 100x) e c) Ilustra micrografia realizada em toda espessura do material (aumento 50x).



Fonte: (Autoria própria, 2015).

4.2 Análise e comparação dos resultados

Nesta etapa do trabalho, todos os valores medidos de orelhamento, para as duas espessuras em estudo 1,80 e 2,10 mm, puderam ser comparados e relacionados com as variáveis de processo da laminação a quente, através dos gráficos de dispersão gerados pelo programa Microsoft EXCEL.

A Figura 24 nos dá o comportamento do orelhamento obtido nas espessuras de 1,80 e 2,10 mm ao longo do projeto, notando-se que ele se manteve constante.

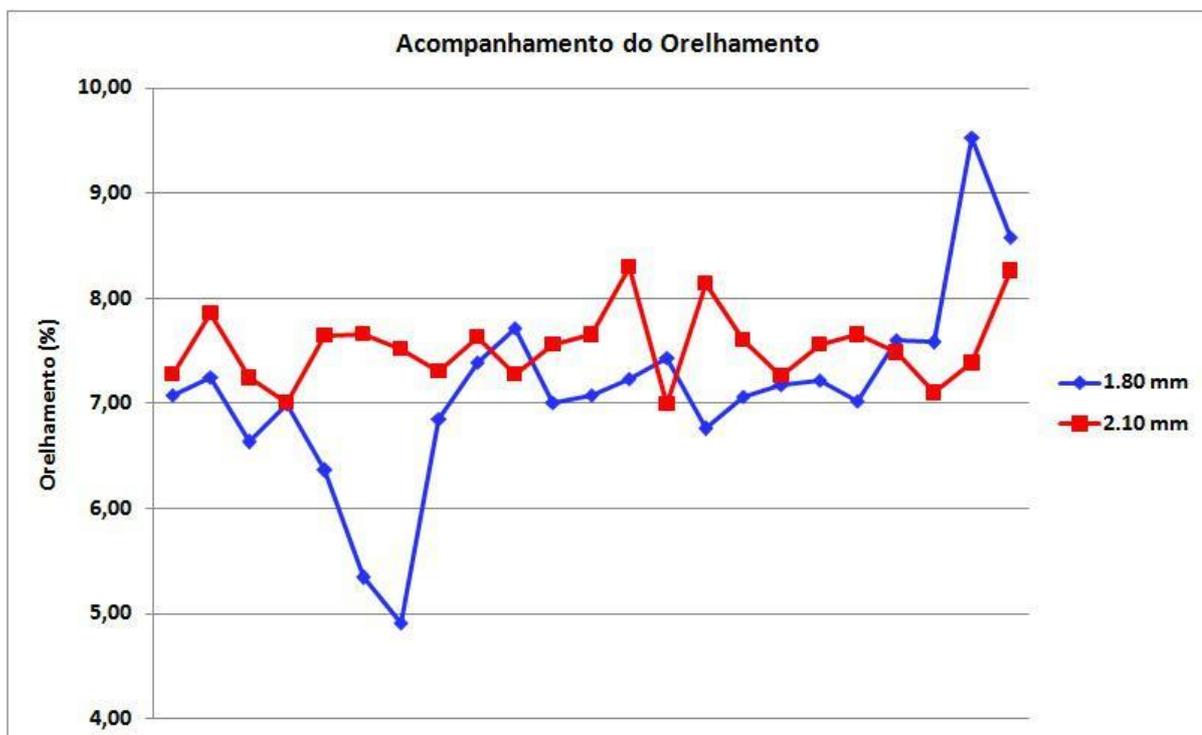
Figura 24 – Comportamento do orelhamento ao longo do projeto para as duas espessuras



Fonte: (Autoria própria, 2015).

Podemos notar que os valores comparados entre as espessuras estudadas são bem próximos, com exceção de uma variabilidade maior na espessura 1,80 mm Figura 25.

Figura 25 – Comportamento e comparação do orelhamento entre as espessuras de 1,80 e 2,10 mm ao longo do projeto



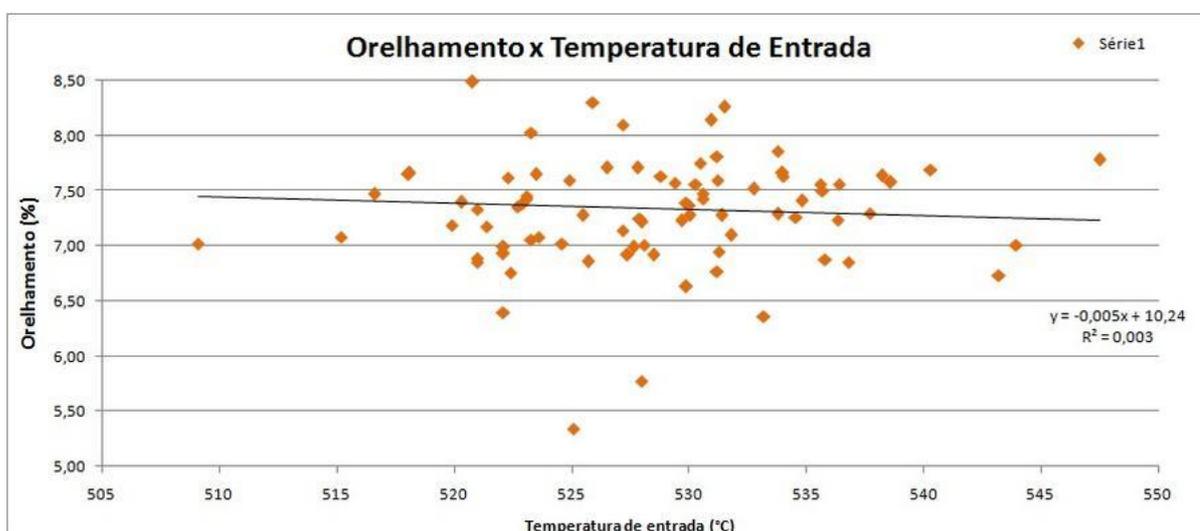
Fonte: (Autoria própria, 2015).

Gráficos de dispersão foram obtidos para correlacionar o orelhamento com as variáveis de processo da laminação a quente, tendo como objetivo exibir o quanto uma variável é afetada por outra.

Podemos observar na Figura 26 que a temperatura de entrada que varia de 520 a 540°C, não interfere nos valores obtidos de orelhamento para ambas as espessuras. Assim como a temperatura de saída do laminador Figura 27, que variou de 340 a 350°C, não afetando o resultado desejado para a média do orelhamento de 7,3%.

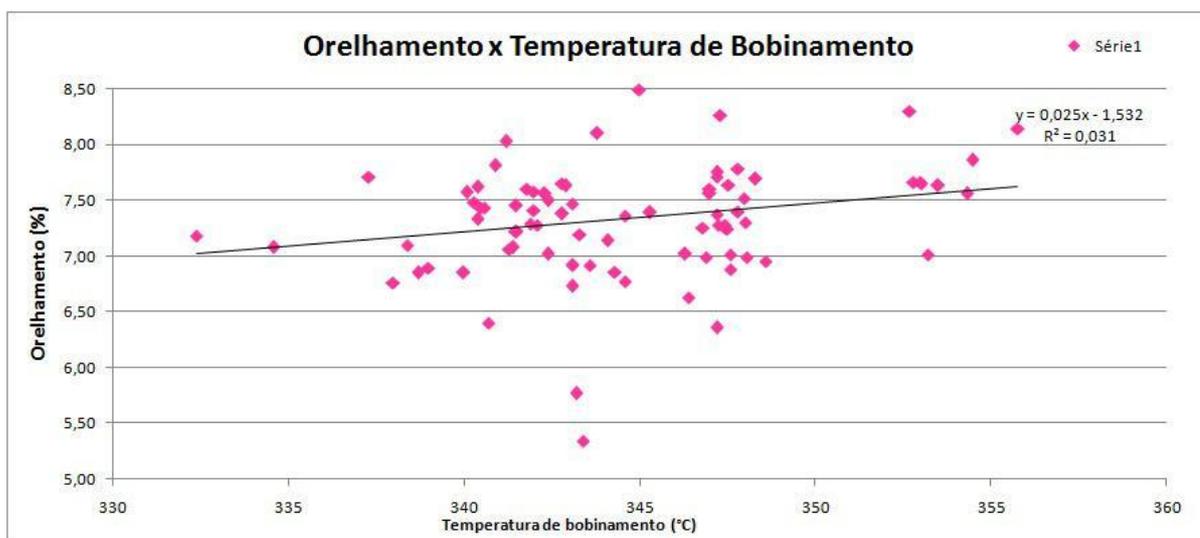
A Figura 28 nos dá a correlação entre o orelhamento e a composição química da liga AA3104, onde podemos observar que as variáveis possuem uma alta correlação.

Figura 26 – Correlação entre o orelhamento e a temperatura de entrada do laminador a quente



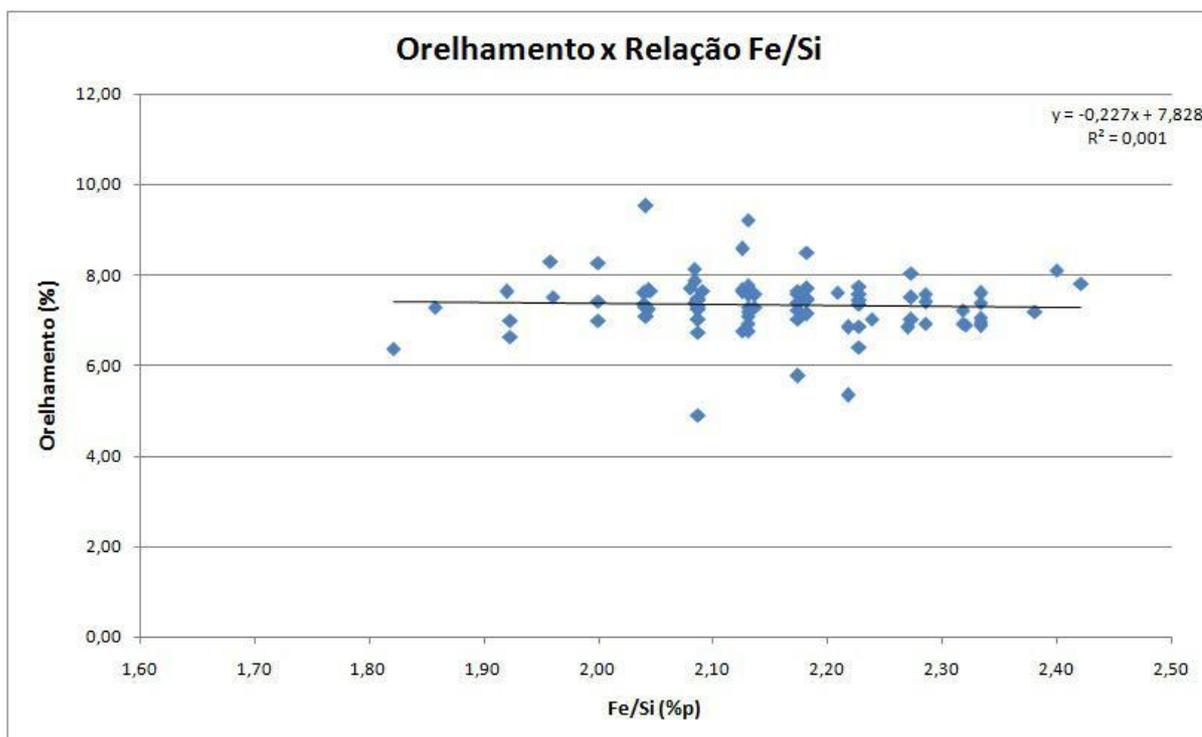
Fonte: (Autoria própria, 2015).

Figura 27 – Correlação entre o orelhamento e a temperatura de saída do laminador a quente



Fonte: (Autoria própria, 2015).

Figura 28 – Correlação entre o orelhamento e a composição química

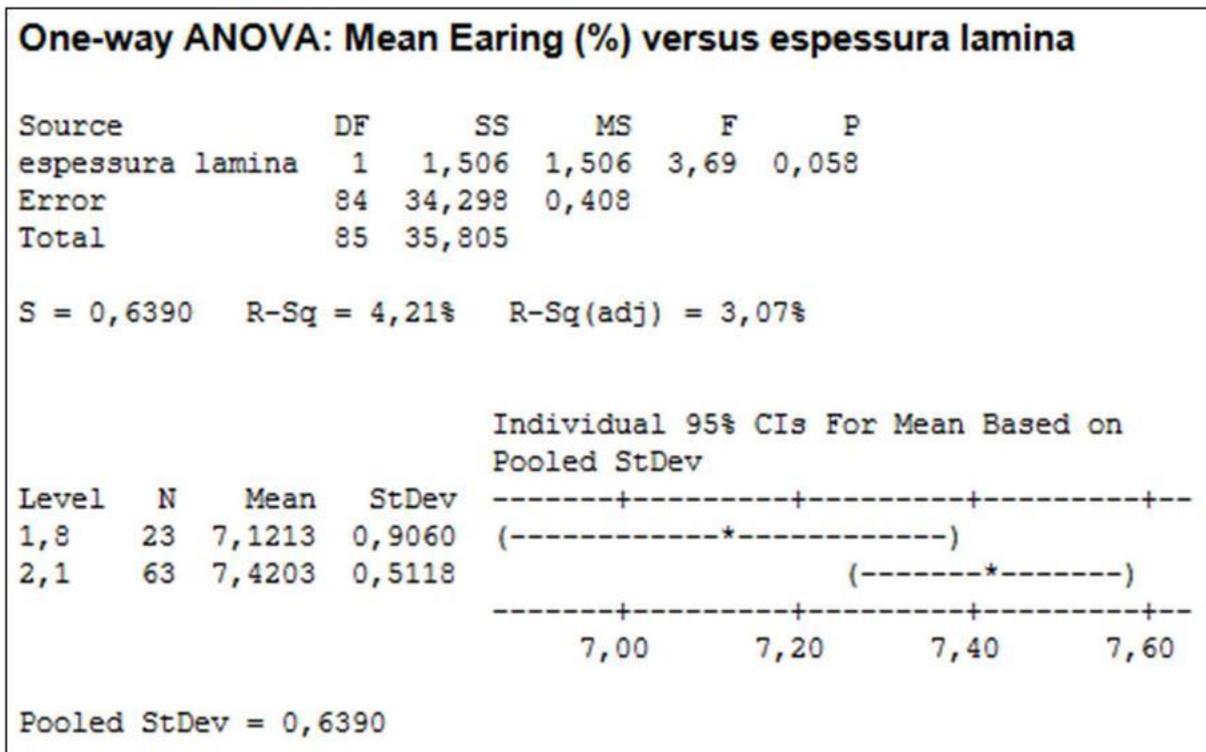


Fonte: (Autoria própria, 2015).

Os tratamentos estatísticos dos dados obtidos para um universo de 86 amostras foram realizados com o auxílio do programa MINITAB. Nele pudemos gerar um histograma Figura 30 e um *Interval Plot*¹ Figura 31 para comparação dos valores de orelhamento obtidos entre as duas espessuras finais, analisar sua variabilidade e compará-las estatisticamente utilizando a técnica de ANOVA Figura 32 disponível no programa.

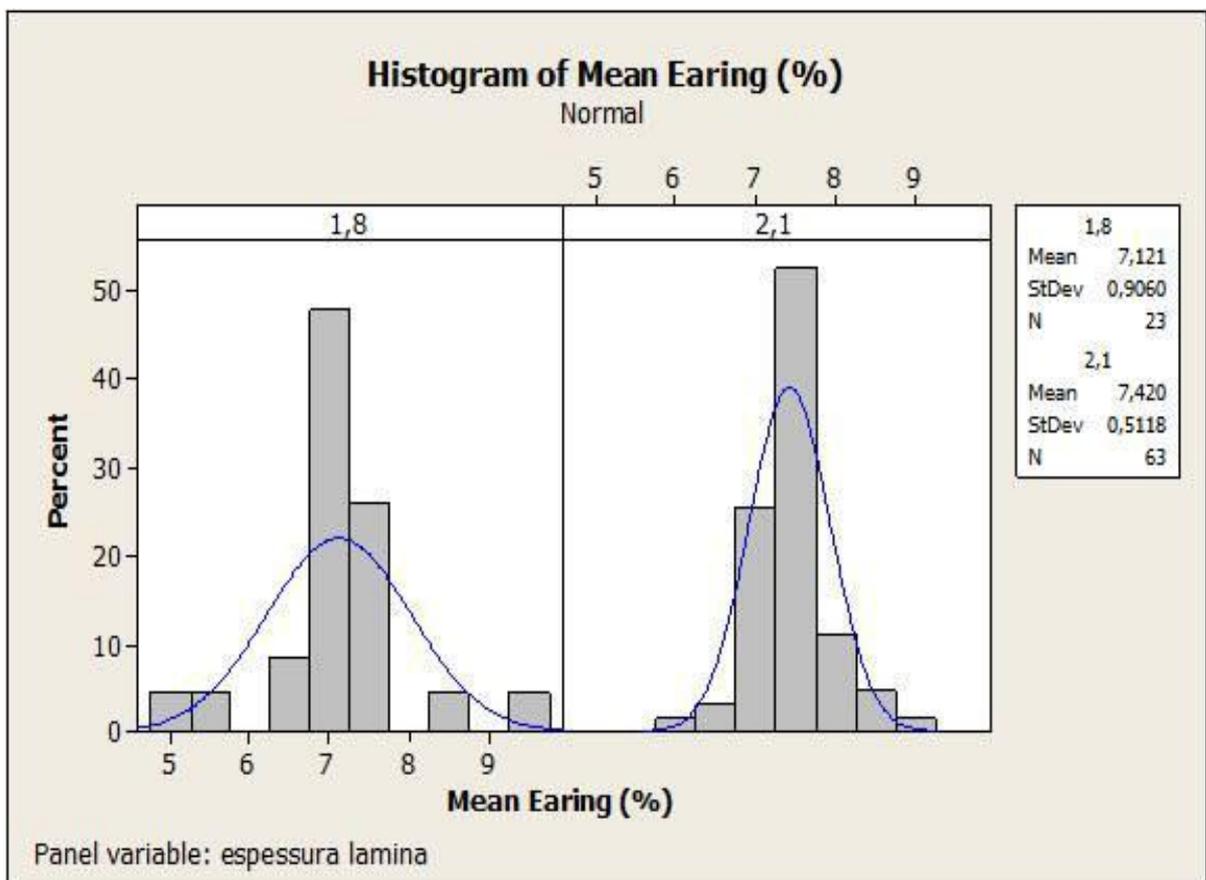
¹ Interval Plot - é um gráfico de intervalos, que mostra a variabilidade e a tendência central da amostra

Figura 29 – Correlação do orelhamento e as espessuras de 1,80 e 2,10 mm no MINTAB



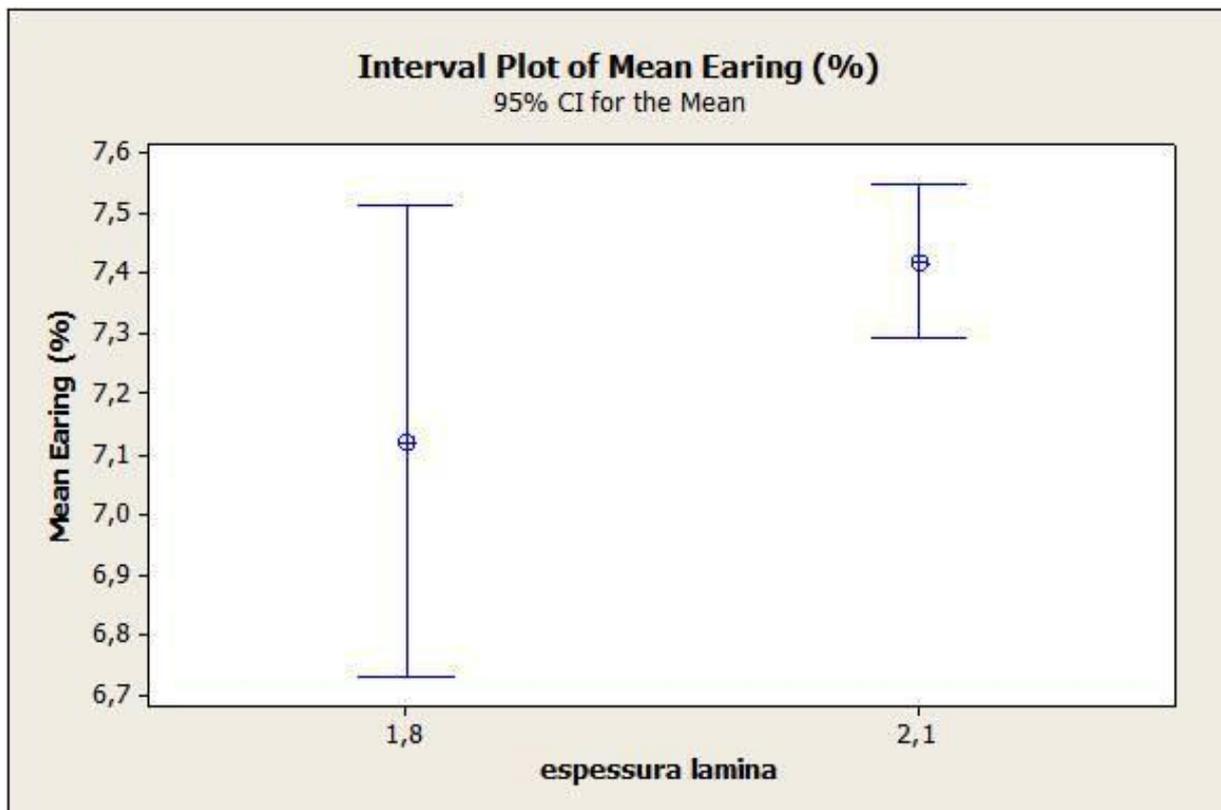
Fonte: (Autoria própria, 2015).

Figura 30 – Histograma dos valores de orelhamento para as espessuras de 1,80 e 2,10 mm



Fonte: (Autoria própria, 2015).

Figura 31 – Variabilidade e a tendência de orelhamento para as espessuras de 1,80 e 2,10 mm



Fonte: (Autoria própria, 2015).

Com base nas curvas e gráficos apresentados, notamos que o orelhamento para as espessuras finais apresentadas são estatisticamente iguais, não há uma diferença significativa, a diferença de espessura para as laminadas não influencia no seu orelhamento final. A chapa com espessura 1,80 mm possui uma variabilidade maior na média dos resultados como mostrado na Figura 31, onde o orelhamento varia de 6,7 a 7,5%, concentrando-se em um valor de 7,1% aproximadamente.

5 CONCLUSÃO

Pode-se verificar através da técnica ANOVA e do programa MINITAB que estatisticamente a média do orelhamento para as duas espessuras estudadas são iguais, em torno de 7,30%. Controlando as variáveis de processo, eu garanto uma faixa especificada para o orelhamento na laminação a quente, que deve ser de 7,0 a 7,5%, para que ele possa ser controlado no processo de redução a frio. Com isso, eu mantenho um controle sobre o meu orelhamento nos fabricantes de latas, evitando o desperdício e custo com os materiais que precisam ser aparados.

Foi observado também através da análise micrográfica nas amostras que houve uma maior recristalização na lâmina de 1,80 mm em relação com a 2,10 mm, com a formação de grãos menores.

A taxa de redução nos cilindros da laminação a quente para diferentes espessuras não interfere no orelhamento.

Obtemos uma maior amplitude no 1,80 mm, devido a sua variabilidade, de 6,7 a 7,5%. Por ser um processo difícil de controlar, e devido aos erros experimentais durante os ensaios de embutimento.

Sugestão: Realizar estudos do orelhamento com aumento nas reduções entre as cadeiras do laminador para a liga AA3104.

REFERÊNCIAS

ABAL. Associação Brasileira do Alumínio. **Vantagens do alumínio**. Disponível em: <<http://www.abal.org.br>>. Acesso em: 19 jan. 2016.

ABRALATAS. Associação Brasileira dos Fabricantes de Lata de Alta Reciclabilidade. **Fabricação de latas de bebidas**. Disponível em: <<http://www.abralatas.com.br>>. Acesso em: 20 out. 2015.

ALLUMATTER. **Imagem amostra de metal**. Disponível em <<http://www.aluminium.matter.org.uk>>. Acesso em: 20 out. 2015.

CIMM. **A estampabilidade dos materiais metálicos**. Disponível em: <<http://www.cimm.com.br>>. Acesso em: 20 out. 2015.

ENGLER, O. et al. Texture-based design of a convoluted cut-edge for earing – free beverage cans. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 211, 2011, p. 1278-1284.

FOGAZZI, W., FERRARI C. R. F.; SANTOS, C. A.; DEDAVID, B. A.; SÍM, J. A.; **Análise microestrutural da liga AA3104 H19**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

HOSFORD, W. F.; DUNCAN, J. L. The aluminum beverage can. **Scientific American**, New York, v. 271, p. 48-53, 1994.

HOUTTE, P.V.; CAUWENBERG, G.; AERNOUDT, E. Analysis of the earing behaviour of aluminium 3004 alloys by means of a simple model based on yield loci calculated from Orientation Distribution Functions. **Materials Science and Engineering**, Lausanne, v.95, p. 115-124, 1987.

JONAS, J.J.; RAY, K.R.; HOOK, R.E. Cold rolling annealing textures in low carbon and extra low carbon steels. **International Materials Reviews**, London, v. 39, p. 129-172, 1994.

LIU, W. C., et al. Estimating local dislocation content near a grain boundary in hot deformed AA 3104 aluminium alloy. **Materials Science and Engineering A**, Lausanne, v. 531, 2012 p. 78-181. 2011.

LOMAS, P. T. B. **Propriedade dos materiais**: slides. Disponível em: <<http://pt.slideshare.net/pedrotiagobornabelomas/5-propriedades-mecnicas>>. Acesso em: 20 out. 2015.

MARTINS, J. P. **Evolução da microestrutura e da textura durante o processamento de chapas da liga Al-Mn-Fe-Si (3003) produzidas por lingotamento contínuo**: um estudo comparativo com o processo semi-contínuo. 2005. 203f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

NOVELIS. **Imagens de materiais metálicos**. Disponível em: <<http://www.novelis.com>>. Acesso em: 20 out. 2015.

PADILHA, A. F.; SICILIANO, J. F. **Encruamento, recristalização, crescimento de grão e textura**. São Paulo: ABM, 1995.

PATROCÍNIO, Paulo Roberto Godoy. **Caracterização da textura e do orelhamento (“earing”) da liga AA3104 após a redução a frio**. 2011. 115 p.: il. Dissertação (Mestrado em Ciências – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Materiais. Área de Concentração: Materiais Metálicos, Cerâmicos e Poliméricos) – Escola de Engenharia de Lorena - Universidade de São Paulo, 2011.

SILVA JUNIOR, W. F., et al. **Análise microestrutural da liga AA3104 H19**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 4., 2007, Estância de São Pedro. **Anais...** Estância de São Pedro: [s.l.], 2007.

SOMETAIS. **Imagens de amostras de metal**. Disponível em: <<http://www.sometais.com.br>>. Acesso em: 20 out. 2015.

THE ALUMINUM ASSOCIATION. **Aluminum Standart and data**. Disponível em: <www.aluminum.org>. Acesso em: 20 out. 2015.

VERLINDEN, B.; DRIVER, J.; SAMAJDA, I.; DOHERTY, R. D. **Thermo-mechanical processing of metallic materials**. London: Elsevier, 2207. v. 11, cap. 14, p. 365-404.

WIKIPÉDIA. A enciclopédia livre. **Conformação**. Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Conformação>>. Acesso em: 19 jan. 2016.