

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

FELIPE MARQUES PIUBELLI

**INFLUÊNCIA DA TAXA DE DEFORMAÇÃO POR LAMINAÇÃO NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS NA LIGA DE ALUMÍNIO 1100**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO
2017

FELIPE MARQUES PIUBELLI

**INFLUÊNCIA DA TAXA DE DEFORMAÇÃO POR LAMINAÇÃO NAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS NA LIGA DE ALUMÍNIO 1100**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Mecânica da Coordenação de Engenharia Mecânica – COEME – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientadora: Prof. M. Silvana Patrícia Verona

PATO BRANCO

2017

FOLHA DE APROVAÇÃO

Influência da taxa de deformação por laminação nas propriedades mecânicas na liga de alumínio 1100

Felipe Marques Piubelli

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado no dia 13/11/2017 como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Mecânico, do curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Pato Branco (UTFPR-PB). O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora julgou o trabalho **APROVADO**.

Prof. M. Maria Nalu Verona
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

Prof. Dr. Dalmarino Setti
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

Profa. M. Silvana Patricia Verona
(UTFPR)
Orientador

Prof. Dr. Bruno Bellini Medeiros
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Mecânica

*A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica

DEDICATÓRIA

À Deus, meus pais, irmãos, família e amigos que foram meu fôlego e sustento para dar sempre continuidade na minha trajetória e me ajudaram a ver um mundo aberto com muitas possibilidades.

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora M. Silvana Patrícia Verona, que sempre com muita paciência e sabedoria me conduziu na realização deste trabalho.

À professora M. Maria Nalu Verona que com todo seu afinho me auxiliou por diversas vezes no decorrer deste trabalho.

À empresa Alcast do Brasil que doou todo o Alumínio utilizado neste trabalho.

À empresa Pressoto que auxiliou no corte dos corpos de prova.

À toda equipe da empresa VCI Brasil que me auxiliaram por diversas vezes durante a execução deste trabalho.

Ao Engenheiro Mecânico Marcos de Alencar Ribeiro que com seu vasto conhecimento me auxiliou diversas vezes.

À amiga Amanda Shimosaka que deu suporte por muitas vezes durante este trabalho.

À grande amiga Bruna Simões da Cunha que nunca mediu esforços para ajudar nos momentos mais difíceis.

EPÍGRAFE

“Slip inside the eye of your mind. Don’t you know you might find a better place to play?” (GALLAGHER, Noel, 1995).

“Deslize os olhos para dentro da sua mente. Você não sabe que pode encontrar um lugar melhor pra ficar”. (GALLAGHER, Noel, 1995).

RESUMO

PIUBELLI, Felipe Marques. Influência da taxa de deformação por laminação nas propriedades mecânicas da liga de alumínio 1100. 2019. 62 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2017.

Este trabalho demonstra como diferentes taxas de deformação por laminação influenciam nas propriedades mecânicas da liga de alumínio 1100. Foram realizados experimentos com corpos de prova variando a taxa de deformação de $3,58 \text{ s}^{-1}$ até $16,1 \text{ s}^{-1}$ em laminação a frio. As propriedades mecânicas analisadas neste trabalho foram: dureza e ductilidade e limite de resistência a tração. Este trabalho também demonstra como as diferentes taxas de deformação influenciam na macroestrutura da liga de alumínio 1100. Foram encontrados um aumento de cerca de 8% na dureza da liga com diferentes taxas de deformação e redução de ductilidade de 20 a 50%.

Palavras-chave: Laminação, taxa de deformação, alumínio, trabalho a frio, alumínio 1100.

ABSTRACT

PIUBELLI, Felipe Marques. The influence of the strain rate in rolling on the mechanical properties of aluminium alloy 1100. 2019. 62 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2017.

This work demonstrates how different strain rates of rolling influence the mechanical properties of the 1100 aluminum alloy. Experiments were carried out with specimens varying the deformation rate from 3.58 s^{-1} to 16.1 s^{-1} in cold rolling. The mechanical properties analyzed in this work were: hardness and ductility and limit of tensile strength. This work also demonstrates how the different rates of deformation influence the macrostructure of the aluminum alloy 1100. An increase of about 8% in the hardness of the alloy with different strain rates and a reduction of ductility from 20% to 50% was found.

Keywords: Rolling, strain rate, aluminium, cold work, aluminium 1100.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Desenho esquemático do processo de laminação	22
Figura 2 – Dariação da velocidade ao longo do processo de laminação	23
Figura 3 – Esquema de laminação com ângulo de contato.....	23
Figura 4 – Escala de temperatura homóloga.....	25
Figura 5 – Visualização encruamento	27
Figura 6 – Alteração das propriedades com deformação a frio	27
Figura 7 – Alumínio e elementos de liga	29
Figura 8 – Corpos de prova cortados	32
Figura 9 – Formato de corpo de prova	32
Figura 10 – Parâmetros utilizados para laminação	33
Figura 11 – Garra de fixação utilizada.....	35
Figura 12 – Corpos de prova após corte	37
Figura 13 – Balança de precisão.....	38
Figura 14 – Esquemático de deflexão negativa.....	39
Figura 15 – Corpo de prova #6 com trincas laterais.....	40
Figura 16 – Defeitos encontrados na laminação	40
Figura 17 – Empenamento do corpo de prova	41
Figura 18 – Textura dos grãos do corpo de prova #6.....	53
Figura 19 – Comparação das texturas dos grãos dos corpos de prova #6, #8, #10 e #12	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Elementos de liga.....	29
Tabela 2 – Taxas de deformação dos corpos de prova	34
Tabela 3 – Dureza dos corpos de prova	42
Tabela 4 – Dureza dos corpos de prova do grupo 1	42
Tabela 5 – Dureza dos corpos de prova do grupo 2	43
Tabela 6 – Dureza dos corpos de prova do grupo 3	43
Tabela 7 – Dureza dos corpos de prova #2 e #7.....	44
Tabela 8 – Dureza dos corpos de prova #4 e #8.....	45
Tabela 9 – Dados dos corpos de prova #1, #2, #3, #4, #5, #6 e #12	48
Tabela 10 – Dados dos corpos de prova do grupo 2.....	49
Tabela 11 – Dados dos corpos de prova do grupo 3.....	50
Tabela 12 – Resultados do método de arquimedes para corpo de prova #6	52
Tabela 13 – Resultados do método de arquimedes para corpo de prova #12	53

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Aumento da porcentagem de dureza por grupo.....	44
Gráfico 2 – Diagrama de tração do corpo de prova #12.....	46
Gráfico 3 – Comparação dos diagramas de tração do grupo 1	47
Gráfico 4 – Comparação dos diagramas de tração do grupo 2.....	48
Gráfico 5 – Comparação dos diagramas de tração do grupo 3.....	49
Gráfico 6 – Comparação dos diagramas de tração dos corpos de prova #2 e #7.....	50
Gráfico 7 – Comparação dos diagramas de tração dos corpos de prova #4 e #8.....	51
Gráfico 8 – Comparação dos diagramas de tração de todos os corpos de prova	52

LISTA DE SÍMBOLOS

V_1	Velocidade máxima alcançada
α	Ângulo de contato
$\Delta h_{m\acute{a}x}$	Redução máxima de espessura do material
ε	Grau de deformação
v	Velocidade vertical de laminação
ω	Velocidade angular de laminação
v_t	Velocidade tangencial de laminação
h_f	Altura final
h_0	Altura Inicial
$\dot{\varepsilon}$	Taxa de deformação

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 OBJETIVOS	19
2.1 OBJETIVOS GERAL	19
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
2.3 JUSTIFICATIVA	19
3 REFERENCIAL TEÓRICO	21
3.1 CONFORMAÇÃO MECÂNICA	21
3.1.1 Laminação	22
3.1.1.2 Laminação a quente	25
3.1.1.1 Laminação a frio	25
3.2 ALUMÍNIO	28
3.3 ENSAIOS	30
4 MATERIAIS E MÉTODOS	31
4.1 MATERIAL	31
4.2 PARÂMETROS DE LAMINAÇÃO	33
4.3 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA	35
4.4 ANÁLISE METALOGRÁFICA	36
4.5 ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICO PELO MÉTODO DE ARQUIMEDES	37
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
5.1 RESULTADOS DA LAMINAÇÃO	39
5.2 RESULTADOS DO ENSAIO DE DUREZA	41
5.3 RESULTADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO	45
5.4 RESULTADOS DO ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA PELO MÉTODO DE ARQUIMEDES	52
5.5 RESULTADOS DO ENSAIO METALOGRÁFICO	53
6 CONCLUSÃO	57
REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

Os processos de fabricação por conformação são essenciais na obtenção de diversos produtos que estão presentes no cotidiano, desde partes de máquinas complexas até simples objetos como uma chaleira. (Shaeffler, 2004). Este processo consiste na mudança de dimensões e formas do material envolvido com aplicação de esforços mecânicos. (Helman, 2005). Com a modernização dos equipamentos envolvidos neste processo foi então possível diminuir custos e aumentar a produção em alta escala. Dando maior ênfase também no fator econômico, já que são essenciais e vitais para a manutenção da economia brasileira bem como de muitos outros países. (Shaeffler, 2004).

Dentre os vários processos de conformação mecânica, a laminação destaca-se na produção de chapas, tiras, barras, cantoneiras e trilhos. (Dieter, 1986). Durante o processo de laminação, devido a deformação plástica que o material sofre, altera-se as propriedades mecânicas do material, já que este está sujeito a tensões que foram aplicadas para a diminuição da sua seção transversal. Diferentes parâmetros são aplicados no processo para que haja o resultado esperado. Esses parâmetros podem ser: velocidade de laminação, deformação sofrida, raio do cilindro laminador entre outros. A deformação sofrida, por exemplo, está relacionada com mudanças significativas nas propriedades do material devido ao fenômeno de encruamento, que endurece, aumenta a resistência mecânica, porém diminui sua ductilidade e tenacidade. (Rodrigues e Martins, 2010).

Dentre os vários materiais que podem ser conformados, destaca-se o uso do alumínio, já que este apresenta propriedades desejáveis em alguns setores da indústria por ser mais resistente a corrosão e boa resistência mecânica levando em consideração seu peso. (Das et al., 2010). Nos últimos anos a procura e pesquisa sobre o alumínio vem se intensificando devido as diversas aplicações que ele pode oferecer, desde a indústria automobilística até aeronáutica (Lee et al., 2002). (Hellman, 2005)

Neste trabalho foram considerados como a deformação sofrida na laminação influencia nas propriedades mecânicas finais da liga de alumínio 1100. Justifica-se tal pesquisa devido sua grande importância e vasta utilidade do material, logo, o conhecimento de suas propriedades é essencial para que seja feita sua aplicação adequada.

A liga em questão é amplamente utilizada na produção de tanques, luminárias, cubas não estruturais que são utilizadas nas indústrias alimentícia e química, utensílios domésticos, aletas e embalagens. Para chegar ao formato desejado, todos os itens citados anteriormente tiveram que ser submetidos a processos de conformação. Como foco, o trabalho busca realizar uma análise de como a laminação em específico pode interferir no produto final em relação às suas propriedades mecânicas. (“Propriedades da liga de Alumínio 1100”, 2017)

O problema estudado torna-se útil quando se deseja aplicar a esta liga em locais que exigem propriedades específicas além de mostrar como os processos de fabricação podem interferir no resultado final dos materiais. E ainda destacando a importância da laminação e seu conhecimento, já que se estima que cerca de 90% dos materiais metálicos utilizados na indústria transformadora passam por algum ponto pelo processo de laminação (Rodrigues e Martins, 2010).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GERAL

Objetiva-se com o tema proposto avaliar o efeito de diferentes taxas de deformação no processo de laminação nas propriedades mecânicas da liga de Alumínio 1100.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1) Realizar o processo de laminação com diferentes taxas de deformação.
- 2) Realizar os ensaios mecânicos para verificação dos resultados obtidos.
- 3) Análise crítica de resultados obtidos.

2.3 JUSTIFICATIVA

Devido a ampla aplicação do alumínio no cenário global que varia desde simples aplicações até as mais complexas, principalmente em processos de conformação mecânica, bem como é destacável a aplicação da liga de alumínio 1100 em diferentes ramos da fabricação de componentes. O entendimento da influência de diferentes taxas de deformação nas propriedades mecânicas na laminação é de caráter essencial quando se diz respeito a um material altamente conformável como o alumínio, pois através deste pode-se obter mais informações sobre o comportamento deste material. Anexado ao fato da multidisciplinaridade que o trabalho engloba, destacando as áreas de ciências dos materiais, conformação mecânica e ensaio de materiais.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 CONFORMAÇÃO MECÂNICA

A tecnologia é a base para o estilo de vida moderno em que vivemos, e a evolução dos processos de conformação mecânica apresentam papel central para a manutenção deste estilo. (Schuler, 2012). Dentre os processos de fabricação a conformação mecânica é, sem dúvida, a mais antiga e a história de sua evolução está extremamente correlacionada com a história da evolução da humanidade. (Rodrigues e Martins, 2010). Os processos de conformação de acordo com Cordeiro 2012, são definidos pela modificação de um corpo para outra forma desejada. Estes processos, em ocorrem deformação plástica do material no estado sólido, são amplamente utilizados dentre os diversos processos de fabricação devido a sua eficiência por reduzir o desperdício, comparado com outros processos, aproveitando mais assim a matéria prima. (Rodrigues e Martins, 2010).

Atualmente, usa-se a conformação na fabricação de produtos tanto acabados como semiacabados e o seu vasto uso esta correlacionado com as diversas vantagens que este proporciona. Dentre elas destaca-se o baixo custo de produção em alta escala, alta produtividade, bom aproveitamento da matéria prima, aplicação em diversos materiais (ferrosos e não ferrosos) e elevada gama de produtos que podem ser fabricados desde 1 grama até centenas de toneladas. (Rodrigues e Martins, 2010).

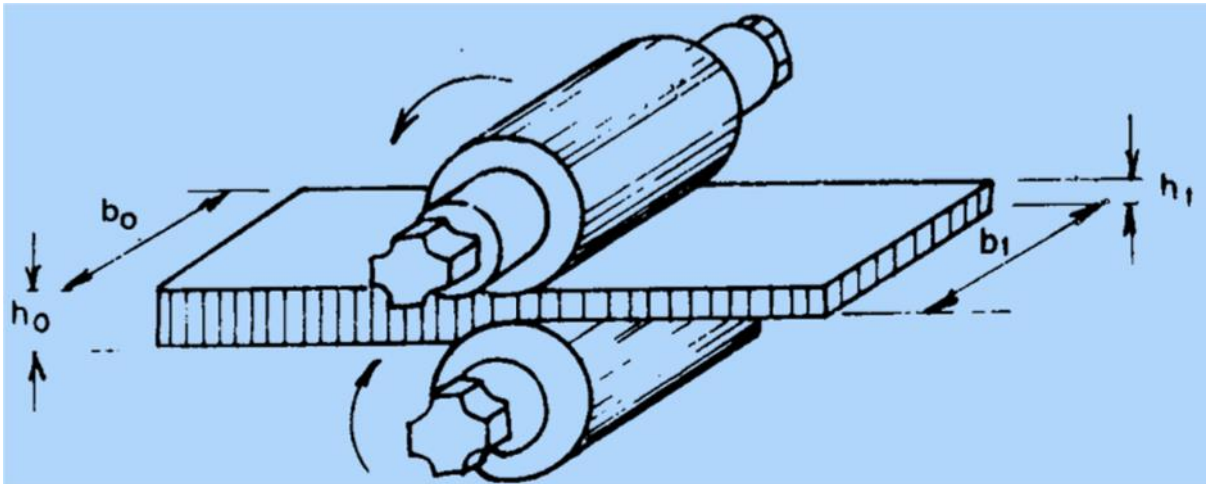
Na literatura de Rodrigues e Martins 2010 são realizados estudos mais detalhados dos diversos processos de conformação, que são divididos nas categorias em destaque: Forjamento, extrusão, laminação, corte, calandragem, estampagem entre outros. Para que ocorra estes processos é necessário a existência de esforços mecânicos que podem ser divididos em dobramento, tração, compressão e corte. (Helman, 2005).

É também importante destacar que alguns materiais são mais suscetíveis a serem conformados que outros. Ligas de cobre são utilizadas para produção de fios (quando a quantidade de cobre é maior) e a mais utilizadas das ligas de cobre é o latão (Cu-Zn). Ligas moles como as de Chumbo e Estanho são também muito utilizadas. Em relação ao Alumínio, quanto menor o elemento de liga mais fácil é sua conformação (Krelling, [s.n.]

3.1.1 Laminação

A laminação é um dos principais processos de conformação. Durante o processo ocorre a deformação plástica do material que é forçado a passar por dois rolos laminadores (cilindros) que giram em sentidos opostos à fim de obter redução de sua espessura, e aumento de sua largura e comprimento. (Lenard, 2014). Este processo pode ser utilizado na fabricação de produtos planos (chapas, por exemplo) e de produtos não planos (tubos, perfis e etc.) (Rodrigues e Martins, 2010). A Fig. 1 exemplifica a o desenho esquemático do processo de laminação também a dimensões antes e após o processo.

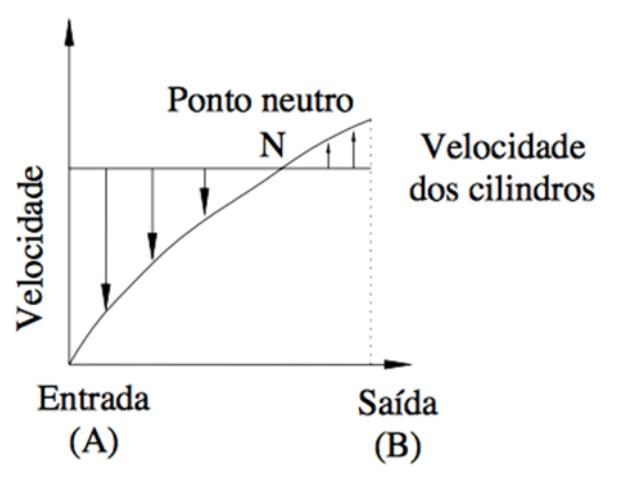
Figura 1 – Desenho esquemático do processo de laminação



Fonte: Cordeiro, 2012.

Durante o processo não ocorre perda de massa do material, e essa passagem só é permitida através da existência de força de atrito que existe entre os cilindros compressores e o material que está sendo conformado. A velocidade dos cilindros é superior que a da peça antes da passagem e as forças de atrito atuam em sentido tangencial ao arco de contato do cilindro levando ao arraste da peça. Após a passagem da peça pelos cilindros a velocidade desta é maior que a dos cilindros, esta inversão começa a ocorrer no ponto neutro, conforme mostra a Fig. 2. (Cordeiro, 2012)

Figura 2 – Variação da velocidade ao longo do processo de laminação



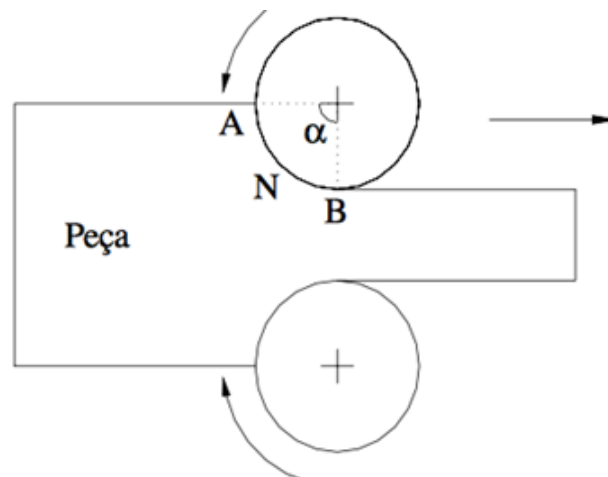
Fonte: Cordeiro, 2012.

A velocidade máxima que o material alcança é obtida através da equação 1:

$$V_1 = V_0 \frac{h_0}{h_1} \quad (1)$$

Para a máxima redução de espessura admissível é necessário levar em conta as características do laminador, ou seja, os aspectos tribológico-dimensionais deste. Neste cálculo são levados em consideração o ângulo de contato, a variação de espessura do material e o raio do cilindro laminador. O ângulo de contato (α) pode ser visto na Fig. 3 (Rodrigues e Martins, 2010).

Figura 3 – Esquema de laminação com ângulo de contato



Fonte: Cordeiro, 2012.

O valor do ângulo de contato é dado então por:

$$\text{tang } \alpha = \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} \quad (2)$$

Para ângulos muito pequenos e no cálculo da redução máxima possível:

$$\text{sen } \alpha \sim \text{tg } \alpha = \sqrt{\frac{\Delta h_{\text{máx}}}{R}} \quad (3)$$

Como previamente estabelecido por Rodrigues e Martins, 2010 o atrito apresenta papel essencial neste processo, logo o coeficiente de atrito também influencia está relacionado com a redução máxima de espessura do material. Conforme a equação abaixo: (Rodrigues e Martins, 2010).

$$\Delta h_{\text{máx}} = \mu^2 R \quad (4)$$

Este processo pode ocorrer quando o metal é submetido a diferentes temperaturas, dividindo o processo em três categorias principais: laminação à quente e laminação à frio. A primeira ocorre quando o processo acontece em uma temperatura superior à metade da temperatura de fusão do material e a segunda ocorre abaixo desta temperatura. Aplica-se as diferentes temperaturas dependendo do resultado esperado em cada processo e dependendo também se busca reduções maiores ou menores. (Lenard, 2010).

Para o cálculo da taxa de deformação na laminação utiliza-se a equação abaixo: (Conformação mecânica, 2017).

$$\dot{\epsilon} = \frac{\ln\left(\frac{h_0}{h_f}\right)}{h_0 - h_f} v \quad (5)$$

Onde v é a velocidade vertical de laminação proposta por Ferreira (2010) é:

$$v = v_t \cos \alpha \quad (6)$$

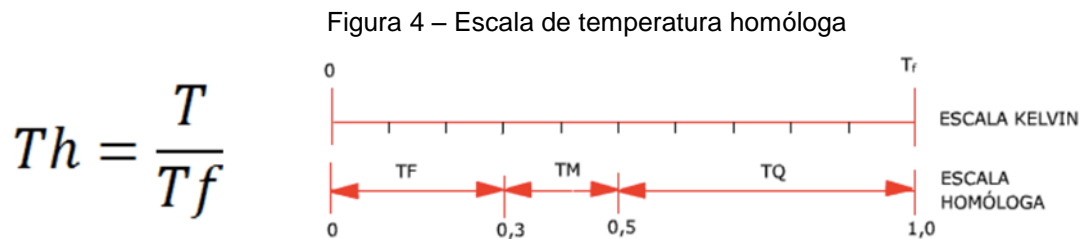
E v_t é dado por:

$$v_t = R\omega \quad (7)$$

3.1.1.2 Laminação a quente

A laminação a quente é o processo que ocorre em temperaturas superiores a 0,5 vezes a temperatura de fusão do material, ou também conhecida como temperatura homóloga, lembrando que esta temperatura é na escala Kelvin (K). Para a redução de grandes seções é necessário que seja feita este tipo de processo. (Cordeiro, 2012).

A escala da temperatura homóloga, em Kelvin, pode ser visualizada na Fig. 4.



Fonte: Krelling.

As vantagens deste processo estão relacionadas maior com a eliminação bolhas e segregações, aumento de tenacidade e ductilidade do material após o processo, menor custo, recristalização do material e ainda garante mais conformabilidade devido a temperatura. Em contrapartida oferece maiores chances da ocorrência de oxidação, formação de carepa em aços e maior heterogeneidade. (Anael Krelling, [s.n.]

3.1.1.1 Laminação a frio

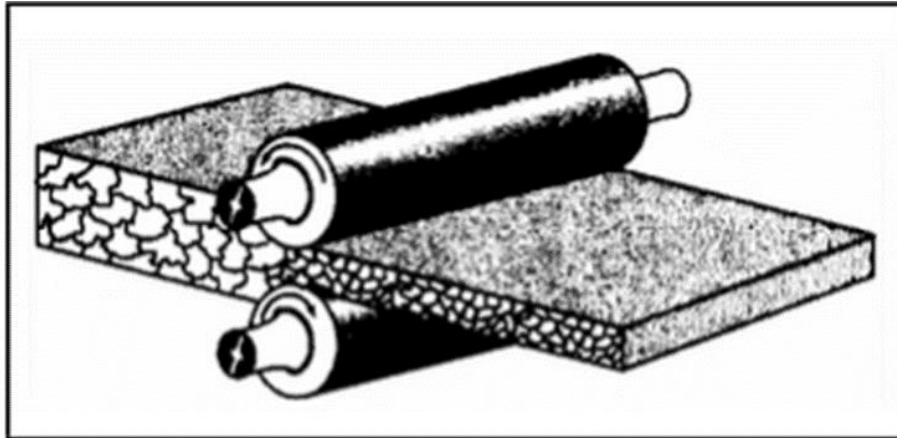
Conforme será aplicado neste trabalho, a laminação a frio ocorre com produtos que já foram previamente laminados a quente e sua temperatura está abaixo

da temperatura de recristalização, e neste processo o material se mostra mais resistente a deformação o que limita mais a redução da seção no processo. Fazendo assim com que a laminação a frio seja mais utilizada para processos de acabamento. (Cordeiro, 2012).

Vale lembrar, que quando o material passa por laminação este sofre alterações nas suas propriedades mecânicas devido aos esforços mecânicos aplicados que alteram suas microestruturas. Rodrigues e Martins afirmam que quando um material passa por um processo de conformação a frio este tende a aumentar sua resistência mecânica bem como o aumento da dureza do material, já sua tenacidade e ductilidade diminuem. Porém este está mais propenso ao aparecimento de fissuras, comparados aos produtos conformados a quentes e a morno, os produtos conformados a frio não apresentam problemas com oxidação ou de contração, garantindo também melhor precisão dimensional.

O encruamento, ocorre pela deformação plástica sofrida através do movimento das discordâncias onde ocorre a interação destas com outras imperfeições diretamente ou entre os obstáculos e os campos de tensões internas das imperfeições indiretamente. Essas interações dificultam o movimento das discordâncias, logo, para que haja deformação plástica é necessário aplicar uma tensão maior. (Ank de Moraes, [s.d.]). O que acaba por ser um resultado positivo já que melhora suas propriedades mecânicas elevando a taxa de conformação, eleva-se o encruamento, o material passa a ser mais frágil, logo, menos dúctil. No entanto é necessário considerar que a partir de certo ponto este aumento de dureza começa a dificultar o processo de conformação e a tentativa de continuar este pode levar a falha do material ou a ruptura da estrutura cristalina, causando fraturas ou trincas. (Krelling, [s.d.]). Uma visualização do encruamento pode ser visto na Fig. 5.

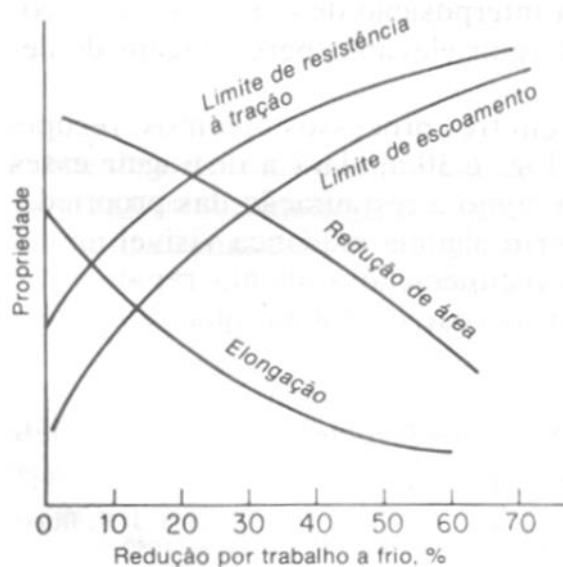
Figura 5 – Visualização encruamento



Fonte: Alves Pinto.

Rodrigues e Martins alegam que as laminações a frio fazem com que ocorra estruturas de orientação preferencial isso é devido a rotação e alongamento dos grãos na direção da laminação de forma a acomodar a deformação que é sofrida pelos cilindros. Estes produtos da laminação a frio são geralmente chapas com espessuras pequenas que foram previamente obtidas da laminação a quente de lingotes. A Fig. 6 ilustra como ocorrem as variações das propriedades de materiais deformados a frio.

Figura 6 – Alteração das propriedades com deformação a frio



Fonte: Cordeiro, 2012

Rodrigues e Martins ressaltam que no processo de laminação a frio, porém é possível que ocorram alguns defeitos como deformações locais, fratura na direção da laminação, fissuras causadas por tensões residuais e ainda a eventual fratura da

própria chapa, portanto é necessário o conhecimento do material que está sendo laminado, bem como conhecer as características da laminadora.

3.2 ALUMÍNIO

Ficando apenas atrás do aço, o alumínio é o metal mais utilizado no mundo atualmente, sua ductilidade, leveza, alto valor de sucata, entre outras qualidades, fizeram com que este alcançasse esta posição. (Alves Pinto, 2012). Utilizado na indústria de transporte (desde a automotiva até a aeroespacial), construção e de bens de consumo entre outras, suas aplicações são diversas, e estão abundantemente presentes no cotidiano do homem. O desenvolvimento de novas ligas de alumínio ajudou ainda mais a dar aplicações mais específicas que beneficiaram processos. (Alves Pinto, 2012).

O metal puro é apresenta uma boa condutividade térmica e elétrica, uma boa resistência a corrosão e é bastante dúctil, sendo ideal para produção de cabos, condutores elétricos, laminados e embalagens. No entanto nestas condições o alumínio apresenta baixa dureza e resistência mecânica, logo, para aplicações deste caráter o alumínio se torna inviável. Quando se deseja alterar ou melhorar as propriedades do Alumínio é então agregado a estes elementos de liga. As ligas são constituídas de Alumínio com elementos como o Cobre, Silício, Manganês, Magnésio entre outros elementos que podem ser adicionados. A escolha da proporção e dos elementos a serem adicionados está relacionada com as propriedades que se deseja alcançar. (Alves Pinto, 2012)

De maneira genérica é possível verificar a interferência de cada elemento na formação da liga e também suas aplicações na Fig. 7.

Figura 7 – Alumínio e elementos de liga

Elemento adicionado	Características	Aplicações
Alumínio puro	Ductilidade, condutividade elétrica e térmica, resistência à corrosão.	Embalagens, folhas muito finas, recipientes p/ a indústria química, condutores elétricos.
Cobre	Resistência mecânica, resistência a altas temperaturas e ao desgaste, usinabilidade.	Rodas de caminhões, rodas, estrutura e asas de aviões, cabeçotes de cilindros de motores de aviões e caminhões, pistões e blocos de cilindros de motores.
Manganês	Ductilidade, melhor resistência mecânica à corrosão.	Esquadrias para construção civil, recipientes para a indústria química.
Silício	Baixo ponto de fusão, melhor resistência à corrosão, fundibilidade.	Soldagem forte, peças fundidas.
Silício com cobre ou magnésio	Resistência mecânica ao desgaste e à corrosão, ductilidade; soldabilidade, usinabilidade, baixa expansão térmica.	Chassis de bicicletas, peças de automóveis, estruturas soldadas, blocos e pistões de motores, construção civil.
Magnésio	Resistência à corrosão em atmosferas marinhas, soldabilidade, usinabilidade.	Barcos, carrocerias de ônibus, tanques criogênicos.
Zinco	Alta resistência mecânica e baixo peso.	Partes de aviões.
Zinco e magnésio	Resistência à tração e à corrosão, soldabilidade, usinabilidade.	Brasagem.
Estanho	Resistência à fadiga e à corrosão por óleo lubrificante.	Capa de mancal, mancais fundidos, bielas.

Fonte: Alves Pinto.

Quanto as ligas trabalháveis de Alumínio, estas estão divididas em 8 grupos principais de acordo com a norma NBR 6834, em que o primeiro número da liga representa o elemento de liga principal de acordo com a Tab. 1.

Tabela 1 - Elementos de liga

Alumínio não ligado com pureza maior que 99%	1XXX
Cobre	2XXX
Manganês	3XXX
Silício	4XXX
Magnésio	5XXX
Magnésio e Silício	6XXX
Zinco	7XXX
Outros elementos	8XXX

Fonte: NBR 6834.

O segundo dígito é relacionado com as modificações da liga original ou dos limites de impureza, e os dois últimos dígitos indicam a liga de alumínio ou a pureza do alumínio.

3.3 ENSAIOS

No ensaio destrutivo de tração é possível que se retire resultados através do gráfico tensão-deformação onde pode ser feita a análise da zona plástica e elástica do material e obter valores das tensões de escoamento e de ruptura. Obtendo respostas sobre a ductilidade e resistência mecânica do material.

De acordo com Souza, a dureza Rockwell foi introduzida em 1922 e esta leva o nome de seu criador. Este tipo de dureza apresenta algumas vantagens e vasto uso internacional. Uma das vantagens apresentada por esse método é a não necessidade de realizar quaisquer medidas da impressão causada, já que o resultado da dureza é lido diretamente na máquina. Desta maneira o processo se torna mais rápido e também previne possíveis erros humanos. Outra vantagem citada por Essel é que, neste tipo de medição, diferente de Brinell por exemplo, pode-se realizar medições de dureza de materiais mais duros e mais moles. (Souza, 1982)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A fim de alcançar os objetivos propostos neste trabalho, que é avaliar a influência da taxa de deformação na laminação nas propriedades mecânicas da liga de alumínio em estudo, é necessário com que seja seguida uma metodologia com um planejamento adequado. Com auxílio da literatura presente no referencial teórico, da orientadora e dos laboratórios disponíveis realizou-se o estudo proposto. Logo, foram as etapas abaixo.

4.1 MATERIAL

A liga de alumínio 1100 é amplamente utilizada em embalagens, cubas não estruturais, aletas, peças estampadas entre outras aplicações. As propriedades desta liga são grandemente desejáveis para conformação, graças a sua baixa resistência mecânica, e também esta liga, possui uma boa soldabilidade e alta resistência a corrosão. (“Propriedades da liga de Alumínio 1100”, 2017). Suas propriedades térmicas levam a sua utilização em trocadores de calor.

Quanto a sua composição química a liga possui uma pureza de 99% cerca de 1% de Silício e Ferro, de 0,05 a 0,2% de Cobre, até 0,05% de Mn, 0,1 de Zinco e 0,05% de outros possíveis elementos. Sua dureza é em torno de 32 HB com uma tensão de escoamento é de 34 MPa e tensão de ruptura é cerca de 90 Mpa esta liga apresenta também uma tensão de cisalhamento de 62 Mpa e limite de fadiga de 34 MPa. A densidade é de 2,71 g por cm cúbico e ponto de fusão de 658 ° C. (“Propriedades da liga de Alumínio 1100”, 2017).

Com a disponibilidade de duas chapas de Alumínio da liga 1100 com as dimensões de 300 mm de largura, 200 mm de comprimento de 7 mm de espessura, foram cortados por guilhotina 24 corpos de prova com as dimensões de 200 mm de comprimento, 20 mm de largura e a espessura permaneceu a mesma, 7 mm, conforme a Fig. 8. O primeiro corpo de prova foi cortado na serra manual, porém com o tempo levado, esforço cometido e acabamento ruim que este método apresentava as duas chapas de Alumínio foram então levadas até a empresa Pressoto localizada na cidade de Pato Branco onde o corte foi realizado em uma guilhotina hidráulica da marca NGP, modelo GCN 3012 que tem a capacidade de realizar corte de chapas com até 12 mm de espessura, 3200 mm de comprimento e 800 mm de largura. O equipamento possui limitador traseiro vinculados ao um sistema que exhibe a largura

que a peça será cortada e corta com uma velocidade de 9 golpes por minuto.
(Descritivo Técnico – Linha GCN)

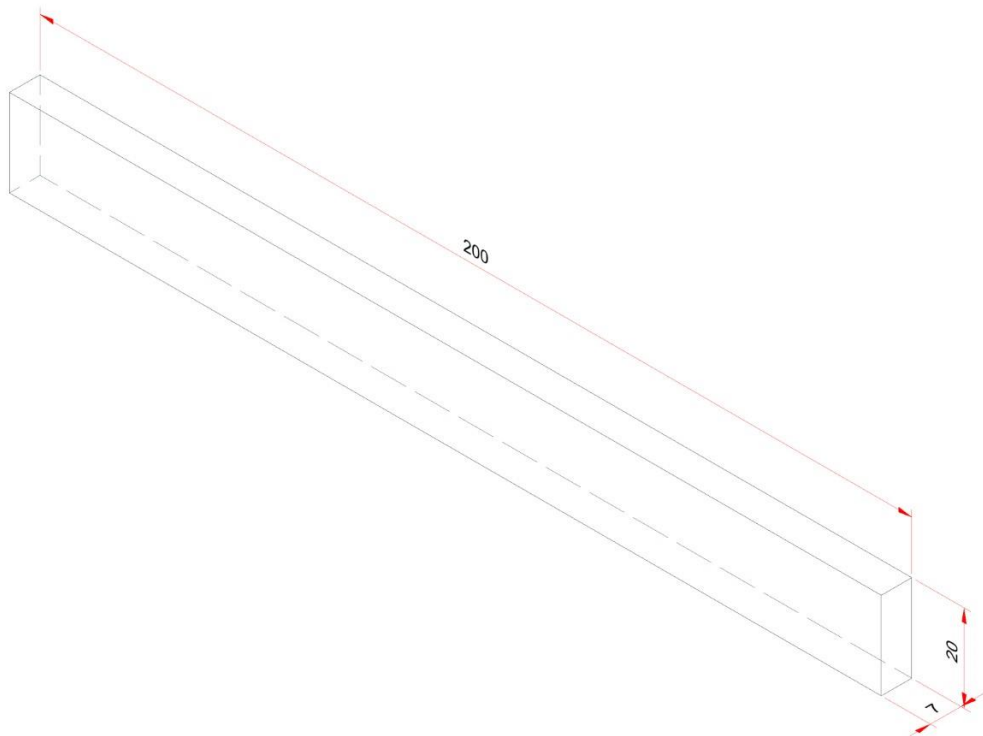
Figura 8 – Corpos de prova cortados



Fonte: Autoria própria, 2017.

O formato de cada de corpo de prova pode ser visto na Figura 9.

Figura 9 – Formato de corpo de prova



Fonte: Autoria própria, 2017.

4.2 PARÂMETROS DE LAMINAÇÃO

Com as equações presentes no referencial teórico deste trabalho, foram realizados cálculos para obter a redução máxima de espessura que o material poderia sofrer por passe. Inicialmente foi calculado o coeficiente de atrito com os valores para redução de espessura de 1mm, 2mm e 3mm, os valores de redução máxima de espessura encontrados para estes foram 1,98mm, 3,927mm e 5,83mm respectivamente. Desta maneira é possível afirmar que os passes realizados respeitavam os valores de redução de espessura permitida.

Para a laminação destes corpos de prova foi utilizada a laminadora presente no laboratório H5 da Universidade Tecnológica Federal do Paraná seguindo as normas vigentes dos laboratórios da Universidade. A laminadora que foi construída como trabalho de conclusão de curso de Anunciação et al (2016), é composta de dois rolos laminadores de diâmetro de 110 mm e comprimento de 280 mm contando com uma velocidade de laminação de 30 rpm ou 3,14 rad/s e esta pode ser utilizada apenas para a laminação de materiais não ferrosos.

Para a realização do processo de laminação foram reservados um total de 12 corpos de prova para a realização do trabalho sendo que 11 foram submetidos a diferentes parâmetros de laminação para que houvesse uma comparação final entre eles. Os parâmetros usados são descritos a seguir na Fig. 10.

Figura 10 – Parâmetros utilizados para laminação

AMOSTRA	Redução da espessura em mm por passe						Espessura final [mm]
	Passe 1	Passe 2	Passe 3	Passe 4	Passe 5	Passe 6	
1	1	*	*	*	*	*	6
2	1	1	*	*	*	*	5
3	1	1	1	*	*	*	4
4	1	1	1	1	*	*	3
5	1	1	1	1	1	*	2
6	1	1	1	1	1	1	1
7	2	*	*	*	*	*	5
8	2	2	*	*	*	*	3
9	2	2	2	*	*	*	1
10	3	*	*	*	*	*	4
11	3	3	*	*	*	*	1
12	CORPO SEM LAMINAÇÃO						7

Fonte: Autoria própria, 2017.

Para o cálculo da taxa de deformação utilizou-se a equação 8.

$$\dot{\epsilon} = \frac{\ln\left(\frac{h_0}{h_f}\right)}{h_0 - h_f} v \quad (8)$$

Levando em conta a taxa de deformação sofrida por cada corpo os valores são apresentados na Tab. 2.

Tabela 2 – Taxas de deformação dos corpos de prova

Corpo de prova	Taxa de laminação s ⁻¹						Média
	Passe 1	Passe 2	Passe 3	Passe 4	Passe 5	Passe 6	
1	3,58	*	*	*	*	*	3,58
2	3,58	4,23	*	*	*	*	3,91
3	3,58	4,23	5,18	*	*	*	4,33
4	3,58	4,23	5,18	6,68	*	*	4,92
5	3,58	4,23	5,18	6,68	9,42	*	5,82
6	3,58	4,23	5,18	6,68	9,42	16,1	7,53
7	5,51		*	*	*	*	5,51
8	5,51	8,37	*	*	*	*	6,94
10	7,47	*	*	*	*	*	7,47
12	Sem laminar						0

Fonte: Autoria própria, 2017.

Devido a ruptura de componentes da laminadora presente no laboratório h5 da Universidade Tecnológica Federal do Paraná não foi possível realizar a laminação dos corpos de prova de número 9 e 11, na realização do processo esta já apresentava ruídos não característicos que sugeriam possíveis avarias no equipamento.

Para a medição da área que da espessura final ao material conformado foram utilizados corpos de prova com 1mm de espessura cada afim de medir a distância entre os rolos compressores já que o sistema que controla a distância entre os rolos compressores é composta por dois parafusos (um em cada lado) M20 com passo de rosca de 2,5 mm apresentavam folgas consideráveis que poderiam causar menor precisão durante a conformação do material. Esta folga presente na laminadora também fez com que houvesse deformações indesejáveis nos corpos de prova.

Com os corpos de prova já laminados estes foram cortados na guilhotina para que seu comprimento final fosse de 150 mm para facilitar no processo de ensaio de tração posteriormente.

4.3 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

Os ensaios de dureza foram os primeiros ensaios a serem realizados devido ao fato de, além destes não serem destrutivos, sua realização anteriormente ao ensaio de tração garante um resultado mais preciso, já que o material não passou por mais transformações.

Para a realização destes ensaios foi utilizado a máquina de ensaio Rockwell B do laboratório h5 da Universidade Tecnológica Federal do Paraná onde cada amostra foi ensaiada pelo menos três vezes para que fosse obtido uma média aritmética simples da dureza do material. No ensaio os seguintes passos foram executados: o corpo de prova era aproximado do penetrador, o corpo de prova era submetido a uma pré-carga de 100 Kgf, era então aplicado a carga maior até o ponteiro do leitor parar, a carga era então retirada e a leitura realizada no leitor na escala de Rockwell B. O valor mais alto e o mais baixo dentre os medidos eram descartados para a realização da média.

Para a realização dos ensaios de tração foi utilizado a máquina ensaio de tração presente no laboratório H005 da Universidade Tecnológica Federal do Paraná seguindo as normas vigentes deste.

Na realização do primeiro ensaio do corpo de prova 12 (aquele que não foi laminado) foram utilizadas as garras que garantiam fixação de corpos de prova de 7 até 14 mm de espessura conforme a Fig. 11.

Figura 11 – Garra de fixação utilizada



Para o ensaio dos corpos de prova de número 1 a 11, a garra utilizada foi a de fixação de C.P. de 0 até 6 mm. Nos ensaios das peças que foram laminadas pôde-se notar que o formato irregular dos corpos de prova dificultou na fixação destes no equipamento de ensaio.

Os corpos de prova tinham comprimento de 150 mm e de acordo com dita a norma NBR 7549, que regulariza ensaios de tração para ligas de alumínio, em casos necessários a largura da cabeça e útil podem ser modificadas e até mesmo deixando-o com seus lados paralelos em todo seu comprimento. O corpo de prova retangular foi utilizado como consequência do fato de a espessura do material dificultava na fabricação do corpo de prova com o formato usual. (ABNT, 2002)

4.4 ANÁLISE METALOGRAFICA

A macrografia é um tipo de ensaio que busca a análise macroestrutural do material identificando possíveis defeitos no material a até mesmo a textura dos grãos do material. A análise da amostra pode ser feita a olho nu ou até mesmo com um aumento de 10 vezes. (Macrografia, 2017)

Realizada no laboratório de ensaios de materiais H005 da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, este ensaio consistiu em realizar um ataque químico nas amostras a fim de obter a textura dos grãos dos corpos de prova. A solução utilizada para a realização do ataque é um composto conhecido como Tuckers, nesta solução está presente: ácido clorídrico na proporção de 60%, ácido nítrico na proporção de 30%, ácido fluorídrico 5% e 5% de água destilada. (Principais reativos para macrorevelação, 2017)

Durante o ensaio, a amostra era imersa a frio por um tempo que variava de 5 a 10 segundos na solução Tuckers, o tempo de imersão variou pois cada amostra, principalmente as que foram mais laminadas, demoravam mais para a revelação dos resultados. A realização de todo o ensaio foi feita dentro da capela presente no laboratório e com utilização de luvas. Após a imersão as amostras foram limpas com algodão e os resultados foram verificados a olho nu.

4.5 ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICO PELO MÉTODO DE ARQUIMEDES

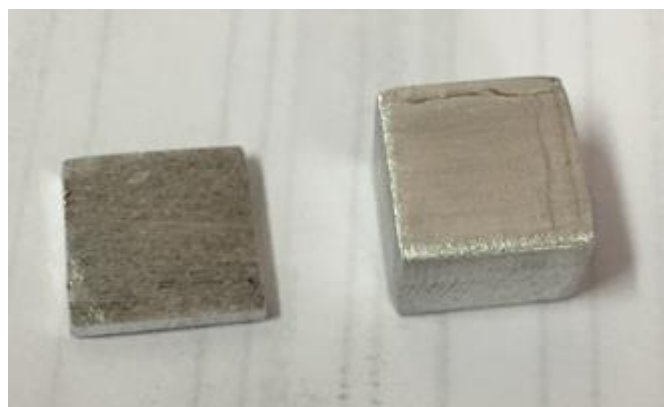
No laboratório de química da empresa VCI Brasil, situada na cidade de Bauru (SP), os experimentos do método de Arquimedes foram realizados com o corpo de prova de número 6, já que este foi o que sofreu a maior redução de espessura e o corpo de prova de número 12, aquele que não sofreu laminação, para a realização do ensaio seguiu-se a norma ASTM B-912.

Este método baseia-se em que um corpo imerso em um fluido gera empuxo, e este apresenta a mesma intensidade da massa de fluido deslocado, desta maneira com o a massa do corpo, massa do fluido deslocado e a densidade do fluido utilizado é possível calcular sua densidade.

Conforme estabelecido por Mazali (2017), o ensaio foi seguido de acordo com a metodologia proposta onde o primeiro passo foi medir a massa do corpo de prova, logo após foi montado o aparato para a medição da massa aparente e com a determinação da massa aparente e a temperatura da água pôde-se então calcular a densidade do corpo de prova.

O corpo de prova de número 12 foi cortado nas dimensões de 10.5x10.5x7 mm a fim de facilitar a imersão na água destilada e o corpo de prova de número 6 foi cortado nas dimensões de 10.5x10.5x1 mm com o mesmo objetivo. Os corpos de prova cortados podem ser visualizados na Fig. 12.

Figura 12 – Corpos de prova após corte

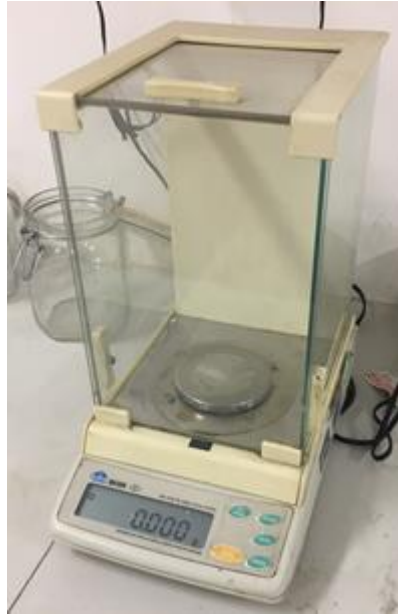


Fonte: Autoria própria, 2017.

A balança de precisão utilizada era do modelo BK500 da marca GEHAKA e tinha precisão de três casas decimais após a vírgula com capacidades de medição de 0,02 até 510g, de acordo a empresa o aparelho estava com as calibrações em dia.

A Fig. 13 mostra a balança e suas placas de vidro ao redor que protegem o material que está sendo pesado evitando interferências nos resultados.

Figura 13 – Balança de precisão



Fonte: Autoria própria.

A realização do ensaio foi realizada de tal maneira que o Becker com água ficasse suspenso, ou seja, não interferisse na medição de massa da balança e o suporte que suspenderia o corpo fosse apoiado na balança, porém este teria sua massa descontada na tara.

Cada medição foi realizada pelo menos três vezes e os valores anotados em uma planilha do software Excel, onde os cálculos foram também realizados. A fórmula utilizada para medir a densidade do corpo foi:

$$\rho = \left(\frac{M_c}{M_c - M_a} \right) * \rho_{H20} \quad (8)$$

Onde ρ é densidade, M_c a massa do corpo, M_a a massa aparente e ρ_{H20} a densidade da água para a temperatura que ela se encontra. A temperatura da água destilada era de 21 °C e sua densidade nesta temperatura de acordo com Mazali (2017) é de 0,9976 gramas por centímetros cúbicos.

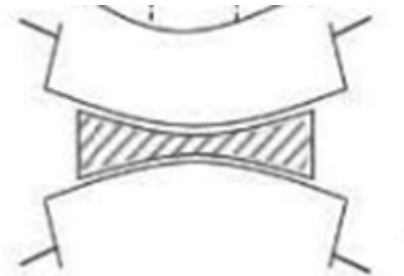
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na seção 5 deste trabalho são exibidos os resultados encontrados através da metodologia apresentada e estes são interpretados a fim de buscar conclusões sobre o assunto abordado. Durante o processo de laminação foram encontrados a presença de trincas nos corpos de prova laminados, o que influenciou negativamente nos resultados obtidos.

5.1 RESULTADOS DA LAMINAÇÃO

A laminadora utilizada nos experimentos apresentou algumas avarias que resultaram em produtos laminados com defeitos. O defeito que ficou explícito em alguns corpos de prova foi a presença de grandes trincas nas laterais, e até mesmo trinca menores, estas de acordo com Ferreira (2010) sugerem que houve um estiramento menos intenso do material nas laterais comparado com a região central, conforme pode ser explicitado na Fig. 14.

Figura 14 – Esquemático de deflexão negativa



Fonte: Ferreira, 2010.

No corpo de prova de número 6 é possível ver com maior clareza o efeito desta flexão negativa com as trincas laterais presentes na Fig. 15.

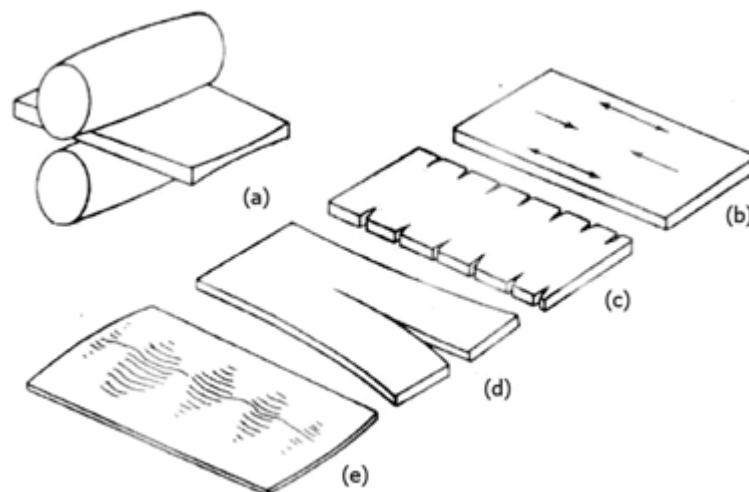
Figura 15 – Corpo de prova #6 com trincas laterais



Fonte: Autoria própria, 2017.

Esta deflexão negativa, também chamada de deflexão convexa, geram possíveis defeitos no material laminado, de acordo com a Fig. 16.

Figura 16 – Defeitos encontrados na laminação



Fonte: Laminação, 2017.

Os defeitos (d) e (c) ambos estavam presentes no corpo de prova de número 6, enquanto o defeito (c) e (e) encontrava-se presente no corpo de prova de número 4, 5, 6, 8 e 10. Todos os outros corpos de prova apresentaram o defeito (c).

Outro efeito decorrente da laminação foi o aumento da temperatura dos corpos de prova, principalmente quando houve maiores taxas de deformação. Quando a redução era de 1mm a temperatura das amostras se encontraram em torno de 35°C, com redução de 2mm a média de temperatura era em torno de 37°C, já os com redução de espessura em 3 mm as temperaturas ficaram em torno dos 43°C. Esse aumento de temperatura é devido ao atrito entre os rolos compressores e o material laminado e também de acordo com da Costa (2017) este aumento de temperatura é devido a energia interna decorrente da deformação plástica, onde 5% é retida e 95% dissipada em forma de calor.

Outro defeito decorrente da laminação que ocorreu foi o empenamento dos corpos de prova que de acordo com Reis, Menezes e Moreira Filho (2007) é gerado pelo excesso em tensão interna na peça. O empenamento pode ser notado na Fig. 17.

Figura 17 – Empenamento do corpo de prova



Fonte: Autoria própria, 2017.

5.2 RESULTADOS DO ENSAIO DE DUREZA

Como apresentado no referencial teórico, a laminação interfere na dureza do material, logo nesta seção os resultados dos experimentos realizados são

discutidos e apresentados. Os resultados obtidos no ensaio de dureza Rockwell B são apresentados na Tab. 3. Na categoria dureza encontram-se as três medidas de valores de dureza que foram consideradas para a realização da média.

Tabela 3 – Dureza dos corpos de prova

Nº C.P.	1	2	3	4	5	6	7	8	10	12
Dureza	44,5	49,5	68	69	80	91	54	75	70	37
	40	52	64	64	81	84	58	75	68	38
	40	51	68	69	80	85	55	72	71	34
Média	41,5	50,83	66,67	67,33	80,33	86,67	55,66	74	69,67	36,33
Variância	4,5	0,5	5,333	8,33	0,33	14,33	4,33	3	2,33	0,5
D. padrão	2,12	0,71	2,31	2,89	0,58	3,79	2,08	1,73	1,53	0,71

Fonte: Autoria própria, 2017.

Algumas comparações importantes devem ser levadas em consideração para que os dados possam ser analisados mais precisamente, logo é necessário subdividir os corpos de prova para analisar os que ficaram com a mesma espessura final porem foram submetidos taxas de deformação diferentes e subdividir em outros três grupos: de acordo com suas taxas de deformação, sendo primeiro grupo os com taxa de deformação de 3,58 a 7,53 s⁻¹, o segundo grupo com 5,51 a 6,94 s⁻¹ e o terceiro grupo com taxa de deformação de 7,47 s⁻¹.

No primeiro grupo, os que sofreram passes de redução 1 mm de espessura os valores de dureza na escala Rockwell B podem ser visualizados na Tab. 4.

Tabela 4 – Dureza dos corpos de prova do grupo 1

Nº C.P.	12	1	2	3	4	5	6
Dureza	37	44,5	49,5	68	69	80	91
	38	40	52	64	64	81	84
	34	40	51	68	69	80	85
Média	36,3	41,5	50,83	66,67	67,33	80,33	86,67

Fonte: Autoria própria, 2017.

Analisando as médias nota-se que há um aumento de dureza de 12,45% entre os corpos de prova de número 12 e 1, 18,36% entre os corpos 1 e 2, aumento 23,75% entre os corpos de número 2 e 3, um aumento de cerca de 1% entre os corpos de número 3 e 4, um aumento de 16,18% entre os corpos de prova de número 4 e 5, e 7,3% entre os corpos de prova número 5 e 6.

Em linhas gerais a média aritmética simples entre as porcentagens apresentadas acima apresentam um aumento de dureza de 13,17% por passe, porém é interessante ressaltar que como alguns valores variaram de maneira significativa podendo exibir alguma adversidade na realização dos experimentos é cabível que se calcule também a mediana da porcentagem de aumento de dureza que são apresentadas acima, esta é de 14,32%.

No grupo 2, aqueles que sofreram passes de redução de espessura de 2 mm os valores de dureza na escala de Rockwell B são apresentados na Tab. 5.

Tabela 5 – Dureza dos corpos de prova do grupo 2

Nº C.P.	12	7	8
Dureza	37	54	75
	38	58	75
	34	55	72
Média	36,3	55,66	74

Fonte: Autoria própria, 2017.

Com os dados obtidos da Tabela 3 é possível afirmar que entre os corpos de prova 12 e 7 houve um aumento de dureza de 34,72% e entre os corpos de prova de número 7 e 8 houve um aumento de dureza de 24,78%. Nos levando a uma média de 29,75% de aumento de dureza por passe.

No grupo 3 com o corpo de prova de número 10 que foi submetido uma redução de espessura de 3 mm os dados obtidos são apresentados na Tab. 6.

Tabela 6 – Dureza dos corpos de prova do grupo 3

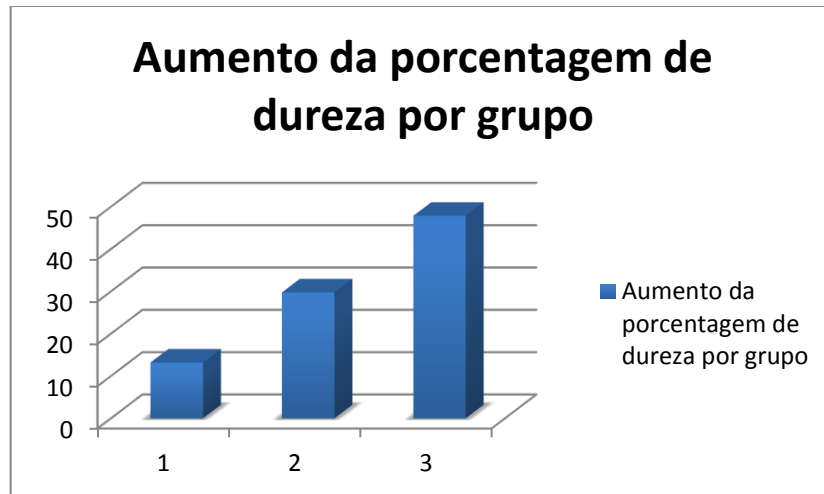
Nº C.P.	12	10
Dureza	37	70
	38	68
	34	71
Média	36,3	69,67

Fonte: Autoria própria, 2017.

Neste grupo, o aumento de dureza entre o corpo de prova de número 12 e o corpo de prova de número 10 foi de 47,85% que se mostrou amplamente significativo quando comparado a dos outros grupos.

Na comparação entre os grupos 1, 2 e 3 é possível afirmar que passes com maior redução de espessura do material aumentam significativamente a dureza deste devido ao seu maior encruamento, onde, dependendo de sua aplicação pode ser desejável ou indesejável. Os valores podem ser analisados no Gráfico 1.

Gráfico 1 – Aumento da porcentagem de dureza por grupo



Fonte: Autoria própria, 2017.

Na análise do Gráfico 1 de colunas é possível notar que o aumento da dureza é diretamente proporcional à maior taxa de deformação do material quando laminado.

Na segunda parte da análise será feita entre os 4 corpos de prova que apresentaram mesma espessura final. Como é possível notar na Fig. 9, os corpos de prova de número 2 e 7 apresentaram a mesma espessura final de 5 mm, porém o corpo de prova 2 passou por dois passes com redução de sua espessura de 1mm por passe e o corpo de prova 7 sofreu apenas um passe com redução de sua espessura em 2 mm. Na Tab. 7 são mostrados os valores de dureza que estes apresentaram.

Tabela 7 – Dureza dos corpos de prova #2 e #7

Nº C.P.	2	7
Dureza	49,5	54
	52	58
	51	55
Média	50,8	55,66

Fonte: Autoria própria, 2017.

É possível observar que quando o material é submetido a maiores taxas de deformação este sofre maior encruamento neste caso o corpo de prova de número 7 apresenta uma dureza de 8,68% maior que o corpo de prova 2.

Entre os corpos de prova 4 e 8, onde ambos apresentam espessura final de 3 mm e 4 sofreu um total de 4 passes com redução de espessura de 1 mm por passe e 8 sofre apenas dois passes com redução de espessura de 2 mm por passe, suas durezas podem ser observadas na Tab. 8.

Tabela 8 – Dureza dos corpos de prova #4 e #8

Nº C.P.	4	8
Dureza	69	75
	64	75
	69	72
Média	67,3	74

Fonte: Autoria própria, 2017.

Novamente é possível concluir que passes com maior redução de espessura causam maior endurecimento no material, já que comparando o corpo de prova de número 4 com o número 8 existe um aumento de dureza de 9,01%.

Em linhas gerais pode-se notar o efeito da deformação plástica à frio no material aumenta significativamente sua dureza principalmente quando existe uma maior deformação plástica. Silva (1993) explica tal efeito com o fato de quanto maior a redução de espessura maior será o seu encruamento, que é causado por um aumento de densidade dos defeitos cristalinos.

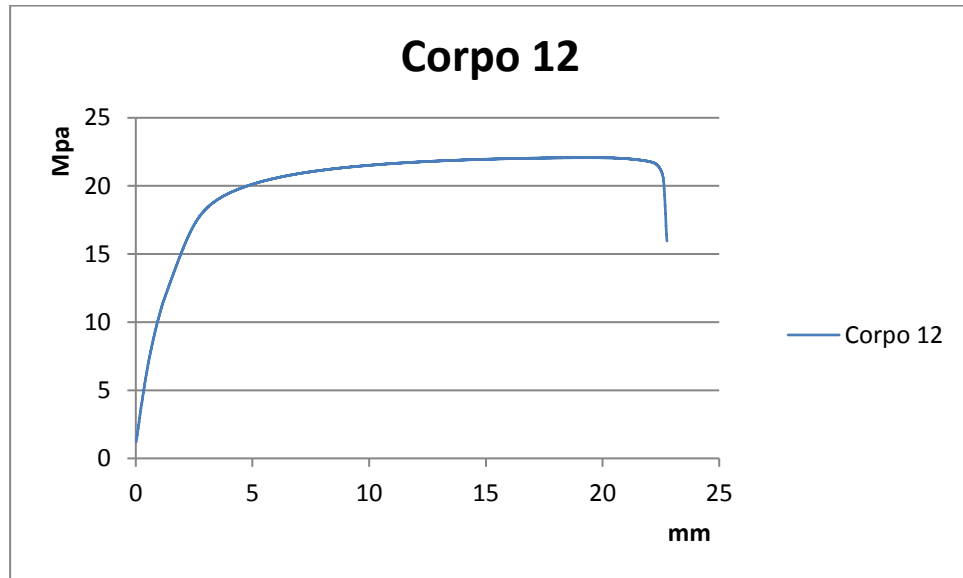
Outra análise que se torna plausível neste trabalho é o fato da dureza do material presente na literatura, 32 HRB, é cerca de 58% menor que o valor aferido na amostra de número 12, cerca de 77 HB (36,33 HRB) o que sugere que a amostra inicial já se encontrava previamente encruada, provavelmente causada por efeitos da própria laminação e resfriamento rápido do alumínio.

5.3 RESULTADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO

Com objetivo de analisar a ductilidade, ensaios de tração foram realizados. Outros resultados importantes que podem ser extraídos destes ensaios são os limites

de escoamento, limite de resistência a tração e a tensão de ruptura. Os dados do corpo 12 são extraídos do Gráfico 2.

Gráfico 2 – Diagrama de tração do corpo de prova #12



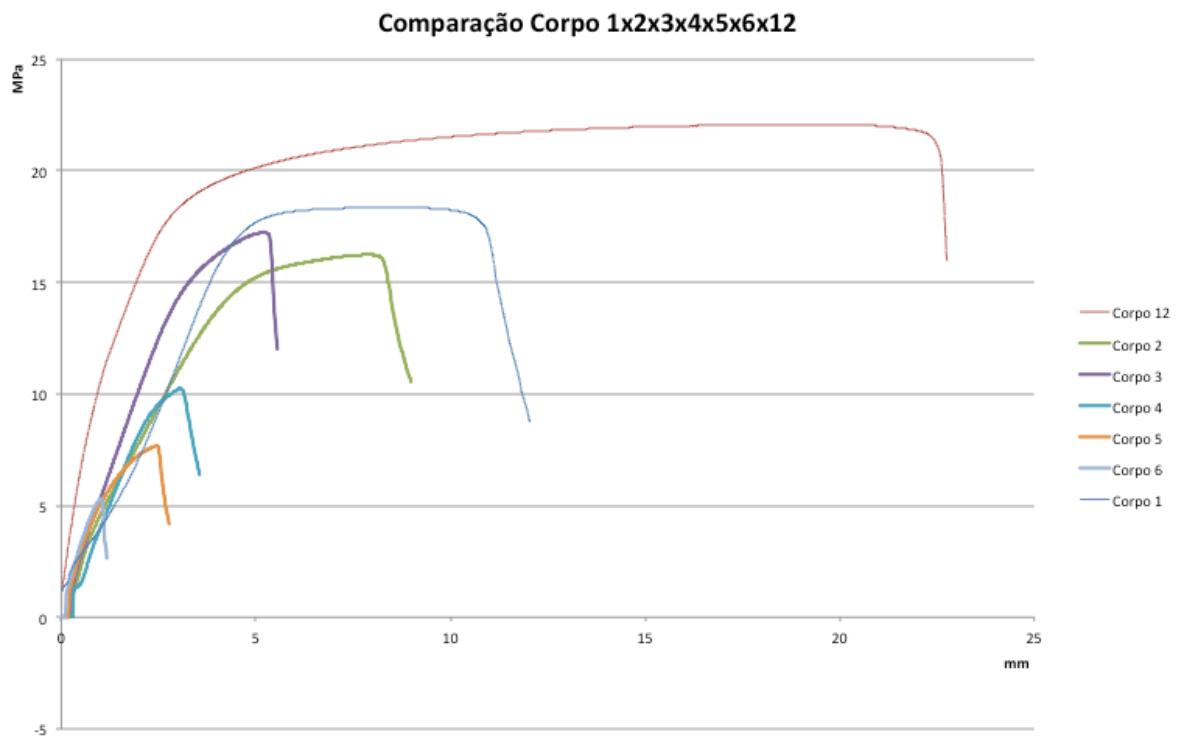
Fonte: Autoria própria, 2017.

O corpo de prova 12 apresentou limite de resistência a tração de 22,075 MPa, limite de escoamento de cerca de 17,25 Mpa e tensão de ruptura de 19,43 Mpa. Os valores encontrados se apresentam menores que os presentes na literatura, podendo já sugerir possíveis efeitos de processos anteriores no material. Sendo interessante a consideração de que a realização de um tratamento térmico de recozimento tivesse sido efetuada antes da laminação do material, já que esta é recomendada prévia a trabalhos a frio. (Tratamentos térmicos para ligas de alumínio, 2017)

Nestes testes as análises serão feitas de tal forma que, corpos de prova do mesmo grupo sejam comparados, bem como corpos de prova com parâmetros de laminação diferente e mesma espessura final sejam também contratados. Sendo o primeiro grupo os corpos de prova de número 1 ao 6 e o corpo de prova 12, o segundo grupo compreendido pelos corpos de prova de número 7, 8 e 12 e o terceiro grupo compreendido pelos corpos de prova 12 e 10. Os corpos de prova com mesma espessura final são os de número 2 e 7 e os corpos 4 e 8.

No primeiro grupo os dados obtidos nos ensaios de tração estão apresentados nos Gráfico 3 onde as curvas foram plotadas e sobrepostas para que a visualização fosse melhor compreendida.

Gráfico 3 – Comparação dos diagramas de tração do grupo 1



Fonte: Autoria própria, 2017.

Como é possível notar a cada passe de redução de espessura que o corpo de prova sofria suas propriedades mecânicas eram cada vez mais alteradas. Porém com o experimento realizado notou-se a diminuição gradativa do limite de resistência a tração, limite de escoamento bem como a diminuição da tensão de ruptura o que contradiz o que está na literatura. Este acontecimento, porém, deu-se ao fato de quando laminado o material apresentou trincas em suas bordas e pequenas trincas na sua superfície, interferindo negativamente nos resultados que se esperavam obter.

Algo, porém, que pode ser confirmado pela literatura foi a redução da ductilidade do material conforme este era passado por maior deformação plástica. Portanto, pode-se constatar que o fenômeno de encruamento ocorreu; porém, a quantidade de trincas que foi gerada na laminação não permitiu que este fosse constatado através do ensaio de tração.

Na Tab. 9 constam os dados dos corpos de prova 1 ao 6 e o corpo de prova de número 12.

Tabela 9 – Dados dos corpos de prova #1, #2, #3, #4, #5, #6 e #12

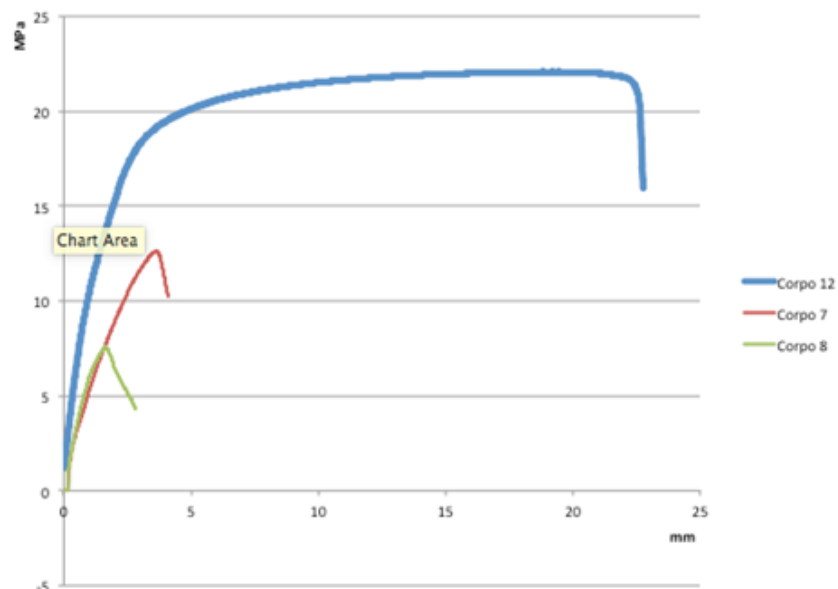
Corpo	12	1	2	3	4	5	6
Limite de resistência a tração [Mpa]	22,1	18,342	16,233	17,217	10,245	7,668	5,303
Deslocamento da mesa na ruptura [mm]	19,4	13,098	7,6	4,69	3,012	2,362	0,9857

Fonte: Autoria própria, 2017.

Nota-se que o valor do deslocamento da mesa na ruptura vai caindo de forma gradativa, logo a porcentagem de sua redução é de 32,55% no corpo 1, 60,87% no corpo 2, 75,85% no corpo 3, 84,49% no corpo 4, 87,84% no corpo 5 e 94,92% no corpo 6. O mesmo fenômeno é notado com o limite de resistência a tração, porém como já explanado anteriormente, de acordo com a literatura isto não deveria acontecer, somente aconteceu devido a presença de trincas nos corpos de prova laminados.

Quando comparado os corpos de prova do segundo grupo, pode-se notar que estes apresentam comportamento similar aos do primeiro grupo, conforme exposto no Gráfico 4.

Gráfico 4 – Comparação dos diagramas de tração do grupo 2



Fonte: Autoria própria, 2017.

O que pode ser extraído Gráfico 4 é que em comparação com passes de diminuição de espessura de 1 mm (grupo 1) com o de diminuição de 2 mm (grupo 2) é que no segundo as propriedades mecânicas de ductilidade e resistência a tração caíram de forma mais bruscas, como pode ser observado na Tab. 10.

Tabela 10 – Dados dos corpos de prova do grupo 2

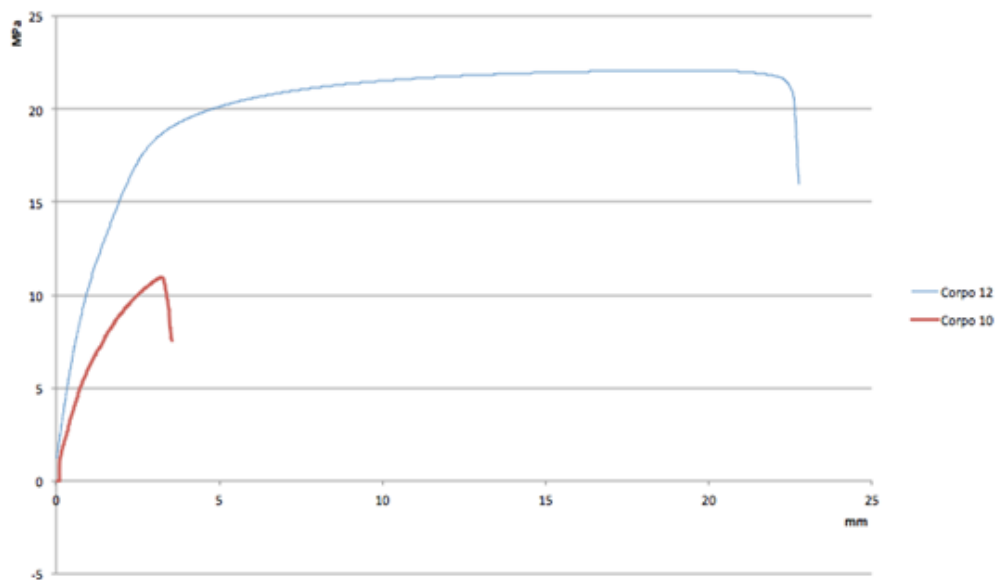
Corpo	12	7	8
Limite de resistência a tração [Mpa]	22,1	12,611	7,579
Deslocamento da mesa na ruptura [mm]	19,4	3,5	2,403

Fonte: Autoria própria, 2017.

Com apenas um passe com redução de 2 mm na sua espessura o corpo de prova 7 o deslocamento da mesa caiu em 81,98% e por conta do surgimento de trincas o limite de resistência a tração caiu em 42,97%. O corpo de prova 8 com redução de 4 mm em sua espessura, sendo estes dois passes de 2mm cada, apresentou uma diminuição de 87,63% no deslocamento da mesa e também devido ao surgimento de trincas no corpo de prova seu limite de resistência a tração caiu em 65,67%.

No grupo 3 os resultados obtidos dos ensaios de tração são apresentados no Gráfico 5.

Gráfico 5 – Comparação dos diagramas de tração do grupo 3



Fonte: Autoria própria, 2017.

Como pode ser notado no gráfico anterior, com uma diminuição de espessura de 3 mm em um passe, a ductilidade do material cai bruscamente e devido a falhas na laminação seu limite de resistência a tração caiu também. Os valores

contidos no gráfico do deslocamento da mesa e limite de resistência a tração podem ser também encontrados com maior precisão na Tab. 11.

Tabela 11 – Dados dos corpos de prova do grupo 3

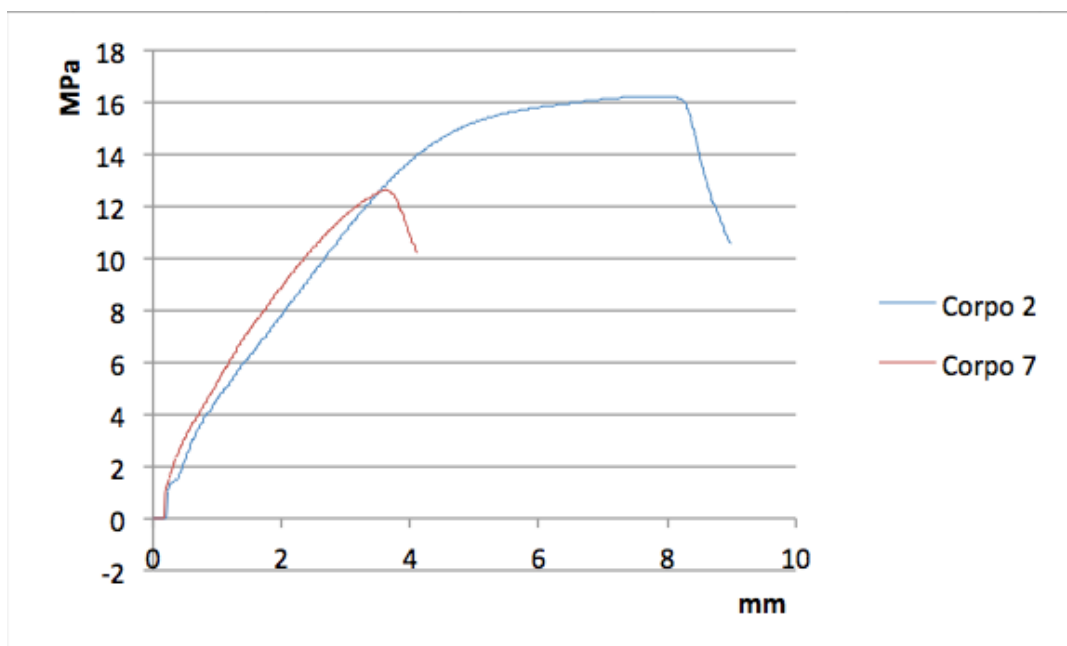
Corpo	12	10
Limite de resistência a tração [Mpa]	22,1	10,963
Deslocamento da mesa na ruptura [mm]	19,4	3,007

Fonte: Autoria própria, 2017.

Pode-se notar que o deslocamento da mesa cai em 84,52% e novamente por falhas e presença de trincas no processo de laminação o limite de resistência a tração caiu também em 50,34%.

Quanto aos corpos de prova que apresentam a mesma espessura final com parâmetros diferentes de laminação os corpos de prova de número 2 e 7 apresentaram os resultados do ensaio de tração expostos no Gráfico 6.

Gráfico 6 – Comparação dos diagramas de tração dos corpos de prova #2 e #7

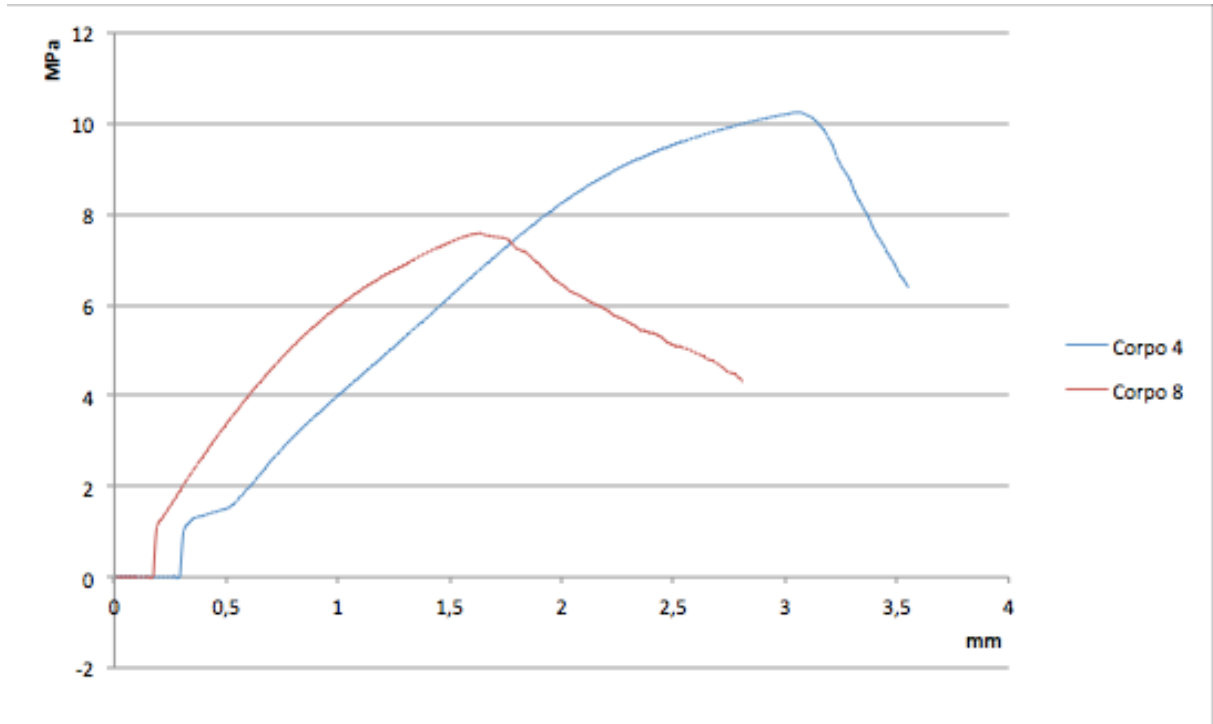


Fonte: Autoria própria, 2017.

É possível notar que o corpo de prova de número 2, aquele que foi submetido a passes com menores redução de espessura apresenta-se mais dúctil. Quanto ao limite de resistência a tração, o corpo de número 7 apresenta um valor menor, isso devido ao surgimento de trincas maiores na laminação deste.

Entre os corpos de prova de número 4 e 8 os dados obtidos no ensaio de tração podem ser visualizados no Gráfico 7.

Gráfico 7 – Comparação dos diagramas de tração dos corpos de prova #4 e #8

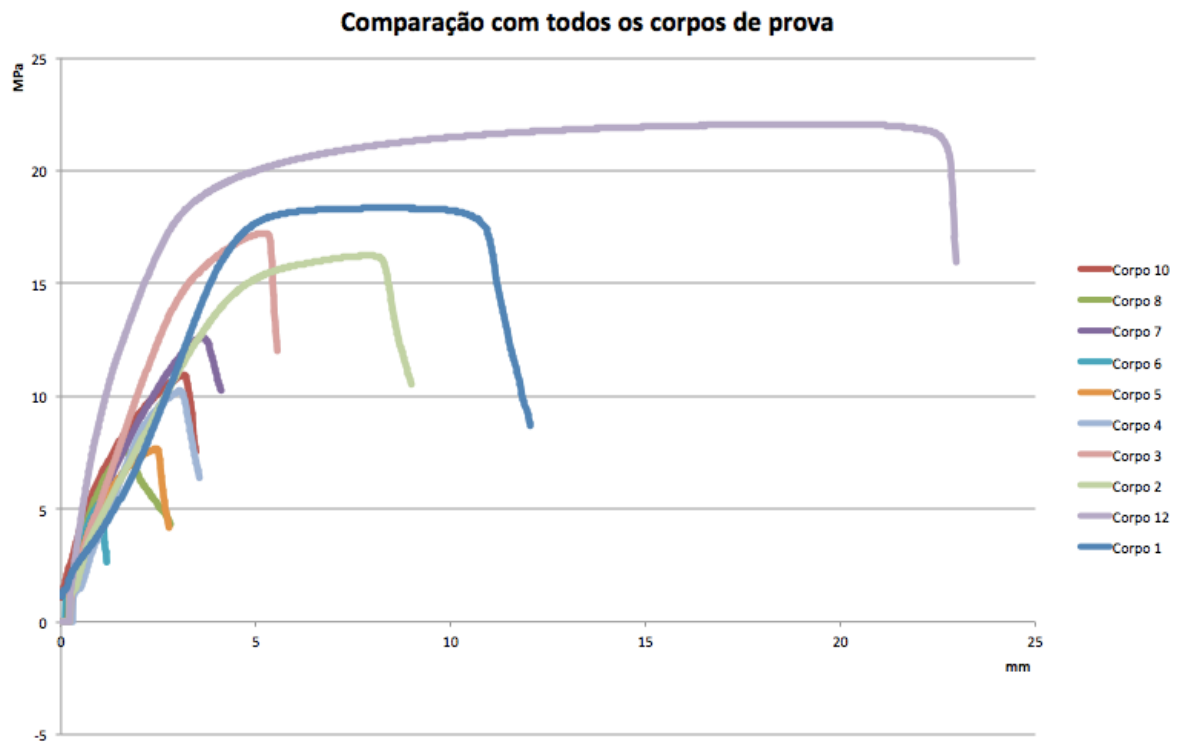


Fonte: Autoria própria, 2017.

O mesmo ocorrido nos corpos de número 2 e 7 pode ser observado nos corpos de prova 4 e 8. Apesar de ambos apresentarem a mesma espessura final, o corpo de prova 4 apresenta-se mais dúctil devido ao fato deste sofrer menores taxas de deformação.

E de maneira geral pode-se observar que os corpos de prova laminados diminuíram sua ductilidade devido ao encruamento que pôde ser visto através do ensaio de dureza e devido ao surgimento de trincas o limite de resistência a tração também foi reduzido conforme é mostrado no Gráfico 8.

Gráfico 8 – Comparação dos diagramas de tração de todos os corpos de prova



Fonte: Autoria própria, 2017.

5.4 RESULTADOS DO ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA PELO MÉTODO DE ARQUIMEDES

Com a metodologia seguida obteve-se os resultados para o corpo de prova de número seis que podem ser visualizados na Tab. 12.

Tabela 12 – Resultados do método de arquimedes para corpo de prova #6

Corpo de prova 12	Peso aparente [g]	Massa [g]	Densidade	Média
Teste 1	0,276	0,437	2,706142857	2,68546615
Teste 2	0,274	0,437	2,67293865	
Teste 3	0,276	0,437	2,706142857	
Teste 4	0,273	0,437	2,656640244	

Fonte: Autoria própria, 2017.

Os resultados da Tab. 12 mostraram-se cerca de 1% menor que a literatura.

Na tabela 13 encontram-se os resultados do corpo de prova do número doze

Tabela 13 – Resultados do método de arquimedes para corpo de prova #12

Corpo de prova 12	Peso aparente [g]	Massa [g]	Densidade	Média
Teste 1	1,268	2,007	2,70768	2,70951918
Teste 2	1,268	2,007	2,71	
Teste 3	1,268	2,007	2,71	
Teste 4	1,268	2,007	2,7114	

Fonte: Autoria própria, 2017.

Os resultados da Tab. 13 apresentam-se similares à literatura, não apontando avarias no material.

5.5 RESULTADOS DO ENSAIO METALOGRAFICO

Os corpos de prova de número 6, 8, 10 e 12 foram ensaiados a fim de encontrar a textura dos grãos após o processo de laminação bem como da amostra inicial.

Os resultados encontrados na amostra de número 6 são mostradas na Fig. 18.

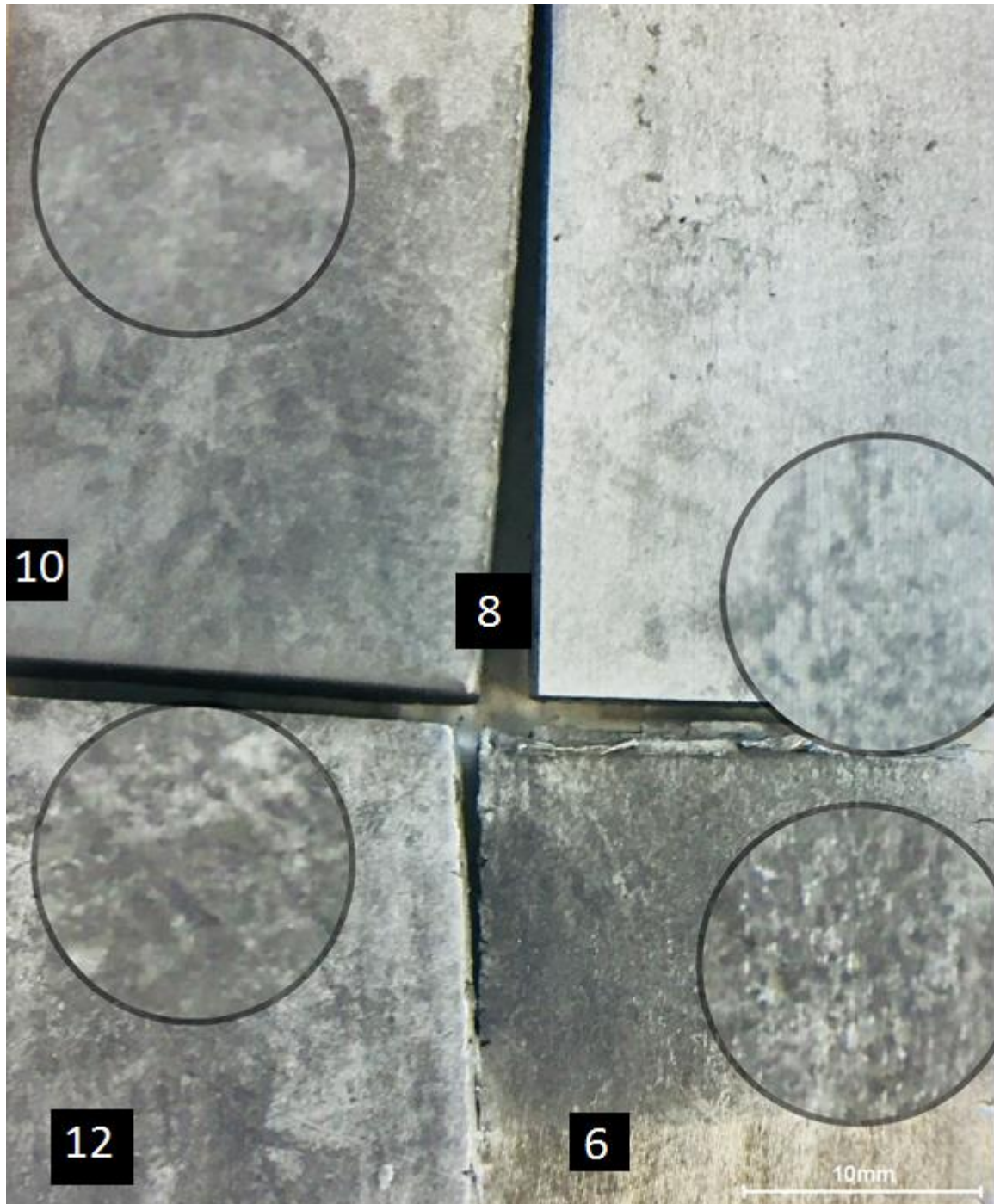
Figura 18 – Textura dos grãos do corpo de prova #6



Fonte: Autoria própria, 2017.

Uma comparação geral entre as quatro amostras testadas é exibida na Fig. 19.

Figura 19 – Comparação das texturas dos grãos dos corpos de prova #6, #8, #10 e #12



Fonte: Autoria própria, 2017.

Na figura acima, a lupa virtual nos dá um aumento da imagem em 5 vezes para melhor visualização dos resultados. Com a comparação das quatro amostras é possível notar que quanto maior a taxa de deformação o corpo de prova sofreu maior

o sentido preferencial dos grãos na textura dos grãos. Este sentido preferencial pode ser visto na literatura por Rodrigues e Martins (2005).

6 CONCLUSÃO

O desenvolvimento do trabalho possibilitou uma análise de como diferentes taxas de deformação, propriedades mecânicas e macroestrutura da liga de alumínio 1100 com o objetivo de avaliar a influência da taxa de deformação na laminação nas suas propriedades mecânicas.

No que diz respeito à dureza, foi possível constatar o encruamento causado pelo trabalho a frio, a ponto desta ser aumentada em até cerca 138%. Ainda foi possível constatar que os corpos de prova com a mesma espessura final que sofreram taxas de deformação maiores apresentaram durezas que variavam de 8 a 9 % maiores comparados com os que passaram por taxas de deformação menores. É que somente um passe de laminação com uma alta taxa de deformação pode aumentar a dureza da liga em cerca de 50%.

Outro ponto que pôde ser constatado neste trabalho é a importância do laminador no resultado do material laminado, já que possíveis defeitos podem ocorrer devido a avarias no equipamento utilizado e também a parâmetros incorretos de laminação.

Quanto a ductilidade do material foi possível constatar o encruamento por meio do ensaio de tração dado que no material que sofreu maiores taxas de deformação e passou por mais passes de laminação teve sua dureza aumentada e sua deformação, obtida no ensaio de tração, reduzida em cerca de 95%. Quanto aos materiais com a mesma espessura final e com diferentes taxas de laminação, foi possível notar que menores taxas de laminação podem garantir uma maior ductilidade, já que nos ensaios de tração, a deformação mostrou-se até 125% maior.

Na macroestrutura do material foi possível constatar o encruamento das amostras pois estas apresentaram uma textura de grãos mais alongadas ao decorrer do processo de laminação.

Outro aspecto que pode ser concluído é que um tratamento térmico de recozimento do material prévio à laminação poderia ter guiado a melhores resultados já que o material inicialmente já se apresentava com dureza maior que a literatura e ainda foi submetido a trabalho a frio.

É possível concluir, ainda, que este trabalho apresenta uma linha de pesquisa extremamente extensa e que o número de corpos de prova testado não

apresenta um alto poder de significância, logo este trabalho poderá servir como um piloto para que esta linha de pesquisa seja seguida.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7549**: Alumínio e suas ligas - Ensaio de tração de produtos dúcteis e fundidos. Rio de Janeiro, 2002. 17 p.

ALVES PINTO, E. **Metalurgia II**. 1. ed. [s.l.: s.n.].

ANK DE MORAIS, W. **Conformação plástica dos metais**. 1. ed. Santos: [s.n.].

ANUNCIAÇÃO JUNIOR, A. Et al. **Projeto e execução de laminador de bancada para materiais não ferrosos**. Graduação. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

All About Aluminium. Disponível em: <<http://www.aluminiumleader.com/>>. Acesso em: 23 abr. 2017.

CORDEIRO, H. Miranda, **Apostila Processos de Fabricação**, Universidade Federal do Ceará 2012.

DA COSTA, ELEANI MARIA. Propriedades dos metais deformados plasticamente. In: [s.l.:s.n.], 2017

DAS, S. et al. **Effect of the rolling speed on microstructural and mechanical properties of aluminum–magnesium alloys prepared by twin roll casting**. Materials & Design, v. 31, n. 3, p. 1633-1638, 2010.

Descritivo técnico – Linha GCN . Callmaq. Disponível em: http://callmaq.com/attachments/File/Descritivo_LT11_GC�.pdf . Acesso em: 24 de Out. 2017

DIETER, GE (1986). **Mechanical Metallurgy**. EUA: McGraw-Hill

ESSEL (2017), . **Dureza Rockwell**. [online]. Disponível em: <http://essel.com.br/cursos/material/01/EnsaioMateriais/ensa12.pdf> [Acessado: 16 de Outubro de 2017]

FERREIRA, Ricardo Artur Sanguinetti. **Conformação plástica: Fundamentos Metalúrgicos e mecânicos**. 2. ed. Recife: Universitária da Ufpe, 2010. p. 245

Laminação. Disponível em: <<http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM262/Material%20Aulas/9%20-%20Laminacao.pdf>>. Acesso em: 4 nov. 2017.

KRELLING, A. **Conformação Mecânica**. 1. ed. Joenville: [s.n.].

LEE, S. et al. **Microstructures and mechanical properties of 6061 aluminum alloy processed by accumulative roll-bonding**. Materials Science and Engineering: A, v. 325, n. 1-2, p. 228-235, 2002.

LENARD, J. **Primer on flat rolling**, second edition. Tradução . 1. ed. Kidlington, Oxford, UK: Elsevier, 2014.

Macrografia. Infopedia.pt. Disponível em: <[https://www.infopedia.pt/\\$macrografia](https://www.infopedia.pt/$macrografia)>. Acesso em: 2 nov. 2017.

MAZALLI, I. O. (2017). Determinação da densidade de sólidos pelo método de Arquimedes. [online] Disponível em: http://lqes.iqm.unicamp.br/images/vivencia_lqes_meprotec_densidade_arquimedes.pdf [Acessado em 16 de Outubro de 2017]

Principais reativos para macro-revelação. USP. Disponível em: <http://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/6495737/LOM3046/reagentes_macrografiano.pdf>. Acesso em: 2 nov. 2017.

Propriedades da liga de Alumínio 1100. Disponível em: <http://www.imperiodosmetais.com.br/downloads/download_ficha_tecnica/aluminio/1100.pdf>. Acesso em: 18 maio. 2017.

REIS, A. C., MENEZES, M. A. MOREIRA FILHO, L. A. Finite Element Analysis of Warpage in Laminated Aluminium Alloy Plates for Machining of Primary Aeronautic Parts. AIP Conference Proceedings, 2007.

RODRIGUES, J.; MARTINS, P. Tecnologia Mecânica – **Tecnologia da Deformação Plástica**. Vol II Aplicações Industriais. Escolar editora, Lisboa, 2005.

SCHULER, L. **Metal forming handbook**. Tradução . 1. ed. Goppingen, Germany: Schuler Co., 2012.

SOUZA, S. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos**. 5. ed. São Paulo (SP): E. Blucher, 1982.

Sun Gui-Xun, et al. **Strain rate and cold rolling dependence of tensile strength and ductility in high nitrogen nickel-free austenitic stainless steel**. *Chinese Physics B*, 2017, 26(9): 096104

Tratamentos térmicos de ligas de alumínio. Disponível em: <<http://www.infomet.com.br/site/metais-e-ligas-conteudo-ler.php?codAssunto=57>>. Acesso em: 2 nov. 2017.