



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
AMAZONAS
PRÓ-REITORIA DE ENSINO
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE PROCESSOS INDUSTRIAIS
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**



SAYMON CASTRO SOMBRA DA SILVA

**ANÁLISE DOS EFEITOS CAUSADOS NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
TRAÇÃO E DUREZA DA LIGA DE ALUMÍNIO AA6351-T6 APÓS SOLDAGEM TIG**

**MANAUS – AMAZONAS
2017**

SAYMON CASTRO SOMBRA DA SILVA

ANÁLISE DOS EFEITOS CAUSADOS NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
TRAÇÃO E DUREZA DA LIGA DE ALUMÍNIO AA6351-T6 APÓS SOLDAGEM TIG

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Processos Industriais do Campus Manaus Centro do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Prof. MSc. Alberto de Castro Monteiro
Orientador

MANAUS – AMAZONAS
2017

Ficha Catalográfica
Layde Queiroz
CRB – 11/980

S586a

Silva, Saymon Castro Sombra da.

Análise dos efeitos causados nas propriedades mecânicas de tração e dureza da liga de alumínio AA6351-T6 após soldagem TIG. / Saymon Castro Sombra da Silva. – Manaus: IFAM, 2017.
58 f.: il.; 30 cm.

Monografia (Engenharia Mecânica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas. *Campus* Manaus Centro, 2017.

Orientador: Prof. MSc. Alberto de Castro Monteiro.

1. Engenharia Mecânica. 2. Propriedades mecânicas. 3. Soldagem. 4. Mecânica I. Monteiro, Alberto de Castro (Orient.) II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas III. Título.

CDD: 621

FOLHA DE APROVAÇÃO

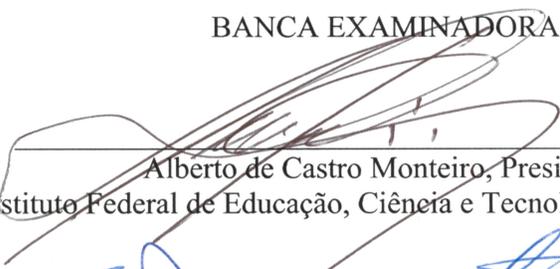
SAYMON CASTRO SOMBRA DA SILVA

ANÁLISE DOS EFEITOS CAUSADOS NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
TRAÇÃO E DUREZA DA LIGA DE ALUMÍNIO AA6351-T6 APÓS SOLDAGEM TIG

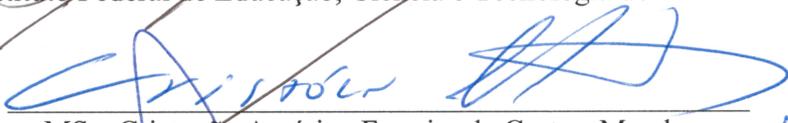
Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Processos Industriais do Campus Manaus Centro do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: 13/12/2017.

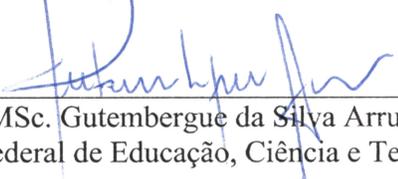
BANCA EXAMINADORA



Alberto de Castro Monteiro, Presidente
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas



MSc. Cristovão Américo Ferreira de Castro, Membro
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas



MSc. Gutemberg da Silva Arruda, Membro
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas

Dedicado aos meus pais e a toda minha família que me deu apoio e motivação para seguir nessa caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, criador do universo, por ser sempre presente em minhas decisões e atitudes, me guiando e orientando da melhor forma, sempre para continuar nessa caminhada da vida.

A toda minha família que me acompanhou nessa etapa da minha vida, em especial aos meus pais, Saul Sombra e Nilzete Castro, por toda educação, apoio, motivação, confiança e perseverança que me foi passados por toda minha vida até este momento de formação acadêmica de Engenheiro Mecânico.

Meus agradecimentos também ao Instituto Federal De Educação, Ciência E Tecnologia Do Amazonas o qual me deu toda a base pra minha formação desde o ensino médio, com o curso integrado de Técnico em Mecânica, e agora com o ensino superior de Bacharelado em Engenharia mecânica, sempre com professores experientes na área, que nos passam suas experiências e vivencias da profissão.

Agradeço também a Universidade Federal do Amazonas - Faculdade de Tecnologia, local onde trabalho na área e pude contar com professores e alunos que me ajudaram muito na pesquisa, e também onde pude utilizar os laboratórios livremente.

Agradeço também ao meu Orientador, Prof. MSc. Alberto de Castro Monteiro, por estar sempre à disposição para sanar dúvidas, bem como acompanhar as atividades e revisar o trabalho. Ao Prof. Dr. José Costa de Macedo Neto pelo apoio e suporte prestados. Ao Prof. MSc. Cristovão Américo Ferreira de Castro pelo apoio e disponibilidade com os procedimentos no laboratório de ensaios mecânicos. Aos professores componentes da banca examinadora, pela avaliação do trabalho, a Prof.^a Dr.^a Deuzilene Salazar pelo apoio e suporte na elaboração do trabalho escrito e ao Departamento Acadêmico De Processos Industriais.

À minha companheira e namorada Keitiane Rodrigues por todo o apoio e motivação para concluir e paciência nos momentos de ausência.

A todos os colegas do Instituto Federal De Educação, Ciência E Tecnologia Do Amazonas e da Universidade Federal do Amazonas que se fizeram presentes na minha caminhada rumo a formação.

"Todos os erros humanos são
impaciência, uma interrupção
prematura de um trabalho metódico".
Franz Kafka

RESUMO

Esta monografia fez uma investigação sobre os efeitos que a soldagem TIG causa nas propriedades mecânicas de tração e dureza das ligas de alumínio AA6351-T6. Foi utilizado o estudo sobre metalurgia da soldagem em alumínio de Kou (2003) e Mathers (2002). O objetivo geral deste trabalho é levantar as interferências da soldagem TIG em uma liga de alumínio da série 6000 (Mg-Si), no que diz respeito a sua resistência mecânica por meio de ensaios mecânicos de dureza e tração. Foi realizado a análise do ensaio de tração em uma junta de topo da liga de alumínio AA6351-T6 soldada no processo TIG, e realizada análise do perfil de dureza e macrografia na zona termicamente afetada e zona de fusão. Foram comparados os resultados do metal de base com os da junta soldada nas seguintes condições: Barra A apenas soldada e Barra B soldada e tratada termicamente com T6. Por fim, a análise das perdas e ganhos em percentuais. Os resultados mostraram através da macrografia que a soldagem foi bem sucedida, não sendo possível verificar nenhum defeito típico de soldagem. Nos ensaios mecânicos a amostra apenas soldada teve uma redução de cerca de 50% na sua resistência a tração e na dureza da ZTA, permanecendo a ZF sem muita perda de dureza em relação ao MB. As amostras que foram tratadas com envelhecimento artificial T6, tiveram uma redução menor de 35% na resistência a tração e recuperou completamente sua dureza na ZTA, porém teve uma redução de quase 50% de dureza na ZF, tornando o material incapaz de deformar plasticamente devido essa zona de fragilidade, o que pode ser comprovado com o gráfico tensão deformação e com o alongamento que foi de apenas 5%. Dessa forma constatou se que a soldagem causa perda de resistência mecânica severa na liga de alumínio AA6351-T6 e o tratamento de envelhecimento artificial recupera a resistência na ZTA, porém reduz muito a resistência na ZF tornando o cordão de solda uma zona sujeita a quebra.

PALAVRAS-CHAVE: AA6351-T6. Soldagem TIG. Resistência Mecânica.

ABSTRACT

This monograph investigated the effects of TIG welding on the mechanical properties of traction and hardness of AA6351-T6 wrought aluminum alloy. It was used the aluminum welding metallurgy studies of Kou (2003) and Mathers (2002). The general objective of this work is to raise the interferences of the TIG welding in an aluminum alloy of the series 6000 (Mg-Si), in respect of mechanical strength by mechanical tests of hardness and traction. The tensile test was performed on a butt joint of the aluminum alloy welded in the TIG process and also the hardness profile and macrography in the heated affected zone and fusion zone. The results of the base metal were compared with those of the welded joint with the following conditions: Bar A as welded and Bar B welded and heated treated with T6. Finally, the analysis of the losses and gains in percentages. The results showed through the macrography that the welding was successful, and it was not possible to verify any typical weld defect. In the mechanical tests the welded sample had a reduction of about 50% in tensile strength and hardness of HAZ, keeping FZ without much loss of hardness in relation to BM. The samples that were treated with T6 artificial aging had a reduction of a little less than 35% in the tensile strength and completely recovered their hardness in the HAZ, but had a reduction of almost 50% of hardness in the FZ, making the material unable of deforming plastically and hence making to this zone of brittleness, which can be verified with the strain-strain graph and the elongation which was only 5%. In this way it was verified that welding causes loss of severe mechanical resistance in the AA6351-T6 aluminum alloy and the artificial aging treatment recovers the resistance in the HAZ, but it greatly reduces the resistance in the FZ making the weld bead a zone subject to breakage.

KEY WORDS: AA6351-T6. TIG Welding. Mechanical Strength.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - Aplicação das ligas de alumínio termicamente tratáveis a)Naval, b) Automotiva	24
FIGURA 2 - Escalas de temperaturas para tratamentos térmicos e curvas solvus importantes para ligas binárias de alumínio.	25
FIGURA 3 - Curva de envelhecimento de uma liga serie 6xxx. Dureza X Tempo	26
FIGURA 4 - Curva Carga x Alongamento	27
FIGURA 5 - Curva σ x ϵ de um metal dúctil submetido ao ensaio de tração	28
FIGURA 6 - Posição de impressão do penetrador (endentador)	30
FIGURA 7 - Esquemático do processo de soldagem TIG	31
FIGURA 8 - Fluxograma dos ensaios realizados no trabalhos	33
FIGURA 9 - a)Máquina de Solda Tig Miller Econotig b)Barras chatas posicionada para serem soldadas	35
FIGURA 10 - a) Barra A, b) Barra B, c)Tocha TIG, d) Pré - aquecimento	38
FIGURA 11 - Estufa a), Mufla b)	39
FIGURA 12 - Corpo de prova segundo ASTM E8	39
FIGURA 13 - Máquina de tração Equilam - Lab. Ensaio de Mat.	40
FIGURA 14 - Posicionamento do corpo de prova na máquina - Lab. Ensaio de Mat.	40
FIGURA 15 - Polimento das amostras - Lab. Metalografia	41
FIGURA 16 - Microdurômetro Vickers	42
FIGURA 17 - Esquemático das posições de medição de dureza	43
FIGURA 18 - Amostra da barra A e barra B	44
FIGURA 19 - Gráfico 1: Perfil de dureza da secção transv. da barra A como soldada	45
FIGURA 20 - Gráfico 2: Perfil dureza da sec. transv. da barra B c/ T6 pós soldagem	46
FIGURA 21 - Gráfico 3: Perfis de dureza das Barras A e B soldadas	47
FIGURA 22 - Gráfico 4: Perfis de dureza somente em uma direção	47
FIGURA 23 - Gráfico 5: Comparativo de resistência a tração	49
FIGURA 24 - Gráfico 6: Tensão def. dos corpos de prova a) CPA2, b) CPB2, c) MB250	

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Tabela 1 - Propriedades físicas do Alumínio	18
Quadro 1 - Classificação das ligas de alumínio trabalhadas	19
Quadro 2 - Classificação dos tratamentos da ligas de alumínio. (Temper)	20
Tabela 2 - Propriedades físico-químicas dos gases de proteção	32
Tabela 3 - Composição química nominal em porcentagem	34
Tabela 4 - Propriedades mecânicas típicas da liga	34
Tabela 5 - Composição química ER4043 em comparação com a liga AA6351 em %	35
Tabela 6 - Sugestões de parâmetros de soldagem - Proteção gasosa de argônio	36
Quadro 3 - Sugestão de preparação de soldagem TIG da norma BS 3019	37
Tabela 7 - Parâmetros usados de fato na Soldagem TIG das amostras	37
Tabela 8 - Média dos valores de resistência mecânica a tração dos CPs e porcentagem em relação ao metal de base	48
Tabela 9 - Propriedades mecânicas da liga AA6351 T6 segundo fornecedor	52
Tabela 10 - Resumo dos resultados obtidos após ensaios de resistência Mecânica	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA	Aluminium Association
AC	Alternating Current
ASM	American Society for Metals
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWS	American Welding Society
BS	British Standards
CP	Corpo de Prova
CPA	Corpo de prova A
CPB	Corpode prova B
DC	Direct Current
DPI	Departamento Acadêmico de Processos Industriais
GP	Guinier Preston
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
HV	Hardness Vickers
LRT	Limite de Resistência a Tração
MB	Metal de Base
MIG	Metal Inert Gas
SSS	Solução Sólida Supersaturada
TIG	Tungsten Inert Gas
ZF	Zona Fundida
ZTA	Zona Termicamente Afetada

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	15
1 O ALUMÍNIO: ASPECTOS GERAIS	18
1.1 Ligas de alumínio	19
1.1.1 Classificações	19
1.1.2 Características e aplicações das ligas de alumínio	21
1.1.3 Series 6xxx	21
1.2 Tratamento Térmico em Ligas de Alumínio	22
1.2.1.1 Endurecimento por precipitação	22
1.2.1.2 Solubilização	23
1.2.1.3 Têmpera	23
1.2.1.3 Envelhecimento	25
1.3 Propriedades Mecânicas	26
1.3.1 Ensaio de Tração	26
1.3.1.1 Limite de resistência à tração	28
1.3.2 Ensaio de Dureza	29
1.3.2.1 Dureza Vickers	29
1.4 Soldagem TIG	30
1.4.1 Eletrodos	31
1.4.2 Proteção gasosa	31
1.4.3 Vantagens e desvantagens	32
2 MATERIAIS E METODOLOGIA EXPERIMENTAL	33
2.1 Material	34
2.2 Soldagem das amostras	34
2.3 Tratamento Térmico	38
2.4 Ensaios de Mecânicos	39
2.4.1 Ensaio de tração	39

2.5 Metalografia	41
2.6 Ensaio de dureza	43
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
3.1 Macrografia	44
3.2 Resistência mecânica	45
3.2.1 Ensaio de dureza	46
3.2.2 Ensaio de tração	48
CONCLUSÕES	54
REFERÊNCIAS	55
APÊNDICE A	57

INTRODUÇÃO

As ligas de alumínio de alta resistência mecânica são materiais muito aplicados na indústria moderna. As áreas que estão sempre na ponta buscando por soluções arrojadas para aumento de desempenho são as que mais empregam as ligas de alumínio. O alumínio vem despontando como uma solução adequada aos tempos que exigem redução de consumo de combustíveis, redução de peso estrutural e facilidade de fabricação, além de ser um material de fácil extrusão o que possibilita ser conformado nos mais diversos tipos de perfis.

As propriedades mecânicas das ligas de alumínio da série 6000 (magnésio-silício) são muito interessantes do ponto de vista de projeto, pois em alguns pontos se aproximam das propriedades mecânicas de aços comuns, podendo até substituí-los em muitos casos onde a resistência mecânica da liga de alumínio satisfaz as exigências de trabalho do projeto mecânico. Essas ligas são tratáveis termicamente, isso quer dizer que aumentam sua rigidez e resistência quando recebem tratamentos térmicos específicos.

Nos processos de fabricação de algumas estruturas metálicas em alumínio, é necessário unir Barras, perfis, eixos e tubos. Para isso é utilizado na maioria das vezes o tipo de soldagem chamado TIG (Tungsten Inert Gas) o qual proporciona uma junta mais limpa e com uma qualidade geralmente superior aos outros processos. Apesar dessas vantagens a soldagem TIG assim com os demais processos de soldagem exercem sempre uma influência, geralmente negativa, sobre a resistência mecânica dos materiais metálicos devido ao calor gerado no processo, e algumas medidas podem minimizar ou recuperar parte da resistência mecânica.

Com o avanço da tecnologia e da engenharia, o alumínio vem ganhando cada vez mais espaço no mundo, não só nos componentes mecânicos, mas também em peças de utilidades no dia a dia e até mesmo peças de arte. Com um vasto campo de aplicações o alumínio vem se tornando assim uma alternativa viável para o uso que necessite de uma boa resistência mecânica, condutibilidade térmica, resistência a corrosão e um baixo peso específico.

Nas últimas décadas o consumo de alumínio aumentou significativamente devido principalmente as aplicações automotivas de quatro e duas rodas, tornando a indústria metalúrgica do alumínio segundo lugar no mundo perdendo apenas para a siderurgia que é a indústria do ferro e do aço.

Apesar do aumento do consumo de alumínio no mundo e as necessidades do mercado aumentar, os estudos brasileiros sobre estruturas metálicas ainda são muito escassos quando o assunto é alumínio estrutural, limitando-se ao aço, que tem seus estudos muito avançados e o campo de pesquisa bem saturado.

O processo de soldagem é um processo consolidado que faz juntas metálicas confiáveis em perfis e Barras de alumínio é utilizado em larga escala na indústria de fabricação de estruturas, e a soldagem TIG é um dos mais aplicados devido suas grandes vantagens em relação a outros processos. Porém existem alguns problemas que ocorrem devido ao aumento da temperatura durante o processo de soldagem. Dessa maneira é importante ter conhecimento sobre os efeitos causados na estrutura ou componente soldado, para que se possa otimizar ou minimizar possíveis danos causados por essa temperatura, trazendo assim, maior durabilidade e resistência para as estruturas de alumínio como por exemplo o quadro de bicicleta, estrutura de palco ou até mesmo em lanchas de alumínio, veículos e aeronaves.

Ainda tratando dessa questão localizamos alguns estudos sobre essa temática e que serviram de referência e colaboraram para a análise dos resultados. Dentre eles, o estudo de Natércia (2010) sobre as propriedades mecânicas de algumas ligas de alumínio da série 6000 para fabricação de rodas de bicicleta. Nesse trabalho a autora analisa a influência do superenvelhecimento que acontece no processo de pintura do componente. Como resultado foi descoberto que o processo de pintura que acontece a uma temperatura de 210°C e faz com que a liga continue trabalhando e reenvelheça, causando um impacto negativo, no qual o material chega a perder de 10 a 28% de dureza.

O estudo comparativo de Ednilson (2011) de soldagem entre juntas soldadas também de uma liga da série 6000, pelo processo MIG (Metal Inert Gas) e TIG (Tungsten Inert Gas), no qual ele comparou vários parâmetros de soldagem de ambos os processos e analisou por meio de ensaios de tração e macrografia da secção de solda. Testando novos parâmetros, conseguiu ter um aumento de produtividade de 30% nos processos, e tanto TIG quanto MIG atenderam a especificação da norma AWS D1.2 (norma americana que trata sobre a soldagem do alumínio).

E a investigação de Marcos Melado (2014) sobre as tensões residuais e propriedades mecânica (resistência e microdureza) de juntas soldadas pelo processo TIG. As juntas foram soldadas com diferentes misturas gasosas de argônio e hélio para proteções. As análises estruturais mostraram que a soldagem reduziu de 30 a 40% o limite de escoamento para as misturas gasosas testadas e a mistura (Ar + N₂O + O₂), apresentou melhores valores de dureza na ZTA em comparação com as juntas soldadas com as misturas convencionais (Ar, Ar + He).

O objetivo geral deste trabalho é levantar dados experimentais que interfiram nas propriedades mecânicas pós soldagem TIG em liga de alumínio da série 6000 (Mg-Si), por meio de ensaios mecânicos. Para isso se fez a análise do ensaio de tração em uma junta de

topo da liga de alumínio soldada no processo TIG e também do perfil de dureza na ZTA e zona de fusão. Foram comparados os resultados do metal de base com os da junta soldada e, por fim, a análise das perdas e ganhos em percentuais.

O tipo de pesquisa a ser adotado é a pesquisa experimental que parte da análise de um fenômeno delimitado sobre o qual formula hipóteses prévias de verdade, e métodos explícitos de verificação, submete o fenômeno à experimentação em condições de controle, cuidando cuidadosamente da validade interna das hipóteses a fim de extrair leis (nomotéticas), fazer generalizações e elaborar teorias explicativas do fenômeno observado. (CHIZZOTTI, 2001)

Essa pesquisa ainda é designada como uma pesquisa analítica pois se pretende fazer análises interpretativas dos dados coletados e extrair conclusões. O método de abordagem pode ser designado como método comparativo, pois serão comparados os dados obtidos nas experimentações com um padrão definido e com a literatura.

As técnicas de coleta de dados foram:

- Soldagem de uma barra chata de alumínio medindo 75mm X 150mm formando uma junta de 150mm X 150mm.
- Ensaio de tração: Preparação dos corpos de provas para o ensaio, usinando-os segundo a norma ASTM E8 para conseguir ensaiar o material soldado e o não soldado (padrão).
- Ensaio de dureza: Extração de corpos de prova da secção transversal da junta com a finalidade de se realizar o ensaio de dureza nas várias regiões da solda. (ZF e ZTA.).

A investigação foi organizada em três capítulos. O capítulo 1 faz uma revisão básica da bibliografia a ser discutida ao longo dos estudos, contendo aspectos gerais, características específicas, vantagens, aplicações das ligas de alumínio entre outros. Também são mostrados os principais tratamentos térmicos e as características principais do processo de soldagem TIG. O capítulo 2 define os materiais, e descreve passo a passo os métodos que foram utilizados ao longo do desenvolvimento da parte experimental deste trabalho. O capítulo 3 faz a apresentação dos dados adquiridos pela metodologia experimental, analisando e discutindo os resultados obtidos nos experimentos.

Esta investigação se propõe a responder o que foi proposto como problema sobre a liga de alumínio comercial AA6351-T6, bem como servir de material de apoio para mais estudos na área da metalurgia da soldagem em alumínio, a qual tem um vasto campo de estudos a ser explorado.

CAPÍTULO 1

O ALUMÍNIO: ASPECTOS GERAIS

O alumínio é o metal não ferroso mais consumido em larga escala no mundo, com mais de 20 milhões de toneladas consumidas por ano. Desses, 18 milhões são de alumínio primário (extraído do minério). Pelo fato de ter um custo mais baixo e outras propriedades interessantes para muitas aplicações, o alumínio se torna cada vez mais competitivo e uma boa solução para muitos problemas nas indústrias que dessa maneira vem investindo em pesquisa e tecnologia para melhorar o produto para os mais variados consumidores (TOTTEN *et. al.*, 2003).

Atualmente sabemos que a presença do alumínio é muito forte em quase todos os ramos da indústria. Por ter uma gama de aplicações muito vasta, sua utilização é vista em muitos produtos, desde os que usamos no dia a dia, como painéis e latas de refrigerante, até peças utilizadas na indústria aeroespacial.

As propriedades físicas do alumínio tem relação direta com seu grau de pureza. Ou seja, varia do alumínio comumente comercializado para um alumínio de extrema pureza. O alumínio é famoso por algumas propriedades como baixa densidade ($2,7 \text{ g/cm}^3$), alta reflexibilidade, alta condutividade elétrica e térmica. Possui uma alta resistência a corrosão atmosférica devido a fina camada de oxido que se forma protegendo o metal. Na tabela 1 é possível ver algumas da mais importantes propriedades segundo Totten *et. al.*, 2003.

Tabela 1 - Propriedades físicas do Alumínio

Propriedades físicas do alumínio					
Propriedades	Pureza %				
	99,999	99,99	99,98	99,95	99
Ponto de fusão		660.2	-	-	657.0
Ponto de ebulição		2480	-	-	-
Calor latente de fusão, cal/g		94.6	-	-	93.0
Calor específico a 100 °C, cal/g		0.2226	-	-	0.2297
Densidade a 20°C, cal/cm ³	2.7	2.7	2.71	2.71	
Resistividade Elétrica, $\mu\Omega\text{-cm}$ a 20°C	2.63	2.68	2.74	2.8	2.87
Coefficiente de Temperatura de Resistividade		0.0042	0.0042	0.0041	0.0040
Coefficiente de Expansão térmica x 10 ⁶ (20 - 100°C)		23.86	23.5	23.5	23.5
Condutividade térmica		0.57	0.56	0.55	0.54
módulo de elasticidade, lb/in ² x 10 ⁻⁶		9.9	-	-	10

Fonte: Totten *et. al.* (2003)

1.1 Ligas de alumínio

As ligas de alumínio que vem em forma de produtos trabalhados como folhas, Barras, tarugos, tubos, extrusões, fios e etc. podem variar de completamente recristalizado a fibroso conforme as características de cada produto. As propriedades mecânicas são obtidas de acordo com as aplicações e se são ligas tratáveis ou não-tratáveis (HATCH,1984).

As ligas de alumínio se dividem em dois grupos principais que são as ligas de alumínio trabalhadas (wrought aluminium alloys) e ligas de alumínio fundidas (cast aluminum alloys) que por sua vez se diferenciam em tratáveis e não tratáveis como dito anteriormente.

Os principais elementos ligantes usados com o alumínio são cobre, manganês, silício, magnésio e zinco. Existem outros que são adicionados em menor quantidade para refino de grão e melhoramento algumas propriedades especiais.

1.1.1 Classificações

Essas ligas tratadas de alumínio tem um designação acordada na AA (Aluminium Association) de 4 dígitos numéricos para alumínios trabalhados e ligas de alumínio. O primeiro dígito dos 4 indica o grupo de liga, o segundo digito se for diferente de zero, indica modificação na liga base, e o terceiro e quarto dígitos, são números arbitrário que identificam a especificidade da liga no grupo(HATCH,1984). No quadro 1 está disposto a divisão das ligas por grupos.

Quadro 1 - Classificação das ligas de alumínio trabalhadas

Designação	Principais elementos de liga
1XXX.....	Nenhum
2XXX.....	Cu
3XXX.....	Mn
4XXX.....	Si
5XXX.....	Mg
6XXX.....	Mg e Si
7XXX.....	Zn
8XXX.....	Diferente dos acima
9XXX.....	Sem uso

Fonte: Hatch (1984)

Para a especificação do alumínio ficar completa, é necessário sua classificação de condição metalúrgica (*Temper*). Esse sistema de classificação é único para as ligas de

alumínio e também foi desenvolvida pela AA. E usado em ligas trabalhadas e fundidas. Essa classificação consiste em uma básica e uma subdivisão. A classificação básica é composta por letras. As subdivisões quando necessárias, são compostas por um ou mais dígitos seguidos da letra como no quadro 2. (TOTTEN *et, al.*, 2003).

Quadro 2 - Classificação dos tratamentos da ligas de alumínio. (Temper)

F	Como fabricada
O	Recozida
H	Encruada
	H1x - Somente encruada. (x se refere a quantidade de encruamento e resistência.)
	H12— Encruamento que proporciona um resistência média entre as têmperas O e H14.
	H14— Encruamento que proporciona um resistência média entre as têmperas O e H18.
	H16— Encruamento que proporciona um resistência média entre as têmperas H14 e H18.
	H18— Encruamento que proporciona 75% de redução.
	H19— Encruamento que proporciona uma resistência maior que 2000 psi do que o obtido na têmpera H18.
	H2x—Encruado e parcialmente recozido.
	H3x—Encruado e estabilizado a baixa temperatura para evitar o endurecimento por envelhecimento da estrutura.
W	Solubilizada
T	Endurecida por envelhecimento
	T1 -Resfriado da temperatura de fabricação e envelhecido naturalmente.
	T2 - Resfriado da temperatura de fabricação, encruado e envelhecido naturalmente.
	T3 - Solubilizado, encruado e envelhecido naturalmente.
	T4 - Solubilizado e envelhecido naturalmente.
	T5 - Resfriado da temperatura de fabricação e envelhecido artificialmente.
	T6 - Solubilizado e envelhecido artificialmente.
	T7 - Solubilizado, estabilizado por superenvelhecimento.
	T8 - Solubilizado, encruado e envelhecido artificialmente.
	T9 - Solubilizado, envelhecido artificialmente e encruado.
T10 - Resfriado da temperatura de fabricação, encruado e envelhecido artificialmente.	

Fonte: Askeland, 2010

1.1.2 Características e aplicações das ligas de alumínio

De acordo com a tabela 2, cada liga de alumínio tem como característica elementos ligantes próprios que os diferenciam em propriedades e por consequência aplicações diferentes como mostra Melado (2014):

Séries 1xxx: Pureza igual ou superior a 99%. Apresenta um resistência a corrosão muito boa, alta condutividade térmica e elétrica, alta ductilidade e baixa resistência mecânica. Não tem uma boa resposta a tratamentos de aumento de resistência mecânica devido seu elevado grau de pureza. Aplicações nas áreas elétricas e química.

Série 2xxx: Apresenta o cobre como principal elemento de liga. Essa série é muito utilizada em aplicações estruturais. Tem uma boa usinabilidade, baixa soldabilidade e baixa resistência à corrosão.

Série 3xxx: Apresenta o manganês na sua composição como principal elemento de liga, com um teor máximo de 1,5%. Esta série apresenta resistência mecânica média e pode ser melhorada por meio de trabalho mecânico. Tem aplicações em diversos segmentos como: utensílios domésticos, trocadores de calor, latas de bebidas, etc.

Série 4xxx: Apresenta o silício como principal elemento de liga desta série, com teor máximo de até 12%, que tem como função baixar a temperatura de fusão sem que cause fragilização. São utilizadas principalmente como arames de solda e liga de brasagem.

Série 5xxx: Tem o magnésio como principal elemento de liga, e apresentam uma boa resistência mecânica juntamente com uma alta ductilidade além de boa soldabilidade e resistência a corrosão. Tem muitas aplicações na indústria naval e metal-mecânica.

Série 7xxx: O zinco é o seu principal elemento de liga, com teor que varia de 1 a 8%. Apresenta alta resistência mecânica, sendo empregada em aplicações estruturais, principalmente pela indústria aeronáutica.

Série 8xxx: Apresenta o estanho como principal elemento de liga. Estas ligas são indicadas para aplicações em mancais e buchas, pois suportam elevadas cargas e apresentam alta resistência a fadiga. Conta com uma alta resistência a corrosão, quando em comparação com outros metais usados normalmente para essas finalidades.

1.1.3 Series 6xxx

A série 6xxx será a abordada neste trabalho como material de estudo de acordo com os objetivos a serem desenvolvidos. Apresenta o magnésio e o silício como elementos principais de liga. Esses elementos se combinam para formar o composto intermetálico Mg_2Si que

quando dissolvido na matriz de alumínio, aumenta a resistência mecânica e dureza. Essa série é muito aplicada como liga estrutural de resistência alta, quando comparadas as outras ligas de alumínio. É muito utilizada nas indústrias automotivas de 4 e 2 rodas, bem como na aeronáutica e naval.

Segundo Hatch (1984), a primeira dessas ligas nos Estados Unidos foi desenvolvida em meados de 1920 e utilizou silício em excesso da relação Mg-Si. Uma alteração atualmente usada em peças forjadas, 6151, contém uma quantidade de cromo para controlar tamanho de grão em produtos que necessitam de tratamento térmico após a fabricação ou trabalhos que produzem várias quantidades de endurecimento por deformação. Uma liga similar, 6351, contém manganês em vez de cromo.

A liga específica a ser utilizada nesse trabalho é a AA6351, devido ser uma liga comercial trabalhada muito comum em produtos como Barras e perfis.

1.2 Tratamento Térmico em Ligas de Alumínio

Tratamentos térmicos são operações de aquecimento e resfriamento de um produto metálico com o objetivo de alterar suas propriedades mecânicas como, resistência, dureza, estrutura metalúrgica e aliviar tensões residuais. Quando o tratamento térmico é aplicado em ligas de alumínio, este se destina a melhorar a resistência e a dureza de ligas comercialmente utilizadas e ligas fundidas por meio da precipitação endurecível. Essas ligas "termicamente tratáveis" se diferenciam das não termicamente tratáveis que dependem apenas de trabalhos a frio para melhorar suas propriedades e são ligas que não sofrem grandes esforços (ASM HANDBOOK vol.4).

1.2.1 Endurecimento por precipitação

Endurecimento por precipitação é o mecanismo principal para o fortalecimento empregado no desenvolvimento e na fabricação de uma liga de alumínio trabalhada de média e alta resistência para aplicações aeroespaciais, automotivas, navais e de engenharia de arquitetura. Com a adição de elementos de liga, as ligas das séries trabalhadas 2xxx, 6xxx e 7xxx são desenvolvidas usando fortalecimento por precipitação. Uma série de tratamentos térmicos são dados a liga com o objetivo de aumentar sua resistência. Primeiramente a liga é submetida a alta temperatura (acima de 490°C) para dissolver os elementos de liga na matriz de alumínio, seguido de uma têmpera em água para obter uma solução sólida supersaturada (SSS). Finalmente é feito o envelhecimento que pode ser artificial, quando a SSS fica por um

determinado tempo a uma temperatura, ou natural onde ela permanece por longo períodos de tempo para promover a precipitação e obter um aumento de dureza. (LUMLEY, 2011).

1.2.1.1 Solubilização

Um dos passos mais importantes do endurecimento por precipitação de uma liga de alumínio tratável é o aumento da solubilização da solução sólida e isso é dado com o aumento da temperatura. De acordo com Toten et.al. (2003), para realizar o endurecimento por precipitação é necessário criar uma solução sólida na qual tem o máximo de elementos de liga. A temperatura mínima necessária para essa solubilização é determinada de acordo com a composição da liga. Exceder a temperatura eutética pode levar a uma fusão incipiente das fases eutéticas, a qual causará danos para as propriedades mecânicas. Uma temperatura muito baixa de solubilização pode causar efeitos significantes nas propriedades finais.

1.2.1.2 Têmpera

Uma vez que se chegue ao estado de solubilização total é preciso que se mantenha os elementos de liga em solução sólida supersaturada, à temperatura ambiente. Nesse contexto, é realizada a têmpera que é um resfriamento brusco que deve ser feito na liga solubilizada, sem interrupções, até à temperatura ambiente. Dessa maneira é garantido que a solução sólida se conserve não permitindo uma precipitação inicial (KAUFMAN, [et al.], 2004).

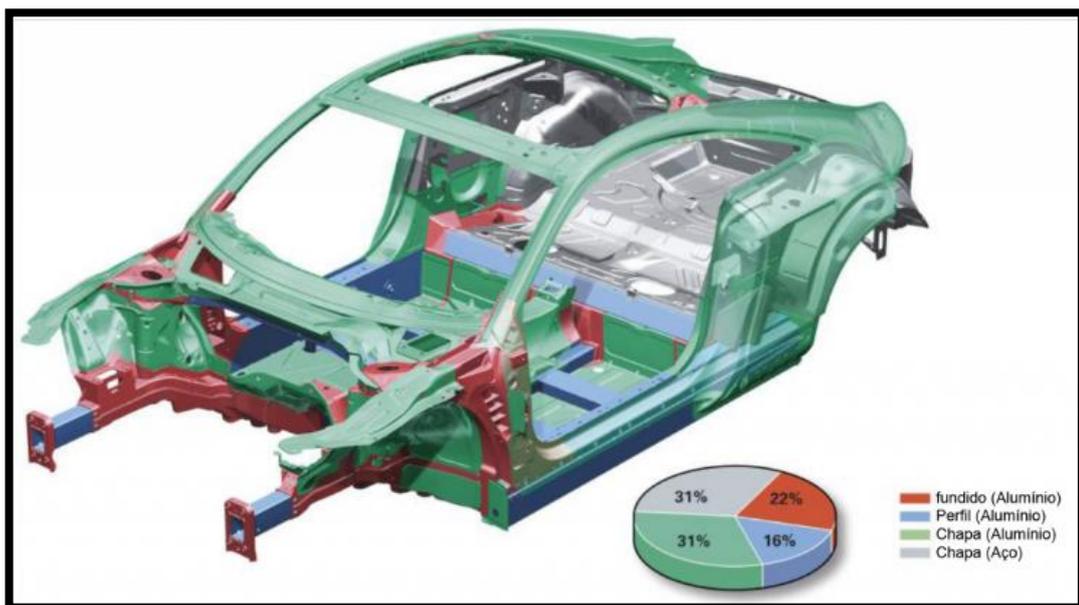
Na indústria, torna-se uma desafio garantir que a precipitação inicial não ocorra. Para que se tenha um custo mais baixo com o procedimento, o forno de solubilização é carregado com grandes cargas de volume. Este procedimento torna mais difícil a transferência da carga do forno até o tanque de refrigeração. Dessa maneira é necessário que esse tempo de transferência seja rápido o suficiente para que não ocorra uma pré refrigeração. Com isso pretende-se evitar a precipitação inicial sendo que nesta fase ela não é interessante. A taxa de transferência de calor entre a carga e o meio de arrefecimento deve ser elevado, caso contrário, inicia-se a precipitação. Geralmente, água, à temperatura ambiente, é o meio de arrefecimento escolhido (MAIA, 2012).

Nesta fase, o que se deseja é obter uma situação de não equilíbrio na qual os elementos ficam dissolvidos na matriz. É comum dizer ter-se atingido um estado metastável equivalente a uma solução sólida sobressaturada. Este estado é relativamente instável e a liga tem a tendência a passar para um estado de menor energia pela decomposição da solução sólida sobressaturada, em fases metastáveis ou de equilíbrio (MAIA 2012).

FIGURA 1 - Aplicação das ligas de alumínio termicamente tratáveis a) Naval, b) Automotiva



a)



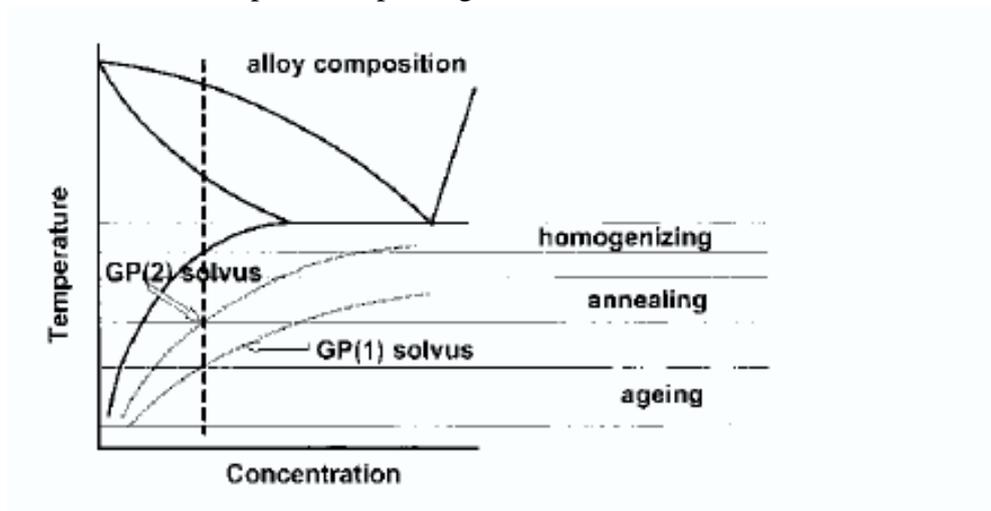
b)

Fonte: <http://aluauto.com.br/tecnologia-audi-space-frame/> acesso em 12/11/2017 -

1.2.1.3 Envelhecimento

O envelhecimento pode ser classificado como natural ou artificial de acordo com o tempo e a temperatura que a liga será exposta. Segundo Toten et. al. A condição geral para precipitação da solução sólida supersaturada, requer uma fina dispersão de precipitados durante o envelhecimento. A temperatura de envelhecimento tem que ficar abaixo da linha solvus e abaixo da linha da fase GP (Guinier Preston) solvus (Figura 2). A presença de excesso de vacâncias promove a difusão e a formação de zonas é mais rápida que as condições de equilíbrio. Durante a precipitação um primeiro aglomerado de átomos é formado seguido pela formação de precipitados metaestáveis. O mecanismo de resistência é causado pelos precipitados coerentes de átomos de soluto.

FIGURA 2 - Escalas de temperaturas para tratamentos térmicos e curvas solvus importantes para ligas binárias de alumínio.

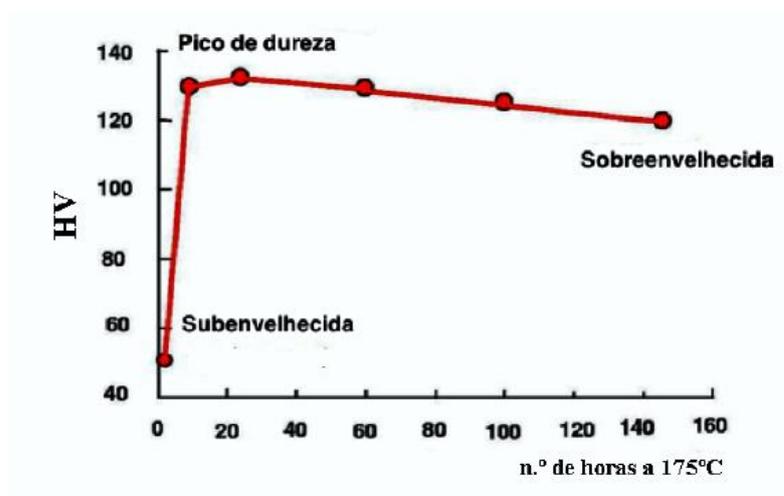


Fonte: Toten et. al.

O efeito do tempo de envelhecimento na resistência mecânica, é normalmente determinado pela curva de envelhecimento. A curva de envelhecimento é uma representação em gráfico do comportamento da resistência mecânica ou da dureza com o tempo de envelhecimento a uma determinada temperatura (SILVA, 2010).

A figura 3 mostra uma curva de envelhecimento tradicional de uma liga da série 6xxx. Observa-se a variação da dureza ao longo do tempo.

FIGURA 3 - Curva de envelhecimento de uma liga serie 6xxx. Dureza X Tempo



Fonte: Maia, 2010.

1.3 Propriedades Mecânicas

Os materiais tem muitas propriedades particulares que determinam se o material é resistente ou frágil. Os metais são materiais que possuem uma série de propriedades que determinam seu comportamento quando sofrem um esforço mecânico. Essas propriedades são chamadas de propriedades mecânicas e são importantes na determinação da aplicação de cada tipo de metal, pois quantificam a resistência mecânica que o material apresenta a um determinado tipo de esforço.

Existem vários tipos de propriedades e essas são determinadas através de ensaios mecânicos realizados através de máquinas específicas capazes de determinar as forças, tensões ou medidas de unidade.

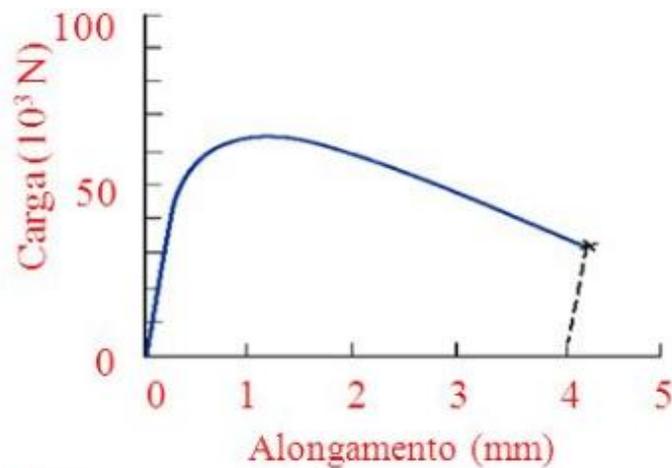
1.3.1 Ensaio de Tração

O ensaio de tração é utilizado para avaliar varias propriedades mecânicas dos materiais e muito importante em projetos de máquinas e equipamentos mecânicos. Também é geralmente utilizado como teste para o controle de especificação de matéria prima fornecida.

Sua ampla utilização na indústria mecânica de componentes é devida à vantagem de fornecer dados quantitativos das características mecânicas dos materiais, como: limite de resistência à tração (σ_u), limite de escoamento (σ_e), módulo de elasticidade (E), módulo de resiliência (U_r), módulo de tenacidade (U_t), ductilidade (AL% ou AS%), coeficiente de encruamento (n) e coeficiente de resistência (k).

O ensaio de tração ou ensaio de ruptura por tração, é o ensaio onde um corpo de prova do metal é preso em duas garras e tracionado a uma velocidade constante enquanto a carga necessária para causar um alongamento é monitorada. É gerado como resultado imediato uma curva carga x alongamento figura 4. Um resultado mais geral consegue - se transformando os dados obtidos na curva da figura 4 em um gráfico. A curva tensão x deformação resultante, aparece na figura 5 (SHACKELFORD, 2008).

FIGURA 4 - Curva Carga x Alongamento



Fonte: Shackelford, 2008.

A tensão de engenharia (1) é dada por:

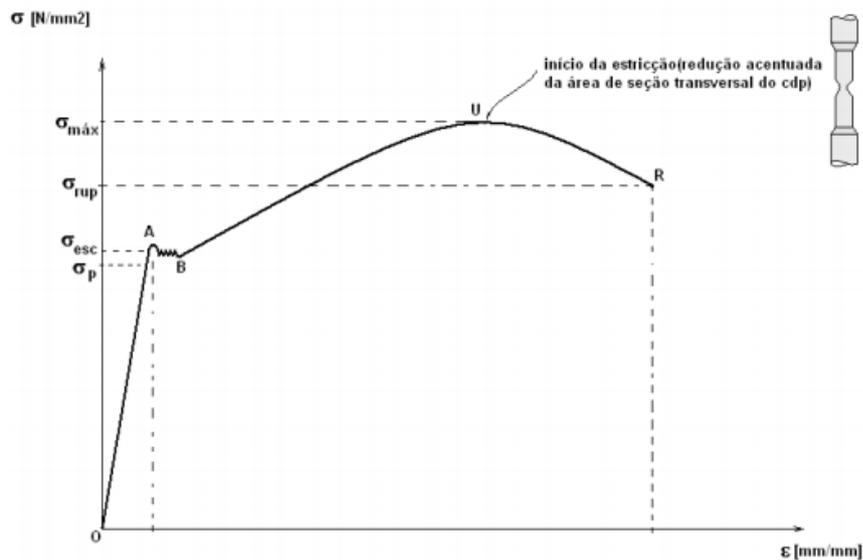
$$\sigma = \frac{F}{A_0}, \quad (1)$$

Onde F é a carga aplicada sobre o corpo de prova e A_0 a área de secção reta original.

A deformação de engenharia (2) é definida de acordo com a expressão:

$$\varepsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (2)$$

onde l_0 é o comprimento original do corpo de prova e l_i é o comprimento instantâneo.

FIGURA 5 - Curva $\sigma \times \epsilon$ de um metal dúctil submetido ao ensaio de tração

Legenda: Fig. 5.

OA – região de comportamento elástico	U – ponto de tensão máxima
AR – região de comportamento plástico	R – ponto de ruptura
AB – região de escoamento de discordâncias	σ_U – limite de resistência do material [Mpa] ou [N/mm ²]
BU – região de encruamento uniforme (empilhamento de discordâncias)	σ_R - limite de ruptura do material [Mpa] ou [N/mm ²]
UR – região de encruamento não uniforme (estricção)	σ_e - limite de escoamento [Mpa] ou [N/mm ²]
A – ponto de escoamento	σ_p - limite de proporcionalidade [Mpa] ou [N/mm ²]

Fonte: Bayer, 2013.

1.3.1.1 Limite de resistência à tração

A tensão máxima que o material suporta (σ_u) é correspondente ao ponto U da figura 4, e é denominado Tensão Limite de Resistência à Tração (3), que se caracteriza por ser a tensão limite antes do material apresentar o fenômeno chamado de estricção,

$$\sigma_u = F / A_o, \quad (3)$$

Após o ponto U tem início a estrição, que representa o início da ruptura do material, sendo um fenômeno marcado pela formação de um “pescoço” no corpo de prova que é a redução da área da secção transversal. (SHACKELFORD 2008).

O Limite de resistência a tração (LRT) é uma das principais propriedades juntamente com o limite de escoamento e outras que compõem a caracterização mecânica do material, auxiliando no processo de especificação e projeto mecânico.

1.3.2 Ensaio de Dureza

A dureza de um material é a resistência a deformação plástica medida através de uma impressão ou risco. Entre as escalas de dureza, a Mohs é a escala mais rústica e representa a capacidade que um material tem de riscar outro mais macio. Na indústria são utilizados os aparelhos de medição de dureza chamados durômetros, os quais fornecem quantitativamente o valor da dureza por meio da dimensão da impressão produzida na superfície da peça ou material. As escalas são em função do tipo de penetrador e da carga aplicada. Na caracterização do material o ensaio de dureza é muito importante.

O ensaio de dureza é muito utilizado na indústria metal-mecânica por ser simples e barato, não inutilizar a peça ensaiada (é um ensaio não destrutivo), e fornecer uma estimativa da resistência à tração do material (BAYER 2013, pg10).

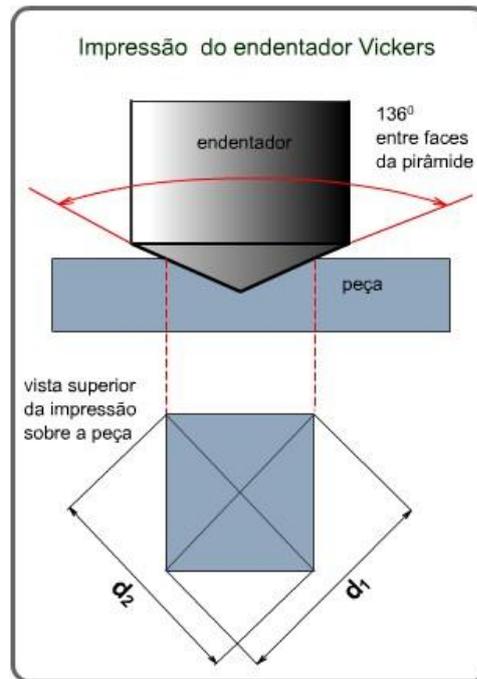
1.3.2.1 Dureza Vickers

O ensaio de dureza vickers consiste em um penetrador pequeno de diamante com base piramidal ser forçado contra a superfície do corpo de prova. As cargas utilizadas nesse ensaio são geralmente bem menores que as utilizadas nos ensaios de dureza Rockwell e Brinell, e variam de 1 a 1000g. A impressão resultante na peça é medida através de microscópio e convertida em dureza conforme fórmula (4). O método de ensaio de dureza vickers também é conhecido como microdureza vickers e é utilizado na maioria das vezes para medir dureza de regiões pequenas (CALLISTER, 2012).

A figura 6 mostra como é a impressão do penetrador e a geometria básica.

$$HV = \frac{2F \sin(136^\circ/2)}{d^2} \cong 1,854 \frac{F}{d^2} \quad (4)$$

FIGURA 6 - Posição de impressão do penetrador (endentador)



Fonte: Centro de informação metal mecânica (CIMM), acesso em 01.11.2017.

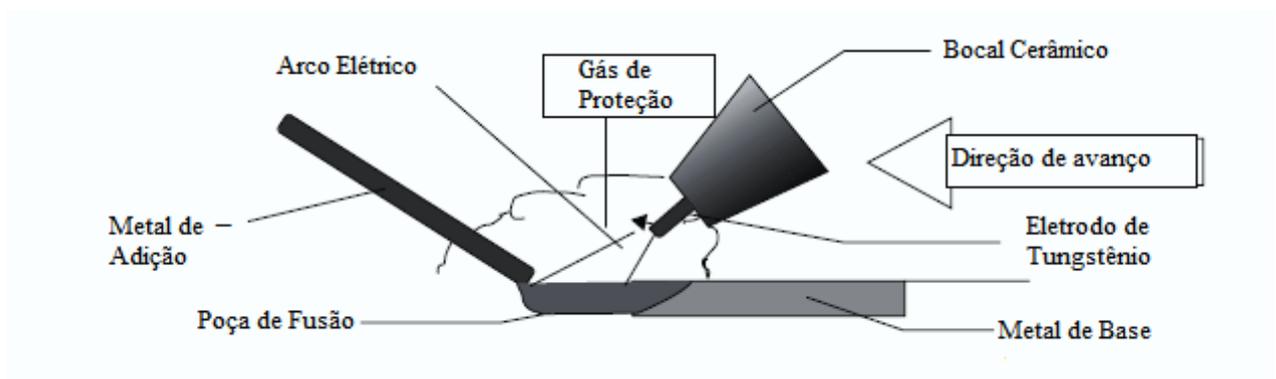
1.4 Soldagem TIG

Segundo Mathers 2002, a soldagem por arco de tungstênio e proteção gasosa inerte, é um processo que tem muitas abreviações e nomenclaturas, mas o mais comum é TIG (Tungsten Inert Gas) ou GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) abreviatura americana. É um processo de soldagem o qual usa um eletrodo de tungstênio não consumível e um gás inerte para proteger o eletrodo, a poça de fusão e o arco elétrico. A soldagem com arco elétrico, age somente como uma fonte de calor e o soldador decide se usa ou não um metal de adição. A poça de fusão é facilmente controlável e até mesmo um passe de raiz sem backing pode ser feito, o arco é bem estável e a corrente de soldagem baixa, possibilitando a soldagem de componentes finos e produzindo uma qualidade de solda muito boa, embora para melhores resultados são necessários soldadores altamente habilidosos. A figura 7 ilustra o processo de soldagem TIG. A máquina de soldagem TIG pode ser de corrente alternada ou corrente contínua.

A escolha do tipo de corrente depende do tipo de material que se quer soldar. Também possui uma tocha a qual fixa o eletrodo de tungstênio. Fonte de gás com válvula reguladora de vazão. A maioria das máquinas de soldagem tem um sistema de alta frequência de ignição

juntamente com um pedal de liga e desliga para a energia e o gás de proteção. (PIMENTA 2012).

FIGURA 7 - Esquemático do processo de soldagem TIG



Fonte: Mathers, 2002.

1.4.1 Eletrodos

Os eletrodos com uma pequena quantidade de tório ou cério tem uma melhor emissividade elétrica e resistência a contaminação que o eletrodo puro. Com isso o resultado é uma abertura de arco mais fácil e mais estável. A eletro emissividade é a capacidade que o eletrodo tem de emitir elétrons, quando se tem uma baixa emissividade o eletrodo aumenta muito a temperatura, aumentando o risco de fundir a ponta do eletrodo (KOU 2003).

Existem também eletrodos com outros elementos na composição. O eletrodo com Zircônia (ZrO_2) é o mais indicado para soldagem com corrente AC - TIG pois este tem o ponto de fusão maior que o do eletrodo de tungstênio puro e maior do que o eletrodo com composição de tório, dessa maneira pode soldar em correntes de mais altas, com mais resistência a contaminação e menos favorável ao desgaste. (MATHERS 2002).

1.4.2 Proteção gasosa

O gás de proteção é um elemento de suma importância no processo de soldagem, pois garante a qualidade da solda, que inclui o eletrodo, poça de fusão e o arco elétrico. Sem o gás de proteção o ambiente da solda fica exposto aos gases da atmosfera que reagem quimicamente com a solda. Geralmente são usados dois tipos de gases, o Hélio e o Argônio ou uma mistura deles, o que pode influenciar no perfil da solda (NORRISH, 1992).

Segundo Kou (2003), ambos argônio e hélio podem ser usados no processo. A tabela 2 mostra as propriedades de alguns gases de proteção. Como mostrado, o potencial de ionização

para o argônio é 15.7 enquanto que para o hélio é 24,5 eV (eletro volt). Com isso é mais fácil ionizar o argônio que o hélio, a abertura de arco é mais fácil também, além da queda de tensão ao longo do arco ser mais baixa com argônio. Como o argônio é mais pesado que o hélio, ele proporciona uma proteção mais efetiva para a zona de fusão e maior resistência transversal que o hélio. Com DC ou AC, o argônio tem grande limpeza de óxido. Com essas vantagens, aliado ao baixo custo do argônio, se faz o argônio a opção mais atrativa para soldagem TIG.

Tabela 2 - Propriedades físico-químicas dos gases de proteção

Gás	Símbolo Químico	Peso Molecular (g/mol)	Gravidade Específica com Respeito ao Ar em 1 atm e 0°C	Densidade (g/L)	Potencial de Ionização (eV)
Argônio	Ar	39.95	1.38	1.784	15.7
Dióxido de carbono	CO ₂	44.01	1.53	1.978	14.4
Hélio	He	4.00	0.1368	0.178	24.5
Hidrogênio	H ₂	2.016	0.0695	0.090	13.5
Nitrogênio	N ₂	28.01	0.967	1.25	14.5
Oxigênio	O ₂	32.00	1.105	1.43	13.2

Fonte: Kou, 2003.

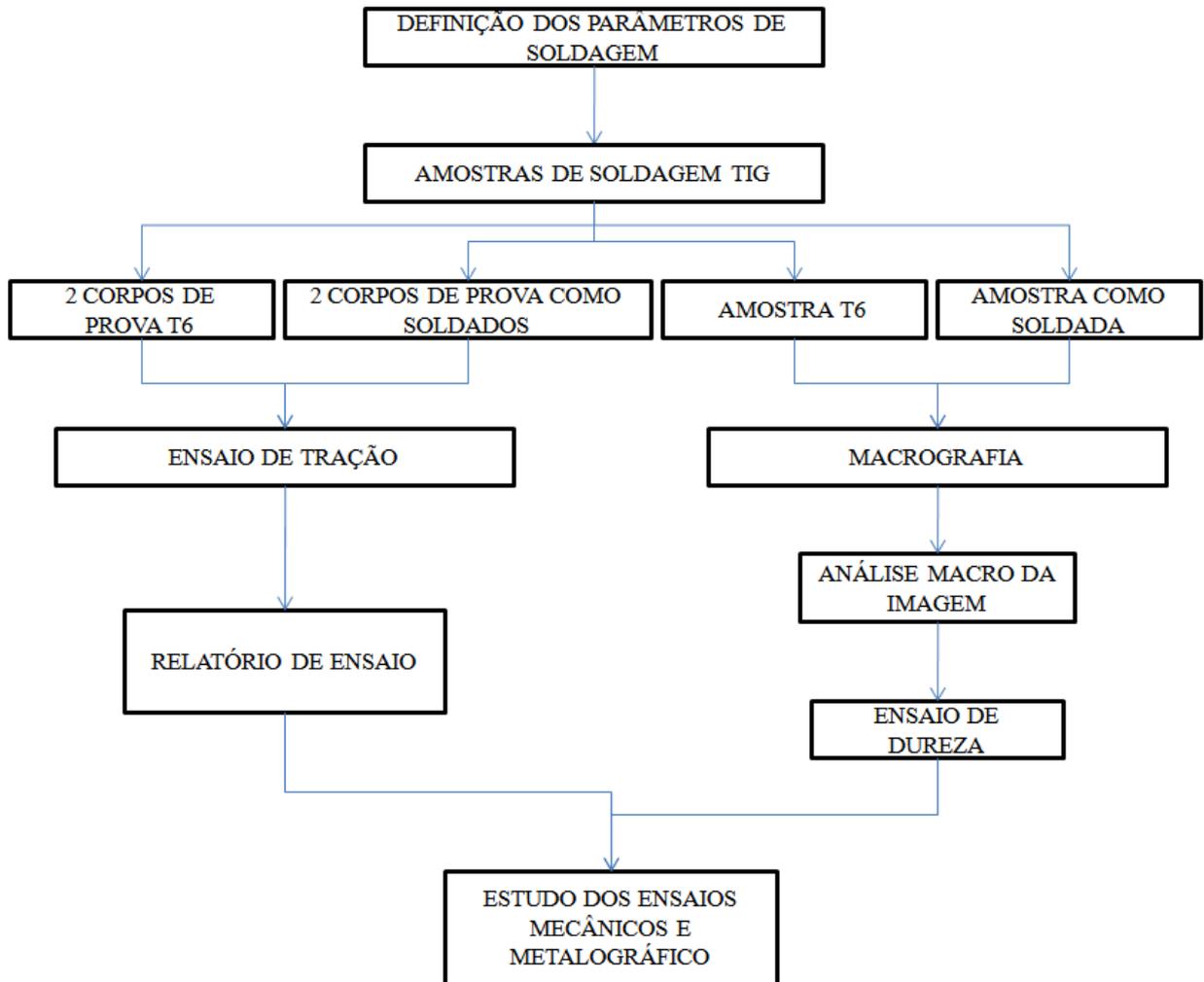
1.4.3 Vantagens e desvantagens

O processo TIG é indicado principalmente para soldagem de seções com espessura fina devido seu aporte de calor limitado. A taxa de alimentação do metal de adição é um pouco independente da corrente de soldagem, permitindo assim a variação na quantidade relativa de metal de base fundido e metal de adição fundido. Dessa maneira o controle da diluição e da energia necessária para soldar podem ser salvos sem a necessidade de mudar o tamanho da solda. Ela pode ser usada para soldar juntas de topo em Barras finas sem o uso de metal de adição ou também chamada de soldagem autógena. A soldagem TIG é um processo muito limpo, que tem capacidade de soldar metais reativos como Titânio e Zircônio, Alumínio e Magnésio. Entretanto, a taxa de deposição de material é muito baixa. Utilizar altas correntes de soldagem pode causar a fusão da ponta do eletrodo e por consequência inclusão no metal de base. Utilizando varetas de metal de adição pré aquecidas, a deposição do metal pode ser melhorada (KOU, 2003).

CAPÍTULO 2

MATERIAIS E METODOLOGIA EXPERIMENTAL

FIGURA 8 - Fluxograma dos ensaios realizados no trabalhos



Este capítulo aborda a metodologia utilizada para caracterizar algumas propriedades mecânicas de uma junta soldada de liga de alumínio AA6351-T6 de aplicação estrutural em automóveis, barcos, bicicletas, estrutura de palco e som, tendas e demais utilizações.

O procedimento experimental constitui uma sequência de atividades que inclui preparação do metal, soldagem, usinagem de corpos de prova, ensaios de tração, ensaio de dureza e macrografia. O Fluxograma da figura 8 ilustra a sequência dos principais procedimentos realizados como procedimento experimental.

2.1 Material

O material utilizado neste trabalho é a liga de alumínio da série 6000 denominada pela AA(Aluminium Association) como AA6351 vendida comercialmente com T6 (Solubilizado e envelhecido artificialmente) e adquirida na forma de barra chata no tamanho 3"x1/4". A composição química e as propriedades da liga estão nas tabelas 3 e 4 respectivamente.

Tabela 3 - Composição química nominal em porcentagem

Liga	Silício	Cobre	Manganês	Magnésio	Cromo	Níquel	Zinco	Titânio
6351	1.0	...	0.6	0.6

Fonte: Kaufman, 2000 de acordo com Aluminium Association.

Tabela 4 - Propriedades mecânicas comerciais da liga

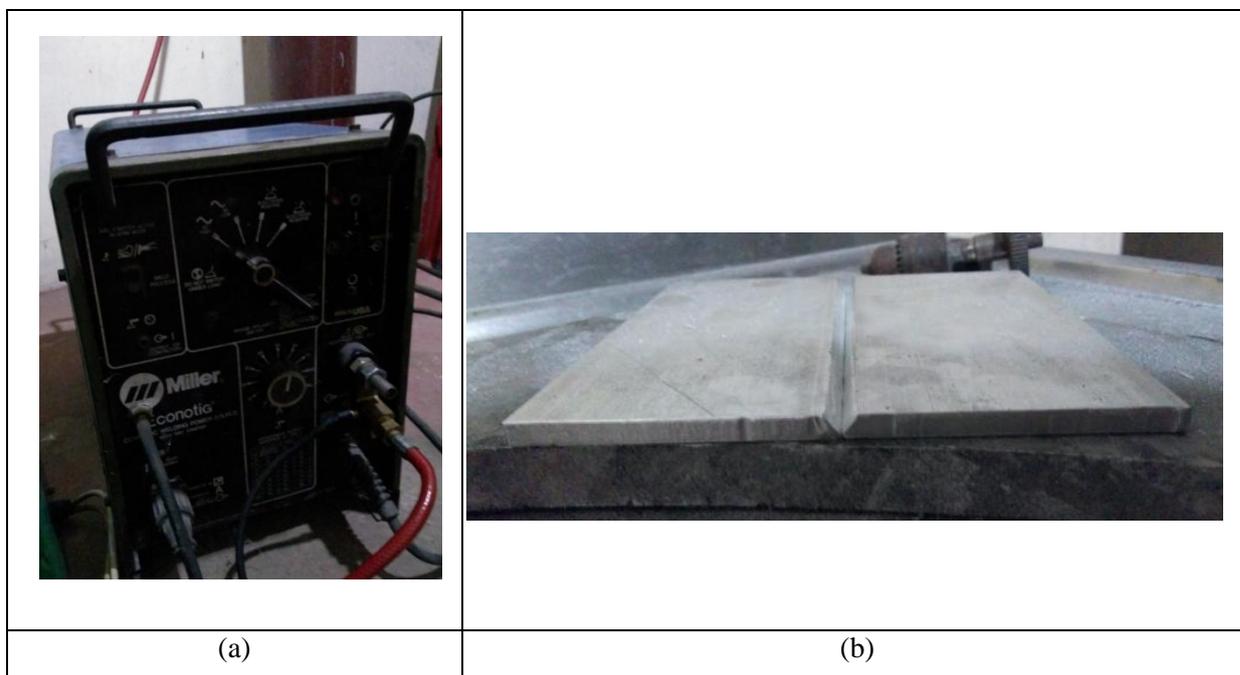
Liga e Tratamento	Limite de resistência a tração (Mpa)	Limite de resistência ao escoamento (Mpa)	Alongamento em 50mm (%)	Dureza (b) BHN	Resistência ao cisalhamento (Mpa)	Limite de fadiga (c) (Mpa)
6351 - T6	340	295	13	95	200	90

Fonte: Hatch, 1984.

2.2 Soldagem das amostras

As amostras foram cortadas nas dimensões de 75 x 150 mm e posicionadas longitudinalmente resultando em uma junta de 150 x 150 mm conforme figura 9 b. Foram feitas duas juntas da mesma maneira sendo chamadas de barra A e barra B. A figura 10 mostra as barras A e B, além da tocha TIG e o pré aquecimento.

FIGURA 9 - a)Máquina de Solda Tig Miller Econotig b)Barras chatas posicionada para serem soldadas



A junta foi soldada pelo processo TIG utilizando corrente alternada (CA). Foi utilizada a máquina de solda da marca Miller modelo Econotig CC-AC/DC Welding Power source (figura 9 a) com eletrodo de tungstênio e 0,2 % de tório. O metal de adição utilizado foi a vareta ER 4043, que é a liga mais indicada para a soldagem pois apresenta maior fluidez e é menos sensível ao fissuramento, além de ter uma boa compatibilidade química com as ligas da série 6000, com diâmetro de 2,4 mm e com a composição química mostrada na tabela 5. O gás utilizado foi o argônio.

Tabela 5 - Composição química ER4043 em comparação com a liga AA6351 em %

Liga	Silício	Cobre	Manganês	Magnésio	Ferro	Níquel	Zinco	Titânio
AA6351	1.0	...	0.6	0.6
ER4043	4,5 - 6,0	0,3	0,05	0,05	0,8	...	0,1	0,2

Fonte: AWS 5.10.

As amostras foram soldadas segundo os parâmetros da espessura 6.5 mm mostrados na tabela 6, na qual tem valores recomendados segundo Mathers (2002) para proteção gasosa de argônio. As duas amostras foram soldadas na posição plana de junta de topo chanfrada com os mesmos parâmetros e na mesma posição de acordo com a preparação sugerida pela norma britânica BS 3019 mostrada na quadro 3. A soldagem foi feita em dois passes e a Barra

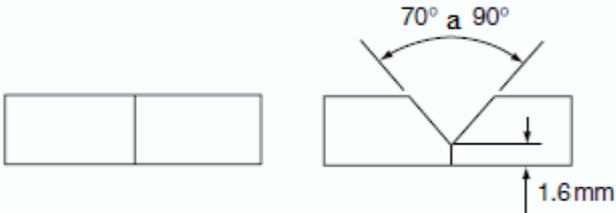
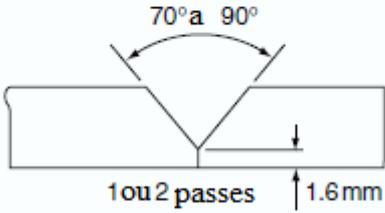
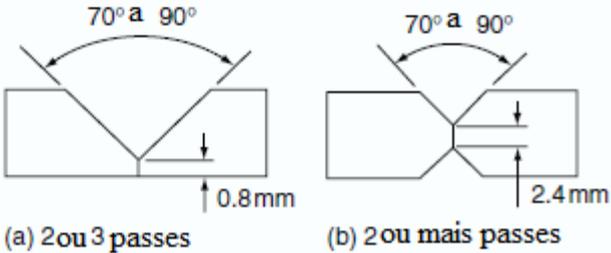
recebeu um ponto no início e um ponto no fim da junta para que fosse travada na posição certa. Também recebeu uma limpeza no local da solda e um pré aquecimento de 180°C para evitar porosidade e facilitar a deposição do metal de adição. A tabela 7 mostra um resumo de todos os o parâmetros utilizados na soldagem.

Tabela 6 - Sugestões de parâmetros de soldagem - Proteção gasosa de argônio

Espessura (mm)	Tipo de Junta	Abertura de Raiz (mm)	Corrente (A)	No. de passes	Diâmetro da Vareta (mm)	Velocidade (mm/min)	Diâmetro do Bocal (mm)
0.8	Topo quadrada	sem	55	1	1.6	300	9.5
1.2	Topo quadrada	sem	100	1	2.4	400	9.5
1.5	Topo quadrada	0.8	130	1	2.4	470	9.5
1.5	Filete		100	1	2.4	250	9.5
2	Topo quadrada	0.8	160	1	3.2	380	9.5
2.5	Topo quadrada	0.8	170	1	3.2	300	9.5
2.5	Filete		140	1	3.2	250	9.5
3.2	Topo quadrada	0.8	180	1	3.2	300	12.7
3.2	Filete		175	1	3.2	300	12.7
5	Topo quadrada	1.6	250	1	4.8	200	12.7
5	Filete		240	1	4.8	250	12.7
6.5	Topo c/ Chamf.	sem	320	1 ou 2	4.8	150	12.7
6.5	Filete		290	1	4.8	250	12.7
8	Topo c/ Chamf.	sem	340	2	4.8	165	12.7
10	Topo c/ Chamf.	sem	350	2	6.4	180	12.7
10	Filete		370	2	6.4	250	16

Fonte: Mathers, 2002.

Quadro 3 - Sugestão de preparação de soldagem TIG da norma BS 3019

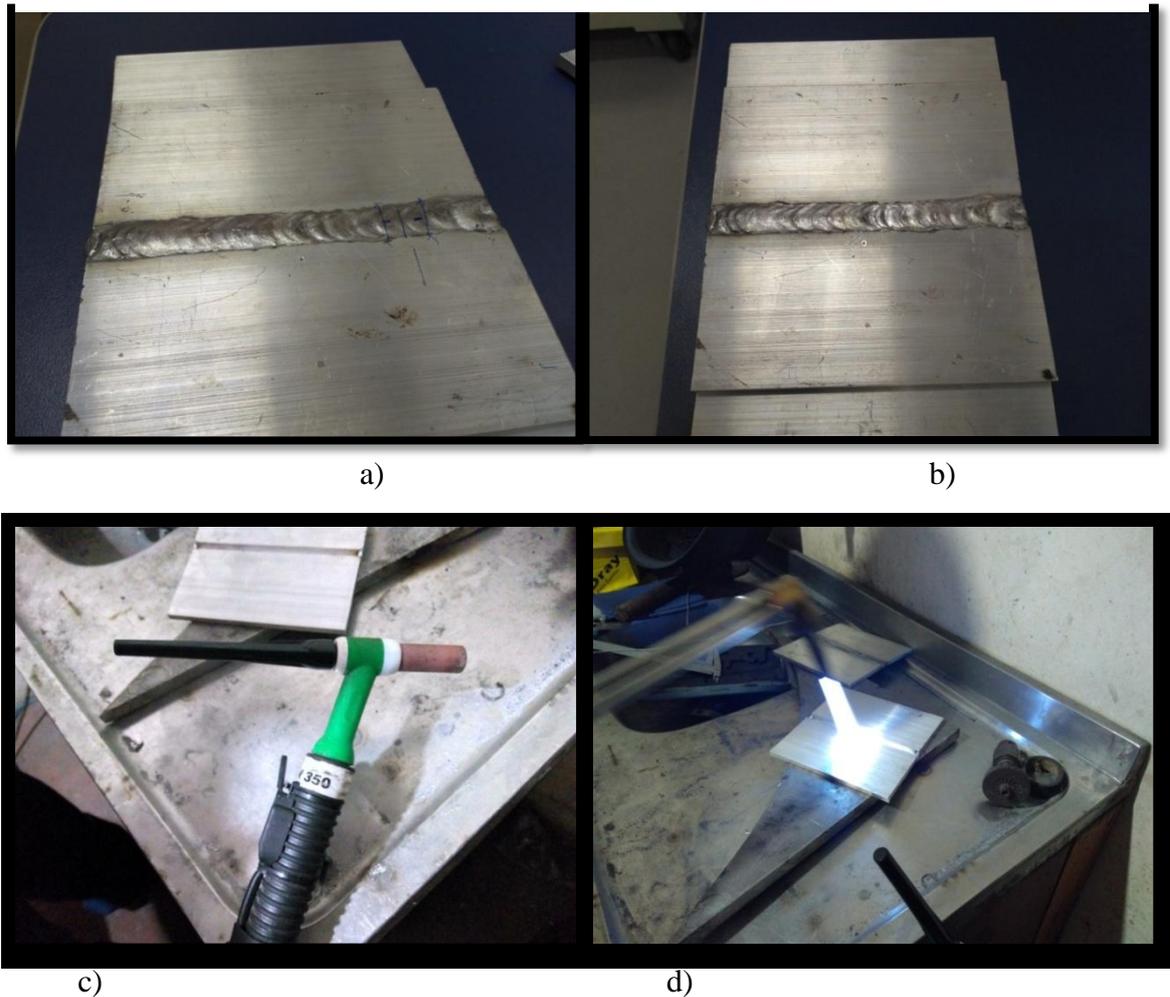
Espessura	Preparação da Junta
0.9mm	
1.6mm	
3.8mm	
4.8 mm	
6.4mm	
9.5mm	

Fonte: Mathers, 2002.

Tabela 2 - Parâmetros usados de fato na Soldagem TIG das amostras

Espessura (mm)	Junta de Topo	Corrente (A)	Vazão do Gás (l/min)	Diâmetro do Eletrodo (mm)	Diâmetro do Bocal (mm)	Número de Passes	Diâmetro da vareta (mm)
6.35	Chanfrada 80°	250	12	3,2	12	2	2,4

FIGURA 10 - a) Barra A, b) Barra B, c)Tocha TIG, d) Pré - aquecimento

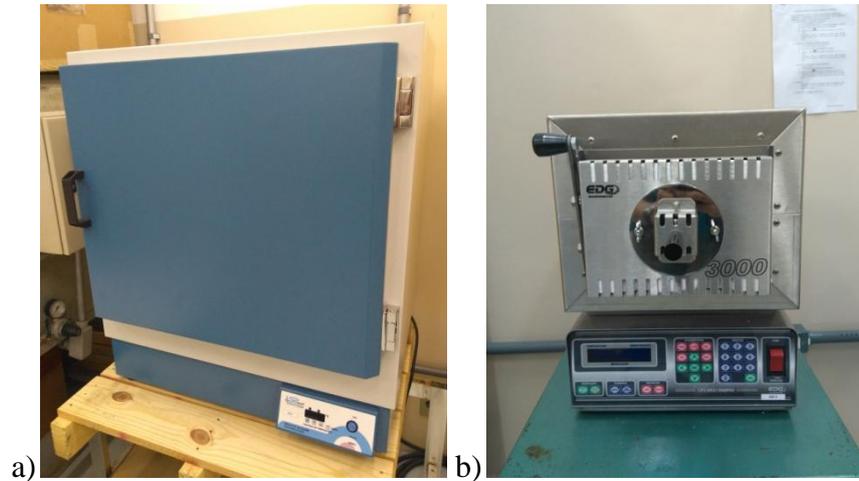


2.3 Tratamento Térmico

Após a soldagem foi realizado um tratamento térmico T6, no qual amostras da Barra B foram solubilizadas a uma temperatura de 550°C por 30 minutos e logo após resfriadas bruscamente em água, se tornando uma solução sólida supersaturada. Em torno de 1 hora após a têmpera, as amostras da liga de alumínio retornaram ao forno para ser realizado a etapa de envelhecimento artificial, na qual foram submetidas a uma temperatura de 165°C por 6h e depois resfriados ao ar livre até a temperatura ambiente.

O tratamento térmico T6 foi realizado no laboratório de metalurgia da Universidade Federal do Amazonas - Faculdade de Tecnologia. Os equipamentos utilizados foram: Forno Mufla marca EDG, modelo: EDG3000, e estufa marca: SPLABOR modelo: SP-100/150. mostrados na Figura 11.

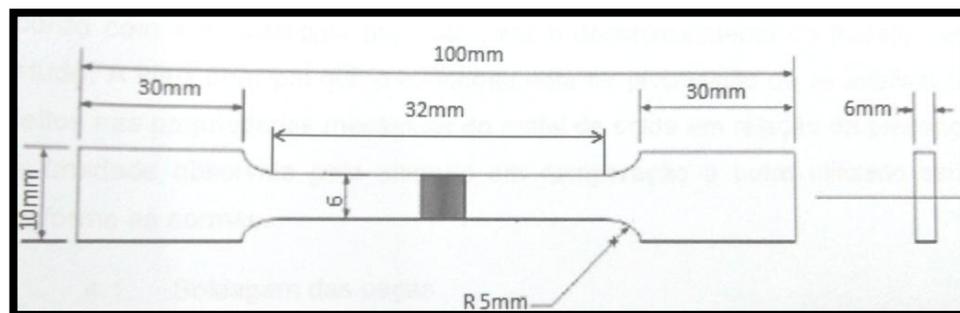
FIGURA 11 - Estufa a), Mufla b)



2.4 Ensaio de Mecânicos

Foram realizados ensaios de tração e de dureza nas amostras do metal de base como veio do fornecedor, amostras com T6 pós soldagem retiradas da Barra B e sem T6 pós soldagem retiradas da Barra A.

FIGURA 12 - Corpo de prova segundo ASTM E8



Fonte: ASTM E8, 2008.

2.4.1 Ensaio de tração

Foram usinados três corpos de prova de cada junta soldada (Barra A e Barra B), de maneira transversal passando pelo centro do cordão de solda, e mais três corpos de prova do material como veio do fornecedor. Os CPs (corpos de prova) foram usinados de acordo com a norma (figura 12) da Associação Americana de Teste de Materiais (ASTM) E8/E8M.

O CPs depois de usinados passaram pelo processo de rebarbação e aplainamento na fresa para tirar os excessos de solda e evitar concentração de tensões e influência no ensaio.

Os ensaios de tração foram realizados no laboratório de ensaio de materiais do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Amazonas - Departamento Acadêmico de Processos Industriais (DPI). Equipamento: Máquina universal de ensaios da marca Equilam modelo EQTB - 100 (figura 13). O corpo de prova foi posicionado e marcado conforme mostra a figura 14 para que se calculasse o alongamento manualmente. A velocidade de tração utilizada foi a de 2mm/min como no trabalho de Melado 2014 que caracterizou as propriedades mecânicas da liga de alumínio AA5086.

FIGURA 13 - Máquina de tração Equilam - Lab. Ensaio de Mat.

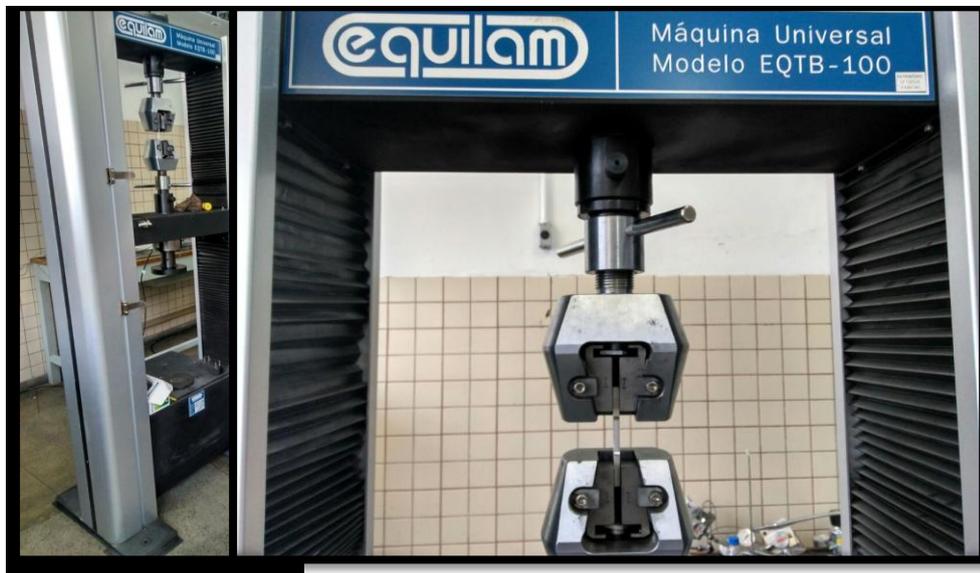


FIGURA 14 - Posicionamento do corpo de prova na máquina - Lab. Ensaio de Mat.



2.5 Metalografia

A preparação metalográfica foi realizada no laboratório de metalografia do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Amazonas - Departamento Acadêmico de Processos Industriais (DPI). Foi realizada macrografia da seção transversal do cordão de solda de uma amostra apenas soldada (barra A) e uma amostra soldada e tratada com T6 (barra B).

As amostras foram lixadas com as lixas de granulometria de 220, 320, 400 e 600. Após o lixamento foi feito o polimento com pasta de diamante de granulometria de 6, 3 e 1 μ m (Figura 15). O ataque químico foi realizado com o reagente keller por 5 segundos seguido de lavagem e secagem.

As imagens foram obtidas por câmera digital comum, pois não há necessidade de ampliação das secções da solda.

FIGURA 15 - Polimento das amostras - Lab. Metalografia



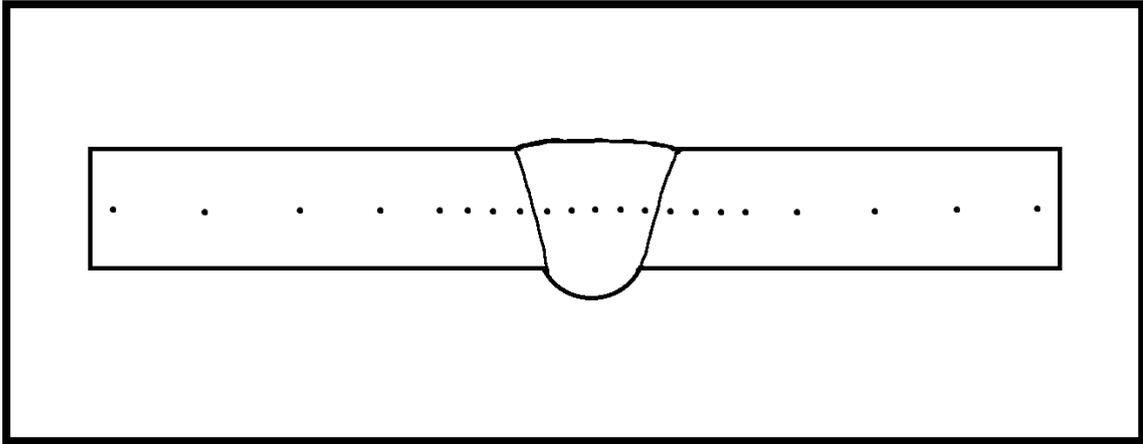
2.6 Ensaio de Dureza

O ensaio de dureza foi realizado no laboratório de ensaio de materiais do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Amazonas - Departamento Acadêmico de Processos Industriais (DPI). Equipamento: Durômetro digital da marca TIME, modelo TH710 com medição automática de dureza (figura 16). A escala utilizada foi a HV0.5, isto é dureza na escala Vickers com carga de 500g e tempo de aplicação de 30 segundos como sugerido pelo manual do equipamento para metais não ferrosos. As amostras usadas no ensaio de dureza são as mesmas que foram feitas as macrografias, devido apresentarem as principais regiões da solda bem definidas como zona fundida (ZF) e zona termicamente afetada (ZTA). Conforme a figura 17 ilustra, foram feitas endentações em linha reta no meio da região transversal da soldadura, começando no centro da zona de fusão para ambos os lados com distanciamento de 2mm de uma para outra até a distância de 12mm e depois mais espaçadas até a distância de 45mm totalizando 21 medidas em cada amostra. Também foi realizadas 5 medidas em locais variados de uma amostra da barra que não foi soldada, para se ter um valor de base da dureza do material estudado.

FIGURA 16 - Microdurômetro Vickers



FIGURA 17 - Esquemático das posições de medição de dureza



A figura 17 é uma esquemata da secção transversal da área da soldada (zona de fusão e zona termicamente afetada), na qual se localizaram as medições de microdureza Vickers.

CAPÍTULO 3

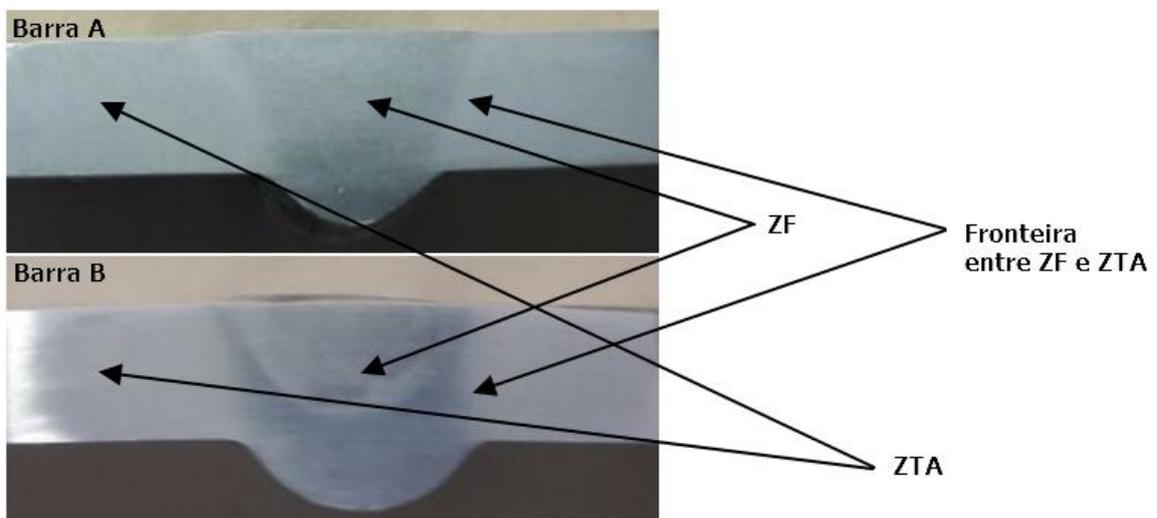
RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo será mostrado o resultado de todos os experimentos realizados em laboratório. Também será feita uma discussão de seus resultados afim de atingir o objetivo geral desta investigação assim como os específicos. Serão analisados os resultados de ensaio de tração, dureza e metalografia das amostras retiradas das juntas soldadas da liga de alumínio AA6351, soldadas e tratadas termicamente com T6 e da liga como veio do fornecedor (MB).

3.1 Macrografia

As amostras em geral não apresentaram nenhum defeito aparente como mostra as macrografias na figura 18. Nenhuma mordedura, nem trincas, nem porosidade visível na macrografia foi detectado. Observa - se que a raiz teve uma boa fusão, porém uma penetração um pouco excessiva. O uso das geometria de preparação sugerida por Mathers 2002 em seu livro "The welding of aluminium and its alloys" foi uma boa escolha pois a poça de fusão na raiz conseguiu fundir bem o metal que ficou (1,6mm), sem a necessidade de espaço entre as áreas de soldagem. A figura 18 indica as regiões da soldagem da amostra tirada da barra A que foi apenas soldada e da barra B a qual recebeu tratamento térmico T6. Na barra B é possível ver mais claramente os 2 passes que foram feitos do que na barra A. O ataque químico não foi muito efetivo mas conseguiu - se distinguir as principais zonas mesmo que com uma certa dificuldade.

FIGURA 18 - Amostra da barra A e barra B



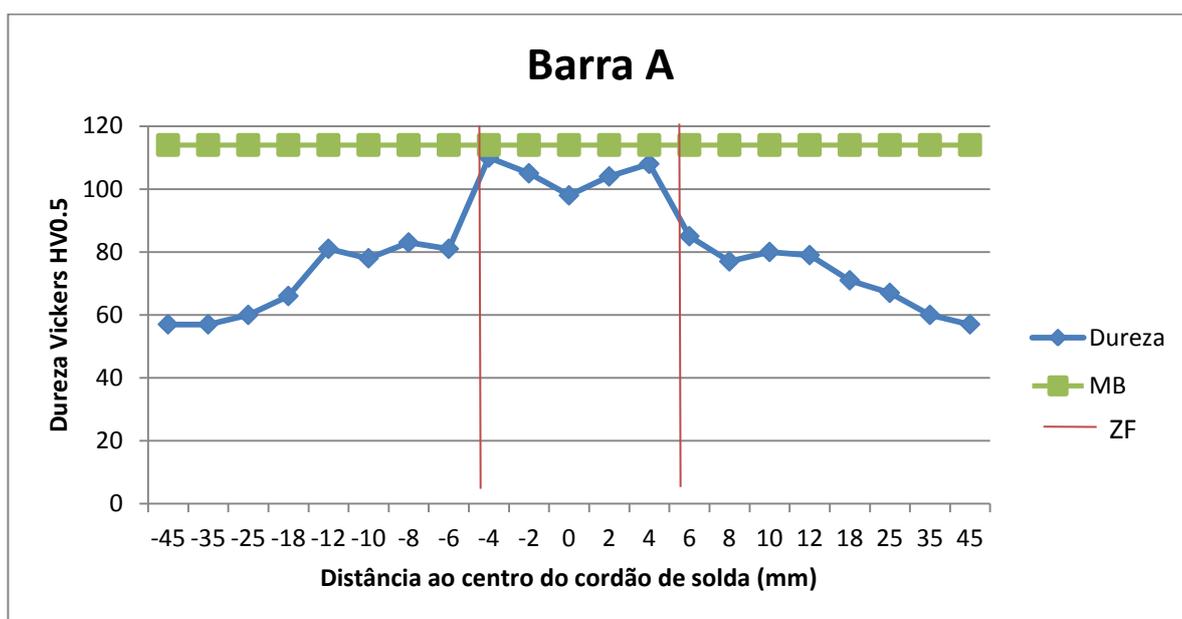
3.2 Resistência mecânica

A análise da resistência mecânica dar se a pelos resultados dos ensaios mecânicos de tração e dureza do material, os quais mostrarão, em porcentagem, as perdas e ganhos de resistência de acordo com o referencial proposto.

3.2.1 Ensaio de dureza

A análise da dureza na secção transversal da solda revelou um pouco do que ocorreu com a resistência do material após a soldagem e após o tratamento térmico de envelhecimento artificial. Nas figuras 19 e 20 (gráficos 1 e 2) são mostrados os resultados dos ensaios de microdureza Vickers para as amostras das barras A, B e do MB.

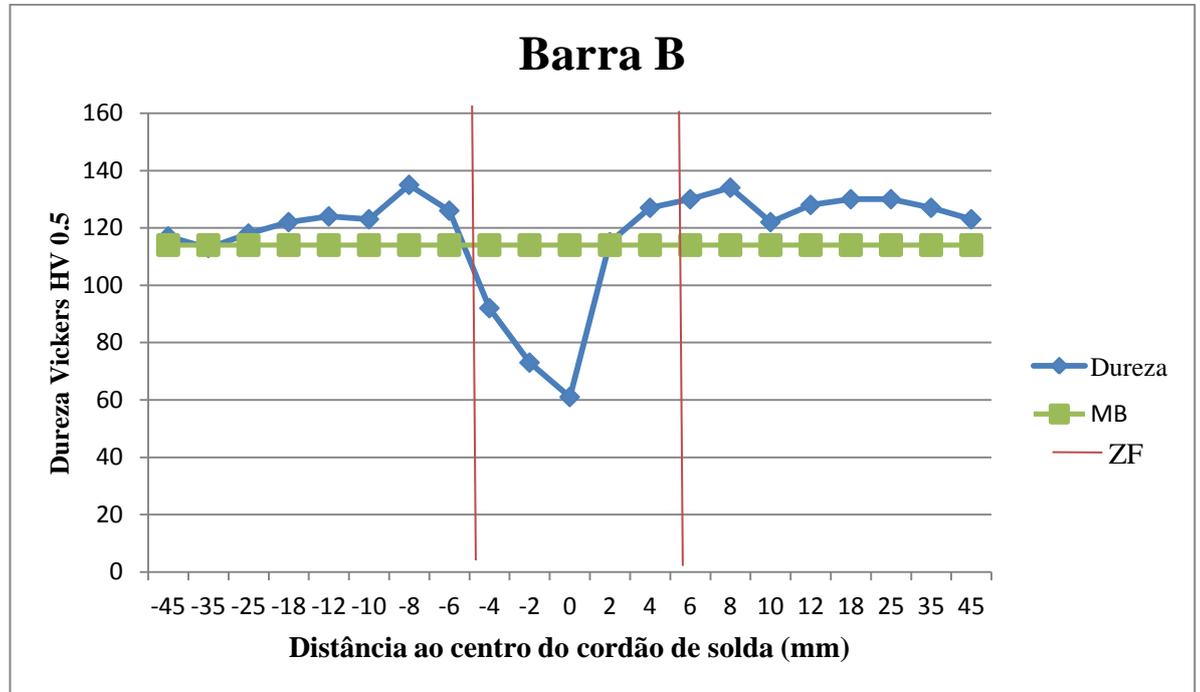
FIGURA 19 - Gráfico 1: Perfil de dureza da secção transversal da barra A como soldada



Com esse resultado é possível ver uma pequena redução de dureza na ZF, registrando uma mínima de 100 HV0.5 bem no centro do cordão de solda. O mesmo não se observa na ZTA que tem seus valores de dureza bruscamente reduzidos ao longo de toda sua extensão chegando a 57HV. Esse resultado já era esperado pois o principal problema relatado por Mathers (2002) e Kou (2003) é a perda de dureza (softening) ou amolecimento na ZTA. Esse é um dos problemas muito comuns em ligas de alta resistência tratáveis termicamente como a da serie 6000 e 2000. Uma das soluções para recuperar essas perda de propriedade é o tratamento térmico pós soldagem. No caso o que foi escolhido foi o T6 pois é a condição que

o material vem do fornecedor. O gráfico 2, mostra os resultados para a barra B a qual foi soldada e tratada termicamente com T6 com a finalidade de recuperar a resistência perdida.

FIGURA 20 - Gráfico 2: Perfil de dureza da seção transversal da barra B com T6 pós soldagem



É possível constatar através do gráfico 2 que a dureza na ZTA foi restabelecida totalmente, chegando a ficar, em muitas regiões, mais alta do que a dureza do metal de base, o qual pelos seus ensaios ficou com uma dureza média de 114 HV0.5. A ZF por outro lado, foi prejudicada pelo tratamento e perdeu quase 50% de sua dureza bem no centro da solda, enfraquecendo a união e tornando a ZF um ponto de fragilidade nos esforços mecânicos.

Existem alguns fatores que causam o enfraquecimento da solda, um deles é o tipo de metal de adição que quando não selecionado corretamente, pode não combinar com metal original causando alguns problemas como na soldagem de metais dissimilares. Porém no caso de ligas de alumínio endurecidas por precipitação, o que ocorre é que se o metal de adição não tem os elementos de liga suficientes para formar o precipitado na ZF, o envelhecimento artificial não tem efetividade. Contudo o metal de adição utilizado ER4043 é o mais indicado pois contém na sua composição química, cerca de 5% de silício que é o formador de silicato de magnésio (Mg_2Si) precipitado na forma β' que enrijece a matriz α de alumínio. Segundo Mathers (2003), as rápidas taxas de solidificação originam tamanho de grãos finos e consequentemente melhores propriedades mecânicas do que taxas lentas de solidificação.

Pode se dizer então que cordões de solda de dimensões pequenas tem uma melhor taxa de solidificação devido seu tamanho favorecer o resfriamento, bem como soldagem com apenas um passe tem melhores propriedades mecânicas do que as de múltiplos passes. Essas ilações podem ser uma razão para o enfraquecimento ocorrido na ZF das amostras de solda tratadas termicamente. Na figura 21 o gráfico 3 é apresentado com os resultados das durezas das barras A e B sobrepostas pra uma melhor comparação.

FIGURA 21 - Gráfico 3: Perfis de dureza das Barras A e B soldadas

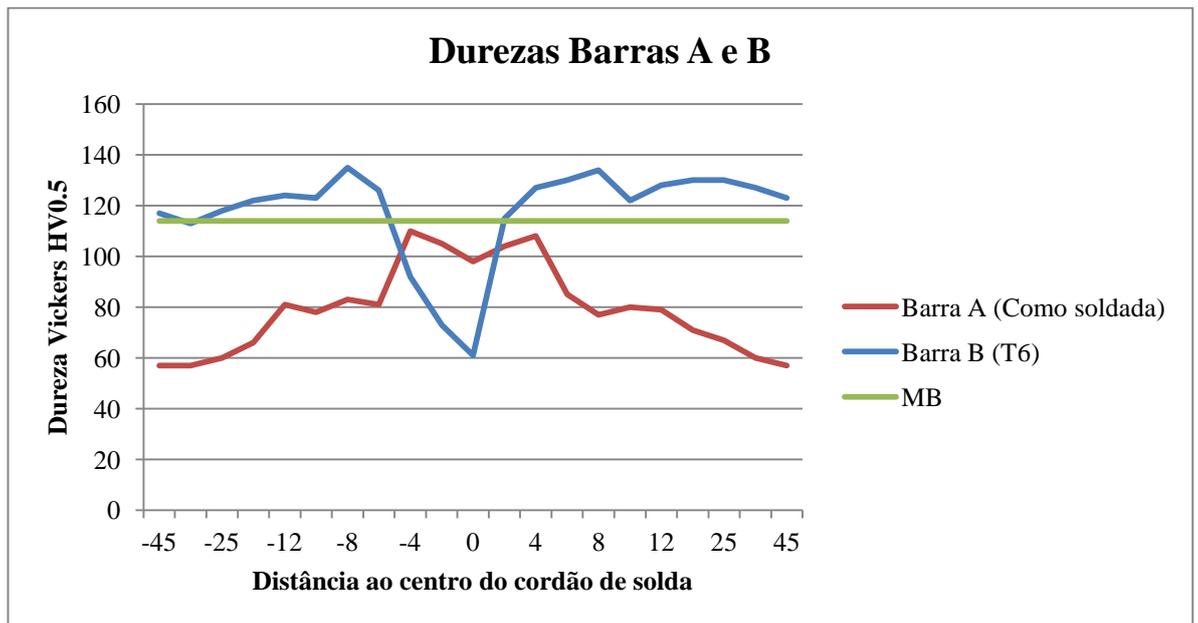
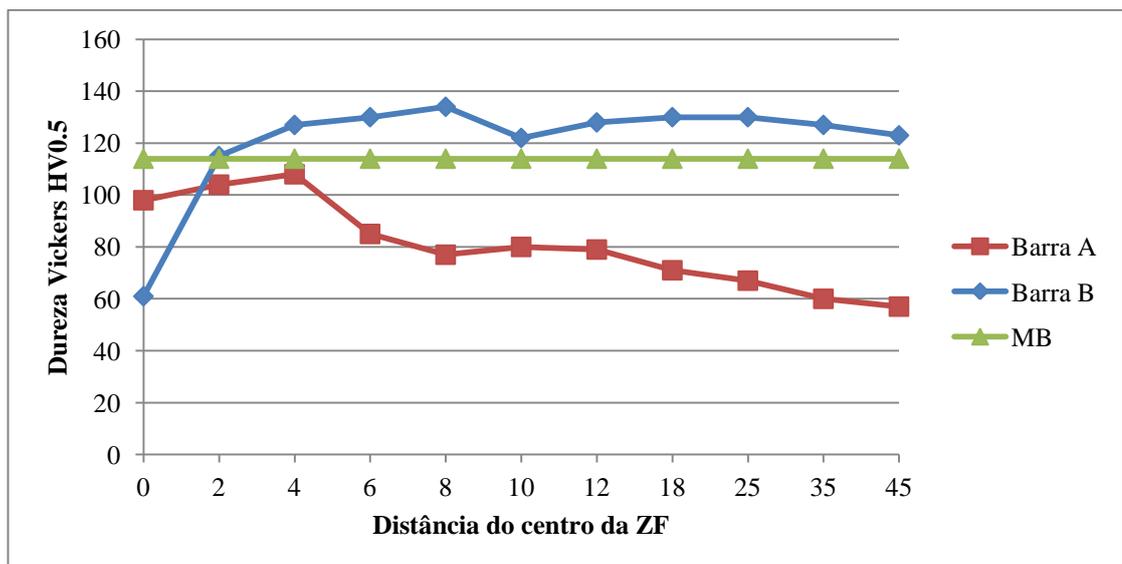


FIGURA 22 - Gráfico 4: Perfis de dureza somente em uma direção



Como mostra o gráfico 4 na figura 22, é fácil ver que o tratamento térmico foi efetivo na recuperação da dureza na ZTA, que era o típico problema a se solucionar, porém devido a outros fatores, uma pequena região da ZF (em torno de 6mm) foi prejudicada perdendo muita dureza e tornando o material frágil nesse ponto.

3.2.2 Ensaio de tração

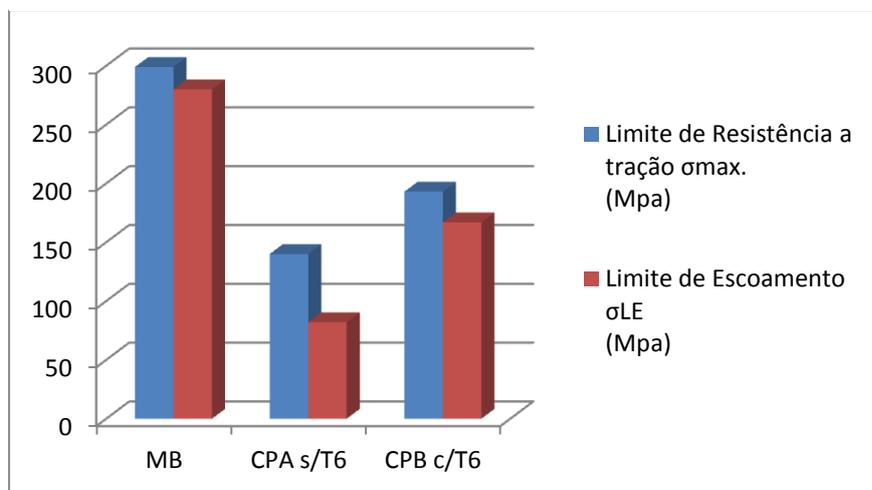
Os ensaios de tração trouxeram vários dados interessantes sobre as propriedades mecânicas de resistência da liga de alumínio. As médias dos valores encontrados para os corpos de prova (CP) das barras A, B e do MB estão expressos na tabela 8. Os valores de limite de resistência a tração, limite de escoamento e alongamento do MB apresentam coerência com os valores normalizados da liga de alumínio, bem como os dados do fornecedor.

Tabela 8 - Média dos valores de resistência mecânica a tração dos CPs e porcentagem em relação ao metal de base

Amostra	Limite de Resistência a tração σ_{max} . (Mpa)	Limite de Escoamento σ_{LE} (Mpa)	Alongamento (%)
MB	299	280	14
CPAs/T6	140 (47%)	82 (29%)	13
CPBc/T6	193 (65%)	*167 (60%)	5

Como podemos ver o gráfico 5 da figura 23 as soldagens reduziram bastante a resistência a tração das amostras. A amostra como soldada(CPA) teve uma redução na sua resistência em média de mais de 50% na tensão máxima de tração e 70% na tensão de escoamento. Na amostra com tratamento T6 pós soldagem(CPB) teve uma redução menor de 36% na tensão máxima, ou seja, recuperou 33% do que perdeu de tensão máxima. O alongamento quase não teve alteração no CPA, porém no CPB teve uma queda para apenas 5 % de alongamento, ou seja, pode se dizer que o material se tornou menos dúctil após o envelhecimento artificial.

FIGURA 23 - Gráfico 5: Comparativo de resistência a tração



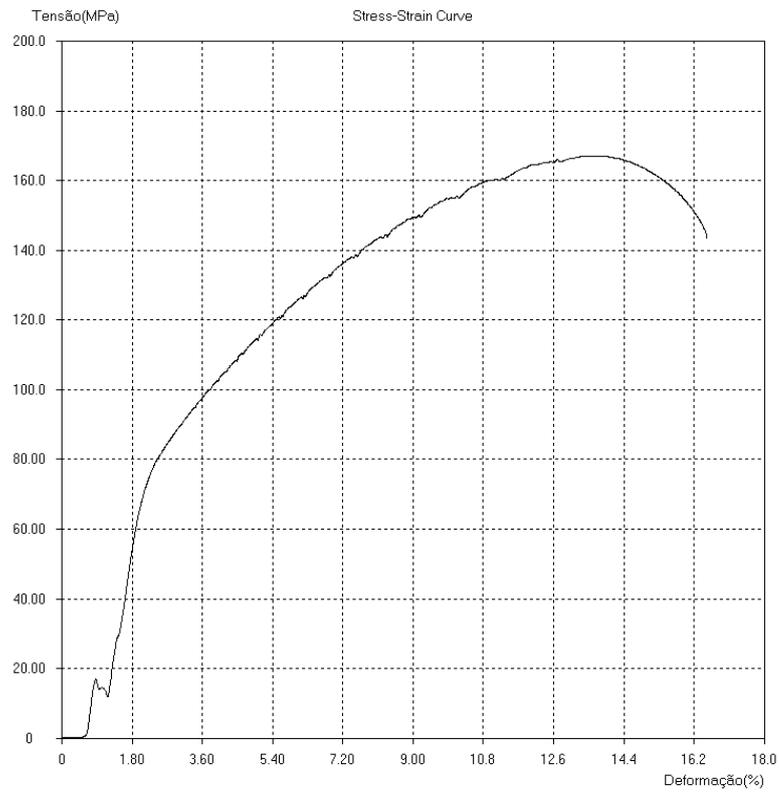
A soldagem TIG é um processo manual em que as condições de soldagem e o soldador influenciam muito no resultado final. As ligas da série 6000 são as mais sensíveis a perda de resistência mecânica por formação de trincas na solidificação, porosidade na ZF, e amolecimento na ZTA. Como foi visto na macrografia, não foi detectado fissuramento a quente (Hot Cracking), nem porosidades aparentes. A perda de resistência mecânica na região da solda já era esperada para a barra A pois como foi dito as ligas série 6000 são as mais suscetíveis a perda de resistência após a soldagem muito devido também, ao aporte de calor causado pela soldagem e dependendo da temperatura atingida, causa a reversão das fases GP dos precipitados e por consequência a perda de propriedade.

Segundo Kou, 2003, a soldagem de ligas de alumínio da serie 2000(Al-Cu-Mg) e 6000(Al-Si-Mg) tem uma tendência a superenvelhecer durante a soldagem. Esse superenvelhecimento deixa a liga de alumínio incapaz de recuperar sua resistência completamente com tratamento de envelhecimento artificial. Os precipitados durante a soldagem tendem a coalescer, impossibilitando a recuperação total de resistência com o tratamento T6 pós soldagem.

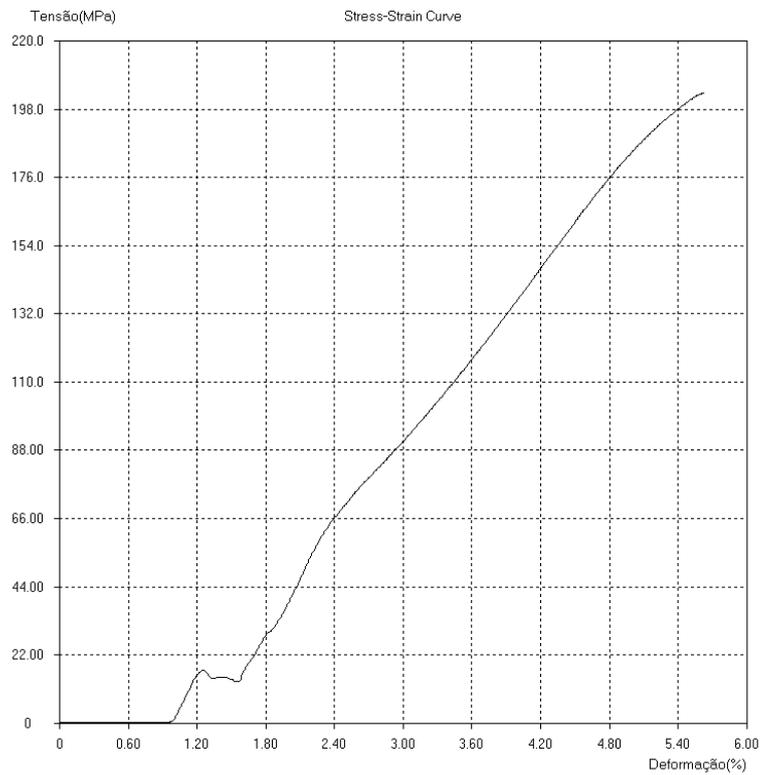
A Barra B recuperou uma quantidade de resistência, mas devido seu alongamento ser muito pouco, pode tornar inviável para certas aplicações. Para uma melhor análise é necessário ver os gráficos tensão x deformação dos corpos de prova ensaiados das barras A e B. Veremos na figura 24 o gráfico 6 que mostra o comportamento durante o ensaio de tração dos corpos de prova CPA2, CPB2 e MB2 como exemplo.

FIGURA 24 - Gráfico 6: Tensão deformação dos corpos de prova, a) CPA2, b) CPB2, c) MB2

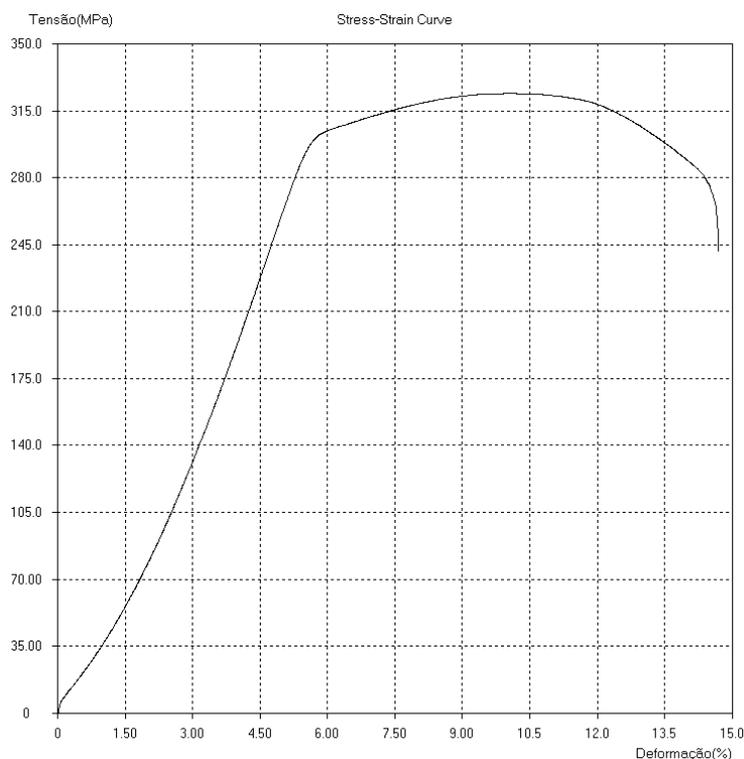
a)



b)



c)



Fonte: Resultados da máquina de ensaio Equilam, 2017.

Com a análise dos gráficos tensão x deformação, é possível ver a queda de resistência em ambas as barras. O comportamento de deformação do material também difere do comportamento do MB tanto nos CPs como soldados quanto nos CPs tratados com T6. O gráfico 6 a) do CPA2, que é o segundo corpo de prova ensaiado, é um dos CPs que foram ensaiados sem tratamento pós soldagem e nele o escoamento ocorre bem antes do que no MB, ou seja sua deformação elástica diminuiu muito em relação ao MB, e isso é confirmado pois na amostra da barra A, a dureza caiu muito na ZTA desse material, tornando mais deformável plasticamente, ou seja, sua deformação é permanente é muito maior que a deformação elástica.

No gráfico 6 b) vemos um comportamento de tensão x deformação com características de um material frágil, pois apresenta se quase como uma reta. Não é possível identificar claramente a tensão de escoamento pelo gráfico, pois a região de deformação plástica não se identifica. O relatório não chegou a gerar um valor coerente, mas observa se pelo gráfico que o material se comportou predominante como deformação elástica e com o alongamento pequeno também proporcional a deformação elástica do MB. Com isso vemos que o material

com T6 perdeu sua capacidade de se deformar plasticamente, apesar de ter um certo ganho no LTR que subiu em média de 140 MPa para mais de 190 MPa.

O ensaio de tração feito no MB bem como veio do fornecedor sem sofrer soldagem, tem um comportamento padrão de uma metal dúctil e apresenta suas regiões bem definidas como se observa no gráfico 6 c). Tanto o LRT quanto a tensão de escoamento e alongamento, tem valores que estão dentro do especificado pelo fornecedor como mostra a Tabela 9.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas da liga AA6351 T6 segundo fornecedor

Liga 6351: Limites de Propriedades Mecânicas						
Têmpera	Seção Específica ou Espessura de Parede ² (milímetros)	Resistência a Tração (MPa)				Alongamento ³
		Limite de Resistência a Tensão		Limite de Escoamento		Porcentagem Min. em 50 mm ou 4D ⁴
		Min.	Máx.	Min.	Máx.	
Têmpera padrão¹						
T4	Até 20,00	205	--	110	--	12
S75	Até 6,30	270	--	230	--	6
	6,30 – 25,00	270	--	230	--	--
T6	Até 3,20	290	--	250	--	6
	3,20 – 20,00	300	--	255	--	8

Fonte: Catálogo Alcoa, 2010.

Os ensaios de tração mostraram que o tratamento teve uma influência grande na resistência da liga de alumínio. O LRT aumentou após o tratamento térmico, porém não chegou a recuperar completamente a resistência inicial, chegando a 65% em média da resistência a tração do MB, enquanto que a liga como soldada teve uma resistência a tração média de apenas 47% em relação ao MB. Por outro lado o tratamento térmico causou um enfraquecimento na liga de alumínio tornando a frágil como se observou pelo gráfico tensão e deformação e também dado seu alongamento muito menor que o normal. Quando se analisa os resultados dos ensaios de tração juntamente com os resultados dos ensaios de dureza, fica claro que os corpos de prova da barra B romperam na ZF, pois existiam os menores pontos de dureza registrados. Com uma dureza de apenas 60 HV no centro do cordão de solda o que é uma redução de quase 50% do restante do material, e sendo uma região pequena se levar em conta o tamanho do CP, leva a crer que a ZF foi um ponto de fragilidade o qual se originou a fratura, impossibilitando o material de deformar plasticamente e uniformemente, dado que pelas macrografias não foi detectado nenhuma trinca aparente ou porosidade excessiva. As imagens em apêndice A dos corpos de prova também comprovam que os CPs tratados com T6 romperam na ZF devido a queda de dureza na região.

Tavares (2016), em sua dissertação de mestrado sobre o tratamento térmico em soldadura MIG em liga de alumínio AA 6082-T6, teve resultados diferentes como na amostra somente soldada que teve uma queda na dureza da ZF e na ZTA apenas uma pequena redução enquanto que nos resultados aqui obtidos, a dureza na ZTA caiu muito. Os LRTs dos outros corpos tratados com T6 foram bem mais altos que os aqui constatados, porém leva se em conta que o processo de soldagem adotado por Tavares (2016), foi o processo MIG semi automático tanto para a deposição do metal de adição, quanto para o deslocamento da tocha pois usou um carro porta tochas com velocidade controlada e ajuste de posição. O metal de adição usado foi o 5356 com mais magnésio ao contrario do estudado que foi o 4340 com predominância de silício. Apesar de algumas diferenças, os resultados convergiram ao determinar a ZF de todos os CPs tratados com T6, como a zona mais frágil da soldagem pois além de romperem na ZF, como mostra a análise de deformações feita, apresentaram uma dureza baixa no cordão e alongamentos na ordem de 20% do alongamento do MB, ou seja até menores do que os da liga 6351 T6 soldado no processo TIG, que ficaram em torno de 45% do alongamento do MB, impedindo também a liga 6082 T6 de deformar plasticamente assim como ocorreu nesse estudo. A seguir a tabela 10 contém o resumo dos resultados dos ensaios obtidos, dispostos em porcentagem.

Tabela 10 - Resumo dos resultados obtidos após ensaios de resistência Mecânica

Amostras	Dureza (HV0.5)	Limite de resistência a tração (Mpa)
MB	114	299
BARRA A (como soldada)	ZF = - 15% / ZTA = - 50%	- 53%
BARRA B (T6 pós soldagem)	ZF = - 50% / ZTA = 100%	- 35%

CONCLUSÕES

Os resultados dos ensaios mecânicos de dureza e tração, bem como a análise das imagens macroscópicas da secção transversal das soldas na barra A e B, trouxeram muitas informações importantes para os estudos propostos por este trabalho. Com esses dados é possível extrair ilações que podem responder o questionamento levantado como problema.

Com as Imagens da macrografia, concluiu-se que a soldagem foi bem sucedida, apresentando uma boa aparência e penetração, além de não apresentar fissuras, trincas nem porosidades visíveis a olho nu. Com isso diminui a possibilidade de erro nos ensaios de tração, com relação a concentradores de tensão que podem interferir nos resultados obtidos nos gráficos e relatórios.

Os resultados de dureza mostraram que a soldagem TIG causou na junta de alumínio da liga 6351, redução de dureza na ZF de 15% em uma distância linear de 12 mm (um pouco mais que a largura da ZF), e na ZTA uma redução severa de 50%. Os dados obtidos nos CPs tratados termicamente com solubilização e envelhecimento artificial (T6) pós soldagem, concluiu - se que o tratamento foi efetivo na recuperação da dureza na ZTA, porém na ZF constatou - se perda de resistência e sua dureza reduziu para 50%, tornando o cordão de solda um ponto de fragilidade do CP.

O resultados dos ensaios de tração comprovaram a fragilidade da ZF, nos CPs com T6 que apresentaram um gráfico que mostra um material praticamente sem deformação plástica e com um alongamento de 5%, tal qual o alongamento do MB na sua região elástica. O mesmo ainda apresentou um ganho de 33% de resistência máxima a tração em relação a liga apenas soldada. A resistência máxima a tração da liga apenas soldada teve uma redução de 50% comparada com o MB, porém manteve a proporcionalidade de deformação e alongamento.

Contudo, conclui-se que a soldagem da liga de alumínio AA 6351-T6, causa perda de resistência em 50%, conforme comprovado nos ensaios mecânicos, e a solução de tratar a liga termicamente com o tratamento T6, recupera 33% da resistência a tração perdida e 100% da dureza perdida na ZTA, porém sua ZF torna se um ponto de fragilidade, impedindo que o material deforme plasticamente.

Para trabalhos futuros, sugere-se o estudo da microestrutura da ZF e ZTA, com a finalidade de investigar melhor os mecanismos que desencadeiam a perda de resistência como o superenvelhecimento, o crescimento de grãos, microporosidades, microfissuras entre outros fatores relatados pelos autores da área.

REFERÊNCIAS

- ALCOA. **Ligas e Têmperas de Extrusão**. [EUA]: ALCOA, 2010.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Philadelphia. **E-8M**. standard test methods for tension testing of metallic materials. Philadelphia, 1995.
- ASKELAND, Donald R, Pradeep P. Fulay, Wendelin J. Wright. **The science and engineering of materials**. 6.ed. Stamford - CT. Cengage Learning. 2010.
- ASM - **Metals Handbook Volume 4: Heat treating**. In ASM Handbook Committee, 1991. Vol. 4, p. 1861-1960.
- BAYER, Paulo Sérgio. **Ensaio dos Materiais**. Joinville, SC: Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica/Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, 2013.
- CALLISTER, W. D. Jr. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 7.ed. Rio de Janeiro, LTC, 2008.
- HATCH, J.E. **Aluminum: Properties and Physical Metallurgy**. ASM, Metals Park, USA, 1999.
- KAUFMAN, J.G. **Introduction to Aluminium alloys and Tempers**, U.S.A, 2000.
- KOU, S.. **Welding metallurgy**. 2.ed. New Jersey: Hoboken, John Wiley & Sons, 2002.
- LUMLEY, Roger(ed). **Fundamentals of Aluminium Metallurgy**. 1.ed. Cornwall, UK Woodhead Publishing, 2011.
- MATHERS, G. **The welding of aluminum and its alloys**. England: Woodhead Publishing Ltd; Cambridge, 2002.
- MELADO, Marcos Caetano. **Estudo das tensões residuais e caracterização das propriedades mecânicas e microestruturais de juntas soldadas de liga de Alumínio AA5086**. 2014. 82f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, Rio de Janeiro, 2014.
- NORRISH, J. **Advanced Welding Process**. [s.l.]: IOP Publishing Ltd, 1992.
- PIMENTA, Ednilson Antonio Ribeiro. **Estudo dos processos de soldagem TIG e MIG em estruturas de alumínio 6351 T6 NBR ISO 209-2010**. 2011. 86f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade de Taubaté - UNITAU, Taubaté-SP, ANO.
- SILVA, Natércia Fernanda Almeida. **Ligas de alumínio para o fabrico de rodas de bicicletas**. 2010. 58f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais), Universidade do Porto, Porto, 2010.
- SHACKELFORD, James F. **Ciência dos Materiais**. 6.ed. São Paulo. Pearson Hall. 2008.

TAVARES, Filipe Manuel Fernandes. **Efeito do tratamento térmico na estrutura e propriedades mecânicas de soldaduras MIG na liga AA6082-T6**. 2016. 65f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade de Coimbra, Coimbra. 2016.

TESTE DA MICRODUREZA: Dureza Vickers. Disponível em: https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6560-teste-da-microdureza#.WhxphlWnHIU. Acesso em 01/11/2017.

TOTTEN, G. E. **Handbook of Aluminium**. Washington, U.S.A: Inc.Seattle, 2003.

APÊNDICE A

Corpos de provas de tração rompidos no ensaio.



CPA1



CPA2



CPB1



CPB2