

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Luiz Alberto dos Santos

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS  
DE SOLDAGEM A LASER NA LIGA DE  
ALUMÍNIO 6XXX**

TAUBATÉ  
2017

**Luiz Alberto dos Santos**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS  
DE SOLDAGEM A LASER NA LIGA DE  
ALUMÍNIO 6XXX**

Monografia apresentada para a obtenção do título de Especialização em Engenharia de Soldagem do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté,

**Área de Concentração:** Engenharia Mecânica.  
**Orientador:** Prof. Msc. Ivair Alves dos Santos

**TAUBATÉ-SP  
2017**

**Ficha Catalográfica elaborada pelo SIBi – Sistema Integrado  
de Bibliotecas / UNITAU - Biblioteca das Engenharias**

S237e Luiz Alberto dos Santos  
Estudo da influência dos parâmetros de soldagem a laser  
na liga de alumínio 6XXX. / Luiz Alberto dos Santos - 2017.  
53f. : il; 30 cm.

Monografia (Especialização em Engenharia de Soldagem –  
Universidade de Taubaté. Departamento de Engenharia  
Mecânica, 2017  
Orientador: Prof. Msc. Ivair Alves dos Santos, Pró-reitoria  
de Pesquisa e Pós-Graduação.

1. Soldagem a laser. 2. Velocidade de soldagem. 3. Ligas  
de alumínio. I. Título

LUIZ ALBERTO DOS SANTOS

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM A LASER NA  
LIGA DE ALUMÍNIO 6XXX**

Monografia apresentada para a obtenção do título de Especialização em Engenharia de Soldagem do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.  
**Área de Concentração:** Engenharia Mecânica.

**Monografia aprovada em 28/07/2017**

**BANCA EXAMINADORA**

Prof. Msc. Ivair Alves dos Santos **Instituição:** Universidade de Taubaté

Assinatura: \_\_\_\_\_

Prof. Msc. Fábio Henrique F. Santejani **Instituição:** Universidade de Taubaté

Assinatura: \_\_\_\_\_

Dedico este trabalho, com muito carinho a minha família e aos meus pais Isaura e Henrique (*in memoriam*)

A minha esposa Daniela Maria e ao meu filho Henrique Aquino Lourenço dos Santos meu maior presente de Deus.

## AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus que permitiu que tudo isso acontecesse, por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades ao longo desses anos e aos meus familiares, pelo amor, incentivo e apoio, em especial minha mãe Isaura e ao meu Pai Henrique (*in memoriam*) pois sempre me incentivaram a estudar e sempre adquirir conhecimento. Agradeço aos meus irmãos Diego e Renato que sempre me ajudaram nesta batalha primeiramente na faculdade e agora no curso de soldagem. Agradeço imensamente a minha esposa Daniela pelo apoio e incentivo nos dias e noites de estudos. Nos meus agradecimentos coloco também o meu filho Henrique, o presente mais valioso que recebi de Deus, que nos encanta com sua serenidade alegria.

Agradeço a instituição UNITAU pela oportunidade em fazer o curso e por me proporcionar um novo horizonte com novas metas.

A todos os meus professores que acreditaram diretamente ou indiretamente que foram tão importantes para me incentivar a estudar e adquirir mais conhecimento sobre soldagem. Agradeço em particular ao meu orientador o professor Ivair Alves dos Santos que acreditou e incentivou neste trabalho desde o primeiro momento.

Agradeço também a todos os meus amigos pelas alegrias, carinho, paciência que fizeram parte da minha formação e, por fim, aqueles que estiveram de alguma forma próxima a mim.

## RESUMO

As ligas de alumínio possuem uma grande versatilidade nas suas aplicações devido a suas excelentes propriedades como, por exemplo, o baixo peso específico, excelente resistência a corrosão, excelente conformabilidade, alta resistência mecânica e boa soldabilidade. As ligas de alumínio podem ser usadas nas variadas aplicações como, nas indústrias alimentícia, farmacêutica, automotiva, aeronáutica e construção civil. Este fato, mostra que as ligas de alumínio são o segundo material mais utilizado na indústria perdendo somente para o aço. A soldagem é um processo de fabricação que permite a união de materiais e, desta forma, simplificando o projeto e diminuindo custos na operação. A soldagem a laser é chamada de processo de elevada energia, pois a energia a utilizada para fusão da amostra para permitir a união da peça é elevada, porém a o rendimento da energia utilizada para união da peça é baixo e possui elevado custo na implementação do processo de soldagem a laser. Porém, o processo de soldagem a laser possui baixa distorções na peça soldada, altas propriedades mecânicas da junta soldada e alta velocidade de execução da soldagem. A soldagem da liga de alumínio da série 6XXX que tem na sua composição química da liga silício e magnésio possui excelente soldabilidade, pois a liga apresenta propriedades mecânicas excelentes após o processo de soldagem e tratamento térmico de precipitação na liga.

Os resultados demonstram que conforme se aumenta a potência na soldagem a laser maior será a profundidade na solda na amostra, devido a elevada energia concentrada na amostra. Além disso, os resultados demonstram que a velocidade de deslocamento do laser também influencia na penetração, pois novamente um menor tempo de absorção de energia acarretará numa amostra com menor penetração no cordão de solda e os resultados de dureza variam nas diferentes regiões soldada no material

O presente trabalho tem como objetivo verificar a influência dos parâmetros de soldagem do processo a laser, como: potência do laser aplicado sobre o material, velocidade de deslocamento do laser e o diâmetro do feixe. O estudo tem como foco de analisar os uma faixa de parâmetros do processo de soldagem a laser para a liga de alumínio 6061, pertencente à série 6XXX que possui além do alumínio (Al) na sua composição química o magnésio (Mg) e o silício (Si), essa liga apresenta boas propriedades. Como por exemplo: boa soldabilidade e alta resistência mecânica. Também é avaliada a dureza do material, sendo realizado um teste de dureza na região soldada, para obter o valor da dureza na junta.

**Palavras-chave:** Soldagem a Laser, Velocidade de Soldagem, Ligas de Alumínio

## ABSTRACT

Aluminum alloys have great versatility in their applications due to their excellent properties such as low specific density, excellent corrosion resistance, excellent formability, high mechanical strength and good weldability. Aluminum alloys can be used in a variety of applications, such as in the food, pharmaceutical, automotive, aeronautical and construction industries. This fact shows that aluminum alloys are the second most used material in the industry losing only to steel. Welding is a manufacturing process that allows the union of materials and, thus, simplifying the design and reducing costs in the operation. However, the laser welding process has low distortions, high mechanical weld joint properties and high weld speed. The welding of the aluminum alloy of the series 6XXX that has in its chemical composition of the alloy silicon and magnesium has excellent weldability, because the alloy presents excellent mechanical properties after the process of welding and heat treatment of precipitation in the alloy. The results show that as the power in the laser welding increases, the depth in the weld in the sample will be higher due to the high energy concentrated in the sample. Moreover, the results show that the laser displacement velocity also influences the penetration because again a shorter time of energy absorption will result in a sample with less penetration in the weld bead and the results of hardness vary in the different regions welded in the material. The present work aims to verify the influence of the welding parameters of the laser process, such as: laser power applied to the material, laser displacement velocity and beam diameter. The aim of this study is to analyze the parameters of the laser welding process for aluminum alloy 6061, belonging to the 6XXX series, which has, besides aluminum (Al) in its chemical composition, magnesium (Mg) and silicon (Si), this alloy has good properties. The hardness of the material is also evaluated, and a hardness test is performed in the welded region to obtain the hardness value of the joint

Keywords: Laser Welding, Welding Speed, Aluminum Alloys

**Keywords:** Laser Welding, Welding Speed, Aluminum Alloys

## **LISTA DE FIGURA**

<b>Figura 1</b> - Balanço de massa na produção de Alumínio (FONSECA; CARVALHO, 2000)...	16
<b>Figura 2</b> - Índice de reciclagem de alumínio no mundo (ABAL, 2013) .....	17
<b>Figura 3</b> - Custo da produção média mundial de alumínio primário no ano de 2009. ....	18
<b>Figura 4</b> - Consumo de Alumínio por segmento de Aplicação .....	18
<b>Figura 5</b> - Diagrama de Pourbaix simplificado do Alumínio ( SANTOS, 2011).....	20
<b>Figura 6</b> - Principais elementos de ligas e classificação das ligas de alumínio.....	22
<b>Figura 7</b> - Relação das concentrações de Magnésio e Silício para algumas ligas da série 6XXX ( MARTINS, 2008). ....	24
<b>Figura 8</b> - Diagrama de fases ternário da liga Al-Mg-Si (MARTINS, 2008) .....	25
<b>Figura 9</b> - a) Região do diagrama ternário Al-Mg-Si rico em Al. b) Diagrama pseudo-binário Al-Mg <sub>2</sub> Si ( MARTINS, 2008; ZHANG et al., 2001) .....	26
<b>Figura 10</b> - Solubilidade do Hidrogênio no alumínio.....	28
<b>Figura 11</b> - Fluxograma de atividade (FONTE: AUTOR) .....	31
<b>Figura 12</b> - Diagrama esquemático da estação de processamento de materiais com laser a fibra (CAPELLA, 2011) .....	32
<b>Figura 13</b> - Equipamento de Solda a Laser, com detalhe do cabeçote de Soldagem .....	33
<b>Figura 14</b> - Desenho esquemático da solda a laser realizada na liga de alumínio 6061 (FONTE: AUTOR).....	36
<b>Figura 15</b> - Seção transversal do cordão da amostra soldada a velocidade de soldagem de 100 mm/s e diâmetro de feixe de 100 µm dos processos; A) 1500 W (CP3); B) 1200 W (CP2) e C) 1000 W (CP1) (FONTE: AUTOR) .....	38
<b>Figura 16</b> - Seção transversal do cordão da amostra soldada a velocidade de soldagem de 75 mm/s e diâmetro de feixe de 100 µm dos processos; A) 1500 W (CP3); B) 1200 W (CP2) e C) 1000 W (CP1) (FONTE: AUTOR) .....	39
<b>Figura 17</b> - Seção transversal do cordão da amostra soldada a velocidade de soldagem de 50 mm/s e diâmetro de feixe de 100 µm dos processos; A) 1500 W (CP3); B) 1200 W (CP2) e C) 1000 W (CP1) (FONTE: AUTOR) .....	39
<b>Figura 18</b> - Seção transversal do cordão da amostra soldada com potência de 1000 W (CP1) e diâmetro de feixe de 100 µm dos processos; A) 50 mm/s; B) 75 mm/s e C) 100 mm/s (FONTE: AUTOR).....	40
<b>Figura 19</b> - Seção transversal do cordão da amostra soldada com potência de 1200 W (CP2) e diâmetro de feixe de 100 µm dos processos; A) 50 mm/s; B) 75 mm/s e C) 100 mm/s (FONTE: AUTOR).....	41
<b>Figura 20</b> - Seção transversal do cordão da amostra soldada com Potência de 1500 W (CP3) e diâmetro de feixe de 100 µm dos processos; A) 50 mm/s; B) 75 mm/s e C) 100 mm/s (FONTE: AUTOR).....	41
<b>Figura 21</b> - Relação da penetração com as velocidades na soldagem no alumínio.....	42
<b>Figura 22</b> - Relação da penetração com a potência na soldagem no alumínio.....	42
<b>Figura 23</b> - Análise de dureza Vicgkers das seções transversais de cordões de solda na amostra em diferentes condições experimentais - CP 1- 1000 W/100 µm .....	43
<b>Figura 24</b> - Dureza Vickers das seções transversais de cordões de solda na amostra em diferentes condições experimentais - CP 2- 1200 W/100 µm (FONTE: AUTOR).....	44
<b>Figura 25</b> - Dureza Vickers das seções transversais de cordões de solda na amostra em diferentes condições experimentais - CP 3- 1500 W/100 µm (FONTE: AUTOR).....	44
<b>Figura 26</b> - Relação da dureza com a diâmetro do feixe na soldagem no alumínio.....	45

<b>Figura 27</b> - Relação da dureza com a velocidade de soldagem na liga de alumínio AA6061 (FONTE: AUTOR).....	46
<b>Figura 28</b> - Microestrutura da liga de alumínio 6061 soldada a laser com potência de 800W e diâmetro de feixe de 100µm e velocidade de (a) 30 mm/s (b) 50 mm/s e (c) 75 mm/s (FONTE: AUTOR).....	47
<b>Figura 29</b> - Relação de profundidade após soldagem a laser na amostra com potência de 800W e diâmetro de feixe de 100µm e velocidade de 30 mm/s, 50 mm/s e 75 mm/s (FONTE: AUTOR).....	48
<b>Figura 30</b> - Microestrutura da liga de alumínio 6061 soldada a laser com potência de 800W e diâmetro de feixe de 168µm e velocidade de (a) 30 mm/s (b) 50 mm/s e (c) 75 mm/s. (FONTE: AUTOR).....	49
<b>Figura 31</b> - Relação de profundidade após soldagem a laser na amostra com potência de 800W e diâmetro de feixe de 168µm e velocidade de 30 mm/s, 50 mm/s e 75 mm/s (FONTE: AUTOR).....	49

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Comparação de Propriedade Físicas dos Metais (ABAL, 2007).....	19
<b>Tabela 2</b> - Classificação de ligas de alumínio ( MACKENZIE; TOTTEN, 2003).....	21
<b>Tabela 3</b> - Nomenclatura dos tratamentos térmicos para ligas de Alumínio.....	23
<b>Tabela 4</b> - Parâmetros da chapa 1 soldada a laser. (FONTE: AUTOR).....	33
<b>Tabela 5</b> - Parâmetros da chapa 2 soldada a laser. (FONTE: AUTOR).....	34
<b>Tabela 6</b> - Parâmetros da chapa 3 soldada a laser. (FONTE: AUTOR).....	34
<b>Tabela 7</b> - Parâmetros da chapa 4 soldada a laser. (FONTE: AUTOR).....	34
<b>Tabela 8</b> - Parâmetros da chapa 5 soldada a laser. (FONTE: AUTOR).....	35
<b>Tabela 9</b> - Parâmetros da chapa 6 soldada a laser. (FONTE: AUTOR).....	35

## **LISTA DE SIGLAS E SIMBOLOS**

ZTA – Zona Termicamente Afetada;

ABAL – Associação Brasileira do Alumínio;

$Al_2O_3$  - Óxido de alumínio;

IACS - Internacional Annealed Copper Standard;

LASER - Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation;

CBA - Companhia Brasileira de Alumínio;

IEAv / DCTA - Instituto Estudos Avançados / Departamento do Centro Tecnológico de Aeronáutica;

DEMAR-EEL – Departamento de Materiais Refratários / Escola de Engenharia de Lorena / Universidade de São Paulo;

CP – Corpo de Prova

## **Sumário**

1.	INTRODUÇÃO .....	15
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	16
2.1	Alumínio.....	16
2.2	Propriedade do alumínio .....	19
2.3	Classificação das ligas de alumínio .....	21
2.4	Nomenclatura dos tratamentos térmicos.....	22
2.5	Ligas de alumínio da série 6XXX.....	23
3.	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	31
3.1	Materiais.....	31
3.2	Fluxograma.....	31
3.3	Soldagem a Laser .....	32
3.4	Metalografia .....	36
3.5	Microscopia Óptica .....	36
3.6	Dureza .....	37
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	38
5.	CONCLUSÃO .....	51
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51

## 1. INTRODUÇÃO

Devido à versatilidade e algumas propriedades físicas que esse metal apresenta como, por exemplo: baixo peso específico, excelente resistência à corrosão, boa conformabilidade e alta resistência mecânica (ABAL, 2007) como resultado tem-se um metal que pode ser aplicado tanto na fabricação de uma simples lata para armazenamento de bebidas quanto peças para a indústria aeronáutica.

Entre todos os processos de união existentes, podemos citar a soldagem que pode ser definido com um processo de união de dois metais que pode ser dividido em duas categorias: os processos de soldagem por deformação e os processos de soldagem por fusão, sendo que estes processos podem ser realizados com ou sem a aplicação de pressão ou em conjunto com o metal de adição (OKUMURA; TANIGUCHI, 1982). O processo de soldagem permite unir desde pequenas peças até grandes estruturas, simplificando o trabalho gerando menor custo e obtendo bons resultados (MACHADO, 1996).

A soldagem possui grande versatilidade com isso uma enorme área de aplicação como, por exemplo: construção naval, indústria aeronáutica, tubulações entre outros. Atualmente existe mais de cinquenta processos de soldagens desde o mais simples até o mais sofisticado com a finalidade de atender a indústria (OKUMURA; TANIGUCHI, 1982).

A soldagem a laser é um processo de soldagem por fusão no qual permite aquecer e fundir qualquer tipo de material, porém é pouco utilizado devido ao seu alto custo (OLIVEIRA, 2010). No entanto este processo de soldagem apresenta grandes vantagens por ser um processo que utiliza feixes de luz em alta potência, apresentando como resultados uma ZTA (zona termicamente afetada) quase imperceptível, baixa distorções na peça soldada, altas propriedades mecânicas da junta soldada e alta velocidade de execução da soldagem (MACHADO, 1996).

O estudo será realizado para avaliar alguns parâmetros de soldagem na liga de alumínio 6061, que possui em sua composição química o silício, magnésio e alumínio. Essa liga é utilizada na indústria aeronáutica devido a algumas propriedades, como por exemplo: boa soldabilidade do material, alta resistência mecânica e a corrosão (FERRARI, 2008).

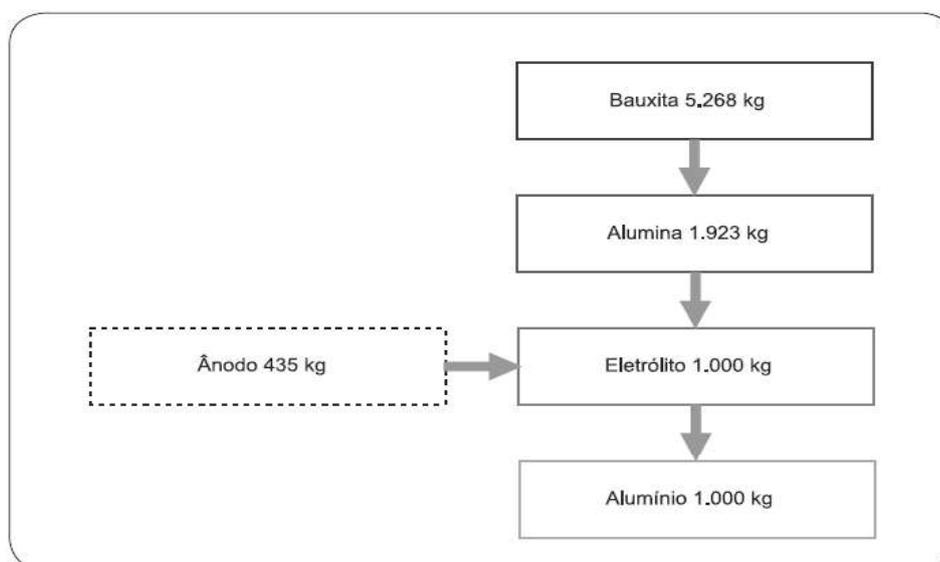
O objetivo deste trabalho visa verificar a influência dos parâmetros de soldagem à laser na microestrutura tais como a velocidade de soldagem, potência do laser de soldagem e diâmetro de feixe e avaliando dados referentes a penetração da solda e a dureza no material soldado em diferentes parâmetros de soldagem.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Alumínio

O alumínio é o terceiro elemento mais encontrado na crosta terrestre, sendo menor apenas que Oxigênio e Silício respectivamente. Suas propriedades, como leveza, alta condutividade elétrica, grande resistência a corrosão e baixo ponto de fusão, permitem que seja utilizado de forma extensiva para a produção de diversos itens (ABAL, 2007).

A obtenção na forma metálica do alumínio (Al) segue um processo que se inicia, com a mineração da bauxita, seguida do seu beneficiamento. Através de um processo chamado de Bayer, que utiliza produtos químicos para a extração de impurezas, a bauxita beneficiada origina um produto intermediário chamado de Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).



**Figura 1-** Balanço de massa na produção de Alumínio (FONSECA; CARVALHO, 2000)

A etapa final consiste em transformação da Alumina em Alumínio primário, na forma metálica, por meio de um processo denominado de Hall-Héroult (FONSECA; CARVALHO, 2000). Como regra geral, necessita-se de pouco mais de 5 kg de bauxita para produzir 1 kg de Alumínio, conforme mostra o balanço de massa esquemático na Figura 1.

Em 2009, a China foi a maior produtora de alumínio produzindo algo em torno de 13,65 milhões de toneladas. Seguida pela Rússia na segunda com 3,82 milhões de toneladas, e o

Canadá em terceiro, com 3,03 milhões de toneladas. O Brasil, apesar de possuir grandes reservas e ser produtor de alumina, não é um produtor significativo de alumínio, pois em 2009 o país produziu apenas 1,54 milhão de toneladas, sendo o sexto maior produtor (ABAL, 2012).

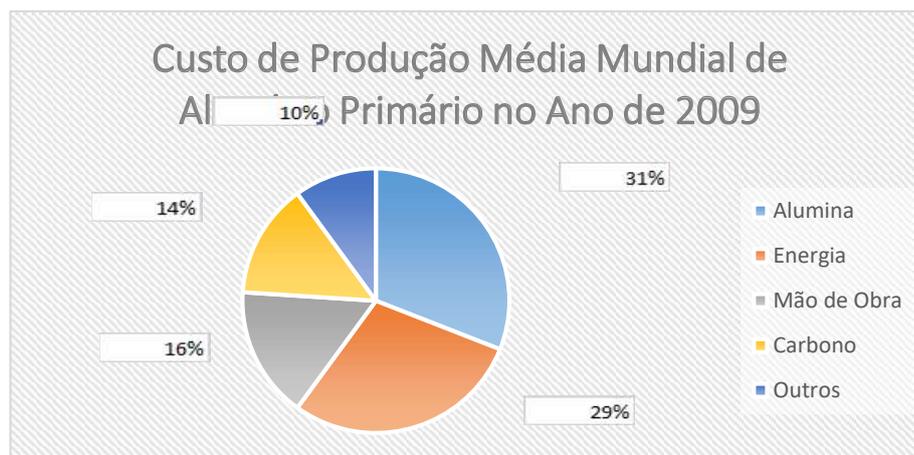
A reciclagem de alumínio no país é uma atividade muito antiga e até confunde com a implantação da indústria do alumínio. A aplicação do metal iniciou-se na década de 20, com os primeiros registros de produção de utensílios de alumínio no país, advindo da sucata importada de vários países. Já anos 90, com o início da produção das latas no Brasil, a reciclagem do metal foi intensificada, registrando volumes cada vez maiores. Essa é a grande vantagem do alumínio, que sai da cadeia depois de utilizado e pode ser reaplicado em diferentes segmentos, gerando ganhos para todo o ciclo (VASQUES, 2010).

De acordo com estudos publicados, a cada cem latas de alumínio fabricadas no país, 98 delas são recicladas, desta maneira, o setor de reciclagem de alumínio movimenta em torno de 1,8 bilhão de reais por ano no país (GLOBO, 2012).



**Figura 2** - Índice de reciclagem de alumínio no mundo (ABAL, 2013)

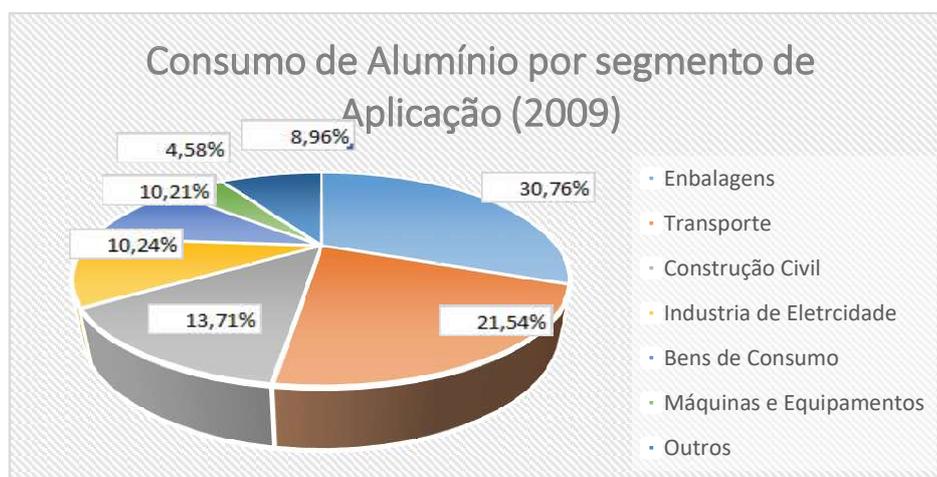
Uma grande vantagem da reciclagem do alumínio comparado a produção de alumínio primário é o consumo de energia elétrica na eletrólise. No Brasil, cerca de 6% da energia elétrica gerada é consumida indústria de alumínio primária. A média mundial do custo da energia elétrica em relação produção de alumínio primário está em torno de 29%, enquanto que no Brasil este valor gira na faixa de 35% do custo da produção (FONSECA; CARVALHO, 2000).



**Figura 3** - Custo da produção média mundial de alumínio primário no ano de 2009.  
( FONSECA; CARVALHO, 2000)

Por exemplo, a reciclagem de 267,1 mil toneladas de latas proporciona uma economia de 4.000 GWh ao país, número equivalente ao consumo residencial anual de 6,6 milhões de pessoas, em dois milhões de residências (ABAL, 2013).

A quantidade de alumínio aplicado nas indústrias é menor apenas que os aços, além disso, o alumínio é um material importante nas atividades econômicas como na indústria metalúrgica, aeronáutica, farmacêutica e alimentar. Por exemplo, na indústria automobilística os componentes de alumínio representam em média 8,6% do peso total dos veículos, já na indústria aeronáutica, cerca de 70% da estrutura dos aviões é composta deste material (ABAL, 2012) .



**Figura 4** - Consumo de Alumínio por segmento de Aplicação  
( FONSECA; CARVALHO, 2000)

## 2.2 Propriedade do alumínio

O alumínio possui massa específica de  $2,7 \text{ g/cm}^3$ , que é aproximadamente 35% da massa específica do aço e 30% do valor da massa específica do cobre. Esta característica é essencial na indústria de transportes, pois a menor densidade específica do alumínio representa menor consumo de combustível, menor desgaste, mais eficiência e capacidade de carga. Para o setor de alimentos, traz funcionalidade e praticidade para as embalagens, devido peso reduzido em relação a outros materiais (ABAL, 2007).

A elevada condutividade térmica e elétrica do alumínio é uma propriedade muito importante, pois o alumínio é aplicado em transmissões de energia elétrica e térmica. Um condutor elétrico de alumínio possui uma condutividade elétrica de 62% da IACS (Internacional Annealed Copper Standard), porém o cobre possui maior densidade específica e preço no mercado mundial. Por isso, o alumínio é muito utilizado pelo setor de fios e cabos (MACKENZIE; TOTTEN, 2003).

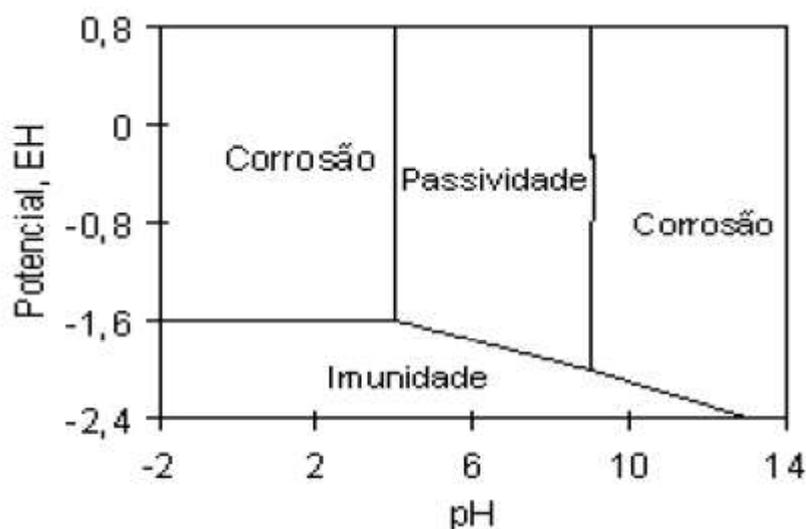
Já condutibilidade térmica do alumínio oferece um bom ambiente para aquecimento e arrefecimento. Trocadores e dissipadores de calor em alumínio são utilizados em larga escala nas indústrias alimentícia, automobilística, química, aeronáutica, petrolífera, etc. Para as embalagens e utensílios domésticos, essa característica confere ao alumínio a condição de melhor condutor térmico, o que na cozinha é extremamente importante (MACKENZIE; TOTTEN, 2003).

**Tabela 1** - Comparação de Propriedade Físicas dos Metais (ABAL, 2007)

Propriedade Física	Alumínio	Aço	Cobre
Densidade ( $\text{g/cm}^3$ )	2,7	7,9	8,9
Temperatura de fusão ( $^{\circ}\text{C}$ )	660	1537	1083
Módulo de Elasticidade (GPa)	70	205	110
Coefficiente dilatação Térmica ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )	$23 \cdot 10^{-6}$	$11,7 \cdot 10^{-6}$	$16,5 \cdot 10^{-6}$
Condutibilidade térmica ( $\text{cal/cm}^{\circ}\text{C}$ )	0,53	0,12	0,94
Condutibilidade elétrica (%IACS)	62	14	100

O alumínio e suas ligas apresentam corrosão em meio alcalino e ácido, a menos que o sistema apresente um pH entre 4 e 8,5 e, desta forma, haja a formação de uma camada passiva

entre a superfície do alumínio e o oxigênio da atmosfera originando o óxido chamado de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Caso o pH do sistema seja inferior a 4 ou superior a 8,5, a camada protetora perderá a característica passiva, devido à alta solubilidade da alumina em meios ácidos ou básicos, expondo o metal-base a corrosão (ROBERGE; PIERRE, 1999).



**Figura 5** - Diagrama de Pourbaix simplificado do Alumínio ( SANTOS, 2011)

A espessura da camada protetora pode variar em função da temperatura, ambiente e elementos de liga. Por exemplo, à temperatura ambiente a camada pode variar entre 2 a 3 nm, enquanto que em temperaturas em torno de 425° C a camada pode atingir 20 nm de espessura (ROBERGE; PIERRE, 1999).

A resistência mecânica do alumínio puro é algo em torno de 90 MPa, ou seja, este valor é baixo para determinadas aplicações. Desta forma, o metal necessita de uma combinação com outros metais para que haja o aumento da resistência mecânica e, conseqüentemente o aumento da aplicação industrial. Outra maneira para que haja um aumento na resistência mecânica é através de processo como endurecimento por encruamento ou precipitação (ABAL, 2013).

O alumínio é frequentemente aplicado em estocagem de substâncias inflamáveis ou explosivas (caminhões-tanque de transporte de combustíveis), porque o metal não produz faíscas. Além disso, o alumínio é impermeável à ação da umidade e do oxigênio, tornando a folha de alumínio um dos materiais mais versáteis no mercado de embalagens (ABAL, 2013).

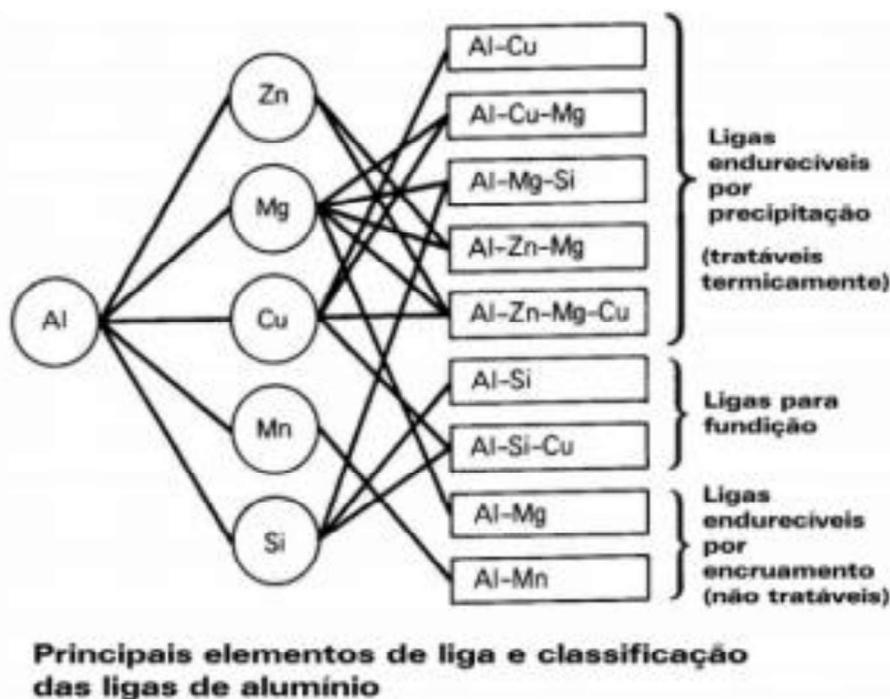
### 2.3 Classificação das ligas de alumínio

O alumínio puro possui excelente resistência corrosão, no entanto a sua resistência mecânica é muito baixa comparada a outros metais puros, desta forma, para aumentar a resistência mecânica das ligas a base de alumínio há necessidade de alteração na composição química, microestrutura, tratamentos térmicos, trabalho mecânicos (deformação plástica) (CALLISTER; WILEY, 2007). As ligas de alumínio para trabalho mecânico dividem-se em dois grupos: ligas para tratamento térmico (tratáveis) e ligas sem tratamento térmico (não tratáveis), conforme descrito na tabela 2.

**Tabela 2** - Classificação de ligas de alumínio ( MACKENZIE; TOTTEN, 2003)

<b>Ligas</b>	<b>Principais Elementos Químicos</b>
<b>1XXX</b>	Alumínio não ligado com no mínimo 99% de pureza
<b>2XXX</b>	Cobre (Cu)
<b>3XXX</b>	Manganês (Mn)
<b>4XXX</b>	Silício (Si)
<b>5XXX</b>	Magnésio (Mg)
<b>6XXX</b>	Magnésio (Mg) e Silício (Si)
<b>7XXX</b>	Zinco
<b>8XXX</b>	Outros elementos (Sn, Li, Fe, Cu, Mg)
<b>9XXX</b>	Série livre

As ligas de alumínio podem ser divididas em duas categorias: ligas de alumínio para trabalho mecânico e as ligas para fundição. Neste trabalho será discutido apenas as ligas trabalhadas, pois a liga utilizada no trabalho será desta classe (ABAL, 2007). As ligas de alumínio sem tratamento térmico não podem ser endurecidas por meio da precipitação, sendo apenas endurecíveis por trabalho a frio. Os três grupos principais deste tipo de ligas são os grupos: 1XXX, 3XXX, 4XXX e 5XXX. A resistência mecânica inicial destas ligas é promovida pelo efeito do endurecimento por solução sólida (MARTINS, 2008).



**Figura 6** - Principais elementos de ligas e classificação das ligas de alumínio (ASM INTERNACIONAL, 2010a)

Enquanto os grupos 2XXX, 6XXX e 7XXX são ligas podem ser endurecidas por meio da precipitação, sendo que, o endurecimento por precipitação ocorre por meio do aquecimento e arrefecimento rápido ou têmpera. Além disso, esses grupos podem ainda ser endurecidas através de trabalho a frio – deformação controlada à temperatura ambiente (MARTINS, 2008).

## 2.4 Nomenclatura dos tratamentos térmicos

Os tratamentos térmicos têm como objetivo remover ou reduzir as segregações, produzir estruturas estáveis e controlar certas características metalúrgicas tais como: propriedades mecânicas, tamanho de grão e estampabilidade. As designações dos tratamentos térmicos das ligas de alumínio para trabalho mecânico são indicadas por um ou mais dígitos e aparecem a seguir à letra que designa o tratamento básico conforme mostrado na tabela 3.

**Tabela 3** - Nomenclatura dos tratamentos térmicos para ligas de Alumínio  
( MACKENZIE; TOTTEN, 2003)

“F”	<b>Como fabricado:</b> aplicado a produtos para os quais não há um controle especial após o aquecimento nem condições de endurecimento a frio são aplicados.
“O”	<b>Recozida:</b> aplicado a produtos forjados que foram aquecidos para gerar o efeito de recristalização, produzindo uma condição de baixa resistência mecânica; os produtos fundidos são recozidos para melhorar a ductilidade e estabilidade dimensional.
“H”	<b>Encruada:</b> aplicado a produtos forjados nos quais a resistência mecânica é aumentada através do encruamento por trabalho a frio. Este processo pode ser seguido de um tratamento térmico, o qual produz certa redução na resistência.
“W”	<b>Solubilizada:</b> uma têmpera instável aplicável somente às ligas que envelhecem espontaneamente na temperatura ambiente (envelhecimento natural) após solubilização. Esta designação é especificamente usada quando o período de envelhecimento natural é indicado.
“T”	<b>Tratada termicamente:</b> aplicado a produtos que são tratados a quente, algumas vezes com encruamento posterior, para produzir têmperas mais estáveis e diferentes de F, O ou H.

As ligas estudadas neste trabalho são tratadas termicamente e por isso é este o estado metalúrgico que nos interessa explorar. As ligas de alumínio tratadas termicamente são subdivididas em 9 grupos (T1-T9). O tratamento térmico estudado neste trabalho é apenas o estado T4 que corresponde ao estado solubilizado e envelhecido naturalmente até à obtenção de um estado praticamente estável (MARTINS, 2008).

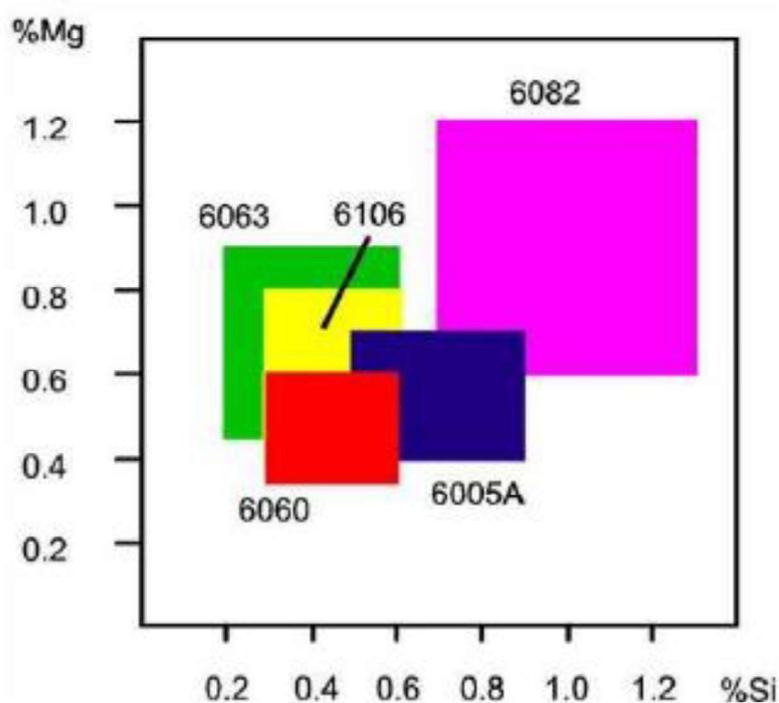
## 2.5 Ligas de alumínio da série 6XXX

O grupo das ligas de alumínio que será focada neste trabalho é da série 6XXX, conforme mencionou-se anteriormente esta série possui como elementos de liga o silício (Si) e o magnésio (Mg). A função de cada elemento de liga se altera de acordo com a quantidade dos elementos presentes e a sua interação com outros elementos. Como é o caso das ligas da série 6XXX que auxilia no aumento da resistência mecânica da liga devido a precipitação do intermetálico

$Mg_2Si$  (fase  $\beta$ ) provocando o endurecimento da liga por precipitação (ASKELAND; PHULÉ, 1998).

Os primeiros registros da produção de uma liga da série 6XXX data-se de 1921, quando foi produzida a liga 6051 com teores de 1% de Si e 0,5 % de Mg, sendo um dos primeiros casos de sucesso de ligas envelhecíveis sem a presença do cobre (FERRARI, 2008).

As ligas de alumínio da série 6XXX apresentam até 1,5% de Magnésio e Silício numa proporção aproximada de 1,73:1 para formar a fase intermetálica  $Mg_2Si$ . A solubilidade da fase intermetálica  $Mg_2Si$  ( $\beta$ ) na matriz rica em alumínio ( $\alpha$ ) aumenta com a temperatura (MARTINS, 2008).



**Figura 7** - Relação das concentrações de Magnésio e Silício para algumas ligas da série 6XXX (MARTINS, 2008).

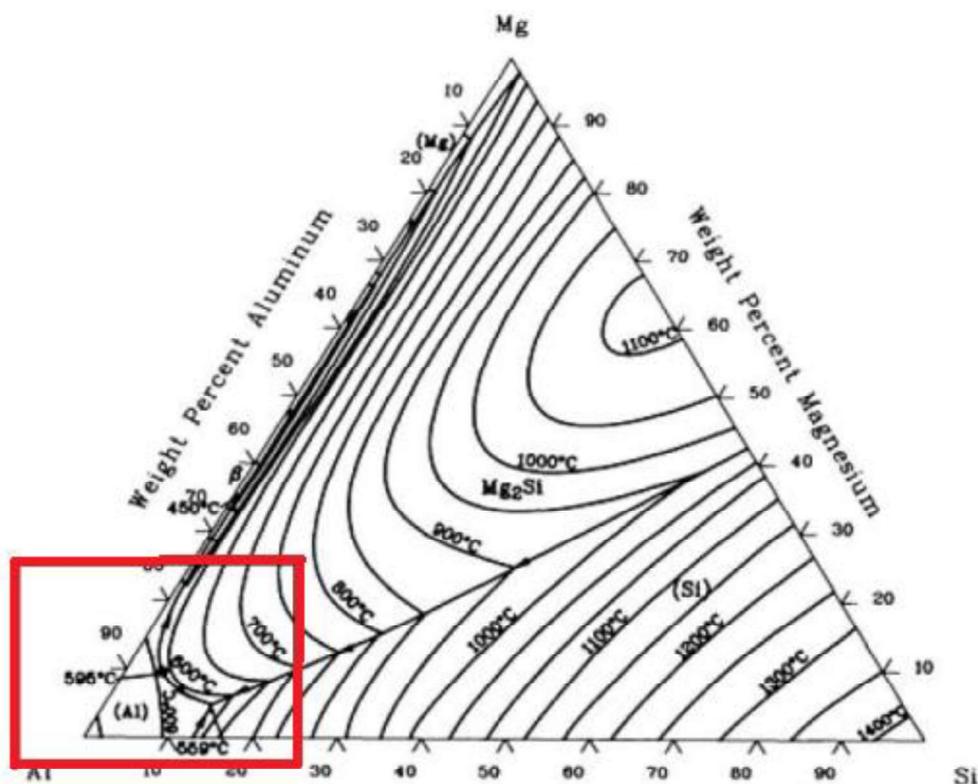
Os principais elementos que influenciam as propriedades das ligas de alumínio da série 6XXX são o magnésio que reduz a extrudabilidade, aumentando a pressão máxima de extrusão que não depende da quantidade de silício apresentada na liga. Além disso, a inserção de magnésio aumenta a sensibilidade à têmpera, porém diminui a ductilidade e tenacidade (MACKENZIE; TOTTEN, 2003).

Já o silício diminui a extrudabilidade quando em excesso na liga, embora o magnésio apresente esta propriedade com mais intensidade. O silício apresenta uma baixa influência na

sensibilidade à têmpera e também com teores acima dos 0,4% possui um excelente endurecimento na liga (MACKENZIE; TOTTEN, 2003) .

O ferro é adicionado em pequenas quantidades, pois melhora a ductilidade e tenacidade, em contrapartida o Fe é geralmente prejudicial para o acabamento superficial (MACKENZIE; TOTTEN, 2003).

O cobre é inserido em concentrações inferiores a 0,1% e tem como objetivo a redução na extrudabilidade ou na sensibilidade à têmpera, resistência, ductilidade ou tenacidade (MACKENZIE; TOTTEN, 2003).



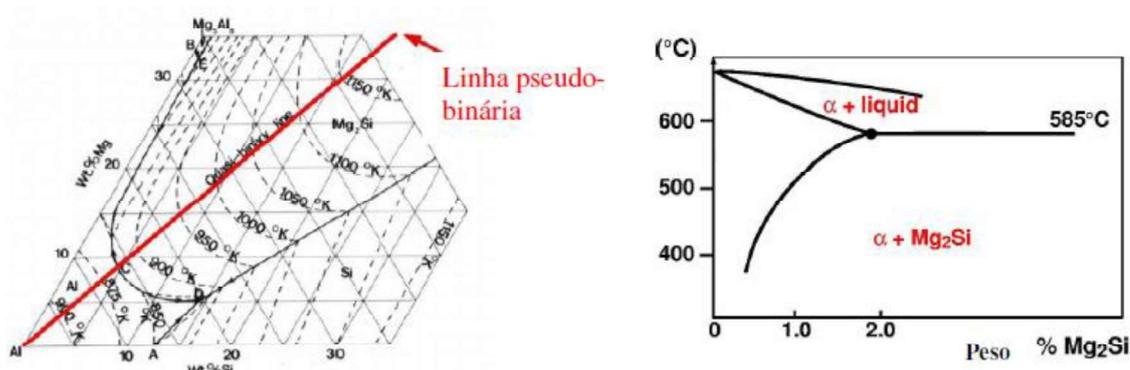
**Figura 8** - Diagrama de fases ternário da liga Al-Mg-Si (MARTINS, 2008)

Os diagramas de fases são mapas que permitem prever as fases presentes numa microestrutura do material, antes mesmo de processar o material a liga, em função da composição química dos componentes e a temperatura do sistema (ASKELAND; PHULÉ, 2008). Com se trata de uma liga com três componentes (Al, Mg e Si) o diagrama de fases gerado será o ternário em que as composições são geralmente indicadas usando como base um triângulo equilátero e seus componentes no vértice conforme indicado na figura 8.

Embora o diagrama de fases ternário seja muito importante para determinações das fases presentes na liga Al-Mg-Si utiliza-se também um diagrama pseudo-binário do sistema Al-Mg<sub>2</sub>Si (Mg:Si =1,73), na qual o precipitado Mg<sub>2</sub>Si é responsável pelo endurecimento por precipitação na liga (MARTINS, 2008). Em ligas com excesso de silício, o teor em peso de Mg<sub>2</sub>Si pode ser calculado pela equação:

$$\% \text{Mg}_2\text{Si} = 1,578 * (\% \text{Mg})$$

A relação mostra a quantidade do precipitado Mg<sub>2</sub>Si gerada pela quantidade dos elementos Magnésio e Silício inserido na liga. A figura 9 representa o diagrama pseudo-binário (Al-Mg<sub>2</sub>Si) da superfície líquidus da região rica Al do diagrama de equilíbrio ternário (figura 8) correspondente às ligas da série 6xxx, evidenciando a linha quase-binária.



**Figura 9** - a) Região do diagrama ternário Al-Mg-Si rico em Al. b) Diagrama pseudo-binário Al-Mg<sub>2</sub>Si ( MARTINS, 2008; ZHANG et al., 2001)

O sistema pseudo-binário representado na figura 9.b, tem o ponto eutético na temperatura 585°C e uma solubilidade máxima de 1,85% (em peso) de Mg<sub>2</sub>Si (MARTINS, 2008). As ligas da série 6XXX podem ser divididas em três grupos:

**GRUPOS 01** – Ligas que apresentam uma porcentagem de 0,8-1,2% de Magnésio e Silício. Além disso, estas ligas possuem uma resistência mecânica baixa ou média-baixa e destacam-se neste grupo as ligas como a 6060, 6106 ou 6063 (MARTINS, 2008).

**GRUPOS 02** – Já as ligas pertencentes a este grupo apresentam um excesso da ordem de 1,4% de Mg+Si, porque este excesso será utilizado na formação dos precipitados que serão formados no envelhecimento da liga (MARTINS, 2008).

**GRUPOS 03** – O terceiro grupo (Ex: 6082, 6351) tem um excesso de silício causando o refinamento das partículas de  $Mg_2Si$ , redução da ductilidade e fragilidade intergranular, devido a tendência de o silício formar precipitados próximos a fronteira. Devido a este fato adiciona-se o Cr e Mn para diminuir o tamanho de grão e inibir a recristalização durante a solubilização (MARTINS, 2008).

## 2.6 Soldabilidade do alumínio e suas ligas

A soldagem é uma operação que tem como objetivo a união de duas ou mais peças assegurando a continuidade física e química na junta. A soldabilidade, em contrapartida, é a capacidade do material ser soldado e suportar as cargas estáticas e dinâmicas impostas pelo dado projeto (URTADO et al., 2013).

A maioria das ligas metálicas existentes até o momento possui a capacidade de serem soldadas, mas, é claro, que há alguns materiais com mais facilidade de serem soldados por um dado processos do que outros. Desta forma, há necessidade de discutir e aprofundar o conhecimento da soldabilidade das ligas de alumínio da série 6XXX e, principalmente em aplicações ligadas a soldagem a laser.

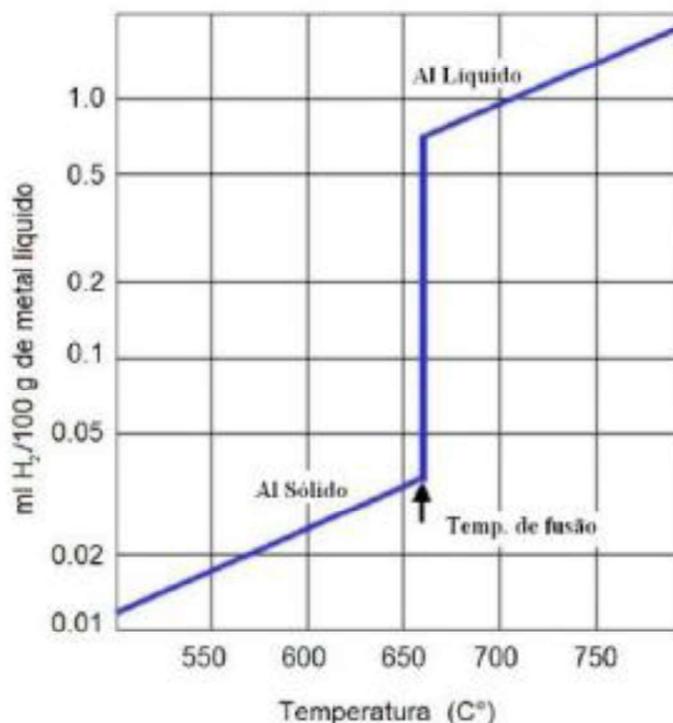
As aplicações iniciais das ligas de alumínio em soldagem caracterizaram-se pela dificuldade da soldabilidade das ligas, mas, é fato, que no princípio utilizavam-se parâmetros de soldagem semelhantes aos materiais ferrosos gerando soldas de baixíssima qualidade (MODENESI, 2001).

Uns dos problemas relacionados a soldagem do alumínio é a facilidade da reação entre o alumínio e o oxigênio formando o óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ). A alumina possui dureza próxima a do diamante e alta porosidade o que pode ocasionar numa retenção de umidade e contaminação do cordão de solda. Logo, antes do início do processo de soldagem nas ligas a base de alumínio deve-se primeiramente remover a camada de alumina de três maneiras diferentes: limpeza química, ação mecânica ou ataque catódico (MODENESI, 2001).

Outro fator que influencia a soldabilidade das ligas de alumínio é a condutibilidade térmica, pois esta propriedade física é cerca de cinco vezes maior que a das ligas ferrosas. Portanto, ligas de alumínio necessita-se de mais energia para elevar e manter a temperatura adequada para a prática adequada da soldagem do processo escolhido (MODENESI, 2001).

A alta condutividade térmica causa a necessidade de maior aporte térmico e, podendo ocasionar maiores distorções durante a soldagem se não forem utilizados os parâmetros corretos para a soldagem do alumínio (ALCAN, 2012).

O alumínio puro possui excelente soldabilidade pelos processos de fusão a arco, embora o ponto de fusão do metal seja muito baixo podendo ocasionar alguns defeitos como a solubilidade do hidrogênio no metal que é a principal causa da porosidade na soldagem do alumínio. A figura 10 mostra que conforme aumenta-se a temperaturas observa-se a um aumento da absorção do hidrogênio no metal.



**Figura 10** - Solubilidade do Hidrogênio no alumínio  
( PRAVEEN; YARLAGADDA, 2005)

As ligas da série 6XXX apresentam como elementos de liga magnésio e silício juntamente, é claro, como o alumínio. A liga 6XXX produz um composto intermetálico siliceto

de magnésio ( $Mg_2Si$ ) que melhora a resistência mecânica devido ao endurecimento por precipitação da liga (SANTOS, 2009).

Além disso, as ligas da série 6XXX tornaram-se dentre as mais utilizadas em estruturas soldadas como, por exemplo, a liga 6061 que é uma das mais aplicadas em estruturas soldadas tanto em espessuras finas ou grossas e, também podem ser aplicadas na condição soldada ou tratada termicamente após a soldagem. Em alguns casos a condição tratada termicamente torna-se necessária porque a região da zona fundida apresenta uma menor dureza do que o restante da barra e, logo, para que haja uma homogeneidade na resistência mecânica da material verificou-se a necessidade do tratamento térmico após o processo de soldagem (ALCAN, 2012).

Já a liga 6063 possui uma resistência um pouco menor que a liga 6061 e na maioria dos casos não há necessidade da realização do tratamentos térmicos após soldagem. Para chapas finas, o aumento da velocidade de soldagem pode acarretar um acréscimo na resistência mecânica das ligas da série 6XXX na condição como soldada. Já no caso de chapas grossas, este aumento de resistência não é significativo (SANTOS, 2009).

Outro fato importante, na soldabilidade das ligas 6063 é a formação de trincas a quente, mas este problema pode ser facilmente contornado pela escolha correta do metal de adição e o formato das juntas que serão soldada (ALCAN, 2012).

## 2.7 Soldagem a Laser

Os processos conhecidos como de alta intensidade de energia necessitam de tempos reduzidos e pequenas áreas para efetuarem a soldagem com extrema eficiência. Existem fundamentalmente dois processos de alta potência de energia: o feixe de elétrons (EBW – Electrons Beam Welding) e o processo a laser, que será aplicado neste trabalho, também conhecido como LBW (Laser Beam Welding) (MODENESI; MARQUES; BRACARENSE, 2011).

Após a publicação dos estudos de Einstein (1917), a respeito da teoria da relatividade que é um dos princípios básicos para o terceiro processo de integração da matéria, a chamada emissão estimulada de radiação. Em 1959, Gordon Gould introduziu definitivamente o termo LASER oriundo do termo em inglês “*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*” (Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação) (URTADO et al., 2013).

O princípio do laser, consiste no choque entre partículas (átomos, moléculas) causando uma absorção de energia por parte dos elétrons do átomo, que, com o aumento energético, passará de seu estado básico fundamental para um estado de maior energia. Porém o mecanismo é reversível, pois quando o elétron regressar a estado fundamental a energia absorvida será restituída na forma de fóton.

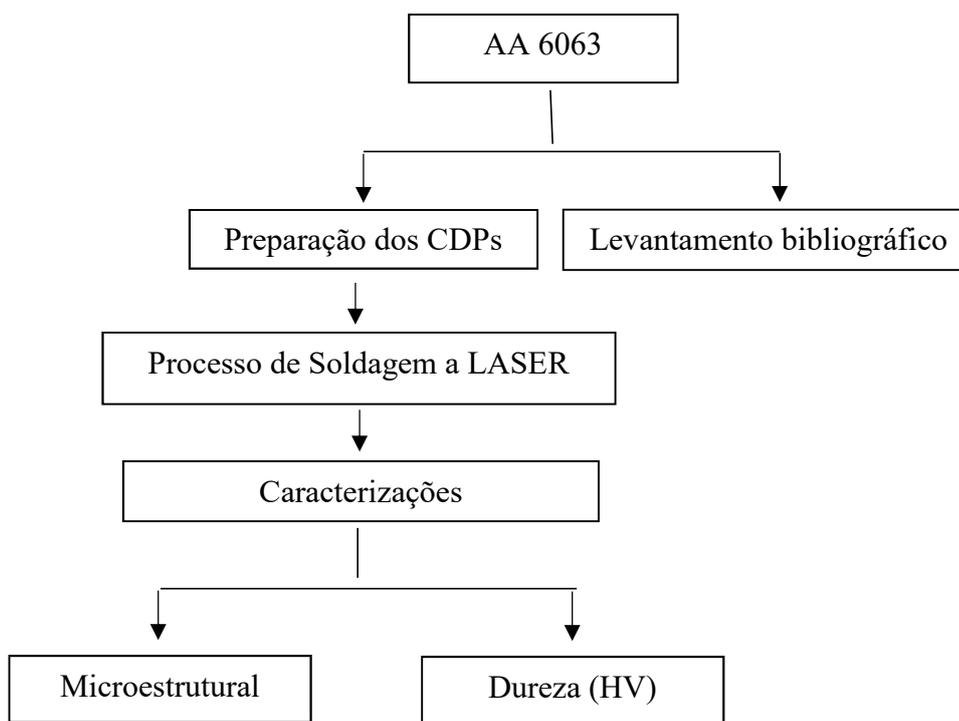
O feixe de laser possui uma capacidade de se propagar no ar e com pouca divergência, orientando-se por ópticas sem que haja perda das características físicas. A baixíssima divergência

### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1 Materiais

A liga de alumínio 6061, pertencente à série 6XXX doada pela empresa CBA (Companhia Brasileira de Alumínio) na forma de chapas com aproximadamente três milímetros de espessura, possui na sua composição química o silício e magnésio responsáveis por melhorar algumas propriedades exemplo: resistência mecânica e à corrosão, e esse material é empregado principalmente na área automobilística e aeronáutica (FERRARI, 2008).

#### 3.2 Fluxograma



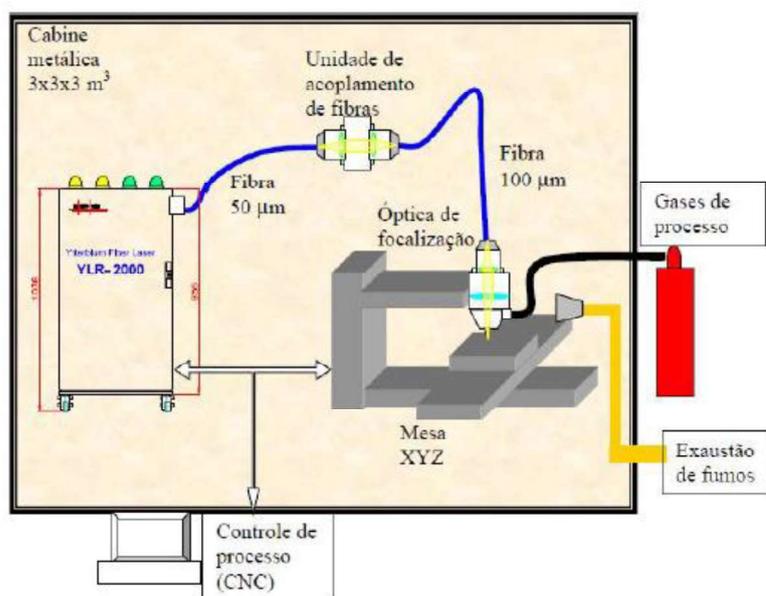
**Figura 11** - Fluxograma de atividade (FONTE: AUTOR)

A figura 11 demonstra um fluxograma, onde representa uma visão melhor de cada processo realizado. O primeiro item apresentado é a liga de alumínio 6061, depois o processo de soldagem no qual a liga é submetida o processo a laser a em seguida à parte metalográfica onde e realizado os processos de lixamento e polimento da amostra depois segue para avaliação

no microscópio óptico para obter imagens, por fim o teste de dureza realizada na região da soldagem.

### 3.3 Soldagem a Laser

O laser utilizado nesse estudo está instalado no laboratório multiusuário de desenvolvimento e aplicações de lasers e óptica (**DedALO**), do instituto de estudos avançados (IEAv/DCTA) em São José dos Campos no estado de São Paulo. Trata-se de um laser de 2k W de potência média (IPG, Modelo YLR-2000) dotado de uma fibra de saída com 50 $\mu$ m de diâmetro e 5m de distância. Uma unidade de acoplamento de fibras faz a conexão de uma segunda fibra de 100 $\mu$ m de diâmetro e 10m de comprimento utilizada no processamento do material.



**Figura 12** - Diagrama esquemático da estação de processamento de materiais com laser a fibra (CAPELLA, 2011)

A mesa XYZ CNC empregada no processamento é controlada por computador, com acionamentos por motores de passo, com velocidade de 160mm/s e cursos dos eixos X de 430mm e Y de 508mm, ambos com resolução de 5 $\mu$ m, enquanto o eixo Z possui curso de 215mm e resolução de 1 $\mu$ m está incorporado a mesa. A óptica de focalização é fixada nesse eixo e facilita posicionamento correto do foco do feixe sobre a amostra (Oliveira, 2011). A

seguidor será apresentado as tabelas com variações dos parâmetros, além disso, o gás de proteção utilizado foi o Hélio (He) com vazão de 22 litros por minuto: Gás = He (22L/min).



**Figura 13** - Equipamento de Solda a Laser, com detalhe do cabeçote de Soldagem (CAPELLA, 2011)

A figura 13 mostra o equipamento para o processo de soldagem a laser em detalhe observa-se o cabeçote de soldagem com a entrada da fibra óptica, gases e refrigeração por cima e a parte de fixação de chapas planas na parte inferior (CAPELLA, 2011).

As tabelas a seguir apresentam as condições em que a soldagem foi realizada, qual os parâmetros que foram utilizados para realização do processo, no qual temos as variações de potência e velocidade, velocidade de soldagem e feixe do laser.

**Tabela 4** - Parâmetros da chapa 1 soldada a laser. (FONTE: AUTOR)

<b>SOLDA 1</b>		
<b>P<sub>1</sub></b>	<b>V<sub>1</sub></b>	<b>Ø<sub>feixe</sub></b>
1000 W	50 mm/s	100µm
<b>SOLDA 2</b>		
<b>P<sub>2</sub></b>	<b>V<sub>2</sub></b>	<b>Ø<sub>feixe</sub></b>
1000 W	75 mm/s	100µm
<b>SOLDA 3</b>		
<b>P<sub>3</sub></b>	<b>V<sub>3</sub></b>	<b>Ø<sub>feixe</sub></b>
1000 W	100 mm/s	100µm

**Tabela 5** - Parâmetros da chapa 2 soldada a laser. (FONTE: AUTOR)

<b>SOLDA 1</b>		
<b>P<sub>1</sub></b>	<b>V<sub>1</sub></b>	<b>Ø<sub>feixe</sub></b>
1200 W	50 mm/s	100µm
<b>SOLDA 2</b>		
<b>P<sub>2</sub></b>	<b>V<sub>2</sub></b>	<b>Ø<sub>feixe</sub></b>
1200 W	75 mm/s	100µm
<b>SOLDA 3</b>		
<b>P<sub>3</sub></b>	<b>V<sub>3</sub></b>	<b>Ø<sub>feixe</sub></b>
1200 W	100 mm/s	100µm

**Tabela 6** - Parâmetros da chapa 3 soldada a laser. (FONTE: AUTOR)

<b>SOLDA 1</b>		
<b>P<sub>1</sub></b>	<b>V<sub>1</sub></b>	<b>Ø<sub>feixe</sub></b>
1500 W	50 mm/s	100µm
<b>SOLDA 2</b>		
<b>P<sub>2</sub></b>	<b>V<sub>2</sub></b>	<b>Ø<sub>feixe</sub></b>
1500 W	75 mm/s	100µm
<b>SOLDA 3</b>		
<b>P<sub>3</sub></b>	<b>V<sub>3</sub></b>	<b>Ø<sub>feixe</sub></b>
1500 W	100 mm/s	100µm

**Tabela 7** - Parâmetros da chapa 4 soldada a laser. (FONTE: AUTOR)

<b>SOLDA 1</b>		
<b>P<sub>1</sub></b>	<b>V<sub>1</sub></b>	<b>Ø<sub>feixe</sub></b>
500 W	30 mm/s	100µm
<b>SOLDA 2</b>		
<b>P<sub>2</sub></b>	<b>V<sub>2</sub></b>	<b>Ø<sub>feixe</sub></b>
800 W	30 mm/s	100µm
<b>SOLDA 3</b>		
<b>P<sub>3</sub></b>	<b>V<sub>3</sub></b>	<b>Ø<sub>feixe</sub></b>
800 W	50 mm/s	100µm
<b>SOLDA 4</b>		
<b>P<sub>4</sub></b>	<b>V<sub>4</sub></b>	<b>Ø<sub>feixe</sub></b>
800 W	75 mm/s	100µm

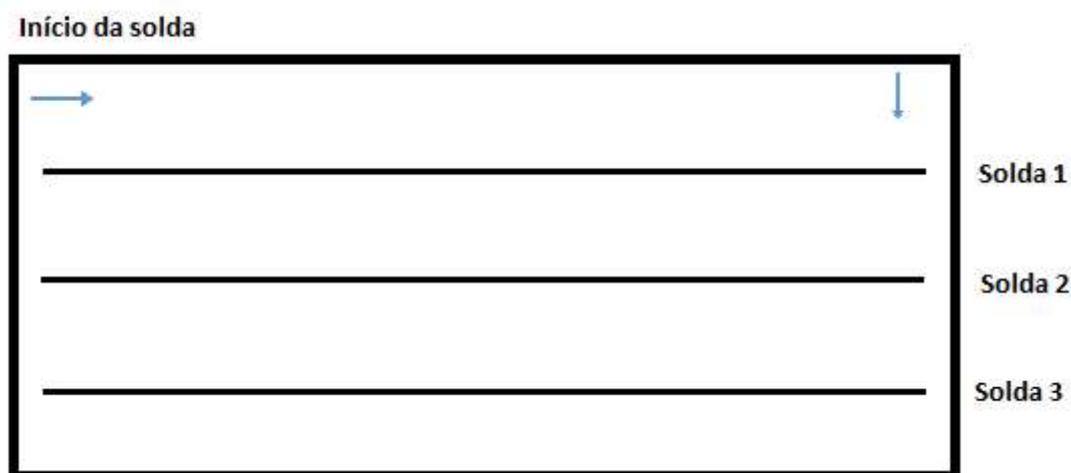
**Tabela 8** - Parâmetros da chapa 5 soldada a laser. (FONTE: AUTOR)

<b>SOLDA 1</b>		
<b>P<sub>1</sub></b>	<b>V<sub>1</sub></b>	<b>Ø<sub>feixe</sub></b>
500 W	30 mm/s	152µm
<b>SOLDA 2</b>		
<b>P<sub>2</sub></b>	<b>V<sub>2</sub></b>	<b>Ø<sub>feixe</sub></b>
800 W	30 mm/s	152µm
<b>SOLDA 3</b>		
<b>P<sub>3</sub></b>	<b>V<sub>3</sub></b>	<b>Ø<sub>feixe</sub></b>
800 W	50 mm/s	152µm
<b>SOLDA 4</b>		
<b>P<sub>4</sub></b>	<b>V<sub>4</sub></b>	<b>Ø<sub>feixe</sub></b>
800 W	75 mm/s	152µm

**Tabela 9** - Parâmetros da chapa 6 soldada a laser. (FONTE: AUTOR)

<b>SOLDA 1</b>		
<b>P<sub>1</sub></b>	<b>V<sub>1</sub></b>	<b>Ø<sub>feixe</sub></b>
500 W	30 mm/s	168µm
<b>SOLDA 2</b>		
<b>P<sub>2</sub></b>	<b>V<sub>2</sub></b>	<b>Ø<sub>feixe</sub></b>
800 W	30 mm/s	168µm
<b>SOLDA 3</b>		
<b>P<sub>3</sub></b>	<b>V<sub>3</sub></b>	<b>Ø<sub>feixe</sub></b>
800 W	50 mm/s	168µm
<b>SOLDA 4</b>		
<b>P<sub>4</sub></b>	<b>V<sub>4</sub></b>	<b>Ø<sub>feixe</sub></b>
800 W	75 mm/s	168µm

O operador responsável por executar o processo de soldagem deve utilizar equipamento de segurança como óculos de proteção devido à intensidade da luz do laser que pode afetar diretamente a visão do indivíduo. Na figura 14 foi realizado um esquema de como foram realizadas as soldagens, ou seja, o sentido que foi realizado o processo de soldagem a laser. Foram realizadas marcações nas amostras, para a orientação de início e término da soldagem.



**Figura 14** - Desenho esquemático da solda a laser realizada na liga de alumínio 6061  
(FONTE: AUTOR)

### 3.4 Metalografia

As amostras da liga de alumínio 6061 foram embutidas a quente em resina fenólica, com uma pressão de 20 kN no equipamento Pan Press 30 do DEMAR-EEL-USP. Em seguida, as amostras serão lixadas no equipamento Panatec polipan 2, com uma sequência de lixas à base de carbetto de silício de 1200#, 2400#, 2500# e 4000#. Já o polimento será realizado no mesmo equipamento com uma suspensão de sílica coloidal OP-S (Struers) até se obter uma amostra própria para aquisição de imagens.

Após a preparação metalográfica, as amostras foram atacadas quimicamente utilizando a solução de Keller (10ml HF, 15ml HCl, 25ml HNO<sub>3</sub> e 50ml H<sub>2</sub>O) por um período de 30 segundos para revelação da macroestrutura do material.

### 3.5 Microscopia Óptica

As amostras foram analisadas por meio de microscopia óptica (MO) e foram obtidas imagens de aumento de 50 a 1000x em um microscópio Leica modelo DM-IRM com câmera analógica Samsung modelo SCC-131 acoplada a um analisador de imagem Leica -Qwin e para aquisição e processamento das imagens foi utilizado um software QWin 2.3.

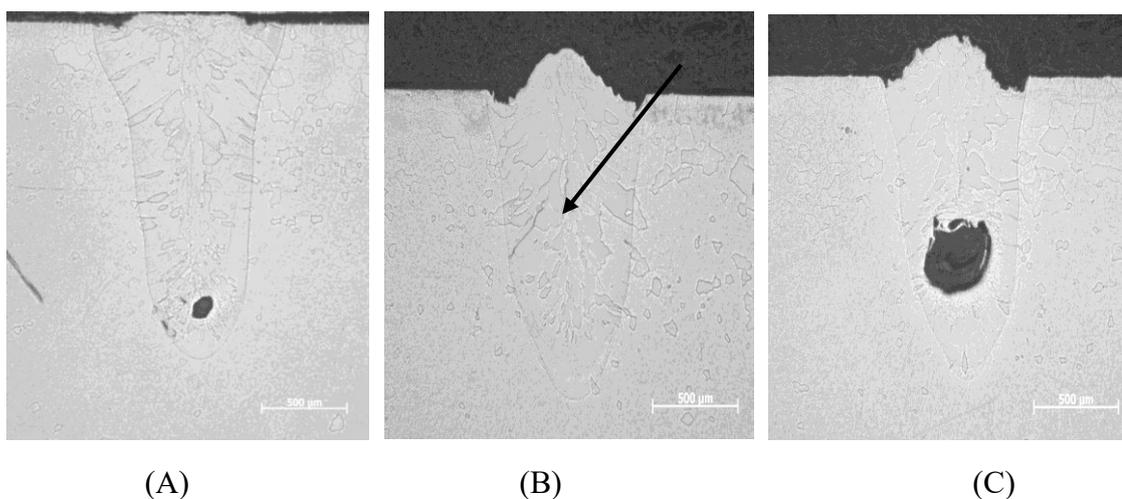
### **3.6 Dureza**

Este ensaio tem como objetivo comparar a dureza da liga de alumínio 6061. Esses ensaios serão executados em um microdurômetro Micromet 2004 da Buehler (DEMAR-EEL-USP), com carga de 300gf e com tempo de aplicação da carga de 30 segundos. Realizando 9 medidas de forma aleatória em cada amostra, sendo que este ensaio seguirá a norma ASTM E384-10 (ASM INTERNACIONAL, 2010b).

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados do processo de soldagem a laser na chapa de alumínio 6061, que contém magnésio e silício em sua composição com a finalidade de avaliar quais serão os melhores parâmetros em que se pode soldar esse material.

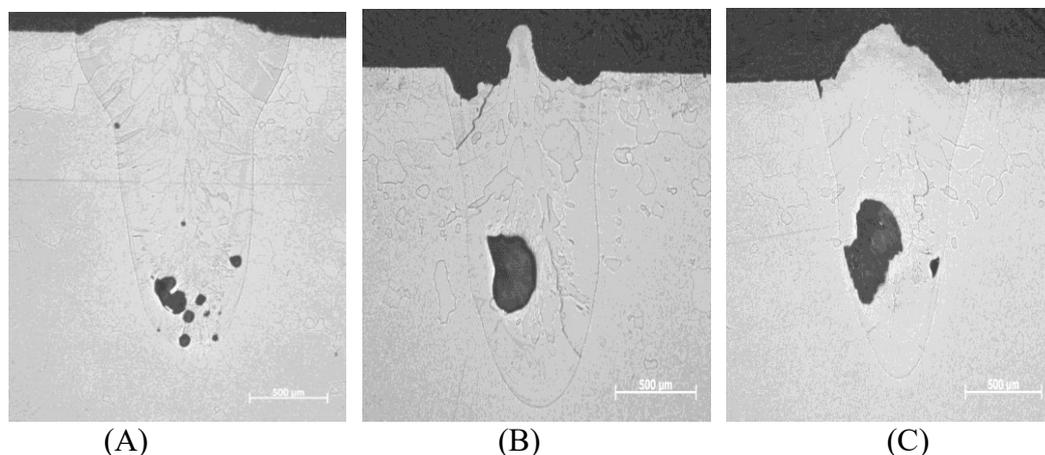
Será avaliada a penetração para cada potência e as consequências que o mesmo causará no material sobre influência das velocidades, por fim foi realizado um teste de dureza. Foram realizadas soldagem nas chapas 1, 2 e 3 nas velocidades de 50 mm/s, 75 mm/s e 100 mm/s com potência de 1000 W, 1200 W e 1500 W e diâmetro do feixe igual a diâmetro de  $\Phi 100 \mu\text{m}$  para todas as amostras. A figura 15 mostra o corte na seção transversal do cordão da amostra soldada a velocidade de soldagem de 100 mm/s e diâmetro de feixe de  $100 \mu\text{m}$  dos processos; A) 1500 W (CP3); B) 1200 W (CP2) e C) 1000 W (CP1).



**Figura 15** - Seção transversal do cordão da amostra soldada a velocidade de soldagem de 100 mm/s e diâmetro de feixe de  $100 \mu\text{m}$  dos processos; A) 1500 W (CP3); B) 1200 W (CP2) e C) 1000 W (CP1) (FONTE: AUTOR)

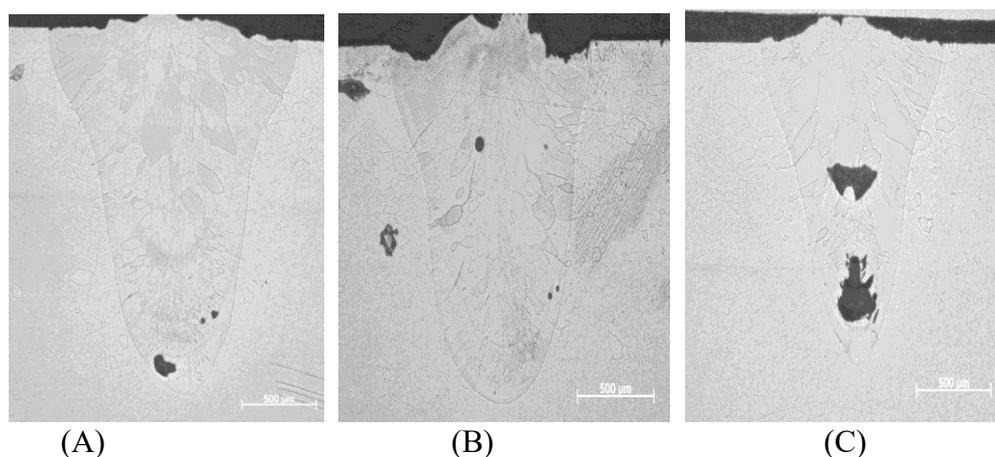
A soldagem realizada com uma velocidade de 100 mm/s representada nas imagens da figura 15 exibe cordões de solda menor largura e penetração devido à alta velocidade de soldagem, consequentemente com maior velocidade menor será a profundidade do cordão, isso porque quanto mais rápido for o deslocamento da soldagem menor será o tempo de fusão do material para que formação um cordão mais profundo. Na figura 16 mostra a seção transversal

do cordão da amostra soldada a velocidade de soldagem de 75 mm/s e diâmetro de feixe de 100  $\mu\text{m}$  dos processos; A) 1500 W (CP3); B) 1200 W (CP2) e C) 1000 W (CP1).



**Figura 16** - Seção transversal do cordão da amostra soldada a velocidade de soldagem de 75 mm/s e diâmetro de feixe de 100  $\mu\text{m}$  dos processos; A) 1500 W (CP3); B) 1200 W (CP2) e C) 1000 W (CP1) (FONTE: AUTOR)

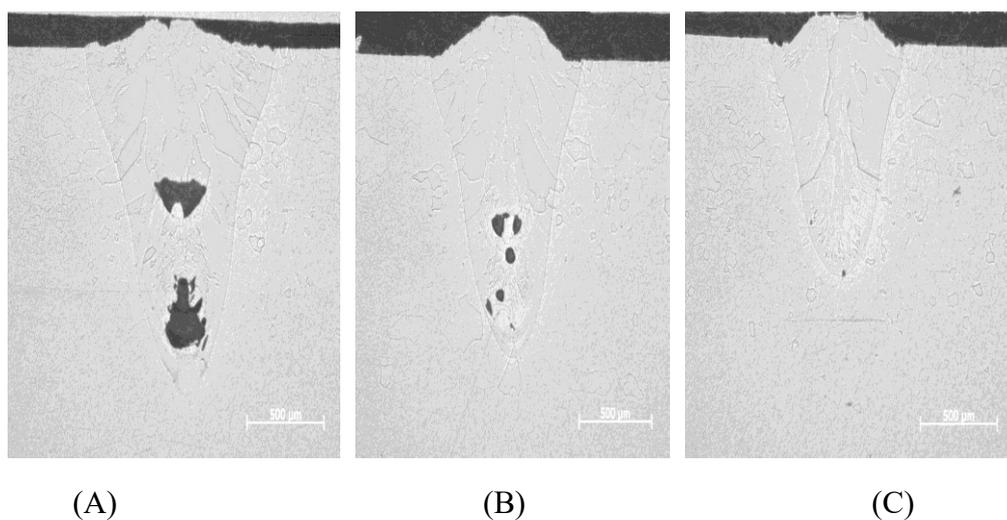
Na figura 16 a velocidade é reduzida para 75 mm/s, é mais baixa se compararmos com a velocidade de 100 mm/s, isso implica em uma profundidade do cordão de solda maior que as imagens anteriores. Na figura 17 mostra a seção transversal do cordão da amostra soldada a velocidade de soldagem de 50 mm/s e diâmetro de feixe de 100  $\mu\text{m}$  dos processos; A) 1500 W (CP3); B) 1200 W (CP2) e C) 1000 W (CP1).



**Figura 17** - Seção transversal do cordão da amostra soldada a velocidade de soldagem de 50 mm/s e diâmetro de feixe de 100  $\mu\text{m}$  dos processos; A) 1500 W (CP3); B) 1200 W (CP2) e C) 1000 W (CP1) (FONTE: AUTOR)

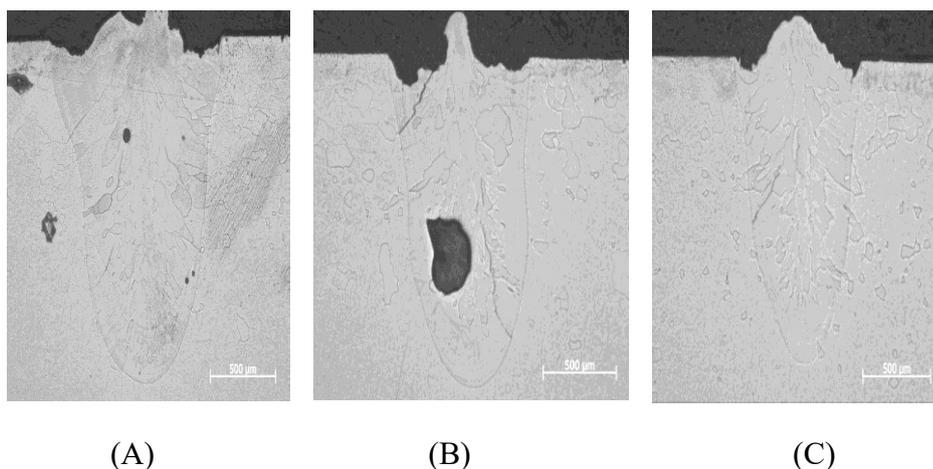
O cordão de solda da figura 17 no qual a soldagem foi realizada com velocidade de 50 mm/s, nesse caso a profundidade será bem maior que a solda realizada com velocidades anteriores, por se uma velocidade baixa permitirá que o feixe tenha tempo suficiente para fundir o material, permitindo assim um cordão mais profundo.

As figuras 15, 16 e 17 mostram as imagens do cordão de solda para as velocidades 100, 75 e 50 mm/s, variando somente as potências de soldagem. Percebe-se que algumas condições apresentam alguns poros e trincas, destacando a solda realizada com potência de 1200 e 1500 W e com velocidades de 100 e 50 mm/s (figura 15 e figura 16) que apresentam boas condições com poucas trincas e poros, já as demais amostras apresentaram grandes poros na região fundida. Na figura 18 mostra a seção transversal do cordão da amostra soldada com potência de 1000 W (CP1) e diâmetro de feixe de 100  $\mu\text{m}$  dos processos; A) 50 mm/s; B) 75 mm/s e C) 100 mm/s.

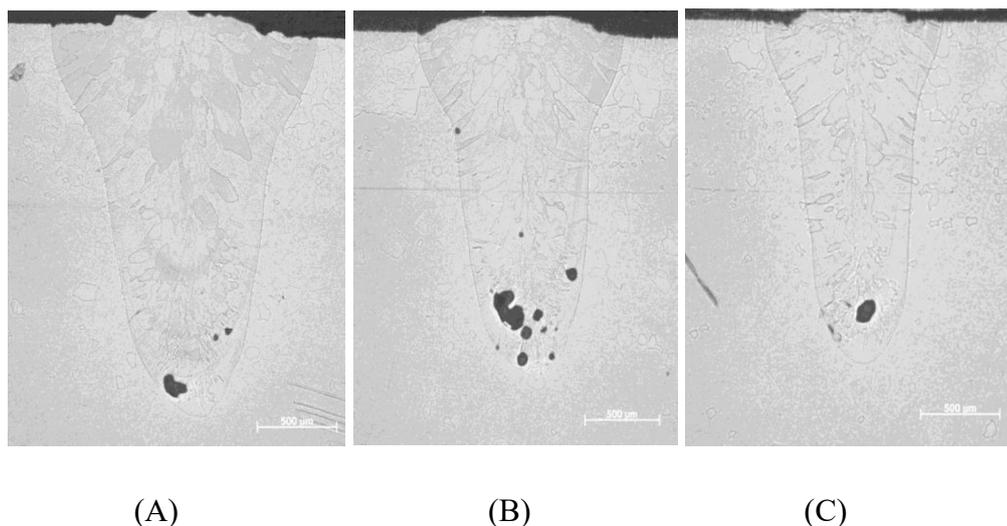


**Figura 18** - Seção transversal do cordão da amostra soldada com potência de 1000 W (CP1) e diâmetro de feixe de 100  $\mu\text{m}$  dos processos; A) 50 mm/s; B) 75 mm/s e C) 100 mm/s (FONTE: AUTOR)

A figura 18 apresenta a influência que os parâmetros de soldagem têm sobre a liga analisada, percebe-se que a potência do laser utilizado foi de 1000 W em velocidades de 50 mm/s, 75 mm/s e 100 mm/s com é possível ver nas imagens o cordão da solda fica menor com o aumento da velocidade e apresentam alguns poros e trincas. Na figura 19 mostra a seção transversal do cordão da amostra com potência de 1200 W (CP2) e diâmetro de feixe de 100  $\mu\text{m}$  dos processos; A) 50 mm/s; B) 75 mm/s e C) 100 mm/s.



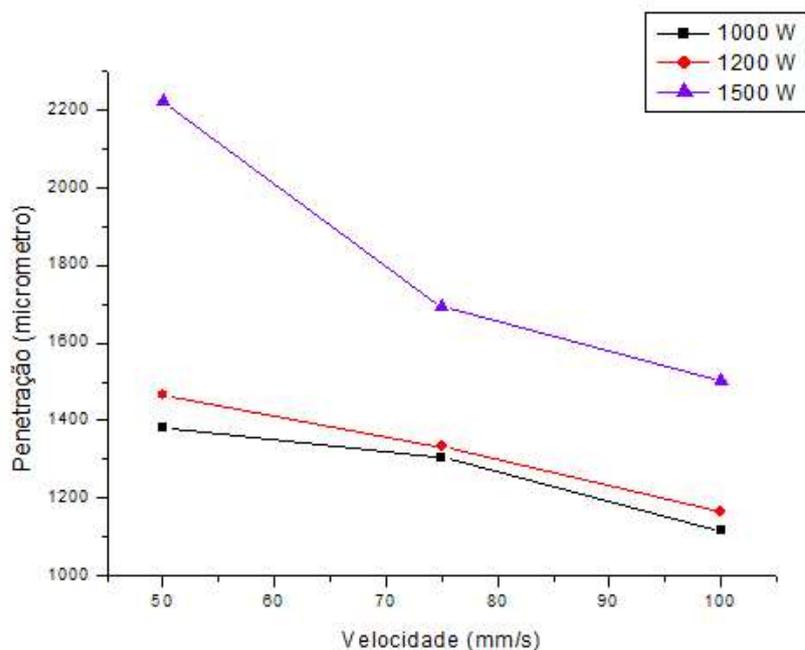
**Figura 19** - Seção transversal do cordão da amostra soldada com potência de 1200 W (CP2) e diâmetro de feixe de 100 µm dos processos; A) 50 mm/s; B) 75 mm/s e C) 100 mm/s (FONTE: AUTOR)



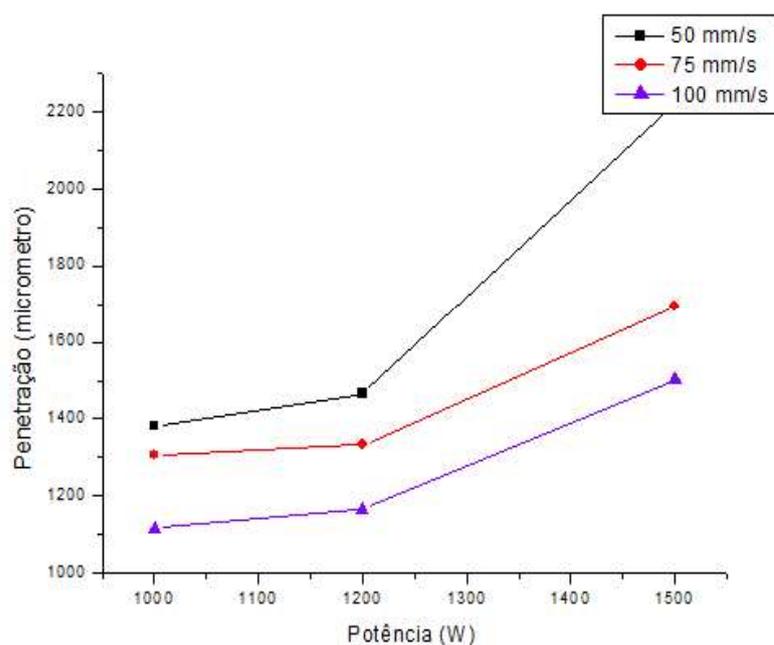
**Figura 20** - Seção transversal do cordão da amostra soldada com Potência de 1500 W (CP3) e diâmetro de feixe de 100 µm dos processos; A) 50 mm/s; B) 75 mm/s e C) 100 mm/s (FONTE: AUTOR)

A figura 19 apresenta a imagem do cordão de solda realizada por uma potência de 1200 W nas velocidades já apresentada nesse trabalho, repare a imagem B, a soldagem foi executada com uma velocidade de 75 mm/s, percebemos que no canto superior esquerdo uma trinca, ser por acaso esses parâmetros fossem escolhidos para um projeto e apresentasse essas condições depois de realizado o trabalho poderia concentrar tensões nessas trincas levando a falha do projeto. Na figura 20 mostra a seção transversal do cordão da amostra soldada com potência de 1500 W (CP3) e diâmetro de feixe de 100 µm; A) 50 mm/s; B) 75 mm/s e C) 100 mm/s.

A imagem 20 assim como as anteriores representa o cordão de solda da liga executada com uma potência de 1500 W e velocidades já mencionadas anteriormente, verifica-se que nas imagens a presença de poros, porém há poucas trincas, a imagem B nota-se que contém um grande número de poros. Na Figura 21 e figura 22 mostram-se através dos gráficos as relações da penetração com as velocidades de soldagem no alumínio e a relação da penetração com a potência no alumínio.



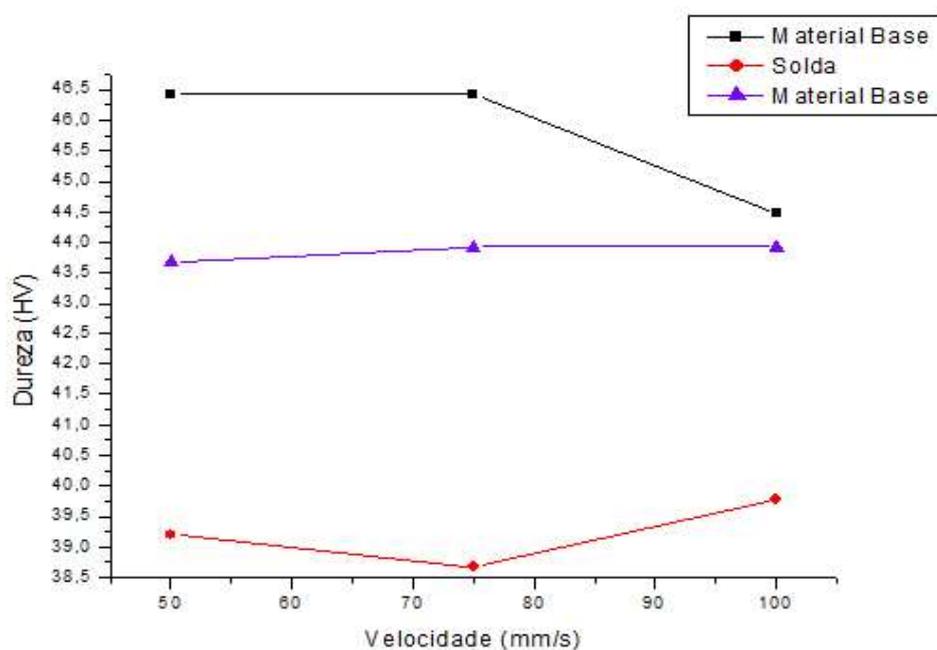
**Figura 21-** Relação da penetração com as velocidades na soldagem (FONTE: AUTOR)



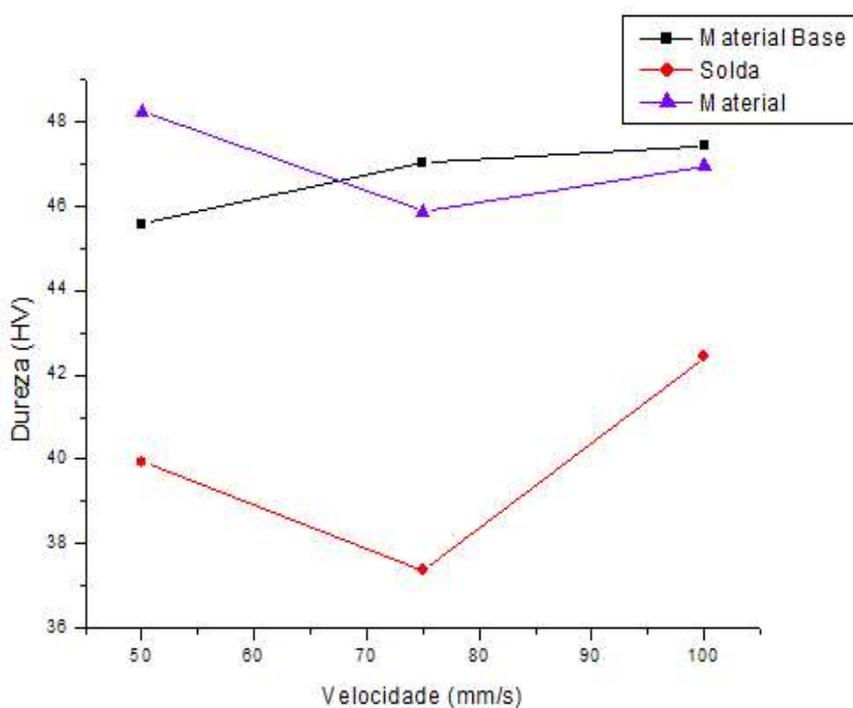
**Figura 22-** Relação da penetração com a potência na soldagem (FONTE: AUTOR)

A figura 21 e figura 22 demonstra as relações entre velocidade de soldagem e penetração e potência com penetração, observa-se o gráfico (A) quanto menor for a velocidade de deslocamento do laser sobre o material maior será a penetração que esse material terá, analisando o gráfico percebe-se quando se aumenta a velocidade de deslocamento reduz a penetração, pois com a velocidade alta o laser não terá tempo suficiente para fundir o material consequentemente resultará em um cordão de solda curto.

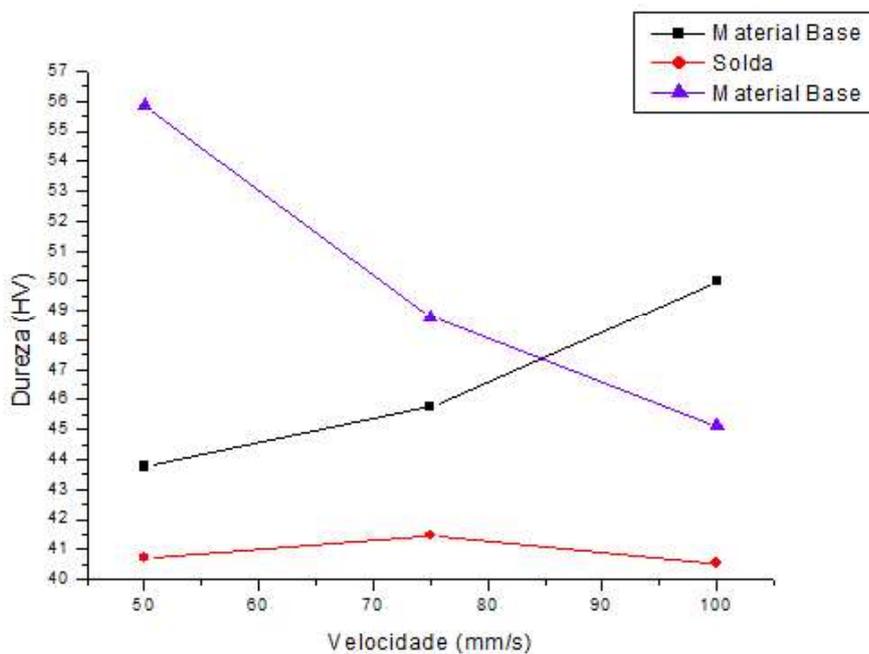
A figura 22 exibe a relação entre penetração com potência, pois naturalmente se utiliza uma potência baixa a penetração do laser no material será menor, o gráfico aponta uma evolução na penetração isso está relacionado diretamente a dois fatores são eles o aumento da energia dissipada no material e a redução da velocidade de deslocamento do laser. Na figura 23, figura 24 e figura 25 podem-se observar os resultados de dureza Vickers das seções transversais de cordões de solda da liga 6061 em diferentes condições experimentais. CP 1- 1000 W/100  $\mu\text{m}$ , CP 2- 1200 W/100  $\mu\text{m}$  e CP 3- 1500 W/100  $\mu\text{m}$ .



**Figura 23-** Análise de dureza Vickers das seções transversais de cordões de solda na amostra em diferentes condições experimentais - CP 1- 1000 W/100  $\mu\text{m}$  (FONTE: AUTOR)

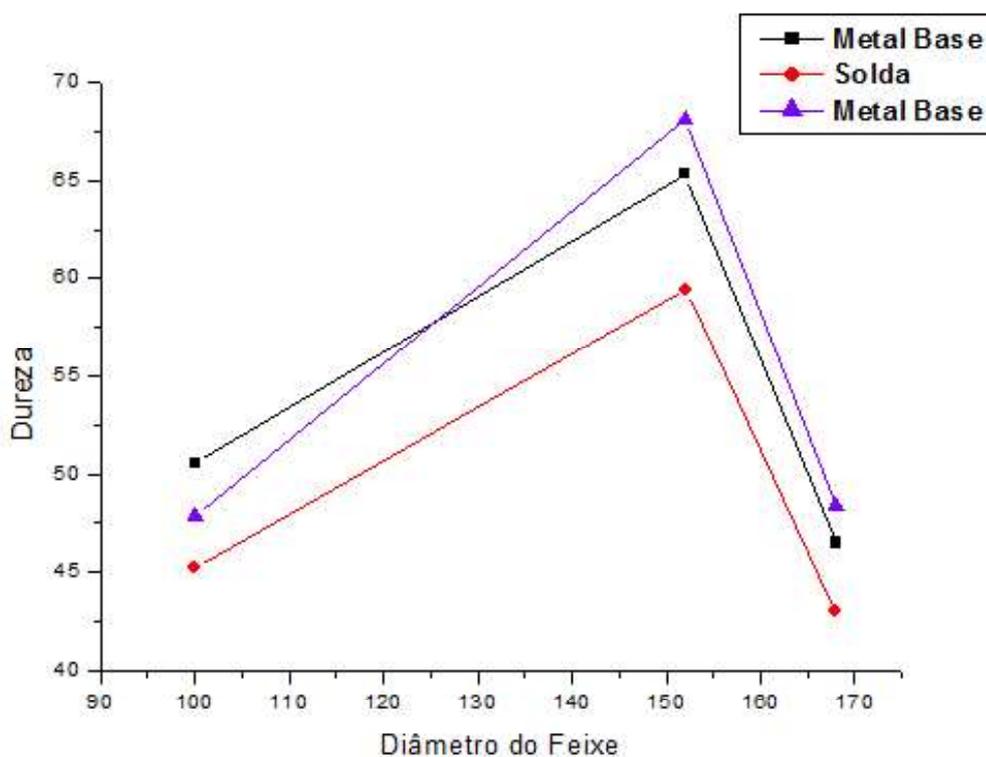


**Figura 24-** Dureza Vickers das seções transversais de cordões de solda na amostra em diferentes condições experimentais - CP 2- 1200 W/100 μm (FONTE: AUTOR).



**Figura 25 -** Dureza Vickers das seções transversais de cordões de solda na amostra em diferentes condições experimentais - CP 3- 1500 W/100 μm (FONTE: AUTOR)

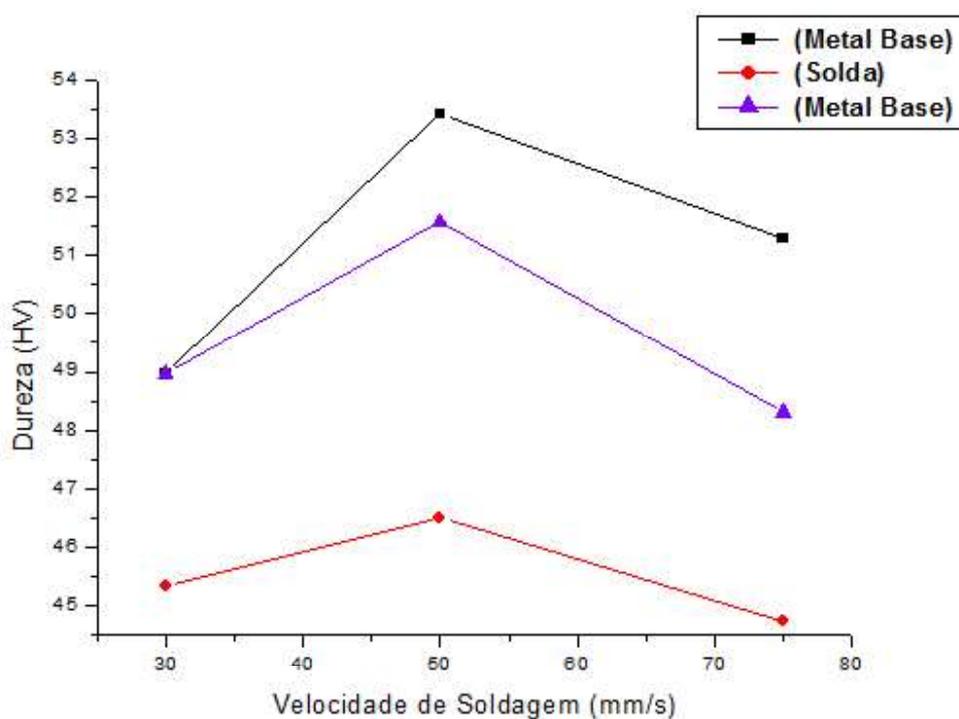
Os gráficos apresentados exibem a relação de dureza na região soldagem em função da velocidade. As durezas estão relacionadas com a potência do laser e velocidade de deslocamento do mesmo, a figura 23 apresenta a relação de dureza na CP 1 sob potência de 1000W diferentemente que no aço, no qual a dureza é maior na região soldada, percebe-se que no alumínio a dureza na região soldada é menor comparada com a material base, isso serve para as figuras 24 e figura 25, os mesmos apresenta apenas umas pequenas variações na dureza em diferentes parâmetros. Abaixo, são apresentados e discutidos os resultados do estudo dos melhores parâmetros de soldagem à laser da liga de alumínio AA6061 das chapas 4, 5 e 6. A figura 26 exhibe os resultados obtidos do ensaio que variou dureza e diâmetro do feixe.



**Figura 26** - Relação da dureza com a diâmetro do feixe na soldagem no alumínio  
(FONTE: AUTOR)

Interpretando a figura 26, vemos que a região da zona fundida tem uma menor dureza que o metal base, pois trata-se de uma liga 6061, que é endurecida à partir de precipitação após tratamento térmico. Conforme ocorre o processo de soldagem, acontece a fusão da zona fundida e conseqüentemente alteração da microestrutura, ou seja, essa alteração leva ao desaparecimento dos precipitados formados por tratamento térmico e a diminuição da resistência mecânica e dureza, pois os defeitos cristalinos que anteriormente eram travados pelos precipitados e, conseqüentemente ocorreria aumento da resistência mecânica não ocorrerá após a fusão desta região devido ao coalescimento dos precipitados. Geralmente observa-se em

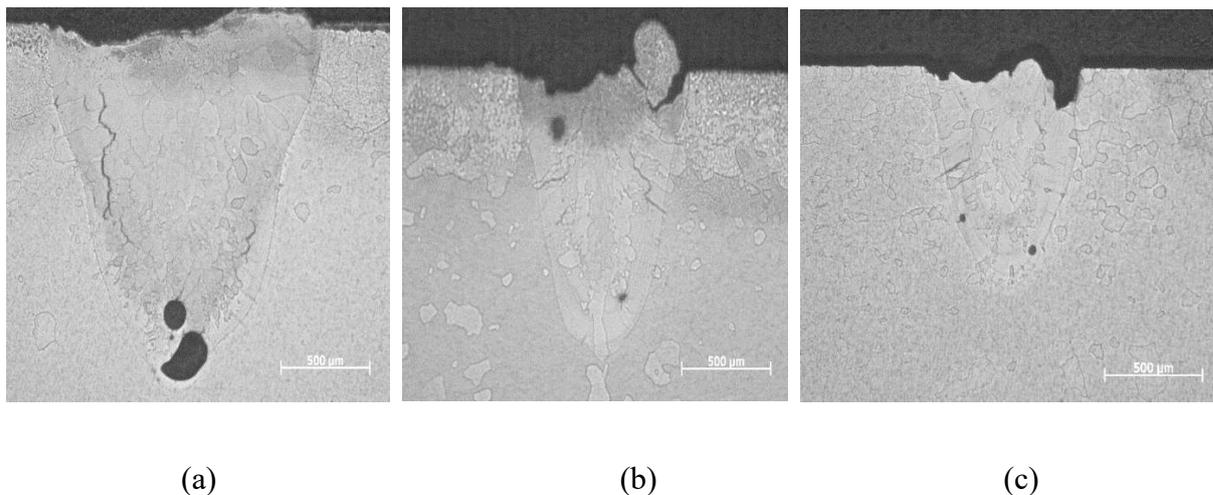
soldagem as três regiões metal base, zona fundida e zona termicamente afetada; porém esta região zona termicamente afetada não é observada na soldagem a laser porque o diâmetro neste processo é menor do que processos mais baratos e comuns no mercado industrial. A figura 27 exibe os resultados obtidos do ensaio que variou dureza e velocidade de soldagem.



**Figura 27** - Relação da dureza com a velocidade de soldagem na liga de alumínio AA6061 (FONTE: AUTOR)

A figura 27 abaixo exibe a relação de dureza em função da velocidade de dureza, pois a dureza está relacionada com a potência do laser e velocidade de deslocamento do mesmo. Quanto menor a velocidade, maior será a incidência de energia sobre a região que será fundida.

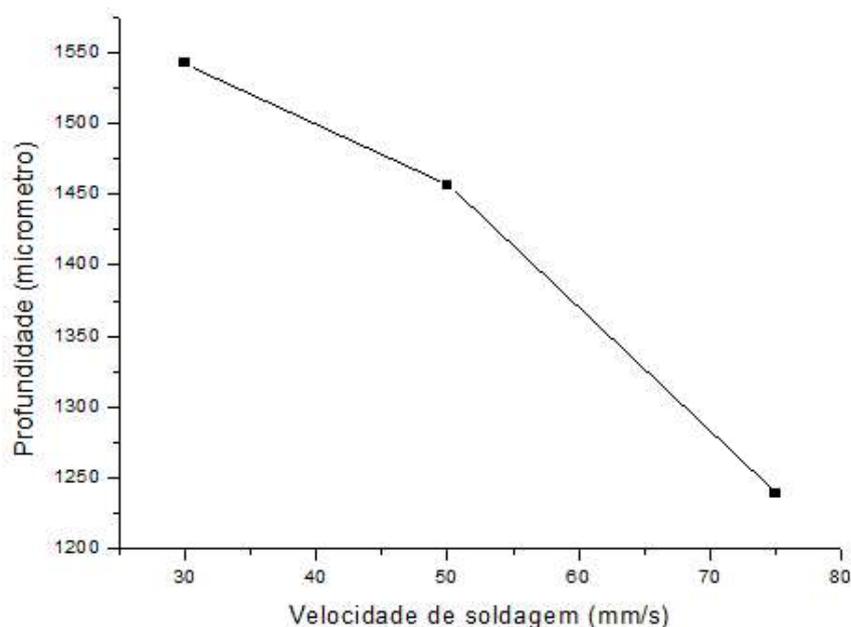
Desta forma observa-se que a microestrutura sofrerá maiores alterações devido a menor velocidade de soldagem, enquanto maior velocidade de soldagem, não haverá tempo suficiente para que os precipitados se coalesce e diminua suas propriedades mecânicas. A figura 28 mostra a microestrutura da liga de alumínio 6061 soldada a laser com potência de 800W e diâmetro de feixe de 100 $\mu$ m e velocidade de (a) 30 mm/s (b) 50 mm/s e (c) 75 mm/s.



**Figura 28** - Microestrutura da liga de alumínio 6061 soldada a laser com potência de 800W e diâmetro de feixe de 100µm e velocidade de (a) 30 mm/s (b) 50 mm/s e (c) 75 mm/s (FONTE: AUTOR)

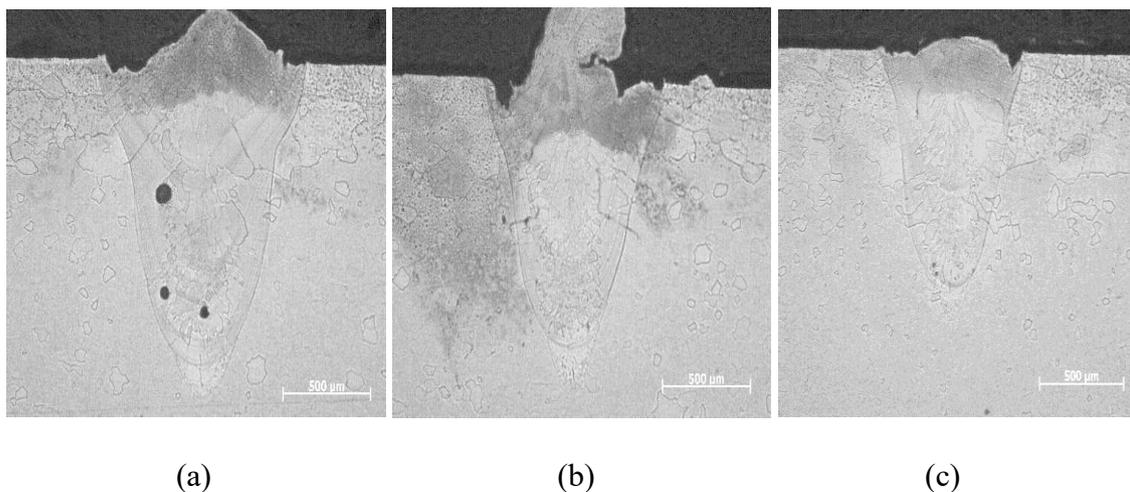
Observa-se na figura 28 a microestrutura da liga de alumínio 6061 soldada a laser com potência de 800 Watts e diâmetro de feixe de 100µm que a velocidade de soldagem influencia diretamente na microestrutura e propriedade mecânicas, pois observa-se na figura 28.c o aparecimento de trinca na amostra e, além disso, na mesma amostra percebe-se o surgimento de porosidade. Estes defeitos são prejudiciais a propriedade do material, pois porosidade é nada mais do que a ausência de átomos na região, ou seja, se esta região não tiver todas as ligações completadas não poderá suportar tensões maiores porque haverá uma concentração de tensão em outras regiões levando a deformação e fratura do material.

Na amostra da figura 28.b apresenta regiões com porosidade e trinca que afeta as propriedades mecânicas do material. A figura 28.c que o material não apresentou trinca na amostra, mas observa-se um volume de porosidade menor que nas amostras anteriores. Na figura 29 mostra a relação de profundidade e velocidade de soldagem na amostra de alumínio.



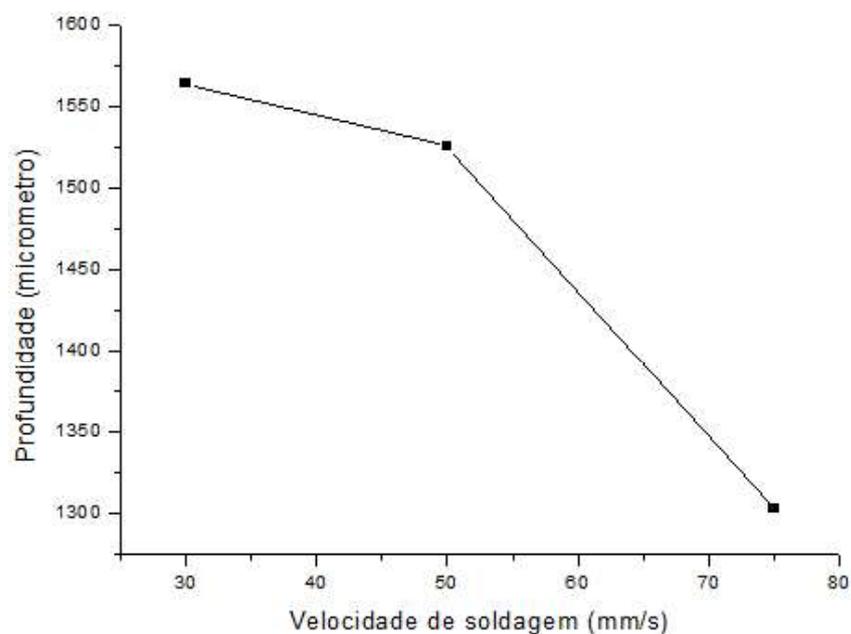
**Figura 29** - Relação de profundidade após soldagem a laser na amostra com potência de 800W e diâmetro de feixe de 100 $\mu$ m e velocidade de 30 mm/s, 50 mm/s e 75 mm/s (FONTE: AUTOR)

A figura 29 mostra os resultados obtidos do ensaio que variou velocidade de soldagem e profundidade da solda (penetração). A soldagem foi realizada com diferentes velocidades, 30 mm/s, 50 mm/s, 75 mm/s e analisando o gráfico percebe-se que quanto maior for a velocidade de soldagem, menor será a profundidade da solda, ou seja, menor será a penetração da solda nesse material. Quando se aumenta a velocidade de soldagem, a penetração que de início é alta vai reduzindo. Isso ocorre, pois, o laser não terá tempo suficiente para fundir o material consequentemente resultará em um cordão de solda menos profundo. Além disso, com velocidade maiores percebe-se uma menor presença de porosidade e não se observa a presença de trinca na amostra, este fato se deve a maior velocidade de soldagem que não dá tempo suficiente para que uma maior energia seja aplicada sobre a amostra para fundi-la e diminui a inserção de oxigênio no material líquido formando poros no material e, além disso, a menor velocidade pode inserir uma energia demasiada e, consequentemente aumentar a probabilidade de trinca. Figura 30 mostra a microestrutura da liga de alumínio 6063 soldada a laser com potência de 800W e diâmetro de feixe de 168 $\mu$ m e velocidade de (a) 30 mm/s (b) 50 mm/s e (c) 75 mm/s.



**Figura 30** - Microestrutura da liga de alumínio 6061 soldada a laser com potência de 800W e diâmetro de feixe de  $168\mu\text{m}$  e velocidade de (a) 30 mm/s (b) 50 mm/s e (c) 75 mm/s.

(FONTE: AUTOR)



**Figura 31** - Relação de profundidade após soldagem a laser na amostra com potência de 800W e diâmetro de feixe de  $168\mu\text{m}$  e velocidade de 30 mm/s, 50 mm/s e 75 mm/s (FONTE: AUTOR)

Observa-se na figura 30 a microestrutura da liga de alumínio 6061 soldada a laser com potência de 800 Watts e diâmetro de feixe de  $168\mu\text{m}$  que a velocidade de soldagem influencia diretamente na microestrutura e propriedade mecânicas. As amostras da figura 30 nestas condições apresentaram uma menor quantidade de porosidade e trinca, ou seja, estas condições

podem apresentar melhores propriedades mecânicas. A figura 31 mostra relação de profundidade após soldagem a laser na amostra com potência de 800W e diâmetro de feixe de  $168\mu\text{m}$  e velocidade de 30 mm/s, 50 mm/s e 75 mm/s.

Na figura 31 variou-se a profundidade (micrometro) e a velocidade de soldagem (mm/s) e verifica-se que quanto maior for a velocidade de deslocamento do laser sobre o material, menor será a profundidade de penetração. Isso ocorre pois se a velocidade estiver muito alta o feixe do laser não terá o tempo suficiente para fundir o material desejado, conseqüentemente resultando um cordão menos profundo.

## 5. CONCLUSÃO

Observa-se os dados apresentados nesse estudo que ao alterar os parâmetros do processo a laser para a chapa de alumínio 6061, obtivemos os seguintes resultados:

Quanto maior for a potência do laser que incide sobre o material, maior será a profundidade levando a uma maior fusão do material com isso um cordão de solda mais profundo.

Quanto maior for a velocidade de deslocamento do laser sobre o material, menor será a penetração, isso ocorre porque se a velocidade estiver muito alta o feixe do laser não terá tempo suficiente para fundir o material desejado, conseqüentemente resultando em um cordão menos profundo.

Nota-se que a dureza na região soldada nas três amostras é sempre menor que na metal base, diferentemente de outros metais como, por exemplo: o aço no qual a solda tem uma dureza maior. Percebemos também que em quase todas as imagens analisadas no capítulo 4 apresenta poros e trincas, um dos motivos de isso ter ocorrido é a difusão do hidrogênio por que o alumínio tem uma grande afinidade, ou uma alta potência do laser e uma baixa velocidade resultando no aprisionamento dos gases regado no processo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABAL**, Fundamentos e Aplicações do Alumínio. Editora Abal, São Paulo, 2007.
- ABAL**, A sustentabilidade da indústria brasileira de Alumínio. Editora Abal, 2012.
- ALCAN**. Manual de Soldagem, ALCAN, 2012.
- ASKELAND, D. R.; PHULÉ, P. P.** Ciência e Engenharia dos Materiais, Editora Cengage Learning, 2008.
- ASM INTERNACIONAL**. Properties and Selection Nonferrous alloys and Special-Purpose Materials. Philadelphia: ASM INTERNATIONAL, 2010.
- ASM INTERNACIONAL**. **E384-10 A**. Standard Test Methods for Knoop and Vickers Hardness of Materials. Philadelphia: ASM INTERNATIONAL, 2010.
- CALLISTER, W. D.; WILEY, J.** Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução, Editora LTC, 2007.
- CAPELLA, A.** Soldagem de Alumínio Estrutural Aeronáutico Utilizando Laser a Fibra de Alta Potência, 152 f., 2011, Doutorado (Tese em Engenharia Aeronáutica e Mecânica), Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos-SP, 2011.
- FERRARI, R. B.** Caracterização de liga metálica a base de Al - Mg obtida por método convencional após tratamentos termomecânicos visando estruturas monocristalinas., f., 2008, Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear: Materiais), Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 2008.
- FONSECA, P.; CARVALHO, P.;** A indústria do alumínio: estrutura e tendências., p. 43–88, BNDES, 2000.
- MACHADO, I. G.** Soldagem e Técnicas conexas. Porto Alegre: Editora UFRGS, 1996.
- MACKENZIE, D. S.; TOTTEN, G. E.** Handbook of Aluminum. Editora: CRC Press, 2003.
- MARTINS, M. M.** Estudo do comportamento das ligas de alumínio 6061 e 6082; 130 f., 2008, Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais), Universidade de Aveiro, Aveiro - Portugal, 2008.
- MASSALSKI, T. B.** Binary Alloys Phase Diagrams.ASM INTERNATIONAL: METALS PARK, 1986.
- MODENESI, P. J.** Soldagem de Ligas Metálicas, 27 f., 2011, E Belo Horizonte, Belo Horizonte: Editora da UFMG, 2011.
- MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; BRACARENSE, A. Q.** Soldagem Fundamentos e Tecnologia, 3o Edição, Belo Horizonte: Editora da UFMG, 2011.

**OKUMURA, T.; TANIGUCHI, C.** Engenharia de soldagem e aplicações. Rio de Janeiro: Livros-Técnicos e Científicos - LTC, 1982.

**PRAVEEN, P.; YARLAGADDA, P. K. D. V.** Meeting challenges in welding of aluminum alloys through pulse gas metal arc welding. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 164–165, p. 1106–1112, maio 2005.

**ROBERGE, P. R.; PIERRE, R.** Handbook of Corrosion Engineering., 1088 f., 2012, Editora McGraw-Hill Education, 2012.

**SANTOS, F. J.** Soldagem de Alumínio: Influência dos parâmetros de pulso na distorção angular, 76 f., 2009, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual Paulista - UNESP, Guaratinguetá-SP, 2009.

**SANTOS, W. I. A.;** Caracterização da Resistência à corrosão de ligas de alumínio após o tratamento alternativo à cromatização com e sem revestimento orgânico, 120 f., 2011, Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais), Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 2011.

**URTADO, E. et al.** Soldagem., 152 f., 2015, Editora Senai-SP, São Paulo-SP, 2013.

**VASQUES, A.** Estudo da Reciclagem de metais no país., 168 f., Ministério de Minas e Energia, 2009.

**ZHANG, J. et al.** Equilibrium pseudobinary Al - Mg 2 Si phase diagram. v. 17, n. May, p. 494–496, 2001.