

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**

Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGE3M

LEONARDO REIXACH LIMA

**REAPROVEITAMENTO DE CAVACO GERADO NO PROCESSO DE USINAGEM
DAS LIGAS DE ALUMÍNIO AA 413 E AA 6351-T6**

**Porto Alegre/RS
2019**

LEONARDO REIXACH LIMA

Engenheiro Agrícola

Estudo realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência dos Materiais

**Porto Alegre/RS
2019**

LEONARDO REIXACH LIMA

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Ciência dos Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador (a): Profa. Dr^a. Célia de Fraga Malffatti

Co-Orientador: Prof. Dr. Roberto Schroeder

Aprovada em: 09/09/2019

Banca Examinadora:

.....

Prof.^a Dr^a. Estela Knopp Kerstner Baldin (Universidade Federal do Rio Grande do Sul)

.....

Prof. Dr. Leonardo Marasca Antonini (Universidade Federal do Rio Grande do Sul)

.....

Prof. Dr. Vinícius Martins (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandese)

Prof. Dr. Afonso Reguly Coordenador do PPGE3M no Ano de 2019

*Dedico este trabalho a meu pai,
Ubirajara Neto Lima.*

AGRADECIMENTOS

Aos professores Dr^a. Célia Malffatti e Dr. Roberto Schroeder devo meus agradecimentos pela confiança e orientação prestada.

A Dr^a Kátia Regina Lemos Castagno por toda a contribuição na elaboração desse trabalho.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense, em especial aos meus colegas do Curso Técnico de Mecânica pelo apoio nos momentos de dificuldade.

Aos meus amigos Joel da Silva Rodrigues e Leandro Câmara Noronha que me mostraram o caminho da realização deste trabalho.

Aos meus colegas Martina Cadorin, Carla Aquino e Diego Tassoni pelo apoio nas atividades neste trabalho.

A Universidade Federal de Pelotas (UFPEL) que contribuiu na minha formação como engenheiro, em especial a professora Rita Fraga, meus sinceros agradecimentos.

A meu pai, Ubirajara Neto Lima, pelo exemplo de homem, que hoje busco seguir em minha vida.

A minha mãe, Elvira Alice Reixach Lima, pelo amor em incondicional.

As minhas filhas, Antonia Brignol Lima e Kailany Brignol Machesan, por me mostrarem o real sentido da vida.

A minha esposa, Carla Brignol Lima, pelo companheirismo e amor dedicado a mim.

A UFRGS pelo apoio técnico e financeiro dando condições materiais para a realização do trabalho.

RESUMO

A reciclagem de materiais tem sido uma prática desenvolvida no Brasil e no mundo, com o propósito de preservar os recursos naturais e desenvolver uma atividade econômica rentável ao setor da indústria que realiza essa prática. Entre esses materiais o alumínio ocupa um lugar de destaque, por ser o material mais reciclado no Brasil vem surgindo como fator de interesse pelos pesquisadores, visto que essa prática necessita de uma tecnologia mais avançada buscando aumentar a eficiência desses processos. O presente estudo teve como objetivo caracterizar lingotes fundidos obtidos a partir do reaproveitamento do cavaco de ligas de alumínio liga AA 413 e a liga AA 6351-T6, gerado nos processos de usinagem. Os lingotes obtidos foram caracterizados quanto à sua morfologia, estrutura, seu comportamento mecânico e a corrosão visando a aplicação industrial. A preparação dos corpos de prova usados nessa pesquisa teve como princípio a obtenção de cavacos sem contaminações e controle da composição química, a partir deste controle os mesmos foram prensados e fundidos em forno elétrico com cadinho de grafite. Foram fundidos também corpos de prova de material maciço proveniente das mesmas ligas de alumínio usadas na obtenção dos cavacos. Foram obtidos dessa forma, seis sistemas para estudo: As ligas primárias ou comerciais (liga AA 413 e a liga AA 6351-T6), as ligas secundárias de material maciço fundido para cada uma dessas ligas e cavacos prensados de fundidos dessas duas ligas. As propriedades mecânicas foram avaliadas e comparadas entre as ligas secundárias por ensaios de tração, dureza Brinell e impacto Charpy, os quais apresentaram uma superioridade das ligas secundárias derivadas AA 413 em relação à tração, porém as ligas secundárias derivadas de AA 6351-T6 obtiveram uma maior tenacidade e durezas próximas entre todas as ligas secundárias. Também se avaliou o comportamento quanto à resistência à corrosão por ensaio de polarização e imersão por 30 dias em solução de NaCl 3,5 %, esses mostraram uma corrosão generalizada nas ligas de AA 413 e nas ligas secundárias de AA 6351-T6 uma corrosão por pites e valores superiores de icor para as ligas provenientes de AA 413. A composição química das ligas foi analisada por ensaios de espectrometria de emissão ótica e demonstraram equivalência entre as ligas secundárias com liga de origem, ou seja, uma proporcionalidade bastante precisa na composição química das ligas, mesmo com os baixos rendimentos na fusão das ligas produzidas a partir de cavacos de alumínio, os quais revelaram rendimentos inferiores a 50% para ambas as ligas. As propriedades mecânicas apresentaram uma perda considerável dos materiais proveniente da liga AA 6351-T6 e uma regularidade daqueles obtidos da liga AA 413. Os materiais secundários apresentaram defeitos como porosidades o que foi observado também na liga AA 413 primária. Nos ensaios de corrosão as ligas secundárias tiveram comportamentos bem próximos ao comportamento das ligas primárias mesmo com defeitos de solidificação não encontrados na liga primária AA 6351 T6. Os resultados encontradas nos ensaios realizados para os materiais fundidos a partir de material maciço e os fundidos a partir de cavacos oriundos do processo de usinagem, foram muito próximos para as duas ligas de alumínio estudadas, indicando que é possível a utilização desse tipo de material como matéria-prima para peças fundidas.

Palavras-chave: Reciclagem, alumínio, cavacos, fundição.

ABSTRACT

Materials recycling has been under development, both in Brazil and worldwide, which has the purpose to preserve the natural resources and develop a profitable economic activity to the industries that benefit from this practice. Aluminum, being the most recycled material in Brazil, has attracted researcher's attention since there is a need for advanced technologies in order to improve the aluminum recycling process. The present study aims to characterize aluminum cast ingots obtained from the recycling of machining chips and solid debris of AA 413 and AA 6351-T6 aluminum alloys. The morphology, structure, mechanical and corrosion behavior were characterized considering further industrial application. In order to prepare the tensile specimens, the machining chips and solid debris used as resource material were carefully selected to obtain the desired chemical composition and to avoid impurities. Then, the machining chips were mechanically pressed and molten using a graphite crucible and an electric furnace. In the same way, tensile specimens were prepared from the solid debris of the same aluminum alloys. For control, tensile specimens from the respective commercial alloys were prepared. Therefore, this study evaluates the following systems: the primary or commercial alloys (AA 413 and AA 6351-T6), and the secondary alloys obtained from the machining chips and solid debris of both alloys. The mechanical properties were evaluated and compared between the secondary alloys by tensile, Brinell hardness and Charpy impact tests, which showed superiority of AA 413 derived secondary alloys in relation to tensile, but the AA 6351-T6 secondary alloys. obtained a higher toughness and close hardness among all secondary alloys. Corrosion resistance behavior was also evaluated by polarization test and immersion for 30 days in 3.5% NaCl solution. These showed a generalized corrosion in AA 413 alloys and AA 6351-T6 secondary alloys. pits and higher icor values for the alloys from AA 413. The chemical composition of the alloys was analyzed by optical emission spectrometry assays and demonstrated equivalence between minor alloys with source alloy, ie very precise proportionality in the chemical composition. alloys, even with the low melting yields of alloys produced from aluminum chips, which showed yields of less than 50% for both alloys. The mechanical properties of the recycled materials obtained from the AA 6351-T6 alloy showed a considerable loss, whilst the samples obtained from the AA 413 alloy showed similar mechanical behavior when compared to the commercial alloys. The secondary materials presented defects such as porosities, which was also observed on the AA 413 primary alloy. The secondary AA 6351-T6 alloy showed a similar corrosion behavior in relation to the primary one, even though solidification defects were present. The results found for the materials cast from the machining chips and solid debris showed similar properties in relation to the primary alloys, indicating the possibility to employ this kind of recycled material in structural and engineering applications.

Key words: recycling, aluminum, machining chips, casting.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Recuperação da sucata em relação ao consumo ⁽¹⁾	20
Figura 2: Beneficiamento do alumínio a partir da bauxita ⁽⁵⁾ (Adaptado)	22
Figura 3: Diagrama de equilíbrio para o sistema Al-Fe ⁽¹⁴⁾	24
Figura 4: Diagrama de equilíbrio de fases da liga Al-Si ⁽¹⁶⁾	25
Figura 5: Microestrutura da liga de alumínio 6351-T6 ⁽²¹⁾	28
Figura 6: Classificação das sucatas de alumínio. ⁽¹⁾	32
Figura 7: Máquina Briquetadora de Cavacos de Alumínio. ⁽³³⁾	34
Figura 8: Briquetes de cavacos de Alumínio. ⁽³³⁾	34
Figura 9: Mecanismo de formação do cavaco ⁽³⁶⁾ . (Adaptado)	35
Figura 10: Morfologia do cavaco ⁽³⁷⁾ . (Adaptado)	36
Figura 11: Distribuição de ferro, cromo, manganês e silícios em alumínio ⁽³⁹⁾ .	37
Figura 12: Microestrutura da liga AA 356 fundida comercial ⁽⁴¹⁾	38
Figura 13: Classificação dos processos de corrosão segundo o tipo de ataque ⁽⁴⁵⁾	39
Figura 14: Diagrama de polarização catódica e anódica. ⁽⁴⁶⁾ (Adaptado)	41
Figura 15: Diagrama de POURBAIX para o alumínio ⁽⁴⁵⁾	42
Figura 16: Fluxograma do processo de obtenção dos corpos de prova para os ensaios.	44
Figura 17: Barra redonda de alumínio AA 6351-T6 e lingote de alumínio AA 413.	45
Figura 18: Usinagem para geração dos cavacos de alumínio.	46
Figura 19: Cavacos sendo prensados.	46
Figura 20: Briquete de cavacos de alumínio.	47
Figura 21: Carregamento do cadinho com os cavacos.	48

Figura 22: Carregamento do forno com os cavacos.	48
Figura 23: Sistema de monitoramento do vazamento.	49
Figura 24: Controle da temperatura do vazamento.	50
Figura 25: Máquina de ensaio de tração.	51
Figura 26: Dimensões dos corpos de prova de tração segundo ASTM. ⁽⁴⁹⁾	52
Figura 27: Representação da coquilha de aço usada no vazamento.	53
Figura 28: Representação do material retirado da coquilha de aço usada no vazamento.	53
Figura 29: Máquina de ensaio de dureza.	54
Figura 30: Corpo de prova usado em ensaio de dureza.	55
Figura 31: Dimensões dos corpos de prova Charpy ⁽⁵³⁾	55
Figura 32: Máquina de ensaios Charpy.	56
Figura 33: Dimensões do corpo de prova teste para imersão.	57
Figura 34: Corpo de prova teste na imersão	58
Figura 35: Dimensões do corpo de prova para ensaios de corrosão por imersão.	58
Figura 36: Corpo de prova para ensaios de corrosão por imersão das liga primaria e secundarias de AA 413.	59
Figura 37: Corpo de prova para ensaios de corrosão por imersão das liga primaria e secundarias de AA 6351-T6.	59
Figura 38: Corpo de prova em imersão das liga primaria e secundarias de AA 413 e AA 6351-T6.	60
Figura 39: Corpo de prova da liga AA 413 fundido após ensaio de tração.	61
Figura 40: Ensaios de polarização em MICROAUTOLAB.	61
Figura 41: célula de ensaio de polarização	62

Figura 42: Perda de massa em gramas após a fusão das ligas secundárias.	68
Figura 43: Metalografia das ligas primárias.	70
Figura 44: Metalografia das ligas secundárias.	70
Figura 45: Resultados do ensaio de tração das ligas AA 413 primária e secundárias.	72
Figura 46: Resultados do ensaio de tração das ligas AA 6351-T6 primária e secundárias.	73
Figura 47: Resultado da tração nas ligas de cavacos AA 413 e cavacos AA 6351.	74
Figura 48: Corpo de prova representativo das ligas primárias e secundárias.	75
Figura 49: Resultado das durezas Brinell nas ligas primária e secundária de AA 413 e AA 6351	78
Figura 50: Resultado dos ensaios Charpy (joule) nas ligas primária e secundária de AA 413 e AA 6351.	80
Figura 51: Corpos de prova da liga AA 413 comercial antes e após a limpeza.	83
Figura 52: Corpos de prova dois da liga AA 413 comercial após imersão.	83
Figura 53: Corpos de prova da liga AA 413 fundido antes e após a limpeza.	84
Figura 54: Corpos de prova dois da liga AA 413 fundido após imersão.	84
Figura 55: Corpos de prova de cavacos da liga AA 413 antes e após a limpeza.	85
Figura 56: Corpos de prova um de cavacos da liga AA 413 após imersão.	85
Figura 57: Corpos de prova da liga AA 6351 comercial antes e após a limpeza.	86
Figura 58: Corpos de prova três da liga AA 6351 comercial após imersão.	86
Figura 59: Corpos de prova da liga AA 6351 fundido antes e após a limpeza.	87
Figura 60: Corpos de prova três da liga AA 6351 fundido após imersão com presença de pites.	87
Figura 61: Corpos de prova de cavacos da liga AA 6351 antes e após a limpeza.	88

- Figura 62:** Corpos de prova dois de cavacos da liga AA 6351 após imersão
compresença de pites. 88
- Figura 63:** Resultado comparativo dos ensaios de corrosão de variação da massa em
gramas das ligas AA 413 e AA 6351 primárias e secundárias. 89
- Figura 64:** Monitoramento do potencial de circuito aberto para as ligas primárias e
secundárias das ligas AA 413 e AA 6351 em solução de 3,5% NaCl. 90
- Figura 65:** Curvas de polarização para ligas primárias e secundárias das ligas AA 413
e AA 6351 em solução de 3,5% NaCl. 92
- Figura 66:** Microscopia da liga AA 413 comercial, antes (A) e após (B) curvas de
polarização. 94
- Figura 67:** Microscopia da liga AA 413 fundida, antes (A) e após (B) curvas de
polarização. 94
- Figura 68:** Microscopia da liga de cavacos de AA 413 fundido, antes (A) e após (B)
curvas de polarização. 95
- Figura 69:** Microscopia da liga AA 6351 comercial, antes (A) e após (B) curvas de
polarização. 95
- Figura 70:** Microscopia da liga de AA 6351 fundido, antes (A) e após (B) curvas de
polarização. 96
- Figura 71:** Microscopia da liga de cavacos de AA 6351 fundido, antes (A) e após (B)
curvas de polarização. 96
- Figura 72:** concentrados em forma de estrelas em liga AA 6351 fundida. 98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Produção primária mensal do alumínio no Brasil (unidade: 1000 ton) ⁽¹⁾	20
Tabela 2: Perfil da indústria Brasileira do Alumínio ⁽¹⁾	21
Tabela 3: Composição química da liga de alumínio AA 413 em % ⁽¹²⁾	23
Tabela 4: Composição química de algumas ligas Aluminum Association (%). ⁽¹⁹⁾	26
Tabela 5: Especificação dos tratamentos térmicos. ⁽²⁰⁾	27
Tabela 6: Composição química da liga AA 6351- T6. ⁽²¹⁾	27
Tabela 7: Propriedades mecânicas da liga AA 413 ⁽²⁴⁾	29
Tabela 8: Propriedades mecânicas da liga AA 6351 T6 ⁽²⁵⁾	30
Tabela 9: Série galvânica de materiais metálicos na água do mar ⁽⁴⁴⁾	40
Tabela 10: Resistência à corrosão das ligas de alumínio (JONES, 1996) ⁽⁴⁸⁾	43
Tabela11: Nomenclatura das ligas.	45
Tabela 12: Composição química do alumínio comercial AA 413 e AA 6351-T6.	63
Tabela 13: Valores médios dos ensaios de espectrometria das ligas primárias e secundárias.	65
Tabela 14: Temperatura inicial e posterior ao vazamento da coquilha usada como molde para fundição das ligas secundaria (°C).	69
Tabela 15: Resultado do ensaio de tração na liga AA 413 comercial.	76
Tabela 16: Dureza Brinell e desvio padrão das ligas AA 413 e AA 6351 primarias e secundarias.	77
Tabela 17: Revisão da dureza Brinell após 12 meses nas ligas primárias e secundarias de AA 6351.	78
Tabela 18: Energia de impacto dos ensaios Charpy em joule.	79

Tabela 19: Monitoramento da variação da massa de corrosão da liga AA 6351-T6 (1° Monitoramento).	81
Tabela 20: Monitoramento da variação da massa de corrosão da liga AA 6351-T6 (2° Monitoramento)	81
Tabela 21: Variação da massa de corrosão em gramas das ligas primarias e secundarias.	82
Tabela 22: Potencial de circuito aberto de corrosão das ligas primarias e secundarias.	90
Tabela 23: Ecorr dos ensaios de polarização (Volts) das ligas primárias e secundárias.	92
Tabela 24: Valores de icorr das ligas primárias e secundárias de AA 413 e AA 6351-T6.	94

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CIA	<i>Central Intelligence Agency</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineers - EUA</i>
AA	<i>Aluminum Association</i>
IAI	<i>International Aluminium Institute</i>
CDP	Corpo de Prova
OCP	Potencial de Circuito Aberto
CFC	Cúbica de Face Centrada
PIB	Produto Interno Bruto

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	18
3	REVISÃO DE LITERATURA	19
3.1	O HISTÓRICO DO ALUMÍNIO	19
3.2	OBTENÇÃO DO ALUMÍNIO	21
3.3	LIGAS DE ALUMÍNIO	23
3.3.1	Liga AA 413 (<i>Aluminum Association</i>)	23
3.3.2	Liga AA 6351-T6 (<i>Aluminum Association</i>)	25
3.3.3	Propriedades mecânicas das ligas de alumínio AA 413 e AA 6351-T6.....	28
3.4	RECICLAGEM DE ALUMÍNIO	30
3.4.1	Novas tecnologias para reciclagem de alumínio	33
3.5	FORMAÇÃO DO CAVACO	35
3.5.1	Mecanismo da formação do cavaco	35
3.6	FUNDIÇÕES DO ALUMÍNIO.....	36
3.7	CORROSÃO DO ALUMÍNIO E LIGAS:.....	38
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	44
4.1	ANÁLISE DO ALUMÍNIO AA 6351-T6 E AA 413	44
4.2	OBTENÇÃO DO CAVACO DO ALUMÍNIO AA 6351-T6 E AA 413.....	45
4.2.1	Obtenção do cavaco prensado de alumínio AA 6351-T6 e AA 413.....	46
4.2.2	Procedimentos da fusão dos cavacos de alumínio AA 6351-T6 e AA 413.....	47
4.3	PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVAS.....	50
4.3.1	Preparação dos corpos de provas de tração.....	51
4.3.2	Preparação dos corpos de provas para ensaio de dureza Brinell	53
4.3.3	Preparação dos corpos de provas para ensaio de impacto	55
4.3.4	Preparação dos corpos de provas para ensaio de corrosão por imersão	56
4.3.4.1	Preparação do corpo de prova para teste preliminar de ensaio de corrosão por imersão	56
4.3.4.2	Preparação dos corpos de prova para os ensaios de corrosão por imersão	58
4.3.5	Preparação dos corpo de prova para os ensaios de corrosão de circuito aberto e polarização	60
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
5.1	ANÁLISES QUÍMICAS DOS MATERIAIS ESTUDADOS	63

5.1.1	Análises químicas dos alumínios secundários AA 413 e AA 6351 e alumínios primários AA 413 e AA 6351-T6	64
5.2	RESULTADO DO RENDIMENTO DAS FUSÕES DE ALUMÍNIO SECUNDÁRIO.....	67
5.3	CONTROLE DA TEMPERATURA DA COQUILHA ANTES DO VAZAMENTO E NO TÉRMINO NO DESMOLDAR	68
5.4	RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS DE TRAÇÃO DAS LIGAS SECUNDARIAS E LIGAS PRIMÁRIAS	71
5.4.1	Resultados dos ensaios mecânicos de tração das ligas primária e secundárias da liga AA 413.....	71
5.4.2	Resultados dos ensaios mecânicos de tração das ligas primária e secundárias da liga AA 6351-T6	72
5.4.3	Comparativos entre as ligas AA 413 e AA 6351-T6 de processos equivalentes.....	73
5.5	RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS DE DUREZA BRINELL DAS LIGAS PRIMÁRIAS E SECUNDARIAS	76
5.6	RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS DE IMPACTO DAS LIGAS PRIMÁRIAS E SECUNDÁRIAS.....	78
5.7	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CORROSÃO POR VARIAÇÃO DE MASSA NAS LIGAS DE ALUMÍNIO PRIMÁRIAS E SECUNDÁRIAS DAS LIGAS AA 413 E AA 6351-T6.	80
5.7.1	Monitoramento de corrosão por variação de massa na liga de alumínio primaria AA 6351-T6.....	81
5.7.2	Resultados dos ensaios de corrosão por variação de massa na liga de alumínio primarias e secundarias de AA 413 e AA 6351-T6.....	82
5.7.3	Aspectos dos corpos de prova do ensaio de corrosão por imersão das ligas AA 413, AA 6351-T6, primarias e secundarias.....	82
5.8	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MONITORAMENTO DO POTENCIAL DE CIRCUITO ABERTO E POLARIZAÇÃO.....	90
6	CONCLUSÃO	97
7	TRABALHOS FUTUROS.....	98
8	REFERÊNCIAS	99
	APÊNDICE	104

1 INTRODUÇÃO

A grande produção de resíduos sólidos, em forma de cavaco proveniente de usinagem apresenta uma necessidade de inovação nas tecnologias de reaproveitamento desse material secundário. Visto que ainda nos dias atuais vários municípios com diferentes empresas, que produzem toneladas mensais de cavacos descartam esse material em aterros sanitários, muitas vezes esses não atendem os requisitos técnicos de impermeabilização de solo, destino de chorume e queima de gases, o que torna o cavaco um contaminante ao meio ambiente.

O processo de reciclagem utiliza apenas 5% da energia elétrica e, segundo dados do *International Aluminium Institute* (IAI), libera somente 5% das emissões de gás de efeito estufa quando comparado com a produção de alumínio primário.

O grande campeão em reciclagem em 2017 no Brasil foi as latas de alumínio que chegaram há um montante de 97,3% de reaproveitamento do total gerado no setor, já o reaproveitamento de cavacos ainda não aparece na estatística, mas esta na tabela de classificação dos vinte tipos de sucata que são identificadas no mercado nacional, com indicação da classificação recomendada *pelo Institute of Scrap Recycling Industries*.

Hoje o Brasil ocupa a segunda colocação no mundo dos países que reciclam o alumínio que consome, uma quantia em torno de 51,6% do que produz de alumínio é reciclado. Mas considerando apenas o total do peso de alumínio reciclado, passa a ocupar o primeiro lugar no mundo de país que mais recicla alumínio.

Em 2011 o Brasil produzia 1440,4 mil toneladas de alumínio primário, esse montante passou a cair chegando em 790,0 mil toneladas em 2016 e passou à uma recuperação em 2017 com 801,7 mil toneladas, em 2018 fechou o ano em baixa novamente com 659,0 mil toneladas.⁽¹⁾

Essa constante extração dos recursos naturais de bauxita fazem necessário estudos direcionados na eficiência da reciclagem, por isso esse material foi base desse estudo, pela viabilidade comercial e pelas demandas sociais de preservação do meio ambiente.

O objetivo desse trabalho foi estudar ligas produzidas a partir de cavacos de alumínio fundido e confrontar suas propriedades mecânicas e de corrosão com ligas produzidas de material maciço fundido.

O estudo foi baseado na utilização de materiais secundários provenientes das ligas AA 413 fundida e a liga AA 6351-T6 fundida, assim como os cavacos de alumínio das ligas AA 413 e AA 6351-T6 prensada e fundida. Após foram analisados os resultados dos ensaios de

caracterização estrutural e morfológica, tração, dureza Brinell, impacto mini charpy e corrosão.

A partir das ligas primárias de AA 413 e AA 6351-T6 foram produzida mais quatro ligas distintas, as ligas a partir de material maciço das ligas AA 413 e AA 6351 fundido em forno de resistência elétrica, as ligas produzidas a partir de Cavacos prensados e fundidos sob as mesmas condições. Formando o total de seis ligas de alumínio estudadas nesse trabalho: A liga AA 413 comercial (primária), a liga AA 413 fundida (secundária), a liga de cavacos prensados e fundidos de AA 413 (secundária), a liga AA 6351 comercial (primária), a liga AA 6351 fundida (secundária) e a liga de cavacos prensados e fundidos de AA 6351 (secundária).

2 OBJETIVOS

O presente trabalho de pesquisa teve como objetivo, caracterizar e comparar lingotes fundidos a partir de cavaco de ligas de alumínio gerado nos processos de usinagem, com os mesmos materiais maciços fundidos e analisar quanto à sua morfologia, estrutura, seu comportamento mecânico e a resistência à corrosão visando um reaproveitamento industrial dessa matéria prima.

Os objetivos específicos são:

- A) Comparar a composição química obtida por espectrômetria, estrutura interna e a morfologia dos lingotes fundidos a partir de cavacos com lingotes obtidos de ligas fundidas a partir de material maciço;
- B) Confrontar as propriedades mecânicas analisadas através de ensaios mecânicos das ligas obtidas a partir do reaproveitamento dos cavacos de usinagem com lingotes obtidos de liga fundidas a partir de material maciço;
- C) Comparar a resistência à corrosão por meio de curvas de polarização potenciodinâmicas das ligas de alumínio em meios contendo cloretos, dos lingotes fundidos a partir de cavacos com a resistência à corrosão de outros lingotes obtidos a partir de ligas comerciais;

3 REVISÃO DE LITERATURA

No presente capítulo serão abordados tópicos relativos a conceitos fundamentais para o desenvolvimento desse trabalho, para tanto, foram consultadas obras de autores referencia no estado da arte em o histórico do alumínio, obtenção do mesmo, suas propriedades, classificações e sua reciclagem.

3.1 O HISTÓRICO DO ALUMÍNIO

O alumínio é um metal encontrado em abundância na crosta terrestre, aproximadamente 8%, mas raramente é encontrado em sua forma livre. Suas atuais aplicações industriais são recentes, sendo produzido em escala industrial e difundido no mundo todo somente a partir do final do século XIX.⁽²⁾

O elemento químico alumínio não é encontrado diretamente em estado metálico na crosta terrestre. O alumínio é obtido a partir do minério da Bauxita que é constituída por óxido de alumínio de composições variáveis, apresentando no mínimo 30% de óxido de alumínio (Al_2O_3) aproveitáveis para a produção do metal alumínio.⁽³⁾

O Brasil é o décimo primeiro produtor de alumínio primário, precedido pela China, Rússia, Canadá, Emirados Árabes, Índia, Austrália, Noruega, Bahrein, Arábia Saudita e Islândia; quarto produtor de bauxita, atrás da Austrália, China e Guiné; e terceiro produtor de alumina, atrás de China e Austrália.⁽¹⁾

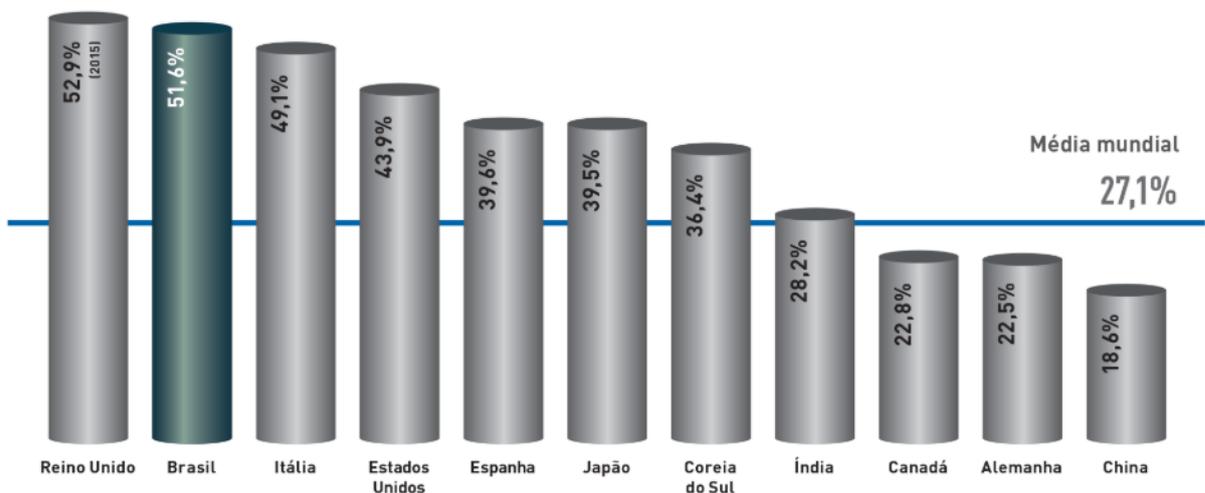
A Tabela 1 mostram o desempenho do Brasil na produção primária de alumínio e o desempenho na reciclagem do mesmo.

Tabela 1: Produção primária mensal do alumínio no Brasil (unidade: 1000 ton)⁽¹⁾

Período	2017	2018	2018/2017 (%)
Janeiro	67,7	66,7	-1,5
Fevereiro	61,3	60,5	-1,3
Março	67,9	67,8	-0,1
Abril	66,2	60,3	-8,9
Maio	68,3	51,6	-24,5
Junho	66,1	49,8	-24,7
Julho	68,4	51,6	-24,6
Agosto	68,1	51,5	-24,4
Setembro	66,1	49,1	-25,7
Outubro	68,5	-	-
Novembro	66,6	-	-
Dezembro	66,5	-	-
Janeiro-Setembro	600,1	508,9	-15,2
Total ano	801,7	-	-

A Figura 1 representa o desempenho do Brasil quanto a reciclagem de alumínio, indicando que hoje ocupa o segundo lugar no mundo com 51,6 % referente aos países que produzem alumínio primário e também reciclam esse material.

Relação entre Sucata Recuperada e Consumo Doméstico – 2016

**Figura 1:** Recuperação da sucata em relação ao consumo⁽¹⁾

A indústria Brasileira tem participação de 1 % do PIB e em 2017 chegou a contribuir com 5,4 % do PIB industrial, contribuindo com mais mais de 400 mil empregos diretos e indiretos conforme mostra a Tabela 2.

Tabela 2: Perfil da indústria Brasileira do Alumínio⁽¹⁾

Composição	2016	2017
Empregos (31/12)	415.208	414.877
■ Diretos	119.444	114.967
■ Indiretos	295.764	299.910
Faturamento (R\$ bilhões) ⁽¹⁾	63,6	65,4
■ Participação no PIB (%)	1,0	1,0
■ Participação no PIB Industrial (%)	3,9	5,4
Investimentos (R\$ bilhões) ⁽¹⁾	0,9	0,8
Impostos pagos (R\$ bilhões) ^{(1) (2)}	13,7	14,1
Produção de Alumínio Primário (mil t)	790	802
Consumo Doméstico de Produtos Transformados (mil t)	1.205	1.263
Consumo <i>Per Capita</i> (kg/hab./ano)	5,8	6,1
Exportação (mil t) (peso alumínio)	495	383
Importação (mil t) (peso alumínio)	534	532
Balança Comercial da Indústria do Alumínio (US\$ milhões FOB) ⁽³⁾		
■ Exportações	3.577	3.958
■ Importações	1.339	1.433
■ Saldo	2.238	2.525
Participação das Exportações de Alumínio nas Exportações Brasileiras (%)	1,9	1,8

3.2 OBTENÇÃO DO ALUMÍNIO

O material alumínio após sua redução da Bauxita apresenta-se em condições ambientes como um metal sólido, de baixa densidade em torno de um terço da do aço, quando puro possui dureza inferior as ligas e menor resistência à ruptura. No entanto quando forma liga com ferro e silício tem sua dureza e resistência à ruptura aumentada. ⁽⁴⁾

Em relação ao seu processo de obtenção, várias etapas foram incorporadas aos métodos tradicionais. Henri Deville, em 1859, promoveu melhorias no processo de obtenção do alumínio quando substituiu o potássio por sódio e o cloreto, a solução de NH_4Cl é uma opção conveniente para a extração de Alumínio. Posteriormente, ainda mais se avançou na extração deste metal a partir de seu mineral. Com o processo Bayer, descoberto ainda no mesmo ano, permitiu a obtenção e difusão do alumínio para uma multiplicidade de aplicações sequer imaginadas na época. Entretanto, a obtenção do alumínio através de sua reciclagem, a partir da década de 1960, se generalizou em muitos países, por razões econômicas e ambientais. ⁽²⁾

O processo de obtenção do alumínio é a partir da bauxita onde se retira a alumina, que por meio do processo de redução, é transformada em alumínio. A produção é constituída por uma série de reações químicas. O processo Bayer é utilizado para o refino da bauxita na produção de alumina (Al_2O_3). Anteriormente ao surgimento do processo Bayer, o beneficiamento da bauxita era realizado através do processo Le Chatelier, desenvolvido cerca de 30 anos antes por Louis Le Chatelier. Esse método consiste no aquecimento da bauxita

com Na_2CO_3 a $1200\text{ }^\circ\text{C}$, remoção dos aluminatos formados com água, precipitação do $\text{Al}(\text{OH})_3$ através da ação do CO_2 e, finalmente, o $\text{Al}(\text{OH})_3$ formado um filtrado, seco e limpo. O processo Bayer foi originalmente desenvolvido para atender uma demanda da indústria têxtil, que utiliza o Al_2O_3 como fixador para o tingimento do algodão. Porém somente com a sua associação ao processo eletrolítico de obtenção do alumínio metálico, processo Hall-Heroult (1886), ganhou importância na metalurgia.

A Figura 2 mostra o processo Bayer para obtenção da alumina seguida do método eletrolítico para obtenção do alumínio puro e o caminho até a indústria. ⁽⁵⁾

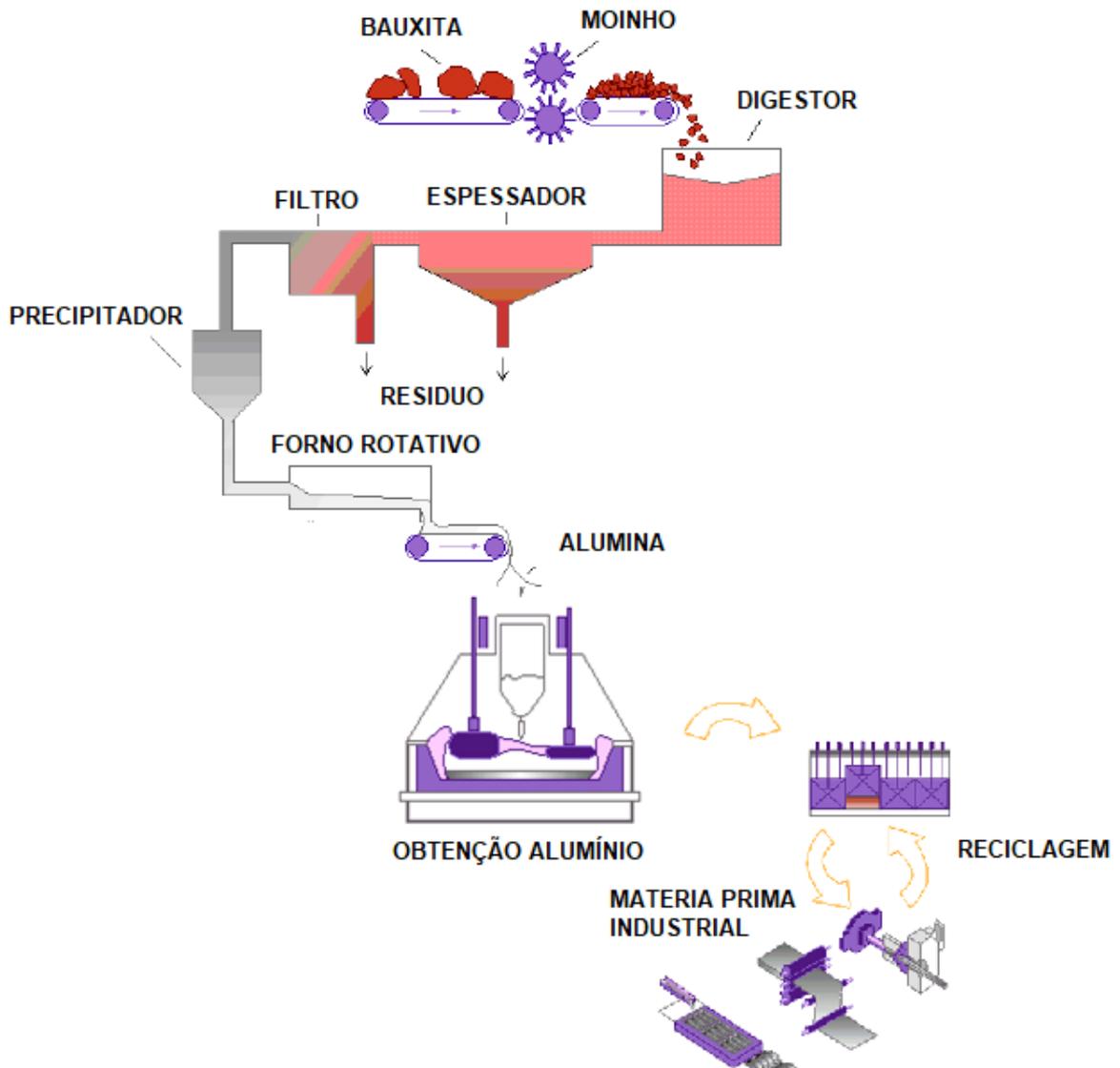
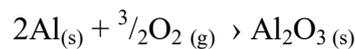


Figura 2: Beneficiamento do alumínio a partir da bauxita ⁽⁵⁾ (Adaptado)

O alumínio possui um aspecto cinza prateado e fosco, o que se deve a uma fina camada de óxidos que rapidamente se forma em sua superfície de maneira espontânea quando exposto ao ar.⁽⁶⁾

Este filme natural de alumina é estável em ambientes com valores de pH próximo ao neutro, mas se dissolve em meio ácido ou alcalino.⁽⁷⁾

Se a superfície passiva é danificada, outra camada imediatamente é gerada, reoxidando o metal base exposto, formando outra camada fina de óxido de alumínio Al_2O_3 , que possui a característica de ser aderente segundo a reação química: ⁽⁸⁾



3.3 LIGAS DE ALUMÍNIO

A composição química do alumínio e suas ligas são expressas em porcentagem, obedecendo a Norma NBR ISO 209.⁽⁹⁾ Esta norma abrange sistemas de classificação das ligas trabalháveis, das ligas para fundição, peças, lingotes e de alumínio primário, além da densidade nominal das ligas trabalháveis de alumínio.⁽¹⁰⁾

3.3.1 Liga AA 413 (*Aluminum Association*)

A liga AA 413 (Tabela 3) é indicada para fundição sob pressão, embora possa ser utilizada em coquilha e em areia. Possui boa usinabilidade, permitindo obter peças com espessuras de paredes variadas e características mecânicas médias.⁽¹¹⁾

Tabela 3: Composição química da liga de alumínio AA 413 em %⁽¹²⁾

Material	Al	Si	Fe	Zn	Mn	Cu	Mg
SAE 305	86.0	12.0	0.5	0.35	0.35	0.25	0.1

As serie AA 3xx e 4xx das ligas de alumínio (*Aluminum Association*) contem silício como elemento de liga principal e adições de magnésio ou cobre. As ligas da série 3xx são empregadas em 90% dos componentes fundidos. São as ligas de alumínio que apresentam as melhores características de fundição, motivo pelo qual cerca de 90% das peças fundidas em alumínio pertencerem à série 300.⁽¹³⁾

Nas ligas de Al contendo Fe, o ferro é considerado uma impureza, tendo solubilidade baixa. O teor de Fe em solução sólida cresce com o aumento da taxa de resfriamento e o aumento do conteúdo de Fe nas ligas de alumínio, porém ele não excede consideravelmente a solubilidade em equilíbrio. Ou seja, o Fe em sua grande maioria, pode ser encontrado nas fases intermetálicas. O sistema Al-Fe é muito importante no âmbito comercial, pois esses elementos fazem parte de muitas ligas comerciais, o que significa que pode haver a formação de sistemas de maior complexidade das fases estáveis e metaestáveis. A figura 8 a seguir apresenta o diagrama de equilíbrio para o sistema Al-Fe ampliado próximo ao ponto eutético.⁽¹⁴⁾

A Figura 3 apresenta uma existência de um ponto eutético a uma provável composição entre 1,7% a 2,0% de ferro em uma temperatura de 655 °C, podendo ser observada mais facilmente no diagrama de fases Al-Fe.

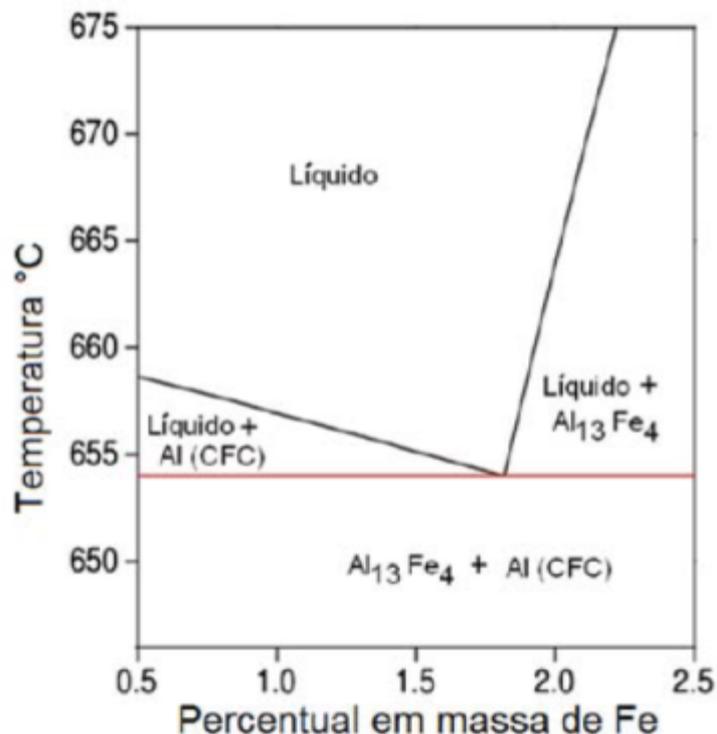


Figura 3: Diagrama de equilíbrio para o sistema Al-Fe⁽¹⁴⁾

As ligas de Al-Si possuem excelentes características de fundição em virtude de sua elevada fluidez e sua relativa baixa contração, sendo usadas em fundidos não tratáveis termicamente. O silício propicia a redução da contração durante a solidificação, reduz a porosidade nas peças fundidas, o coeficiente de expansão térmica e melhora a soldabilidade. O teor de silício em ligas de alumínio comerciais está na faixa de 5 a 23%, em peso. As

estruturas podem ser hipoeutéticas, eutética ou hipereutética. A Figura 9 apresenta o diagrama de fases da liga Al-Si.⁽¹⁵⁾

A Figura 4 mostra a microestrutura de alumínio silício em ligas comerciais fundidas.(a) Diagrama de equilíbrio Al-Si. (b) Microestrutura da liga hipoeutética.(c) Microestrutura da liga eutética 12,6% Si. (d) Microestrutura da liga hipereutética

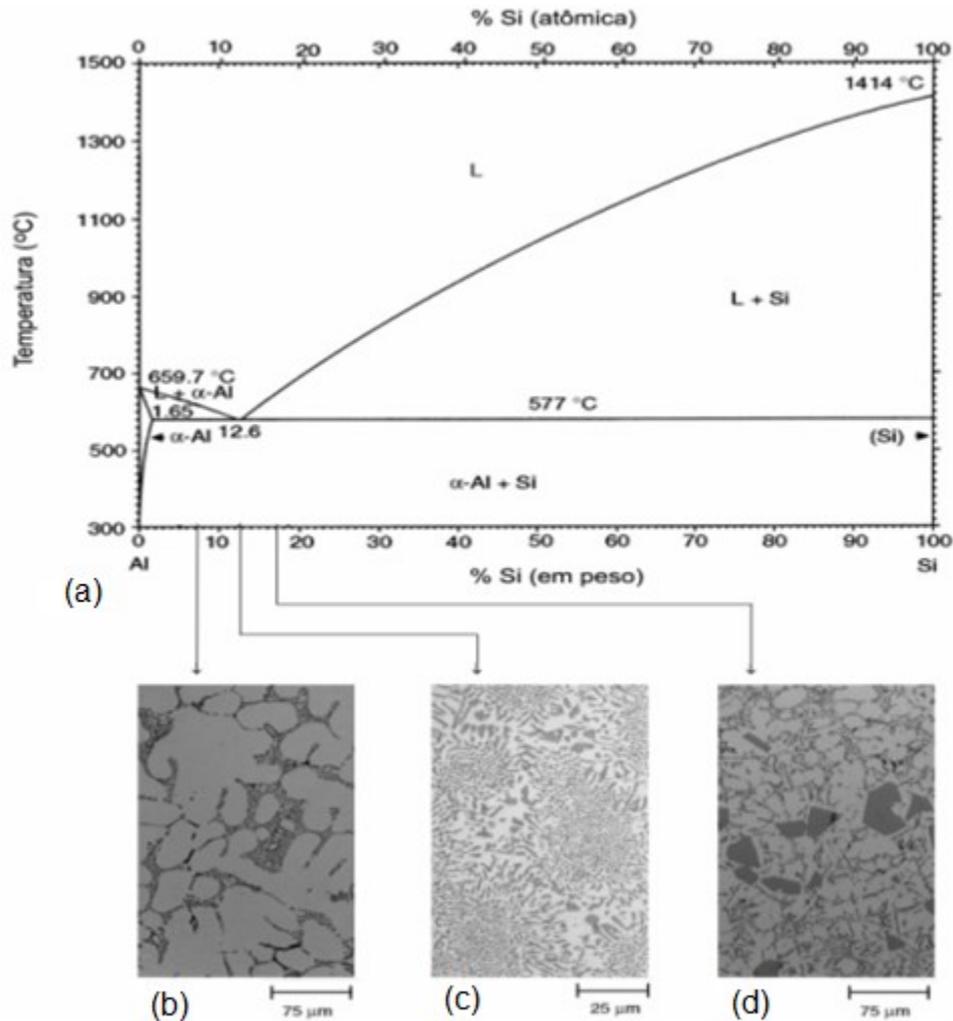


Figura 4: Diagrama de equilíbrio de fases da liga Al-Si⁽¹⁶⁾

3.3.2 Liga AA 6351-T6 (*Aluminum Association*)

As ligas de alumínio da série 6xxx, o magnésio e silício são adicionados em proporções suficientes para formação de Siliceto de Magnésio (Mg_2Si). Essas ligas apresentam elevada resistência à corrosão, boa conformabilidade, boa soldabilidade e são de

fácil usinagem. Têm aplicações em uso arquitetônico, quadros de bicicletas e estruturas soldadas.⁽¹⁷⁾

A Liga AA 6351 é geralmente indicada em aplicações estruturais, onde uma média a alta resistência mecânica é exigida. Disponível nas formas de vergalhão, tubo e perfis estruturais, a Liga AA 6351 oferece alta resistência mecânica, alta resistência à corrosão, boa conformabilidade em têmperas, boa soldabilidade, porém não apresenta boa brasabilidade e boa extrudabilidade. É tratável termicamente e suscetível a anodização somente com fins de proteção da superfície contra o envelhecimento. As aplicações mais comuns da Liga AA 6351 incluem engenharia estrutural, construção de navios, veículos e equipamentos, acessórios para cabos.⁽¹⁸⁾

A Série 6000 da *Aluminum Association* não apresenta equivalência com a SAE (*Society of Automotive Engineers- EUA*), onde magnésio e silício combinados para se obter maior resistência mecânica aliada à resistência a corrosão. A Tabela 4 mostra a composição dessas ligas.⁽¹⁹⁾

Tabela 4: Composição química de algumas ligas Aluminum Association (%).⁽¹⁹⁾

LIGA	3003	3004	5052	5083	5454	6061	6063	6351	7004
Silício	0,6	0,3	0,25	0,4	0,25	0,4 a 0,8	0,2 a 0,6	0,7 a 1,3	0,25
Ferro	0,7	0,7	0,4	0,4	0,4	0,7	0,355	0,5	0,35
Cobre	0,05 a 0,2	0,25	0,1	0,1	0,1	0,15 a 0,4	0,1	0,1	0,05
Manganês	1,0 a 1,5	1,0 a 1,5	0,1	0,4 a 1,0	0,5 a 1,0	0,15	0,1	0,4 a 0,8	0,2 a 0,7
Magnésio	-	0,8 a 1,3	2,2 a 2,8	4,0 a 4,9	2,4 a 3,0	0,8 a 1,2	0,45 a 0,9	0,4 a 0,8	1,0 a 2,0
Zinco	0,1	0,25	0,1	0,25	0,25	0,25	0,1	0,2	3,8 a 4,6
Cromo	-	-	0,15 a 0,35	0,05 a 0,25	0,05 a 0,2	0,04 a 0,35	0,1	-	0,05
Titânio	-	-	-	0,15	0,2	0,15	0,1	0,2	0,05
Zircônio	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1 a 0,2
Outros	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Alumínio	% restante								

Estas ligas (Tabela 4) são tratáveis termicamente, sendo as ligas AA 6061, AA 6063 e AA 6351 de grande aplicação estrutural, a Tabela 5 especifica o tipo de tratamento térmico à que foi submetido o material.

Tabela 5: Especificação dos tratamentos térmicos.⁽²⁰⁾

Tipo	Especificação do 1º dígito
T1	Solubilização parcial e envelhecimento natural
T2	Recozimento
T3	Solubilização total e deformação a frio
T4	Solubilização total e envelhecimento natural
T5	Apenas envelhecimento artificial
T6	Solubilização total e envelhecimento artificial
T7	Solubilização e estabilização
T8	Solubilização, deformação a frio e envelhecimento artificial
T9	Solubilização, envelhecimento artificial e deformação a frio

A Tabela 6 mostra a composição química da liga AA 6351-T6, onde pode ser verificado como elementos de ligas principais o silício, magnésio e manganês.

Tabela 6: Composição química da liga AA 6351- T6.⁽²¹⁾

Composição Química							
% Al	% Si	% Mg	% Mn	% Fe	% Ti	% Zn	% Cu
96 -98,5	0,7 - 1,30	0,4 - 0,80	0,4 - 0,80	0,5	0,2	0,2	0,1

A microestrutura da liga AA 6351-T6 é composta por uma matriz de alumínio (CFC) com dispersão de precipitados (Fe, Mn) Si Al, como pode ser verificado na Figura 5.

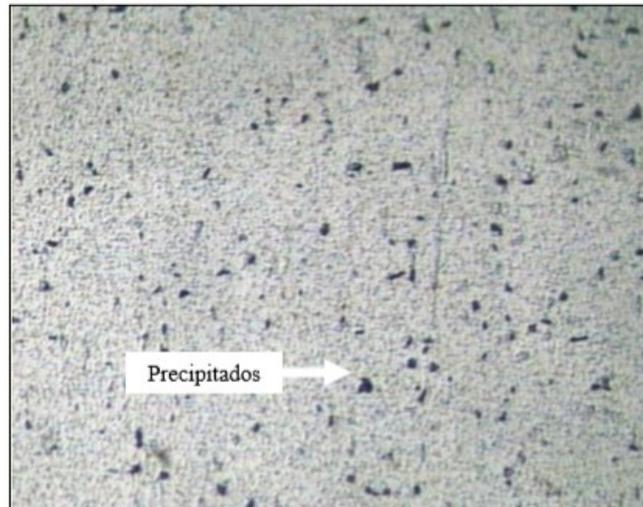


Figura 5: Microestrutura da liga de alumínio 6351-T6 ⁽²¹⁾

3.3.3 Propriedades mecânicas das ligas de alumínio AA 413 e AA 6351 T6

A adição de Mg à matriz de alumínio tem efeitos significativos nas propriedades mecânicas e na evolução microestrutural aumentando resistência as tensões. Esta estabelecido a orientação entre deslocamentos e átomos no soluto de Al-Mg conduzem ao solido da solução.⁽²²⁾

Outro agente nas propriedades mecânicas é o silício que na fundição permite que o alumínio fundido flua com facilidade nas seções mais finas do molde e ajuda a minimizar a contração durante a solidificação e com isso aumenta a resistência mecânica.⁽²³⁾

A liga AA 413 (*Aluminum Association*) é a que apresenta equivalência com a liga SAE 305 (*Society of Automotive Engineers – EUA*) nas propriedades mecânicas conforme sua composição química pode ser confrontada na Tabela 7.⁽²⁴⁾

Tabela 7: Propriedades mecânicas da liga AA 413⁽²⁴⁾

	AA	413	380
	SAE	305	306
Composição Nominal		Si 12,0	Cu 3,5
		•	Si 8,5
Composição Detalhada			
Silício • Si		11,0-13,0	7,5-9,5
Ferro • Fe		2,0	2,0
Cobre • Cu		1,0	3,0-4,0
Magnésio • Mg		0,10	0,10
Manganês • Mn		0,35	0,50
Níquel • Ni		0,50	0,50
Zinco • Zn		0,50	3,00
Outros Total		0,25	0,50
Alumínio • Al		Balanço	Balanço
Propriedades Mecânicas			
Tensão de ruptura MPa		300	317
Tensão de Escoamento MPa		140	160
Enlramento 2% em 51mm		2,5	3,5
Dureza HB		80	80
Cisalhamento MPa		170	190
Resistência ao Impacto J		•	4
Resistência a Fadiga MPa		130	140
Modulo de Elasticidade GPa		71	71
Propriedades Físicas			
Densidade g/cm ³		2,66	2,74
Temperatura de Fusão °C		574-582	540-595
Calor Especifico J/kg °C		963	963
Coefficiente de Expansão Térmica µm/m°K		20,4	22,0
Condutividade Térmica W/m °K		121	96,2
Condutividade Elétrica IACS		31	27
Coefficiente de Poisson		•	0,33
Resistência			
Trincamento		1	2
Estanqueidade		1	2
Fluidez		1	2
Antiaderência ao molde		1	1
Resistência à corrosão		2	4
Usinabilidade		4	3
Polimento		5	3
Anodização		5	3
Resistência à temperatura elevada		3	3
(1= melhor desempenho, 5= pior desempenho)			

A liga AA 6351-T6 (Aluminum Association) não apresenta equivalência com a série SAE (Society of Automotive Engineers – EUA).⁽¹⁾

A Tabela 8 apresenta as propriedades mecânicas dureza, resistência a tração, alongamento da liga AA 6351-T6.⁽²⁵⁾

Tabela 8: Propriedades mecânicas da liga AA 6351 T6⁽²⁵⁾

Propriedades Mecânicas

Liga	DIN	Têmpera	Limite de Resistência à Tração Mpa (N/mm ²)		Limite de Escoamento Mpa (N/mm ²) Min.	Alongamento Mínimo "50mm" (%)	Dureza Brinell (HB)
			MÍN.	MÁX.			
6351	Al Mg Si1,0	T6	290	-	255	8	95

3.4 RECICLAGEM DE ALUMÍNIO

Estima-se que, para o ano de 2020 o consumo de alumínio seja de 70 milhões de toneladas, sendo que 30 milhões de toneladas provirão da reciclagem. Segundo Bertram, no ano de 2004 existiam no mundo 1200 plantas de reciclagem de alumínio e 200 plantas de alumínio primário.⁽²⁶⁾

A reciclagem de alumínio gera empregos diretos e indiretos, injeta recursos na economia através da arrecadação de impostos. Hoje, existe um ciclo, o lixo que até pouco tempo de nada valia para a sociedade, passa a ser fonte de renda para famílias que tiram proveito do mesmo, através da reciclagem, existe uma promoção e integração entre as classes mais baixas, os catadores, até as classes mais altas, os proprietários das grandes indústrias.⁽²⁷⁾

No Brasil, a reciclagem do alumínio tem início com a própria implantação da sua indústria na década de 20. Naquela época, a matéria prima utilizada na fabricação de utensílios eram sucatas importadas de diversos países. Atualmente, o Brasil é líder mundial na reciclagem de latas de alumínio, reciclando aproximadamente 198,8 mil toneladas. Isso corresponde a um índice de 98,2% do total de latas produzidas no país.⁽¹⁾

Apesar do alto índice da reciclagem de latas, no mundo somente 31,1% do alumínio consumido em produtos domésticos é reciclado.⁽¹⁾

Estabelecer as latas como único indicador da reciclagem de alumínio não corresponde a realidade dos diversos produtos fabricados com este metal. Muitos produtos fabricados em

alumínio são de difícil reciclagem. Isto ocorre devido a grande afinidade deste metal com o oxigênio o que leva a uma baixa produtividade durante o processo de fusão. Um exemplo desses produtos são os laminados finos ou folhas de alumínio. Tal fato poderia explicar, em parte, os baixos índices de reciclagem desses produtos.⁽²⁸⁾

Outro exemplo é a preparação do cavaco para a fundição, o módulo de preparação do cavaco é especificamente projetado para remover do cavaco a água e lubrificantes. O sistema ainda necessita de secagem, o ar quente passa através dos cavacos para remover umidade e lubrificantes, reduzindo a umidade para menos de 0,15%, com temperaturas de operação de aproximadamente 315°C.⁽²⁹⁾

Neste sentido, o aumento da recuperação do alumínio metálico dos resíduos sólidos passa pela busca de novas técnicas aliadas a estudos de produtividade e lucratividade, hoje carentes na literatura.⁽³⁰⁾

Uma grande vantagem de reciclar o alumínio é a economia de energia em relação ao processo primário de redução da bauxita. Na produção do alumínio primário, o consumo de energia elétrica corresponde a um terço dos custos do processo. O consumo médio de energia do processo primário é de aproximadamente 15 kWh/kg.⁽³¹⁾

Para realizar a reciclagem do alumínio, levando considerando todo processo desde a preparação até a fusão da sucata, são consumidos em torno de 6% a 8% do total da energia necessária para obtenção do alumínio primário, pelo processo eletrolítico.⁽³¹⁾

A Figura 6 apresenta a classificação da sucata de alumínio produzida pela indústria para a reciclagem desse material.

SUCATA	DESCRIÇÃO
Bloco	Blocos de alumínio isentos de contaminantes (ferro e outros), com teor de 2% de óleos e/ou lubrificantes.
Borra	Escória com teores variáveis de alumínio e percentual de recuperação a ser estabelecido entre vendedor e comprador
Cabo	Cabo com alma de aço. Retalhos de cabos de alumínio não ligados, usados, com alma de aço.
Cavaco	Cavacos de alumínio de qualquer tipo de liga, com teor máximo de 5% de umidade/óleo, isentos de contaminantes (ferros e outros).
Perfil	Retalhos de perfis sem pintura.
Chaparia	Retalhos de chapas e folhas, pintadas ou não, com teor máximo de 3% de impurezas (graxas, óleos, parafusos, rebites etc.); chapas usadas de ônibus e baús, pintadas ou não; tubos aerossol (sem cabeças); antenas limpas de TV; cadeiras de praia limpas (isentas de plástico, rebites e parafusos).
Chaparia mista	Forros, chapas decorativas e persianas limpas (sem corrosões ou outras impurezas).
Chapas off-set	Chapas litográficas soltas, novas ou usadas, da série 1000 e/ou 3000, isentas de papel, plástico e outras impurezas.
Estamparia branca	Retalhos de chapas e folhas, sem pintura e outros contaminantes (graxas, óleos, parafusos, rebites etc.) gerados em atividades industriais.
Latas prensadas	Latas e alumínio usadas decoradas, prensadas com densidade entre 400kg/m ³ , com fardos palatizados ou amarrados em lotes de 1.500kg, em média, com espaço para movimentação por empilhadeira, teor máximo de 2,5% de impurezas, contaminantes e umidade.
Latas soltas ou enfardadas	Latas de alumínio usadas decoradas, soltas ou enfardadas em prensa de baixa densidade (até 100 kg/m ³), com teor máximo de 2,5% de impurezas, contaminantes e umidade.
Paneles	Paneles e demais utensílios domésticos ("alumínio mole"), isentos de cabos – baquelita, madeira etc. – e de ferro – parafusos, rebites etc.
Perfil branco	Retalhos de perfis sem pintura ou anodizados, soltos ou prensados, isentos de contaminantes (ferro, graxa, óleo e rebites).
Perfis mistos	Retalhos de perfis pintados, soltos ou prensados, com teor máximo de 2% de contaminantes (ferro, graxa, óleo e rebites).
Pistões	Pistões automotivos isentos de pinos, anéis e bielas de ferro, com teor máximo de 2% de óleos e/ou lubrificantes
Radiador alumínio	Radiadores de veículos automotores desmontados isentos de cobre, "cabeceiras" e outros contaminantes (ferro e plástico).
Radiador alumínio-cobre	Radiadores de veículos automotores desmontados isentos de "cabeceiras" e outros contaminantes (ferro e plástico).
Retalho industrial branco de chapa para latas	Retalho de produção industrial de latas e tampas para bebidas, soltos ou prensados, isentos de pinturas ou impurezas.
Telhas	Retalhos de telhas de alumínio, pintados em um ou em ambos os lados, isentos de parafusos ou rebites de ferro, revestimentos de espuma ou assemelhados.

Figura 6: Classificação das sucatas de alumínio. ⁽¹⁾

O processo de reciclagem de sucatas de alumínio tem início na triagem da sucata adquirida. Nessa fase as sucatas estão com vários tipos de contaminantes, é necessário um controle da composição química da sucata. A definição da composição química das sucatas ajudará, posteriormente, na definição de quais sucatas deverão ser utilizadas para compor a carga que será fundida para fabricação das ligas requeridas. ⁽²⁸⁾

Por exemplo, o alumínio classificado como bloco nas classificações apresentadas na Figura 6, podem conter sucatas com composições químicas diferentes. Isso faz com que seja necessária uma classificação mais refinada, com o foco na composição química.

O processo de preparação da sucata de alumínio para fusão está ligado ao tipo de material a ser utilizado e as ligas que serão produzidas.⁽²⁸⁾

Associação Brasileira de Normas Técnicas possui a norma NBR 10.004/2004, que estabelece os níveis de periculosidade e as alternativas mais adequadas para destinação dos mesmos, podendo enquadrar-se em três classes:

- classe I: perigosos – apresentam riscos a saúde pública e ao meio ambiente, exigindo tratamento e disposição especial, pois são classificados como: inflamáveis, corrosivos, reativos, tóxicos e patogênicos;
- classe II A: não-inertes – não apresentam periculosidade, porém podem ter características como: combustibilidade, biodegradabilidade, ou solubilidade em água. Esta classe é composta basicamente pelos lixos domésticos;
- classe II B: inertes – estes resíduos não se degradam ou não se decompõem quando dispostos no solo. Quando estes resíduos são depositados na água, sua potabilidade não é comprometida.

A escória do alumínio é um resíduo industrial de classe I, pois os efeitos do alumínio no organismo humano vão desde anemia por deficiência de ferro a intoxicação crônica. Segundo a norma NBR 10.004/2004, os materiais classificados neste grupo devem ser tratados adequadamente e destinados em locais próprios. Para o recebimento deste tipo de resíduo, os aterros industriais devem conter mantas impermeáveis e camadas a fim de proteger o solo e a água da contaminação.⁽³²⁾

3.4.1 Novas tecnologias para reciclagem de alumínio

Atualmente, os Estados Unidos e o Canadá são os maiores produtores mundiais de alumínio. Entretanto, nenhum deles possui jazidas de bauxita em seu território, dependendo exclusivamente da importação. O Brasil tem a terceira maior reserva do minério no mundo, localizada na região amazônica, perdendo apenas para Austrália e Guiné. Além da Amazônia, o alumínio pode ser encontrado no sudeste do Brasil, na região de Poços de Caldas (MG) e Cataguases (MG).⁽³³⁾

Com base nesse mercado o desenvolvimento de novas tecnologias vem sendo estudadas, como o projeto da MÁQUINA PARA BRIQUETAR CAVACOS DE ALUMÍNIO, conforme Figura 7.⁽³³⁾

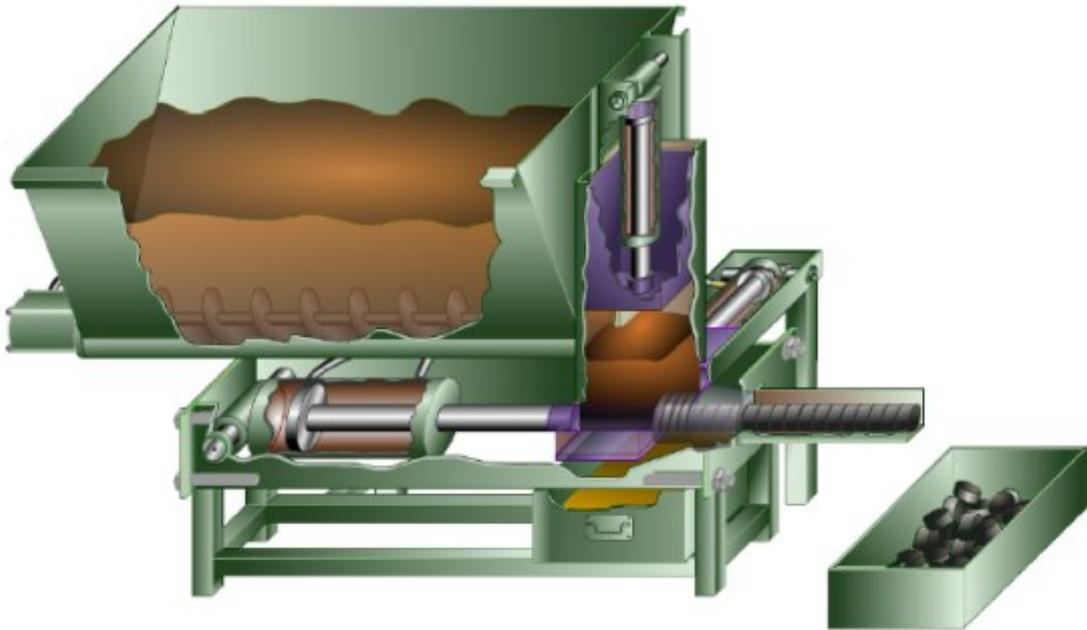


Figura 7: Máquina Briquetadora de Cavacos de Alumínio.⁽³³⁾

A Figura 8 apresenta os cavacos após passarem pela máquina para briquetar cavacos de alumínio, o qual foi fundido dessa forma no presente trabalho.



Figura 8: Briquetes de cavacos de Alumínio.⁽³³⁾

3.5 FORMAÇÕES DO CAVACO

A distribuição de temperatura, as deformações e as forças na zona de corte durante a formação de cavacos são muito importantes, pois tem grande influencia nos resultados dos processos de usinagem como um todo.⁽³⁴⁾

O alumínio é um dos metais que algumas de suas ligas tem a possibilidade de adquirir novas propriedades mecânicas, sendo submetido a processos de tratamentos térmicos ou mecânicos que produzem encruamento.⁽³⁵⁾

3.5.1 Mecanismo da formação do cavaco

Existem vários métodos experimentais dedicados ao estudo das forças de corte em relação ao desgaste da ferramenta e a formação de cavacos. Podem-se avaliar esses mecanismos através de testes como sistema de medição de temperatura ou métodos de visualização de cavacos.

Durante a usinagem de uma liga de alumínio AA 2024 para simular as forças presente na fresagem, é possível verificar as deformações plásticas sofridas pelo material nas formações dos cavacos.

A Figura 9 (a) apresenta um modelo numérico que mostra as distribuições das deformações e temperaturas sofrida pelo alumínio à uma velocidade de corte (V_c) de 800 m/minuto e uma avanço de 0,04 mm/volta, a superfície entre a ferramenta e a peça chega próximo a 500 °C. A Figura 9 (b) demonstra a formação do cavaco usinado com os mesmos parâmetros de usinagem.⁽³⁶⁾

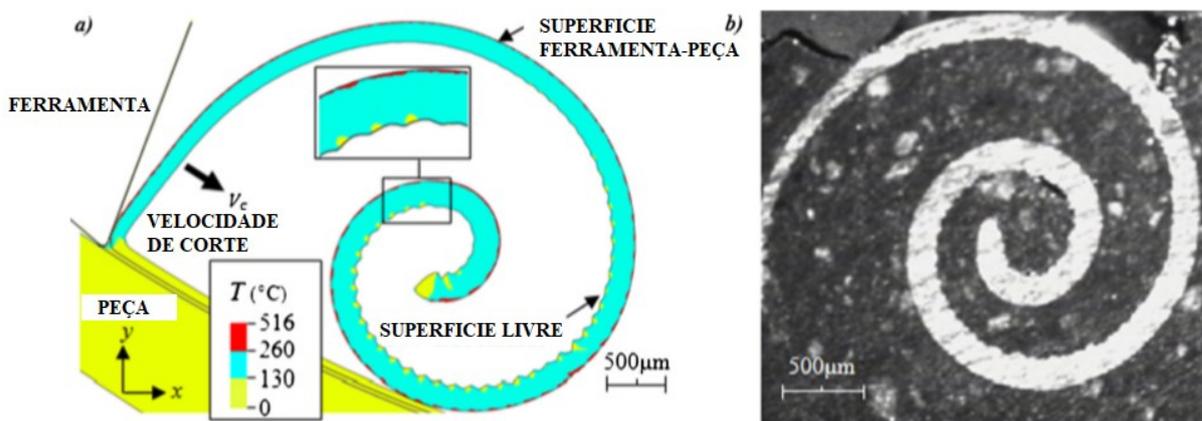


Figura 9: Mecanismo de formação do cavaco⁽³⁶⁾. (Adaptado)

No processo de fresagem usando uma fresa com pastilhas intercambiáveis feita de metal duro, pode se observar uma formação de cavacos com formas menores e finas (Tipo C) como pode ser observado na Figura 10⁽³⁷⁾.

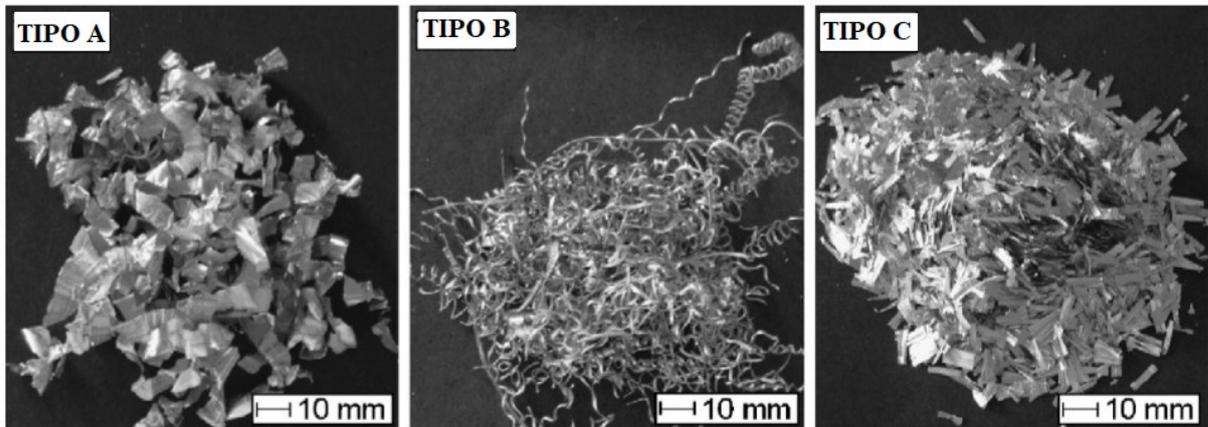


Figura 10: Morfologia do cavaco ⁽³⁷⁾. (Adaptado)

3.6 FUNDIÇÕES DO ALUMÍNIO

Os fatores que afetam a formação da escória na fundição de alumínio é proveniente da oxidação do metal líquido, a temperatura de fusão do banho líquido é ideal entre 700 e 750 °C, maiores temperaturas tendem a elevar a espessura da camada de óxido de alumínio no processo de fundição.⁽³⁰⁾

A principal vantagem do silício é a melhoria das características de fundição das ligas destinadas a esse processo, aumentando a fluidez do metal líquido. De uma maneira geral é possível definir um teor ideal de silício para os processos de fundição. Deste modo, para processos que apresentam uma baixa taxa de arrefecimento, como por exemplo fundição em areia, o teor de silício deverá situar-se entre 5% e 7% , enquanto que, para processos de fundição em coquilha, deverá ser entre 7% e 9% e, para processos de fundição injetada, entre 8% e 12%. Estes valores baseiam-se na relação entre a taxa de arrefecimento e a fluidez do banho. O efeito positivo do silício na fluidez do metal líquido deve-se ao fato da sua presença promover um aumento do intervalo de solidificação, fazendo com que, no momento da solidificação, a liga se mantenha no estado líquido durante mais tempo. A adição de silício

também é acompanhada pela redução da densidade relativa bem como do coeficiente de expansão térmica.⁽³⁸⁾

A presença de magnésio na liga de alumínio facilita a geração de escórias, pois o magnésio é sensível à oxidação. Ou seja, quanto maior o percentual de magnésio presente em uma liga, maior será a perda de produtividade daquele processo. Outro fator importante para as perdas de produtividade no alumínio a ser fundido é a área desse material. A oxidação ocorre em maior grau quanto maior for a relação área/peso do material. Em outras palavras, quanto menor a espessura do material a ser fundido, maior será a sua oxidação naquele banho e conseqüentemente maior será a geração de escórias.⁽³⁰⁾

A distribuição de ferro, manganês, cromo e silício nas ligas de alumínio forma concentrados em forma de estrelas como mostra Figura 11.

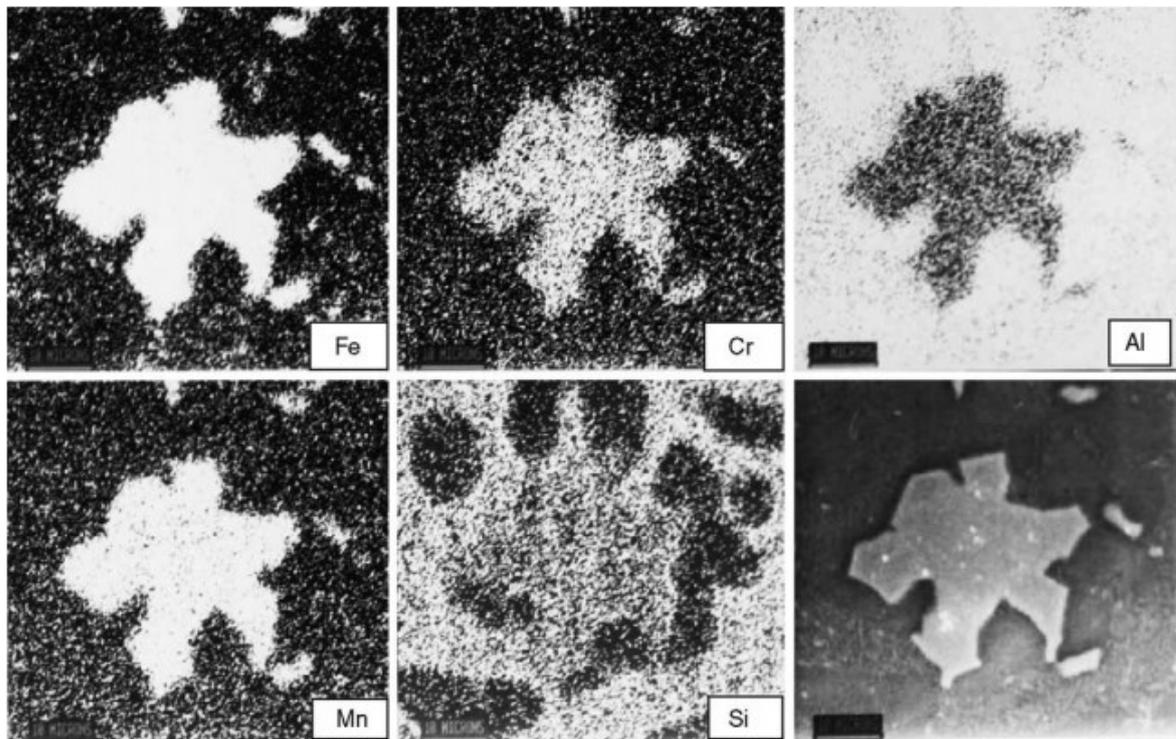


Figura 11: Distribuição de ferro, cromo, manganês e silícios em alumínio⁽³⁹⁾.

A porosidade tem grande influência sobre a densidade do material, pois a região ocupada por poros é preenchida com gás, podendo acarretar em alguns problemas em utilizações específicas. A velocidade de resfriamento do fundido influencia na formação de porosidade. Em um resfriamento rápido a taxa de solubilidade de hidrogênio decai drasticamente, proporcionando uma maior dificuldade ao hidrogênio se alocar no alumínio. Já em um resfriamento lento, o hidrogênio é bastante solúvel em um intervalo de tempo maior, acarretando em uma maior concentração de poros formados no fundido.⁽⁴⁰⁾

Pode-se observar na Figura 7 que a liga AA 356 fundida, bastante semelhante à liga AA 413 que difere apenas por conter mais silício, apresenta microestrutura constituída da fase α com morfologia dendrítica, envolvida por uma fase eutética com morfologia de agulhas. Também é evidente a presença de uma grande quantidade de poros, o que é uma característica de lingotes fundidos adquiridos no mercado.

A Figura 12 (A) apresenta poros com aproximadamente $250\mu\text{m}$ e a Figura 12 (B) demonstra a uma formação dendrítica com ramificações na faixa de $100\mu\text{m}$.⁽⁴¹⁾

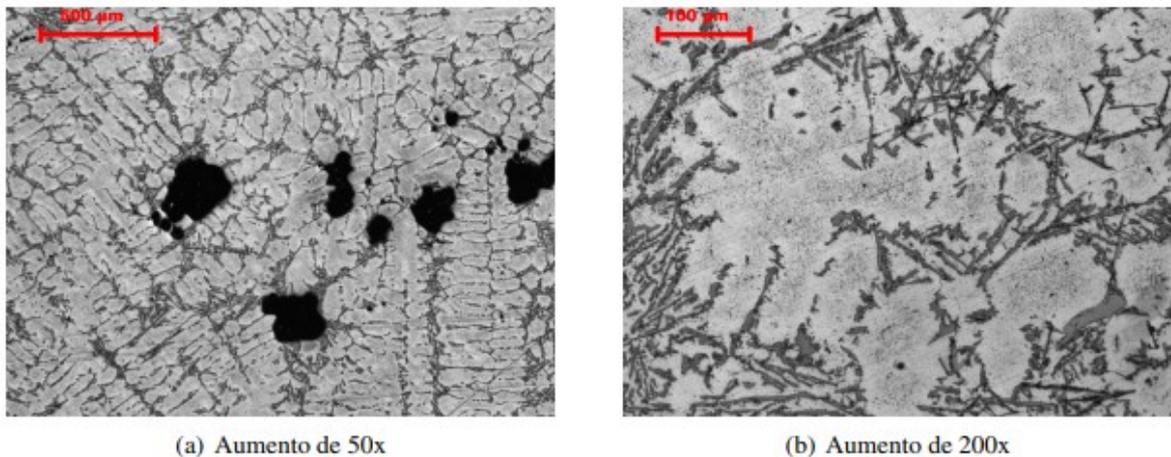


Figura 12: Microestrutura da liga AA 356 fundida comercial⁽⁴¹⁾

3.7 CORROSÃO DO ALUMÍNIO E LIGAS

O alumínio e suas ligas são suscetíveis a corrosões atmosféricas principalmente sob a forma de pites, corrosão intergranular e corrosão sob tensão. Estudos ao ar livre em diferentes ambientes e experimentos acelerados em laboratório têm sido realizados para entender a influência do ambiente atmosférico no comportamento da corrosão do alumínio. Os mesmos estudos mostram que o alumínio e suas ligas quando sofrem corrosão por pite, apresentam uma corrosão localizada, que é uma forma muito agressiva e acontece principalmente em atmosferas contaminadas em cloreto, em geral se desenvolve em três estágios: identificados com a quebra do filme passivo, crescimento de pites metaestáveis e, por fim, crescimento de pites estáveis.⁽⁴²⁾

A corrosão em geral é um processo espontâneo, e se não fora o emprego de mecanismos protetores, ter-se-ia a destruição completa dos materiais metálicos, já que os

processos de corrosão são reações químicas e eletroquímicas que se passam na superfície do metal e obedecem a princípios bem estabelecidos.⁽⁴³⁾

Todos os metais estão sujeitos ao ataque corrosivo, se o meio for suficientemente agressivo. Deste modo, para se afirmar a possibilidade do emprego do material, deve-se fazer um estudo do conjunto: material metálico, meio corrosivo e condições operacionais.

Oxidação é o ganho de oxigênio por uma substância e redução é a retirada de oxigênio de uma substância. Em termos de elétrons oxidação, é a perda de elétrons por uma espécie química e redução é o ganho de elétrons por uma espécie química.⁽⁴³⁾

Segundo Dutra (2011), em geral os processos de corrosão dos metais reagem com os elementos não metálicos presentes no meio, particularmente o oxigênio e o enxofre, produzindo compostos semelhantes aos encontrados na natureza, dos quais foram extraídos. Conclui-se, portanto, que, nestes casos, a corrosão corresponde ao inverso dos processos metalúrgicos.⁽⁴⁴⁾

A corrosão pode ocorrer sob diferentes formas, e o conhecimento das mesmas é muito importante no estudo dos processos corrosivos.

As formas (ou tipos) de corrosão podem ser apresentadas considerando-se a aparência ou forma de ataque e as diferentes causas da corrosão e seus mecanismos, como mostra a Figura 13.⁽⁴³⁾



Figura 13: Classificação dos processos de corrosão segundo o tipo de ataque⁽⁴⁵⁾

Na utilização dos materiais, dificilmente ocorrem às condições-padrão, tendo-se os mais variados íons nos mais diversos meios. Assim, na prática, usa-se uma serie galvânica que especifica cada meio considerado, sendo a mais difundida a relativa água do mar.

Esta série é composta de materiais metálicos, isto é, metais e suas ligas, de emprego mais amplo na indústria. Os materiais são ordenados em função do seu comportamento relativo em água do mar.⁽⁴⁴⁾

Na Tabela 9 pode-se observar que o alumínio apresenta-se nobre, no entanto, a formação de uma camada passiva tende a proteger da corrosão. Em água do mar, devido a presença de Cl⁻ o alumínio e suas ligas terão corrosão por pite.

Tabela 9: Série galvânica de materiais metálicos na água do mar⁽⁴⁴⁾

EXTREMIDADE ANÓDICA (Menos Nobre)	
1-	Magnésio e suas ligas
2-	Zinco
3-	Alumínio comercialmente puro (1100)
4-	Cádmio
5-	Ligas de alumínio (4,5cu, 1,6 Mg,o,6 Mn)
6-	Aço carbono
7-	Ferro fundido
8-	Aço inoxidável (13 Cr ativo)
9-	Ni-Resit (ferro fundido com alto níquel)
10-	Aço inoxidável (ativo) AISI-304 (18-8 Cr-Ni)
11-	Aço inoxidável (ativo) AISI-316 (18-10-2 Cr-Ni-Mo)
12-	Ligas de chumbo e estanhos (soldas)
13-	Chumbo
14-	Estanho
15-	Níquel (ativo)
16-	Inconel (ativo)
17-	Latões (Cu-Zn)
18-	Cobre
19-	Bronze (Cu-Sn)
20-	Cupro níqueis (60-90 Cu, 40-10 Ni)
21-	Monel (70Ni, 30 Cu)
22-	Solda prata
23-	Níquel (passivo)
24-	Inconel (passivo)
25-	Aço inoxidável ao cromo (11-13 Cr passivo)
26-	Aço inoxidável AISI 304 (passivo)
27-	Aço inoxidável AISI 316 (passivo)
28-	Prata
29-	Titânio
30-	Grafite
31-	Ouro
32-	Platina

EXTREMIDADE CATÓDICA (Mais Nobre)

Ainda segundo Dutra (2011), as estruturas submersas em água salgada estão sempre sujeitas a grandes taxas de corrosão, que poderão ainda ser aumentadas pelas presenças de poluentes. Outros fatores influentes na corrosividade nas águas são:

- velocidade e temperaturas: as taxas de corrosão, de modo geral, crescem com o aumento da velocidade da água e da temperatura;
- presença de bactérias : as bactérias de certas famílias, em determinadas condições, podem desencadear processos de corrosão ou acelerar os já iniciados;
- grau de aeração: quanto maior o teor de oxigênio, maiores serão as taxas de corrosão.⁽⁴⁴⁾

As curvas de polarização onde ba e bc são declives de Tafel anódica e catódica, determinam a região de Tafel. O i_{corr} pode ser calculado através de extrapolação da região de Tafel como mostra o gráfico de polarização na Figura 14.⁽⁴⁶⁾

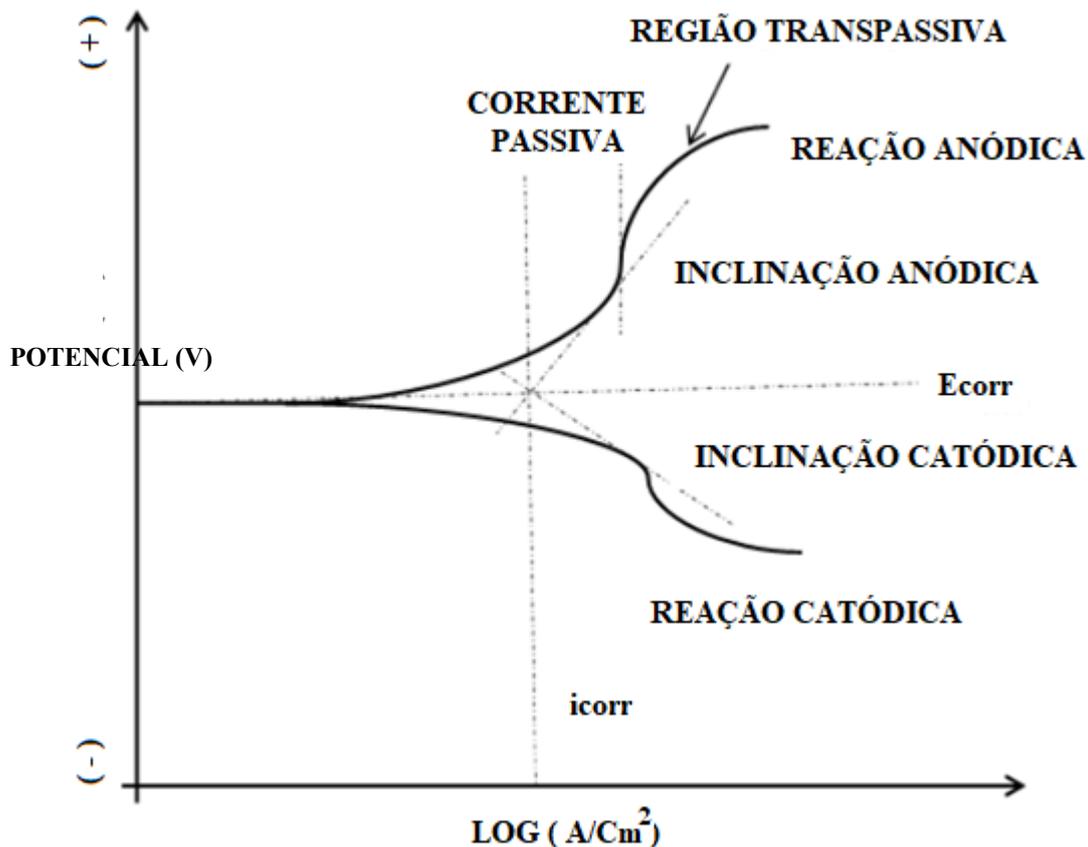


Figura 14: Diagrama de polarização catódica e anódica.⁽⁴⁶⁾ (Adaptado)

A maioria das fases intermetálicas eram vistas como tendo caráter catódico, enquanto algumas partículas de Mg_2Si de tamanho nanométrico apresentam natureza eletroquímica anódica.⁽⁴⁷⁾

O alumínio e suas ligas apresentam características de resistência ao processo de corrosão, pois estes materiais tendem a formar camadas de óxidos passivantes (normalmente na forma de óxido Al_2O_3) que é produzido naturalmente na superfície do metal.⁽⁴⁵⁾

As condições de estabilidade termodinâmica do alumínio em soluções aquosas pode ser expressa pelo diagrama de POURBAIX apresentado na Figura 15 .O diagrama mostra as condições teóricas de corrosão, imunidade e de passivação do alumínio na presença de água. O limite da faixa de estabilidade varia com a temperatura, composição do filme presente e com a presença de substancias que podem formar sais solúveis ou insolúveis com o Al.⁽⁴⁵⁾

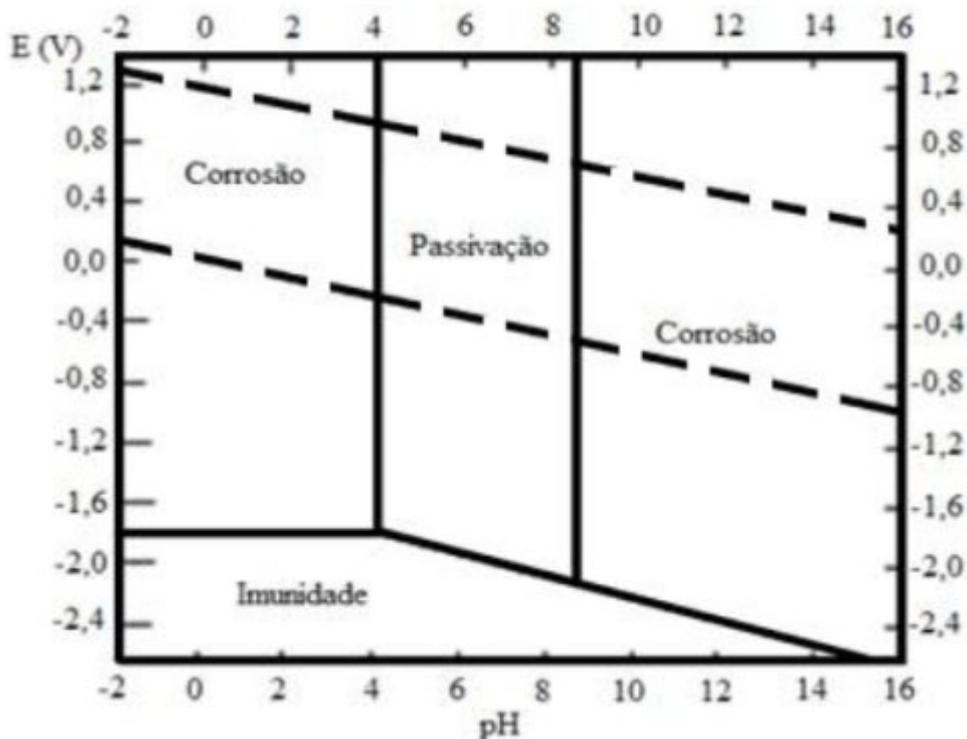


Figura 15: Diagrama de POURBAIX para o alumínio⁽⁴⁵⁾

A Tabela 10 apresenta a resistência a corrosão das ligas de alumínio, onde a liga AA 6351 se mostra mais suscetível a corrosão por pite.

Tabela 10: Resistência à corrosão das ligas de alumínio (JONES, 1996) ⁽⁴⁸⁾

Série	Tratamento * típico	Elementos de liga	Resistência à corrosão**			
			Geral	Pite	Esfoliação	CST***
1xxx	Todos	Impurezas naturais	E	E	E	I
2xxx	T3, T4,	Cu	F	P	P	MS
	T8		F	P	F	R
3xxx	Todos	Mn, Mn+Mg	E	E	E	I
4xxx	Todos	Si	F	B	B	B
5xxx	A maioria	Mn, Mg, Cr	E	B	B	I-R
6xxx	Todos	Mg, Si	E	B	E	I
7xxx	T6,	Zn, Mg, Mn,	F	F	F-P	S-MS
	T73	Cu	F	F	B	R

* T3, T4, T6: endurecido por envelhecimento; T8, T73: superenvelhecimento.

** E = excelente, B = bom, F = razoável, P = pobre, I = imune,

**R = resistente, S = susceptível, MS = muito susceptível,

***CST = corrosão sob tensão.

Com base nas informações levantadas deste capítulo, foi visto que trabalhos acadêmicos na reciclagem de cavacos normalmente não participam de estudos, porém as informações sobre as ligas usadas como base no estudo do presente trabalho foram de grande importância para determinas os parâmetros dessa pesquisa.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais de base analisados neste trabalho foram as ligas comerciais de alumínio AA 6351-T6 e AA 413 (Ligas primárias), de posse desses materiais executaram-se quatro ligas secundárias conforme mostra a Figura 16.

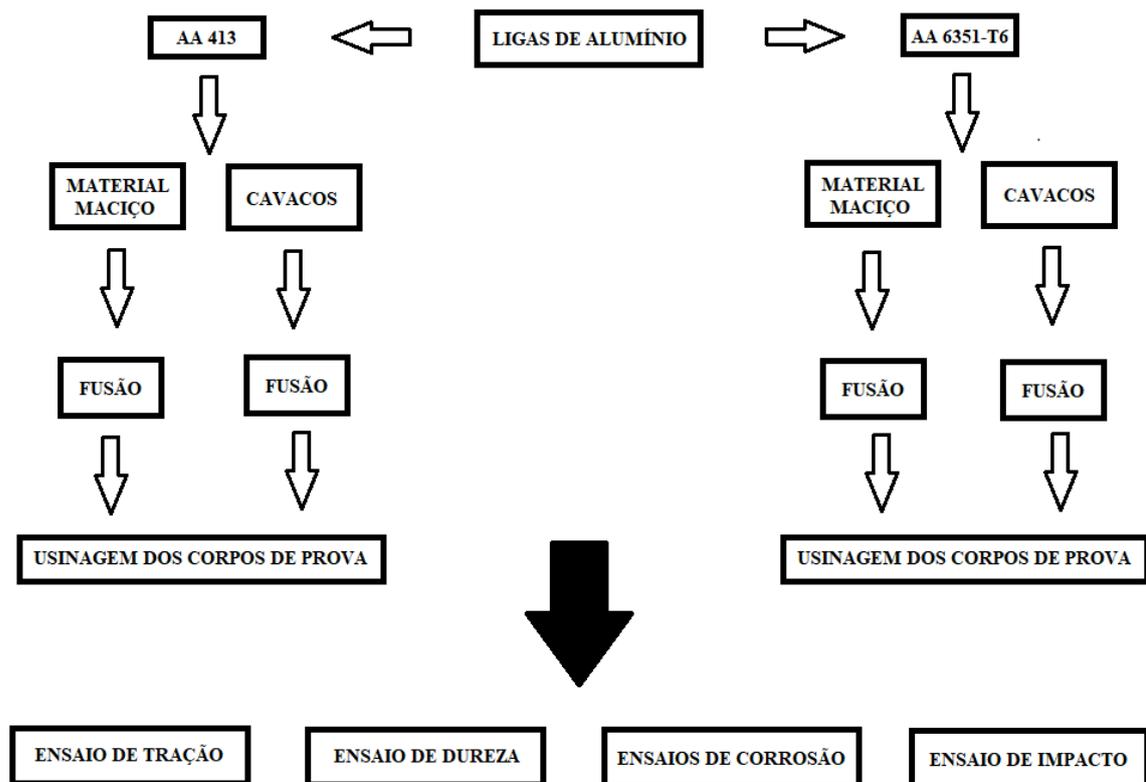


Figura 16: Fluxograma do processo de obtenção dos corpos de prova para os ensaios.

4.1 ANÁLISE DO ALUMÍNIO AA 6351-T6 E AA 413

Inicialmente a análise química foi realizada através de um espectrômetro de emissão ótica modelo Spectrolab tipo LAVFA 18B, da Spectro. O aparelho foi calibrado com padrões spectro de acordo com a norma ISO 100012.1, sendo a liga AA 6351-T6 em barra redonda laminada Figura 17 (A) e a liga AA 413 em lingote fundido conforme mostra as Figura 17 (B) das seções usadas na espectrometria.

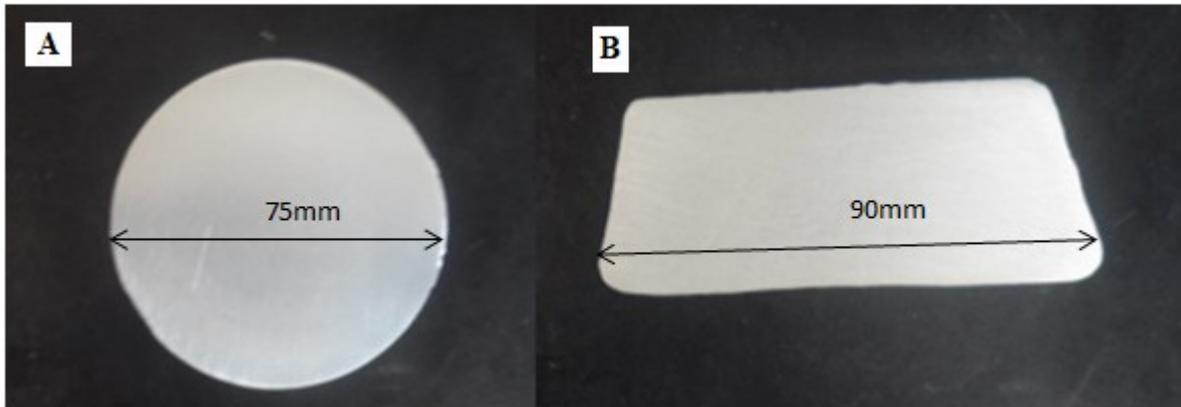


Figura 17: Barra redonda de alumínio AA 6351-T6 e lingote de alumínio AA 413.

As análises químicas efetuadas nas ligas secundárias de fusão foram realizadas através de um espectrômetro OXFORD INSTRUMENTS modelo Foundry-master Pro de emissão ótica. As ligas estudadas nesse trabalho terão a nomenclatura no decorrer dos estudos conforme Tabela 11.

Tabela 11: Nomenclatura das ligas.

AA 413 COMERCIAL	Amostras obtidas a partir de material comerciais em lingote (Liga primária)-material maciço
AA 6351 COMERCIAL	Amostras obtidas a partir de material comerciais em barra laminada com tratamento térmico T6 (Liga primária)-material maciço
AA 413 FUNDIDO	Amostras fundidas a partir de material maciço da liga AA 413 comercial (Liga secundária)
AA 413 CAVACOS	Amostras fundidas obtidas de cavacos oriundos de processo de usinagem da liga AA 413 comercial (Liga secundária)
AA 6351 FUNDIDO	Amostras fundidas a partir de material maciço da liga AA 6351 comercial (Liga secundária)
AA 6351 CAVACOS	Amostras fundidas obtidas de cavacos oriundos de processo de usinagem da liga AA 6351 comercial (Liga secundária)

4.2 OBTENÇÃO DO CAVACO DO ALUMÍNIO AA 6351-T6 E AA 413

O processo de usinagem para a obtenção do cavaco de alumínio proveniente das ligas comerciais AA 413 e AA 6351-T6 foi desenvolvido em uma fresadora vertical ferramenteira Sunlike, mediante a fabricação de um recipiente plástico, o qual foi instalado juntamente com o barramento da máquina de modo que a morsa de fixação das peças ficasse dentro do recipiente plástico evitando assim a contaminação por agentes provenientes da lubrificação da máquina, como óleos, graxas e fluídos de corte. Na usinagem das barras de alumínio foi utilizada uma rotação de 1200 rpm que gera uma velocidade de corte em torno de 40 m/min,

um avanço de 4mm/seg e o uso de ferramenta de corte de metal duro, conforme pode ser observado na Figura 18.

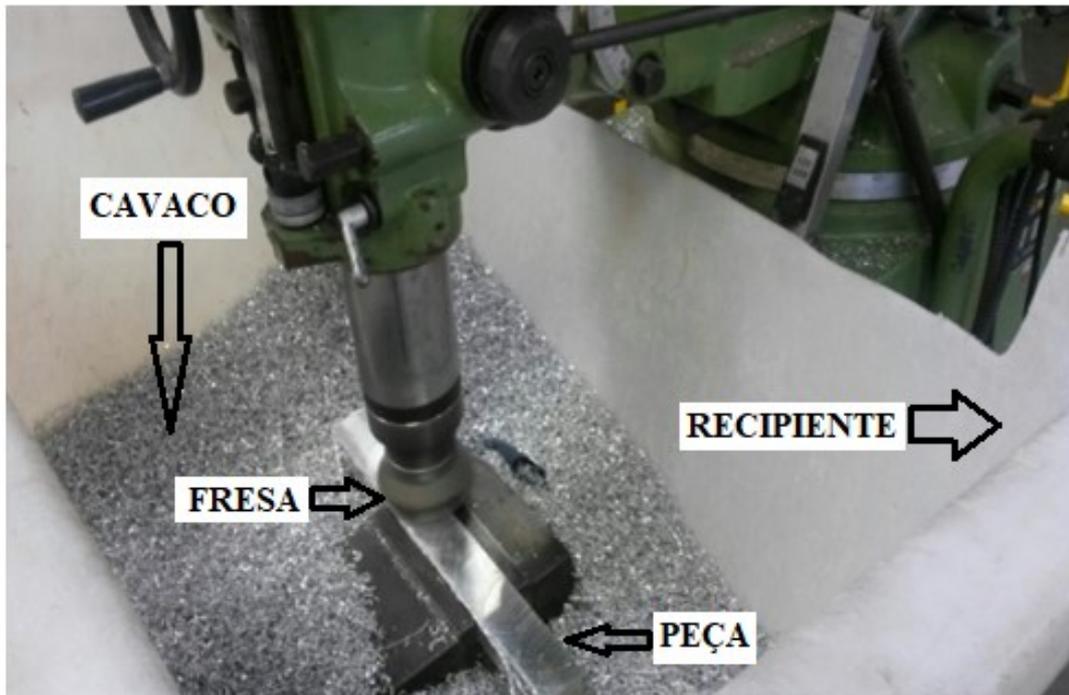


Figura 18: Usinagem para geração dos cavacos de alumínio.

4.2.1 Obtenção do cavaco prensado de alumínio AA 6351-T6 e AA 413

Após o processo de usinagem dos cavacos de alumínio AA 6351 e AA 413 (separadamente), esses materiais foram armazenados cuidadosamente, para não haver a possibilidade de contaminantes, para que com isso fosse garantido que apenas as ligas formassem os cavacos usados na compactação conforme a Figura 19.



Figura 19: Cavacos sendo prensados.

A compactação dos cavacos de alumínio foi realizada com o auxílio de uma prensa hidráulica com faixa de até 300 KN. Por motivo de segurança a compactação dos cavacos de alumínio foi realizada com 200 KN, gerando sobre a área uma pressão de 42 MPa.

Após a compactação dos cavacos de alumínio foi gerado um volume reduzido de cavaco, aumentando a densidade de cavaco usado no cadinho para a fusão, com isso buscou-se uma menor área de material a ser fundido, tentando diminuir os efeitos da oxidação no momento da fusão, conforme demonstrado na Figura 20.

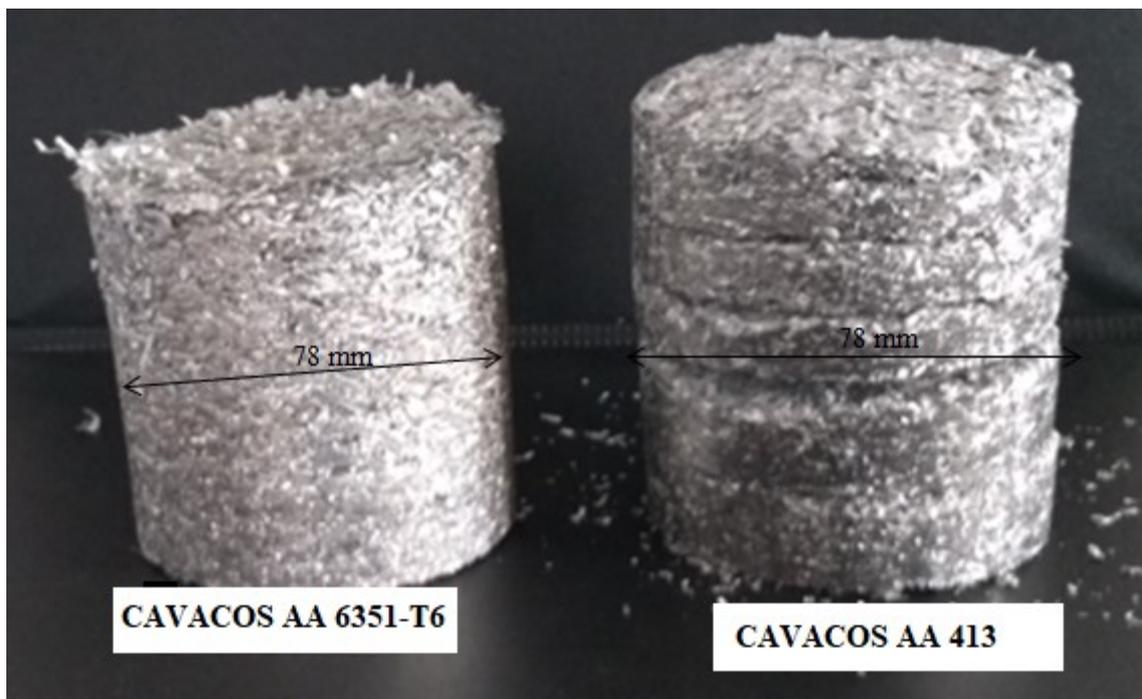


Figura 20: Briquete de cavacos de alumínio.

4.2.2 Procedimentos da fusão dos cavacos de alumínio AA 6351-T6 e AA 413

A fusão dos cavacos de alumínio foi realizada em cadinho de grafite conforme a Figura 18, onde se buscou um carregamento o mais denso possível para evitar espaços vazios. Após o carregamento com os cavacos de alumínio foi levado ao forno elétrico Jung com capacidade de até 1200 °C, demonstrado na Figura 19. A temperatura de fusão do alumínio de acordo com a literatura é de 660 °C, já os cavacos de alumínio necessitam de uma temperatura mais elevada, por a grande maioria do metal líquido permanecer junto a escória, e essa escória que tem um comportamento similar a uma esponja. A mesma deve sofrer compressão para separar o metal líquido da escória.

A temperatura que se mostrou mais eficiente foi em torno de 860 °C, onde observou-se uma maior facilidade na extração desse metal líquido no interior dessa escória com comportamento de absorver o alumínio líquido.

A Figura 21(A) mostra as dimensões do cadinho usado na fusão das ligas de alumínio e a Figura 21(B) demonstra o carregamento do mesmo com briquetes de cavacos.



Figura 21: Carregamento do cadinho com os cavacos.

A Figura 22 apresenta o carregamento do forno com os cavacos de alumínio. Esse forno teria capacidade para fundir quatro cadinhos equivalente ao que foi usado nesse trabalho.



Figura 22: Carregamento do forno com os cavacos.

Os cavacos de alumínio apresentaram uma característica específica na hora da fusão, mostrando uma grande variação de volume, após ficarem em estado líquido e também apresentando uma camada espessa de escórias que devem ser retiradas do cadinho para a necessidade de novamente fazer o reabastecimento.

O processo de fusão torna mais eficaz a partir do momento que o banho vai se formando, pois nessas condições o alumínio líquido ajuda na fusão do cavaco, diminuindo assim o contato com oxigênio, o qual tem a propriedade de formar óxidos que aumentam o volume da escória.

Após o banho estar pronto foi realizado o vazamento do material fundido em coquilha de aço, onde se buscou controlar a temperatura com termopar para que não houvesse grandes variações de temperatura na coquilha, o que poderia influenciar nos resultados dos ensaios mecânicos.

A Figura 23 mostra a montagem da coquilha com o sistema de termopar da mesma sobre material refratário após o vazamento do metal líquido.



Figura 23: Sistema de monitoramento do vazamento.

O procedimento de controle da temperatura da coquilha se deu antes do vazamento de cada corpo de prova Figura 24(A), bem como no momento em que foi retirado o corpo de prova da mesma, como mostra a Figura 24(B).

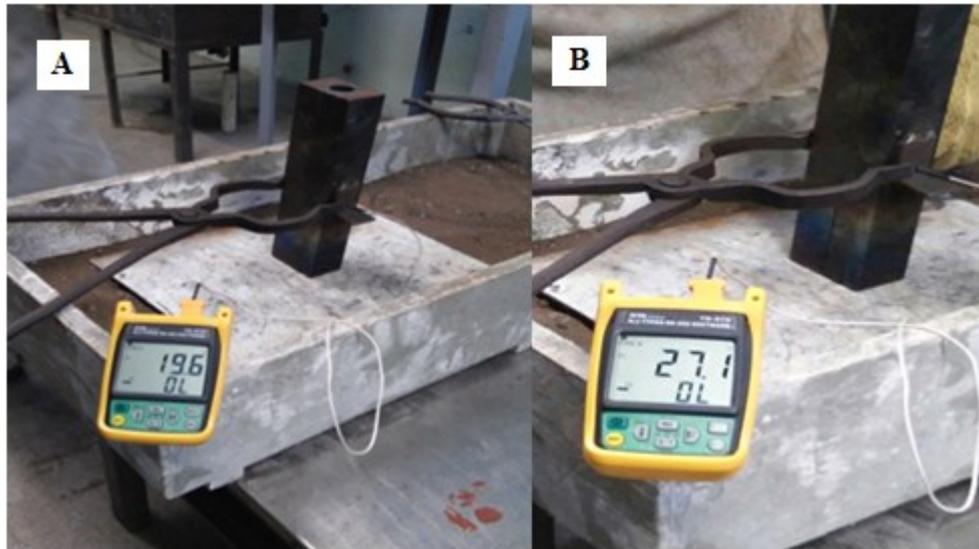


Figura 24: Controle da temperatura do vazamento.

4.3 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVAS

Para obtenção dos corpos de prova, partiu-se de duas ligas comerciais (AA 6351-T6 e AA 413) e quatro ligas de fusão secundárias. Primeiramente dividido as ligas em comercial de fundição no caso do alumínio AA 413 em lingote e comercial de perfis laminados com tratamento térmico T6 que é o caso do alumínio AA 6351-T6. Após determinar que o estudo seria feito nessas duas ligas, por representarem dois grupos distintos de aplicação no mercado de consumo do alumínio, cada liga foi fundida em duas condições:

- Alumínio AA 413 fundido em cadinho de grafite e vazado em coquilha de aço e cavaco de alumínio AA 413 vazado em coquilha de aço.
- Alumínio AA 6351 fundido em cadinho de grafite e vazado em coquilha de aço e cavaco de alumínio AA 6351 vazado em coquilha de aço.

Formando assim, seis diferentes materiais a serem estudados: Alumínio AA 413 comercial, alumínio AA 413 fundido, cavaco de alumínio AA 413 fundido, alumínio AA 6351 comercial, alumínio AA 6351 fundido, cavaco de alumínio AA 6351 fundido.

4.3.1 Preparação dos corpos de provas de tração

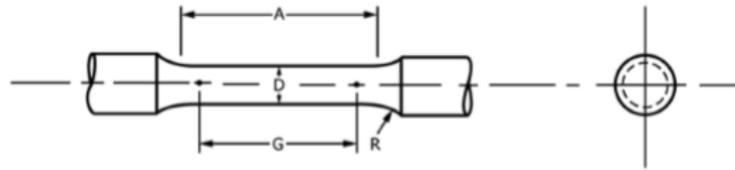
As propriedades mecânicas de tração foram obtidas no ensaio de tração na máquina universal de tração EMIC modelo DL10000 capacidade máxima de tração de 100 KN, disponível no Instituto Federal Sul-Rio-grandense campus Pelotas conforme a Figura 25.



Figura 25: Máquina de ensaio de tração.

Os corpos de provas de tração foram obtidos através de usinagem primeiramente em torno convencional, esse procedimento foi realizado para gerar um perfil cilíndrico e concêntrico com a geometria da peça vazada em coquilha, para posteriormente essa superfície cilíndrica servir de fixação para a placa do torno CNC modelo Diplomat 195.

Após os processos de usinagem nos corpos de provas de tração com as dimensões e procedimentos seguindo as normas ASTM E8/E8M- 16^a (49), apresentaram as dimensões que especificaram o tamanho da coquilha usada nas fundições das ligas de alumínio. Segundo a norma acima citada os corpos de prova de tração apresentaram diâmetro útil de (D) 12,5 mm e comprimento útil de (A) 75 mm conforme pode-se verificar na Figura 26.



Dimensions, mm [in.]					
For Test Specimens with Gauge Length Four times the Diameter [E8]					
	Standard Specimen	Small-Size Specimens Proportional to Standard			
	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Specimen 4	Specimen 5
<i>G</i> —Gauge length	50.0 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	36.0 ± 0.1 [1.400 ± 0.005]	24.0 ± 0.1 [1.000 ± 0.005]	16.0 ± 0.1 [0.640 ± 0.005]	10.0 ± 0.1 [0.450 ± 0.005]
<i>D</i> —Diameter (Note 1)	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	9.0 ± 0.1 [0.350 ± 0.007]	6.0 ± 0.1 [0.250 ± 0.005]	4.0 ± 0.1 [0.160 ± 0.003]	2.5 ± 0.1 [0.113 ± 0.002]
<i>R</i> —Radius of fillet, min	10 [0.375]	8 [0.25]	6 [0.188]	4 [0.156]	2 [0.094]
<i>A</i> —Length of reduced section, min (Note 2)	56 [2.25]	45 [1.75]	30 [1.25]	20 [0.75]	16 [0.625]

Dimensions, mm [in.]					
For Test Specimens with Gauge Length Five times the Diameter [E8M]					
	Standard Specimen	Small-Size Specimens Proportional to Standard			
	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Specimen 4	Specimen 5
<i>G</i> —Gauge length	62.5 ± 0.1 [2.500 ± 0.005]	45.0 ± 0.1 [1.750 ± 0.005]	30.0 ± 0.1 [1.250 ± 0.005]	20.0 ± 0.1 [0.800 ± 0.005]	12.5 ± 0.1 [0.565 ± 0.005]
<i>D</i> —Diameter (Note 1)	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	9.0 ± 0.1 [0.350 ± 0.007]	6.0 ± 0.1 [0.250 ± 0.005]	4.0 ± 0.1 [0.160 ± 0.003]	2.5 ± 0.1 [0.113 ± 0.002]
<i>R</i> —Radius of fillet, min	10 [0.375]	8 [0.25]	6 [0.188]	4 [0.156]	2 [0.094]
<i>A</i> —Length of reduced section, min (Note 2)	75 [3.0]	54 [2.0]	36 [1.4]	24 [1.0]	20 [0.75]

Figura 26: Dimensões dos corpos de prova de tração segundo ASTM. ⁽⁴⁹⁾

As dimensões da coquilha foram baseadas nas dimensões dos corpos de provas de tração, os quais de todos os ensaios realizados apresentaram as maiores dimensões longitudinais, ficando assim estabelecido o tamanho da coquilha que foi usada para todos os ensaios realizados nesse trabalho.

Segundo Garcia ⁽⁵⁰⁾ durante o processo de solidificação, quanto menor for à peça fundida mais rápida acontece à sua solidificação, por outro lado a formação do tamanho de grão fica mais fina, ou seja, quanto maior a velocidade de resfriamento da peça fundida menor será o tamanho de grão da mesma, com isso suas propriedades mecânicas e químicas também vão variar conforme o tamanho de grão. Baseado nesse principio optou-se por manter a mesma coquilha para todas as peças a serem testadas, juntamente com o controle das temperaturas da coquilha durante o vazamento das ligas de alumínio eliminando assim possíveis variáveis que poderiam influenciar nos resultados dos testes realizados nesse estudo.

A Figura 27 e a Figura 28 mostram as proporções usadas na fabricação da coquilha e dos corpos de provas.



Figura 27: Representação da coquilha de aço usada no vazamento.

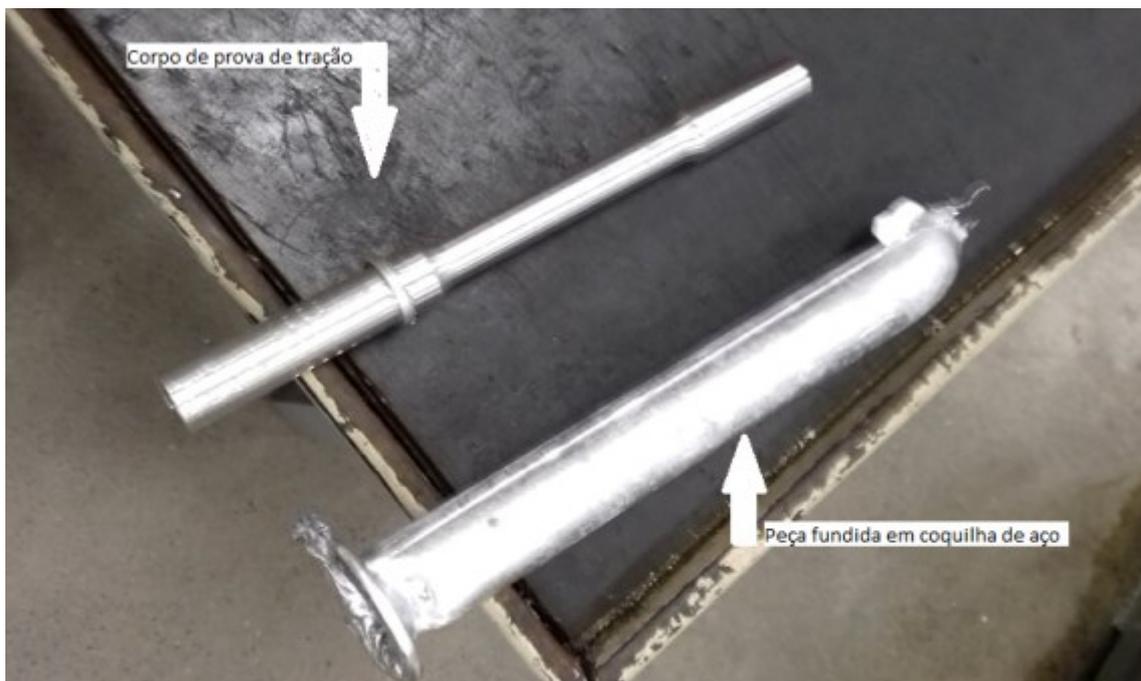


Figura 28: Representação do material retirado da coquilha de aço usada no vazamento.

4.3.2 Preparação dos corpos de provas para ensaio de dureza Brinell

As propriedades mecânicas de dureza foram obtidas conforme a norma da ASTM E10-01 ⁽⁵¹⁾ por ensaio de dureza Brinell no durometro que se encontra no Instituto Federal Sul-Rio-grandense campus Pelotas.

A determinação da dureza foi feita com base no cálculo da dureza Brinell HB conforme a Equação 01:

$$(01) \quad HB = \frac{2Q}{\pi \cdot D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}$$

Onde Q é a carga de 62,5 Kgf, D é o diâmetro da esfera de aço temperado de 2,5 mm e d é o diâmetro da impressão no ensaio.

A Figura 29 apresenta a máquina usada nos ensaios de dureza Brinell.



Figura 29: Máquina de ensaio de dureza.

Os ensaios foram realizados em triplicata em cada corpo de prova, e admitindo como dureza a média dessas três medidas para cada corpo de prova.

A obtenção dos corpos de prova de dureza foram a partir dos corpos de prova de tração. Após os ensaios de tração, levaram-se esses corpos de prova para uma fresadora vertical, a mesma ilustrada anteriormente nesse trabalho. Onde se realizou um processo de usinagem para planificar uma região que não era útil no ensaio de tração para que essa região fosse adequada aos ensaios de dureza. A máquina de ensaio Brinell foi aferida em um microscópio com auxílio do programa imagem J para verificar a precisão da impressão da esfera de aço temperado.

A Figura 30 mostra a região dos corpos de prova de tração que foram planificadas para os ensaios de dureza.



Figura 30: Corpo de prova usado em ensaio de dureza.

4.3.3 Preparação dos corpos de provas para ensaio de impacto

Os corpos de prova dos ensaios de impacto Charpy foram usinados em fresadora vertical e plaina limadora, esse ensaio foi baseado na norma ASTM E-23-05⁽⁵²⁾.

A usinagem dos materiais primeiramente passou pela fresadora vertical, a qual deixou os corpos de prova com as dimensões finais faltando apenas o entale, demonstrado na Figura 31 (A). A confecção dos corpos de provas foi a partir dos materiais fundidos em coquilha, sendo usinado em forma prismática como é recomendado pela norma citada anteriormente e como demonstra as dimensões na Figura 31(B).

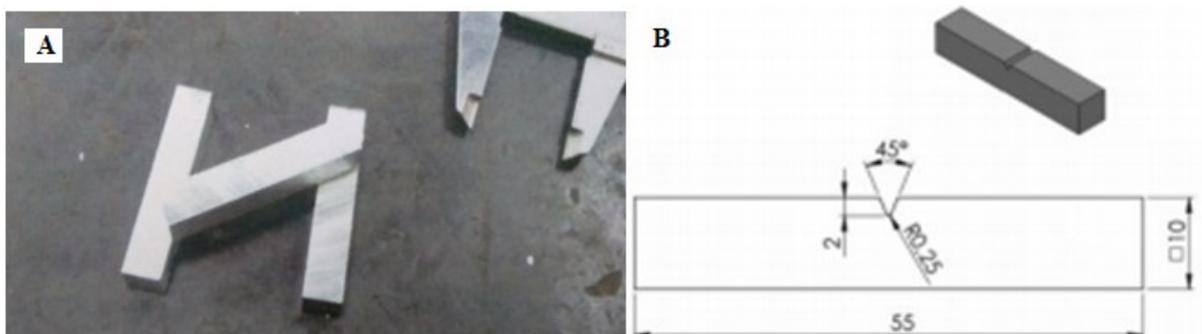


Figura 31: Dimensões dos corpos de prova Charpy⁽⁵³⁾

Para a realização do entalhe foi confeccionado uma ferramenta de aço rápido, cuja suas dimensões foram controladas com o auxílio de um projetor de perfil óptico modelo 215K série 244 com resolução máxima de 100 vezes para ser usada na confecção do entalhe, o qual foi realizado numa plaina limadora.

Os ensaios charpy foram realizados na máquina de ensaios charpy com limitação de até 500 Kgf . cm, disponível no curso técnico de Mecânica situado Instituto Federal Sul-Rio-grandense campus Pelotas conforme a Figura 32.



Figura 32: Máquina de ensaios Charpy.

4.3.4 Preparação dos corpos de provas para ensaio de corrosão por imersão

Os corpos de prova dos ensaios de corrosão por imersão foram realizados segundo as normas da ASTM G31-72⁽⁵⁴⁾, ASTM TMO169/G31-12^{a(55)} e ASTM Designation D1141-98 (reapproved 2003)⁽⁵⁶⁾ para estimular uma possível variação de massa .

4.3.4.1 Preparação do corpo de prova para teste preliminar de ensaio de corrosão por imersão

Antes de começar a usinagem das triplicatas dos corpos de prova de alumínio AA 413 comercial, AA 413 fundido e cavacos de AA 413 fundidos , assim como os corpos de prova

de AA 6351 comercial , AA 6351 fundido e cavacos de AA 6351 fundidos, optou-se por um teste preliminar para acompanhar o desempenho da variação de massa diariamente.

Esse teste foi estabelecido para ter uma noção da evolução da corrosão durante o tempo de imersão, para isso usou-se um corpo de prova da liga AA 6351- T6 comercial por ser a liga que apresentou melhor resistência mecânica. Sendo assim a fabricação do corpo de prova respeitou a mesma área de exposição recomendada na ASTM G31 dos corpos de provas a ser estudados, porém para uma fabricação mais rápida a geometria escolhida foi circular, por apresentar maior facilidade de fabricação.

A Figura 33 representa o formato e dimensões do corpo de prova fabricado para ensaio preliminar de corrosão por imersão.

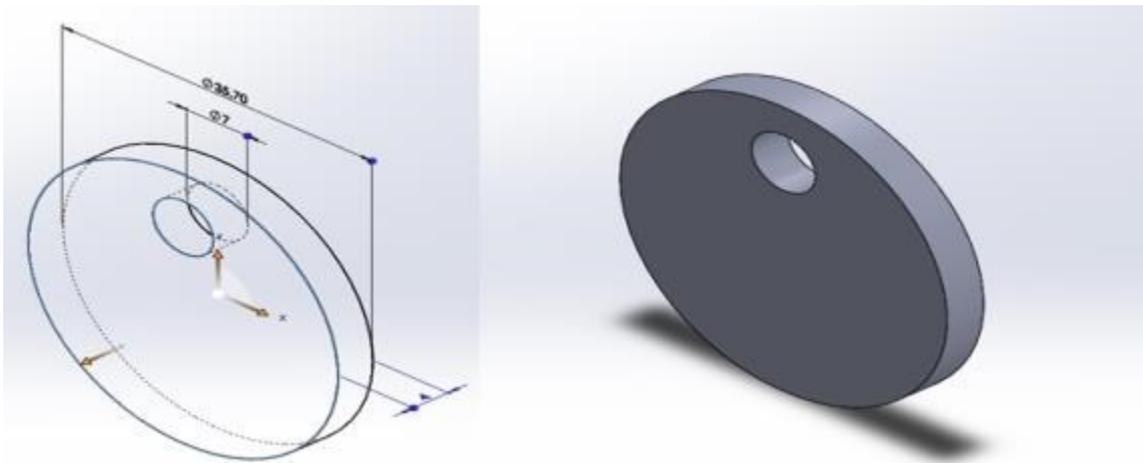


Figura 33: Dimensões do corpo de prova teste para imersão.

A Figura 34 apresenta o ensaio teste de corrosão por imersão na liga AA 6351-T6 comercial, o corpo em forma circular com área de superfície de 2113 mm^2 apresenta uma área próxima à área dos corpos de prova retangulares que é 2560 mm^2 . Exposta à mais de 500 ml de NaCl 3,5% como determina as normas acima citadas.

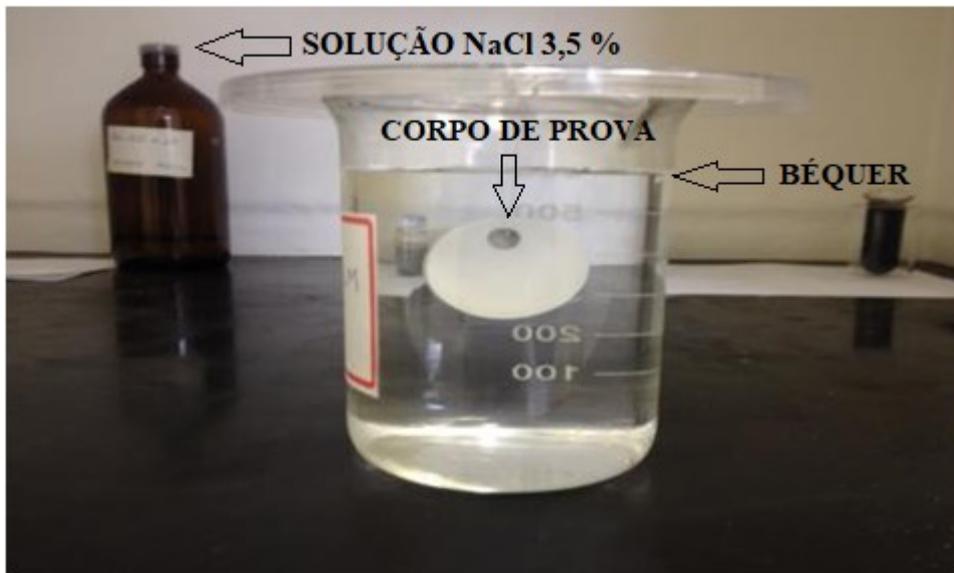


Figura 34: Corpo de prova teste na imersão

4.3.4.2 Preparação dos corpos de prova para os ensaios de corrosão por imersão

Após ensaios preliminares em corpo de prova teste, realizou-se a confecção dos corpos de prova retangulares com furo de 7mm onde passa o fio de náilon isolado por resina epóxi (Brascola Araldite). A Figura 35 mostra as dimensões e formas dos corpos de prova a serem usados na corrosão por imersão.

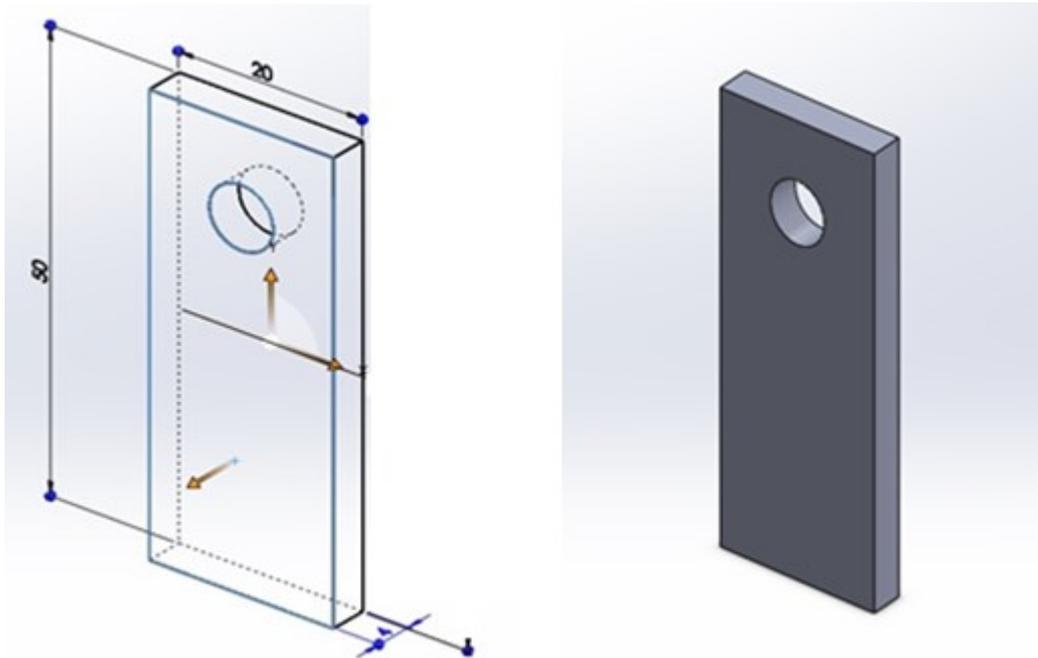


Figura 35: Dimensões do corpo de prova para ensaios de corrosão por imersão.

Os corpos de prova tanto das ligas primárias quanto os das ligas secundárias proveniente da fusão em coquilha, foram cortados com uma serra vertical com baixa

velocidade de corte para aproximação das medidas finais antes de levar a fresadora vertical já mencionada nesse trabalho.

Após a usinagem as amostras das ligas de AA 413 comercial, AA 413 fundido e cavacos de AA 413 fundidos, assim como as ligas AA 6351 comercial, AA 6351 fundido e cavacos de AA 6351 fundidos, para melhorar as superfícies exposta ao NaCl 3,5% foi aplicada lixas d'água de granulação 80, 220, 600, 1200 e 2500.

As amostras após o lixamento foram submetidas a polimento com alumina 0,5 μm , lavadas e desengorduradas com acetona 99 %, conforme se pode verificar nas Figuras 36 e 37.

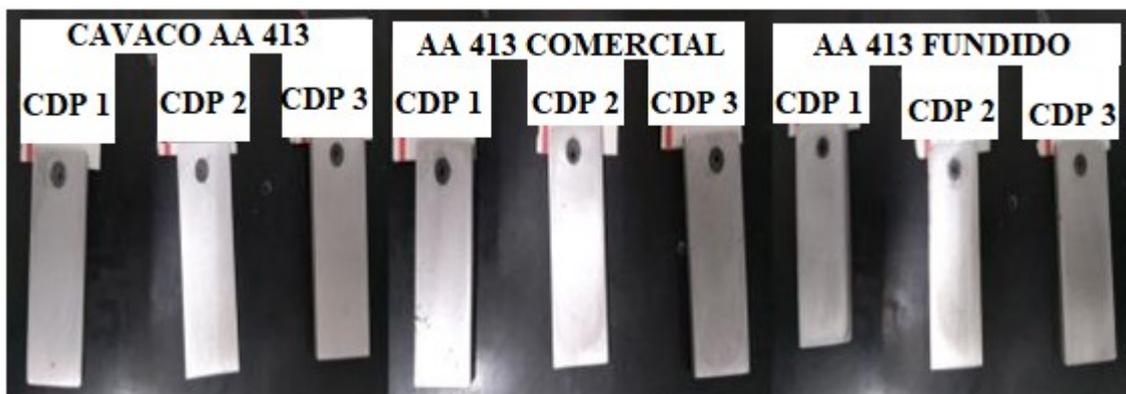


Figura 36: Corpo de prova para ensaios de corrosão por imersão das liga primária e secundárias de AA 413.

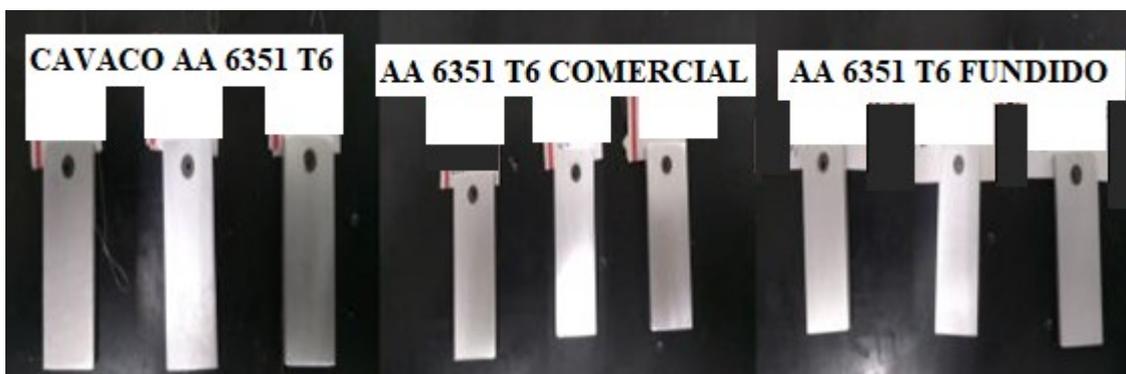


Figura 37: Corpo de prova para ensaios de corrosão por imersão das liga primária e secundárias de AA 6351-T6.

A Figura 38 mostra os corpos de provas das ligas primárias e secundárias das ligas AA 413 e AA 6351, conforme se pode ver na imagem o furo de 7 mm de diâmetro esta isolado com a resina anteriormente descrita, onde foi executado um furo de aproximadamente 2 mm no preenchimento de resina. Fazendo que com isso o fio de náilon não tenha contato com os materiais estudados.

Após a confecção das amostras, essas foram imersas num Becker de 2000 ml com três corpos de prova em cada, totalizando seis Becker (um para cada liga estudada) contendo a solução de NaCl 3,5 % com volume de 1500 ml conforme norma ASTM G31-72⁽⁵⁴⁾.



Figura 38: Corpo de prova em imersão das liga primária e secundárias de AA 413 e AA 6351-T6.

A variação de massa durante o período de 30 dias, foi determinada antes da imersão e após 30 dias, o produto de corrosão para pesagem deve seguir a norma ASTM Designation D1141-98 (reapproved 2003)⁽⁵⁶⁾, que indica retirar o produto de corrosão com o auxílio de escova de polímero em água corrente e limpeza com acetona e esponja de polímero.

O produto de corrosão de coloração branca, foi formado na superfície dos corpos de prova e outra parcela desse produto decantada no Becker da solução de NaCl 3,5 %. Esse produto de corrosão formado na superfície comportou-se de duas maneiras distintas: Uma parcela menor desse produto de corrosão se soltou da amostra no momento da limpeza, outra parcela do produto de corrosão ficou aderente na superfície dos corpos de prova, somente com o auxílio de lixas para sua remoção o que não foi usado porque retiraria uma parcela de material não corroído.

4.3.5 Preparação dos corpo de prova para os ensaios de corrosão de circuito aberto e polarização

Os corpos de provas submetidos aos ensaios de polarização foram retirados de uma porção dos corpos de prova de tração após o mesmo realizado, conforme mostra a Figura 39.



Figura 39: Corpo de prova da liga AA 413 fundido após ensaio de tração.

Como foi visto na Figura 39 os corpos de prova submetidos aos ensaios de polarização foram fracionados dos corpos de prova de tração, logo após foi realizado a preparação da superfície submetida as lixas 80, 600, 1500, 2000 e 2500. Momentos antes dos ensaios de polarização os corpos de prova foram polidos com alumina $0,5\mu\text{m}$, posteriormente limpos com água corrente e submersos em acetona 99%.

Os ensaios de polarização foram realizados em um MICROAUTOLAB, disponível no curso de Engenharia Química situado no Instituto Federal Sul-Rio-grandense campus Pelotas.

Os parâmetros usados nos ensaios de corrosão para a polarização foram de 5×10^{-3} Volts / seg para velocidade de varredura e o potencial inicial de -1 Volts até -0,5 Volts e para as medidas de OCP foi usado o tempo de 900 segundos, conforme mostra a Figura 40.

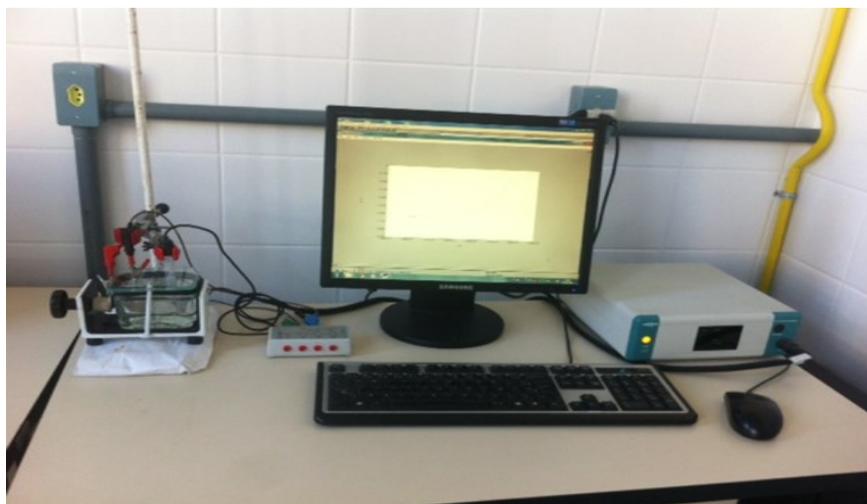


Figura 40: Ensaio de polarização em MICROAUTOLAB.

A Figura 41 mostra detalhes da célula confeccionada no curso de técnico de mecânica para os ensaios de polarização. Conforme podemos ver na imagem, essa célula é constituída de uma base em aço, um recipiente inerte de vidro, onde o corpo de prova fica isolado entre materiais de elastômeros e submetido ao NaCl 3,5 %. Nesse recipiente de vidro são imersos uma chapa de platina e o eletrodo de referência de calomelano.

A área exposta à corrosão é delimitada por um furo no vidro isolada com elastômero através da pressão exercida pelo suporte da célula.

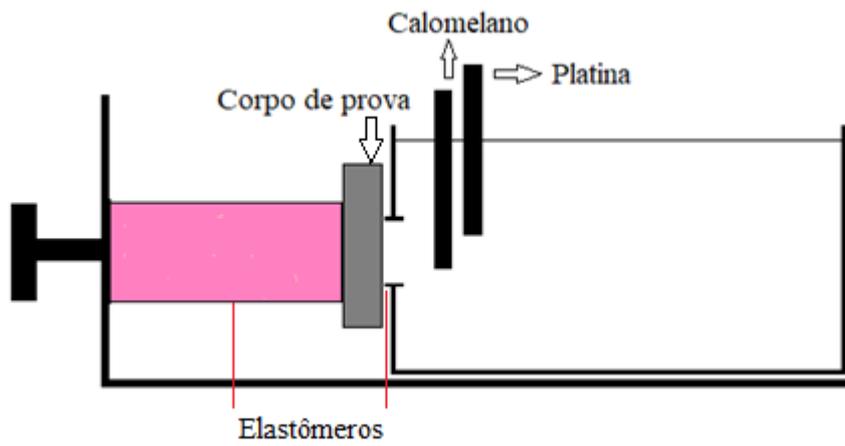


Figura 41: célula de ensaio de polarização

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente capítulo expõe os resultados e as observações referentes aos ensaios de tração, dureza Brinell, impacto charpy, espectrometria, metalografia, assim como os ensaios de corrosão.

5.1 ANÁLISES QUÍMICAS DOS MATERIAIS ESTUDADOS

A análise química das ligas comerciais AA 413 e AA 6351-T6, as quais foram materiais de origem das ligas secundárias. AA liga AA 413 com um teor de silício entorno de 12%, e os demais elementos de ligas inferior a 1% conforme a composição química das ligas *Aluminum Association*, assim como a liga AA 6351-T6 que teve composição de alumínio acima de 97%.

O resultado apresentado após análise química em espectrometria na Tabela 12 demonstra o valor máximo e o mínimo de cinco medidas da distribuição química dos elementos de ligas no alumínio comercial AA 413 e AA 6351 comercial usados na pesquisa.

Tabela 12: Composição química do alumínio comercial AA 413 e AA 6351-T6.

(%) máx/min da composição química no alumínio AA 413 comercial			
Si	Fe	Cu	Mn
13,070 - 12,630	0,598 - 0,548	0,838 - 0,770	0,217 - 0,204
Mg	Cr	Ni	Zn
0,151 - 0,142	0,027 - 0,024	0,025 - 0,023	0,266 - 0,189
Ti	Pb	Sn	V
0,020 - 0,019	0,050 - 0,050	0,050 - 0,050	0,010 - 0,010
Sr	Zr	Cd	Co
0,020 - 0,020	0,004 - 0,003	0,005 - 0,005	0,003 - 0,003
B	Ag	Bi	Ca
0,001 - 0,001	0,014 - 0,013	0,014 - 0,010	0,016 - 0,013
Al			
85,280 - 84,850			
(%) máx/min da composição química no alumínio AA 6351-T6 comercial			
Si	Fe	Cu	Mn
0,984 - 0,957	0,156 - 0,152	0,019 - 0,014	0,775 - 0,773
Mg	Cr	Ni	Zn
0,630 - 0,616	0,005 - 0,004	0,005 - 0,005	0,0049 - 0,0036
Ti	Pb	Sn	V
0,025 - 0,024	0,050 - 0,050	0,050 - 0,050	0,009 - 0,008
Sr	Zr	Cd	Co
0,003 - 0,002	0,004 - 0,003	0,005 - 0,005	0,003 - 0,003
B	Ag	Bi	Ca
0,001 - 0,001	0,001 - 0,001	0,006 - 0,006	0,001 - 0,001
Al			
97,460 - 97,380			

5.1.1 Análises químicas dos alumínios secundários AA 413 e AA 6351-T6 e alumínios primários AA 413 e AA 6351-T6

O resultado apresentado após análise química em espectrometria na Tabela 13 mostra a média de três medidas da distribuição química dos elementos de ligas no alumínio secundários provenientes das ligas AA 413 e AA 6351-T6 utilizadas na pesquisa.

Essas médias da distribuição química dos elementos de ligas dos materiais secundários comparado com sua liga comercial mostra uma relação bastante simétrica, pois revela que mesmo com o baixo rendimento da fusão como se apresenta em capítulo posterior, há uma migração proporcional de todas as ligas para a escoria, que foi evidenciado com o ensaio de espectrometria em todos os corpos de prova em triplicata, totalizando um total de nove medições para cada liga, tendo em vista que todas os resultados apresentaram um desvio padrão de baixa amplitude. As provenientes de cavacos das ligas primárias, mesmo com o baixo rendimento, demonstram que a reciclagem desses materiais vieram a respeitar em suas ligas secundarias as características químicas proveniente das suas ligas comerciais.

Em 2003 Chino⁽⁵⁷⁾ afirma que o silício e o ferro são grandes contaminantes das ligas de alumínio recicladas, pois o ferro em excesso forma corrosão galvânica nas ligas de alumínio, já o silício altera as propriedades mecânicas nas ligas de alumínio.

Os resultados apresentados para as seis ligas estudadas, mostram que essa contaminação pode ser evitada controlando a composição química das ligas usadas em reciclagem, pois se deve escolher a liga para reciclar, isto é, se a liga apresentarem silício e ferro os mesmos vão ser transferidos para as ligas recicladas, como aconteceu na liga AA 413. Já a liga AA 6351 possui um percentual muito baixo de ferro e silício em sua composição, desta forma o material reciclado também apresentou o mesmo percentual dos elementos citados. Deste ponto de vista para uma melhor qualidade na reciclagem deve-se escolher ligas com baixo percentual de elementos contaminantes como o ferro e o silício.

A variação em porcentagem dos elementos químicos (Tabela 13) apresenta a relação entre o total variado na fusão com sua concentração na sua liga de origem, isto considerando que sua proporção na liga primária é 100%, sendo assim, um elemento químico como o silício na liga AA 413 comercial que contem entorno de 12%, esse valor é considerado 100% para o silício nas ligas secundarias de AA 413, outro exemplo é o mesmo silício na liga AA 6351-T6 comercial que apresenta 0,9 % ficando esse valor como 100% para o silício nas ligas secundárias de AA 6351-T6.

Tabela 13: Valores médios dos ensaios de espectrometria das ligas primárias e secundárias.

ELEMENTOS DE LIGA	AA 6351-T6 Comercial	AA 6351-T6 Fundido	AA 6351-T6 Cavacos	AA 413 Comercial	AA 413 Fundido	AA 413 Cavacos
	Quantidade (%)					
CDP	Si			Si		
Média	0,9746	0,9887	1,0183	12,9000	13,6667	12,7667
D.Padrão	0,0104	0,1440	0,1013	0,1640	0,1528	0,1528
variação (%)		1	4		6	-1
CDP	Fe			Fe		
Média	0,1552	0,1463	0,1770	0,5678	0,6623	0,6217
D.Padrão	0,0018	0,0031	0,0226	0,0208	0,0631	0,0240
variação (%)		-6	14		17	9
CDP	Cu			Cu		
Média	0,0159	0,0029	0,0042	0,8016	0,7697	0,8593
D.Padrão	0,0078	0,0003	0,0006	0,0275	0,1103	0,1621
variação (%)		-82	-73		-4	7
CDP	Mn			Mn		
Média	0,7634	0,5890	0,5633	0,2118	0,1663	0,1540
D.Padrão	0,0074	0,0154	0,0040	0,0052	0,0040	0,0046
variação (%)		-23	-26		-21	-27
CDP	Mg			Mg		
Média	0,6240	0,6533	0,5103	0,1472	0,1427	0,0738
D.Padrão	0,0062	0,0385	0,0498	0,0037	0,0058	0,0353
variação (%)		5	-18		-3	-50
CDP	Cr			Cr		
Média	0,0046	0,0042	0,0061	0,0254	0,0227	0,0268
D.Padrão	0,0003	0,0002	0,0015	0,0011	0,0011	0,0069
variação (%)		-8	33		-11	6
CDP	Ni			Ni		
Média	0,0050	0,0003	0,0041	0,0246	0,0247	0,0362
D.Padrão	0,0000	0,0000	0,0052	0,0009	0,0016	0,0201
variação (%)		-94	-17		0	47
CDP	Zn			Zn		
Média	0,0039	0,0151	0,0122	0,2156	0,3597	0,3507
D.Padrão	0,0002	0,0005	0,0018	0,0318	0,0134	0,0146
variação (%)		284	210		67	63
CDP	Ti			Ti		
Média	0,0248	0,0295	0,0263	0,0198	0,0203	0,0238
D.Padrão	0,0004	0,0039	0,0032	0,0004	0,0007	0,0060
variação (%)		19	6		3	20
CDP	Pb			Pb		
Média	0,0500	0,0008	0,0061	0,0500	0,0344	0,0478
D.Padrão	0,0000	0,0003	0,0071	0,0000	0,0023	0,0253
variação (%)		-98	-88		-31	-4

CDP	Sn			Sn		
Média	0,0050	0,0033	0,0029	0,0050	0,0117	0,0132
D.Padrão	0,0000	0,0000	0,0010	0,0000	0,0007	0,0029
variação (%)		-34	-41		134	164
CDP	V			V		
Média	0,0087	0,0110	0,0109	0,0100	0,0083	0,0096
D.Padrão	0,0001	0,0009	0,0002	0,0000	0,0004	0,0030
variação (%)		27	26		-17	-4
CDP	Sr			Sr		
Média	0,0027	0,0001	0,0001	0,0020	0,0001	0,0001
D.Padrão	0,0002	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001
variação (%)		-96	-96		-95	-93
CDP	Zr			Zr		
Média	0,0033	0,0031	0,0035	0,0032	0,0001	0,0031
D.Padrão	0,0003	0,0004	0,0005	0,0003	0,0000	0,0024
variação (%)		-5	8		-97	-4
CDP	Cd			Cd		
Média	0,0050	0,0013	0,0007	0,0050	0,0012	0,0011
D.Padrão	0,0000	0,0001	0,0002	0,0000	0,0004	0,0006
variação (%)		-74	-85		-77	-78
CDP	Co			Co		
Média	0,0030	0,0010	0,0010	0,0030	0,0018	0,0027
D.Padrão	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0003	0,0003
variação (%)		-67	-67		-40	-10
CDP	B			B		
Média	0,0010	0,0047	0,0043	0,0010	0,0025	0,0072
D.Padrão	0,0000	0,0004	0,0014	0,0000	0,0004	0,0075
variação (%)		370	333		153	617
CDP	Ag			Ag		
Média	0,0010	0,0014	0,0006	0,0134	0,0112	0,0109
D.Padrão	0,0000	0,0022	0,0003	0,0005	0,0006	0,0004
variação (%)		43	-37		-17	-19
CDP	Bi			Bi		
Média	0,0060	0,0015	0,0030	0,0132	0,0086	0,0145
D.Padrão	0,0000	0,0000	0,0025	0,0018	0,0006	0,0114
variação (%)		-75	-51		-35	10
CDP	Ca			Ca		
Média	0,0010	0,0016	0,0025	0,0144	0,0094	0,0112
D.Padrão	0,0000	0,0006	0,0019	0,0011	0,0016	0,0078
variação (%)		60	150		-35	-22
CDP	Al			Al		
Média	97,4140	97,4667	97,5667	85,0040	84,1333	84,8667
D.Padrão	0,0288	0,2082	0,1528	0,1656	0,2517	0,3055
variação (%)		0	0		-1	0

5.2 RESULTADO DO RENDIMENTO DAS FUSÕES DE ALUMÍNIO SECUNDÁRIO

O rendimento apresentado após pesagem antes e depois da fusão das ligas AA 413 e AA 6351-T6 comerciais e os cavacos em forma de briquetes dessas mesmas ligas, apresentam um rendimento muito baixo dos cavacos, tanto da liga AA 6351-T6 como dos cavacos da liga AA 413.

Isso pode ter acontecido devido a uma camada muito espessa de escórias que se formam nos materiais provenientes de cavacos, funcionando como uma verdadeira esponja, a qual durante a fusão dos cavacos uma boa parte do alumínio líquido fica dentro dessa camada de escórias. Esse alumínio que no momento do banho se encontra absorvido por essa camada de escória, que foi migrado para o banho apenas no momento da retirada dessa escórias com a aplicação de pressão dos instrumentos que retiram a escória.

Após verificar visualmente dentro do forno com o auxílio de ferramentas de aço em forma de concha, aplicou-se uma pressão contra as paredes do cadinho, fazendo com que a escória sofresse uma redução de volume e com isso aconteceu uma migração do alumínio líquido das capilaridades da escória para o banho, após retirou-se a escória já prensada deixando apenas o alumínio líquido para o vazamento. Segundo Gronostajski⁽⁵⁸⁾ esse material perdido na fusão de cavacos de alumínio pode chegar a 95% e se haver uma redução do volume pode chegar próximo a reciclar 55%. A eficácia da retirada do metal líquido da escória com instrumento manual, como foi realizado no processo desse trabalho, mostrou-se relativamente baixa, já que boa parte do material é perdido em forma de escórias..

Nas ligas AA 6351 e AA 413 fundidas inicialmente levou-se ao forno massas de 1500 g e 2350 g respectivamente, após a fusão mediu-se as massas de 1480 g para a primeira e 2300g para a segunda, já nas ligas de cavacos, inicialmente registrou-se a massa de 5121 g para cavacos de AA 413 e 5011g para cavacos de AA 6351, no término das fusões registrou-se as massas de 1898 g e 2247 g respectivamente.

A Figura 42 representa mais nitidamente essa relação de perda de massa após a fusão, mostrando o rendimento em porcentagem das diferentes ligas secundarias, onde pode se observar um rendimento a cima de 97 % para as ligas de material maciço e rendimentos inferiores a 45 % para as ligas de Cavacos.

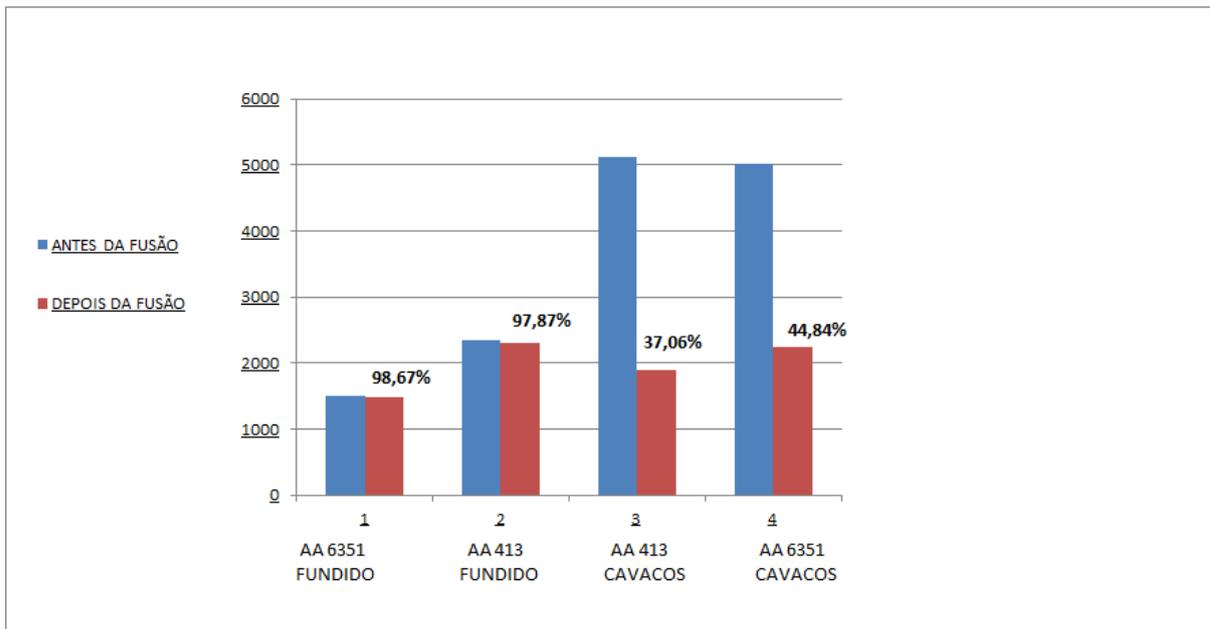


Figura 42: Perda de massa em gramas após a fusão das ligas secundarias.

5.3 CONTROLE DA TEMPERATURA DA COQUILHA ANTES DO VAZAMENTO E NO TÉRMINO NO DESMOLDAR

O controle da temperatura da coquilha ao executar os vazamentos das ligas secundaria de alumínio, foi realizado com termopar e termômetro digital conforme representado no capitulo 4.2.2 desse trabalho. Esse controle apresentou uma regularidade muito próxima das temperaturas ambientes, o que podemos verificar Tabela 14.

Tabela 14: Temperatura inicial e posterior ao vazamento da coquilha usada como molde para fundição das ligas secundária (°C).

Fusão (°C)	AA 6351 Fundido INICIAL L	AA 6351 Fundido FINAL	AA 6351 Cavacos INICIAL	AA 6351 Cavacos FINAL	AA 413 Fundido INICIAL	AA 413 Fundido FINAL	AA 413 Cavacos INICIAL	AA 413 Cavacos FINAL
1	18,9	83	26,6	28,1	19,6	27,1	19,8	22,4
2	29,3	88,5	27	34,5	25,3	30,4	22,1	23,3
3	28,9	81,5	26,9	32	22,5	46,1	24,4	42,3
4	28,8	82,9	26,2	40	24,4	39,2	26,9	50
5	28,1	56,7	25,4	34,6	Vazamento incompleto	Vazamento incompleto	33,2	44,9
6			28,2	38,2	14,7	35,9	25,9	55,7
7			27,3	38,8	21,8	35,2	29,8	45,5
8			26,4	31,5	24,2	37,5	28	49,6
9			65,9	68,3	22	47,6	27,1	43,5
10					19,9	51	27,4	45,6
11							44,4	59,7
MÉDIA	26,80	78,52	31,10	38,44	21,60	38,89	28,09	43,86
DESV. PADRÃO	4,44	12,49	13,07	11,84	3,24	7,99	6,49	11,64

A Figura 43 mostra a microestrutura dos materiais comerciais antes da fusão para simular os processos de reciclagem.

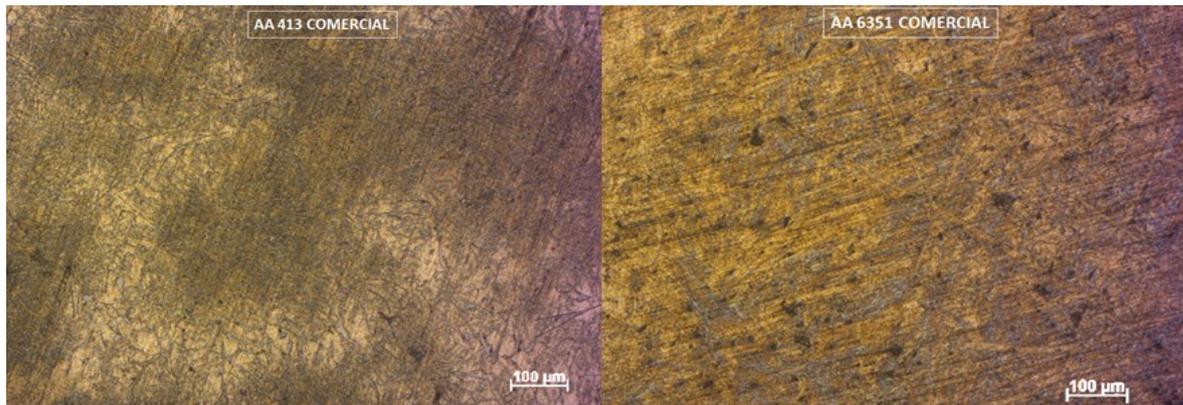


Figura 43: Metalografia das ligas primárias.

A intenção de controlar a temperatura da coquilha foi buscar equiparar as condições de vazamento para todas as ligas, com isso buscar uma morfologia semelhante entre as ligas de composição química iguais, o que pode se verificar na Figura 44 foi alcançado, se pegar as ligas AA 6351 fundido e cavacos de AA 6351 nota-se que há uma semelhança no tamanho de grão.

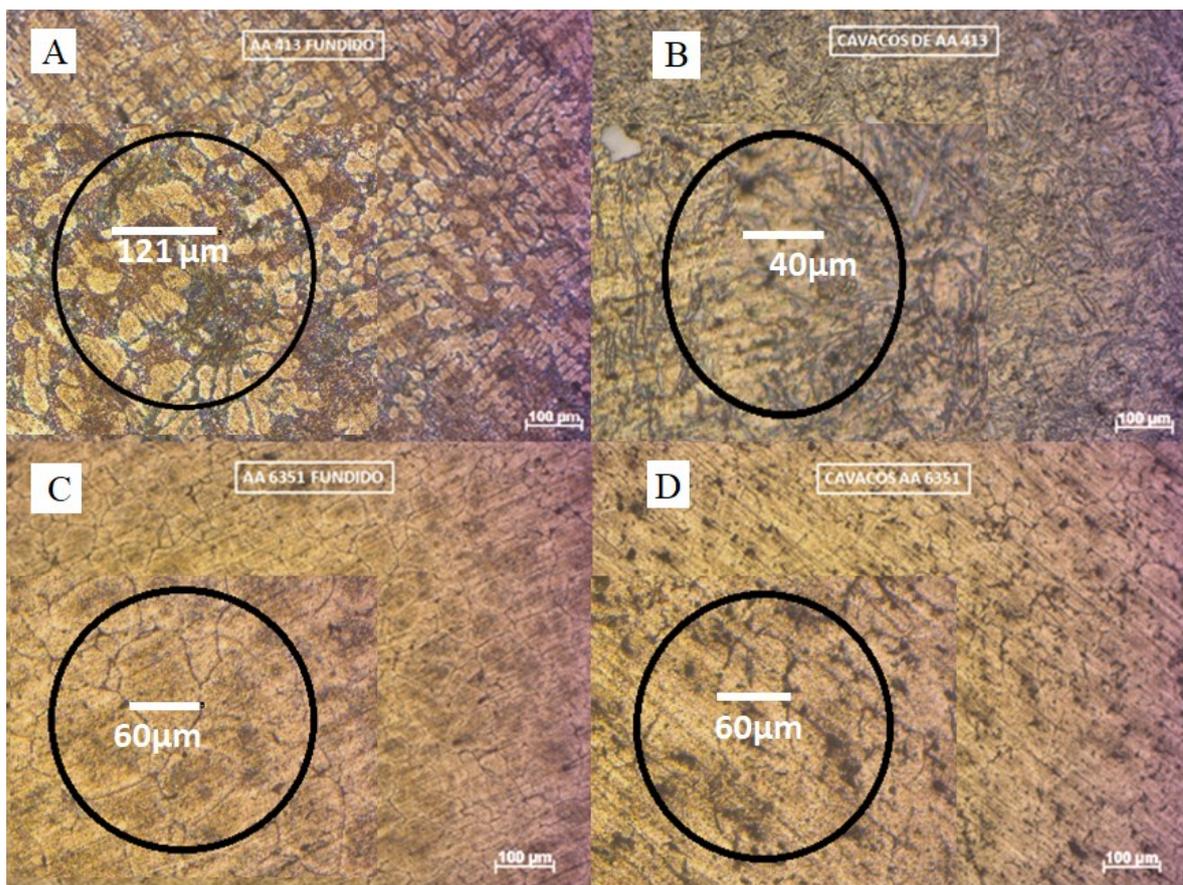


Figura 44: Metalografia das ligas secundárias.

A Figura 44 (A) da liga secundária de AA 413 fundido a partir de material maciço apresenta uma formação de dendritas na faixa de 121 μm semelhantes a liga primária, já a liga de cavacos de AA 413 Figura 44 (B), apresenta dendritas menores com valores entorno de 40 μm . A Figura 44 (A) de AA 6351-T6 fundido a partir de material maciço e a Figura 44 (B) de cavacos de AA 6351-T6 fundidos apresentara tamanho de grão próximos a 60 μm .

5.4 RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS DE TRAÇÃO DAS LIGAS SECUNDÁRIAS E LIGAS PRIMÁRIAS

Os ensaios de tração das ligas de alumínio apresenta uma síntese de varias características mecânicas apresentadas pelos materiais estudados nesse trabalho, trazendo para a pesquisa uma relação direta das ligas em particular com as demais estudadas.

Nesse capítulo apresenta-se em um primeiro momento a relação das ligas comerciais com as ligas secundarias, já num segundo momento buscou-se uma relação entre as ligas de diferente origem comercial, comparando-se os processos de semelhanças equivalentes, isto é, comparando ligas fundidas AA 413 com ligas fundidas AA 6351-T6 e cavacos fundidos AA 413 com cavacos fundido AA 6351-T6.

5.4.1 Resultados dos ensaios mecânicos de tração das ligas primária e secundárias da liga AA 413

Na Figura 45 mostra os resultados representativos das ligas AA 413 comercial, AA 413 fundido e cavacos de AA 413 fundidos.

A liga AA 413 fundida apresentou uma resistência mecânica maior, 9,8% em relação a AA 413 comercial, o que pode ser explicado por a liga AA 413 comercial ser fundida em lingotes maiores, e a liga AA 413 fundida ser em coquilha o que torna o processo de nucleação mais rápido favorecendo a uma formação de grãos menores, conforme mostram a Figura 43 e a Figura 44.

A liga de cavacos de AA 413 apresentou desempenho em 15,25 % menor do que a liga AA 413 fundida, isso porque apresenta uma morfologia com maiores porosidades e por ser mais heterogênia, conforme apresentado na Figura 44.

Mello⁽⁵⁹⁾ constata para uma liga SAE 305 fundida uma Tensão de escoamento de 140MPa e 290 MPa de tensão máxima, FALAVIGNA⁽⁶⁰⁾ em 2014 apresenta uma tensão máxima de 230 MPa o que foi superior aos valores encontrados nessa pesquisa mas mostra a heterogeneidade dessa liga.

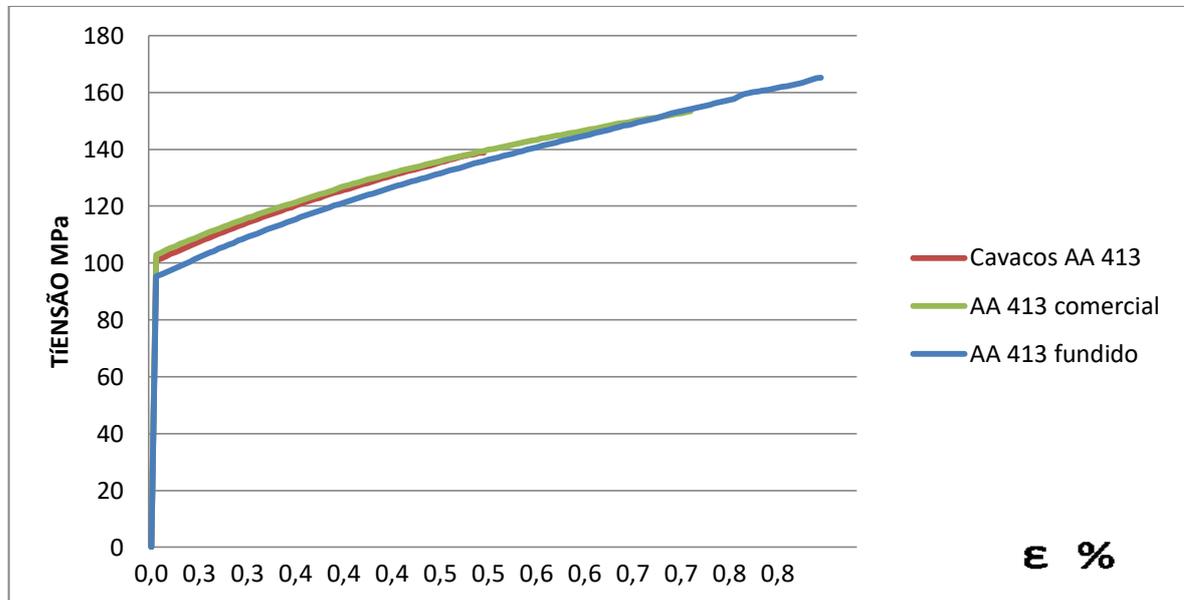


Figura 45: Resultados do ensaio de tração das ligas AA 413 primária e secundárias.

5.4.2 Resultados dos ensaios mecânicos de tração das ligas primária e secundárias da liga AA 6351-T6

Na Figura 46 estão representados os resultados intermediários das ligas AA 6351 comercial, AA 6351 fundido e cavacos AA 6351 fundidos.

A liga AA 6351 comercial por ser um alumínio conformado e tratado termicamente (T6), sua resistência mecânica é 67,70% maior que a liga AA 6351 fundida e 81,89% maior que a liga de cavacos de AA 6351.

Tonoli⁽⁶¹⁾ estudando fadiga na liga AA 6351-T6 apresentou uma resistência mecânica média de 325,7 MPa e um alongamento de 15,9 %, valores que mostraram afinidade com os encontrados nesse trabalho.

A perda de resistência mecânica das ligas AA 6351-T6 fundida e cavacos de AA 6351-T6 pode se considerar normal pelo fato que no momento da fusão a liga AA 6351-T6 comercial perde seu tratamento térmico e muda sua microestrutura conforme mostram a Figura 43 e a Figura 44.

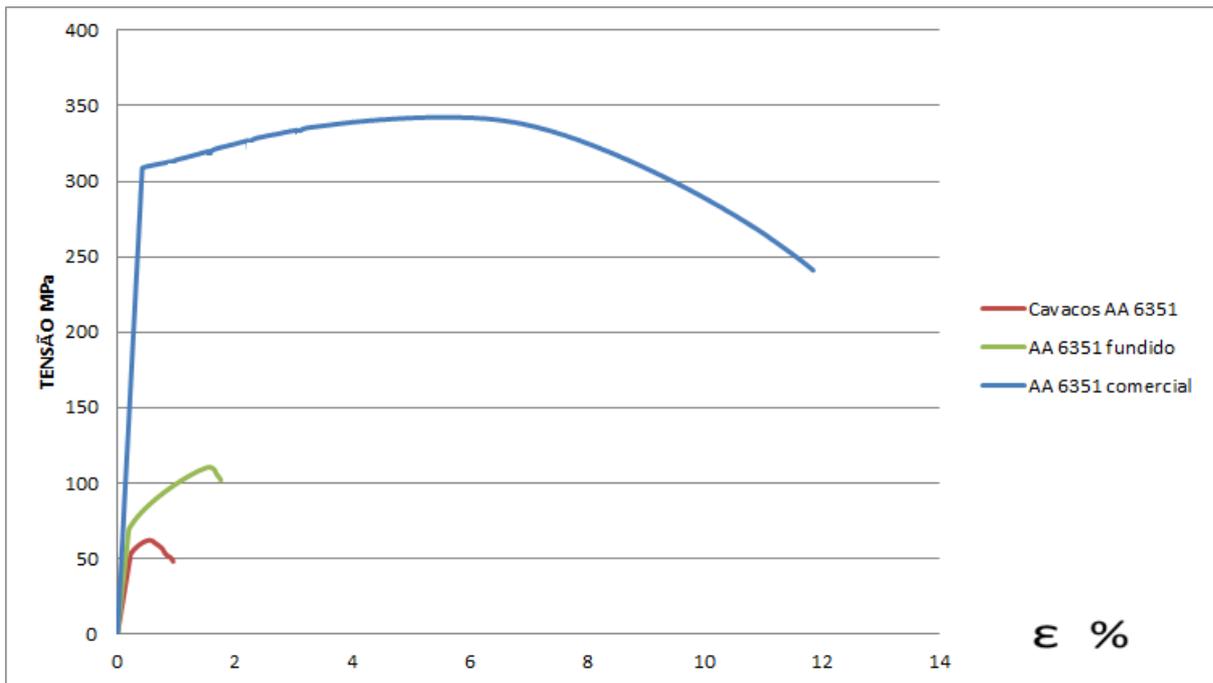


Figura 46: Resultados do ensaio de tração das ligas AA 6351-T6 primária e secundárias.

5.4.3 Comparativos entre as ligas AA 413 e AA 6351-T6 de processos equivalentes

Nos ensaios de tração, a liga AA 413 que emprega normalmente o processo de fundição como método de fabricação, apresenta resultados mais próximos entre o fundido a partir de cavacos e o fundido a partir de material maciço que a liga trabalhada AA 6351-T6, quando no estado fundido.

A liga AA 6351-T6 fabricada habitualmente através de processo de conformação mecânica apresenta resultados inferiores, quando fundida, em relação a resistência a tração da liga fundida a partir de cavacos.

Pode-se dizer que, em relação à resistência a tração, a liga AA 413 que, emprega normalmente o processo de fundição como método de fabricação, apresenta resultados mais próximos entre o fundido a partir de cavacos e o fundido a partir de material maciço que a liga trabalhada AA 6351-T6, quando no estado fundido.

As ligas de cavacos AA 413 fundidos foram superior em 55,36% aos cavacos AA 6351-T6 fundidos, onde a liga de cavacos AA 413 fundidos apresentaram um alongamento 40,78% inferior do que a liga de cavacos AA 6351-T6 fundido, o que confirma a tendência das ligas provenientes de AA 6351-T6 ter uma maior deformação e uma menor resistência a tração do que as ligas provenientes de AA 413.

Essa relação não se confirma entre as ligas comerciais, onde a Liga AA 6351-T6 comercial tem resultados maiores em todos os aspectos por ser fabricada por conformação e sofrer tratamento térmico T6.

Já a liga fabricada habitualmente através de processo de conformação mecânica apresenta resultados inferiores, quando fundida, em relação a resistência a tração da liga fundida a partir de cavacos como mostra a Figura 47.

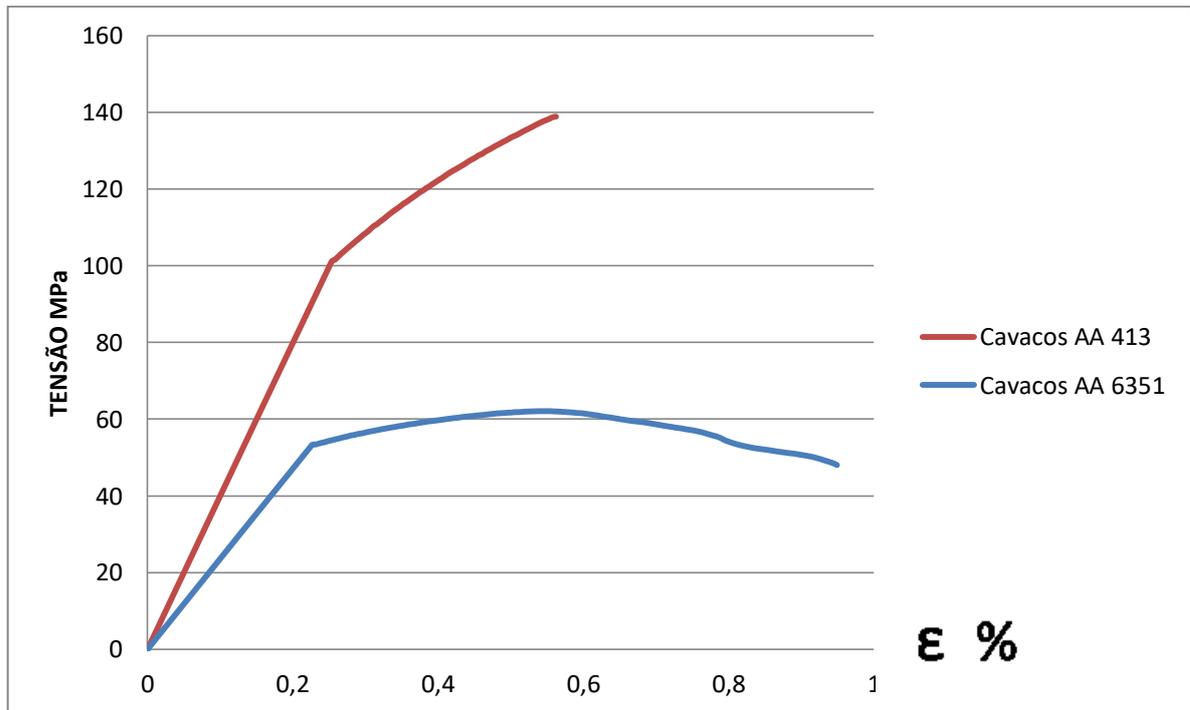


Figura 47: Resultado da tração nas ligas de cavacos AA 413 e cavacos AA 6351.

A Figura 48 apresenta todos os valores que serão representativos para as ligas em estudo para comparações nesse trabalho. A liga AA413 comercial será representado pelo CDP3, a liga AA413 fundida pelo CDP1, a liga de cavacos de AA 413 fundidos pelo CDP3, a liga AA 6351-T6 comercial pelo CDP3, a liga AA 6351 fundido pelo CDP2 e os cavacos da liga AA 6351-T6 fundidos pelo CDP2. Os mesmos respeitaram o critério de escolha da tensão máxima de tração, pegando o valor intermediário das triplicatas realizadas.

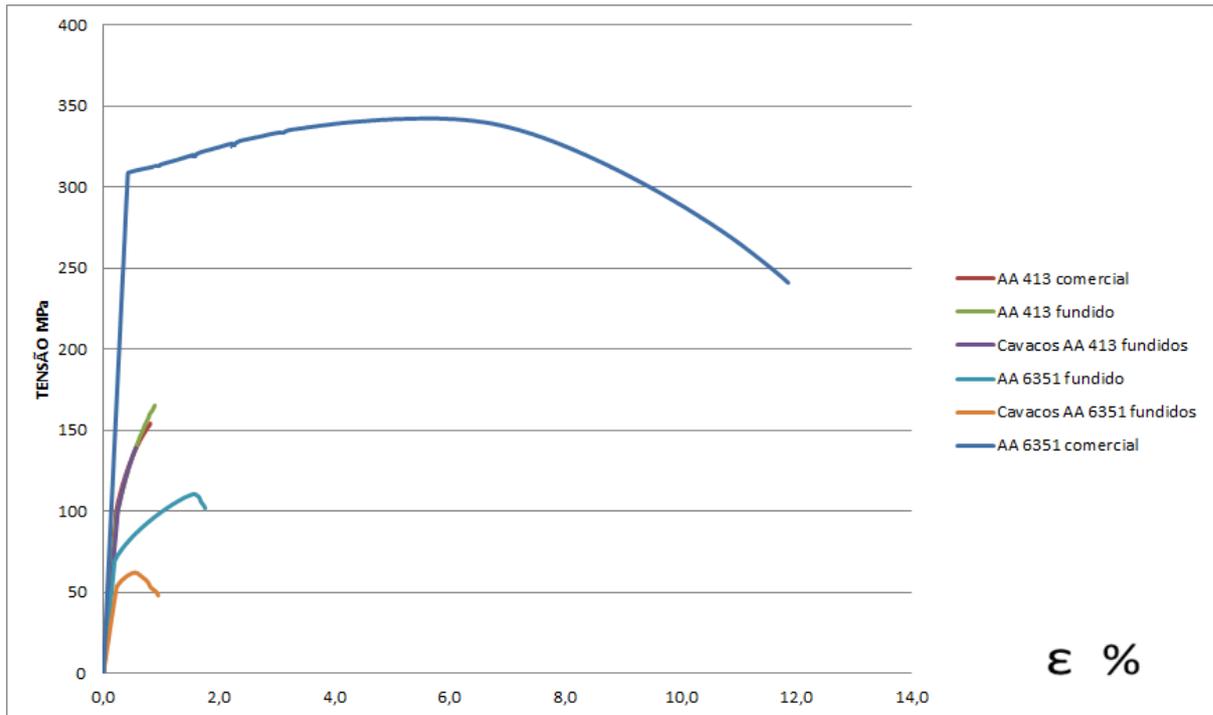


Figura 48: Corpo de prova representativo das ligas primárias e secundárias.

Conforme já foi apresentado em capítulos anteriores, a liga comercial de alumínio AA 413 é um material comercializado em lingotes com aplicação direta nas fundições, esse material foi submetido à tração em três corpos de prova, assim como as ligas secundárias de alumínio AA 413 fundido e cavacos de AA 413 fundidos apresentaram resultados bem próximos a liga comercial no que se refere a resistência à tração e deformação.

As liga AA 6351-T6 comercial apresenta características bem diferentes das demais, por se tratar de ser a única proveniente de um processo de conformação mecânica, e por ter sofrido tratamento térmico T6 apresenta resistência à tração bem mais elevada que as demais estudadas nesse trabalho, as ligas secundárias de alumínio AA 6351-T6 fundido e cavacos de AA 6351 fundido, apresentaram pequenas diferenças nos resultados dos ensaios de tração, onde a liga de cavaco de AA 6351-T6 fundido obteve menores tensões e deformações do que a liga de AA 6351-T6 fundido. Já esses valores das ligas secundárias de AA 6351-T6 quando comparadas a liga AA 6351-T6 primária apresentam valores significativos bem inferiores, por a liga comercial ser proveniente de um processo de conformação com tratamento térmico.

A Tabela 15 apresenta os valores da média e desvio padrão das tensões de escoamento, tensões máximas e deformações.

Tabela 15: Resultado do ensaio de tração na liga AA 413 comercial.

Média / D. Padrão	Tensão escoamento (MPa)	Tensão máxima (MPa)	Deformação (%)
Liga AA 413 Comercial			
MÉDIA	100,2	150,7	0,8
D.PADRÃO	3	13,3	0,2
Liga AA 413 Fundido			
MÉDIA	95,6	173,7	1,1
D.PADRÃO	4,3	22,9	0,3
Cavacos da liga AA 413 Fundidos			
MÉDIA	101,8	152,4	0,7
D.PADRÃO	6,8	25	0,3
Liga AA 6351-T6 Comercial			
MÉDIA	307,3	340,8	12,8
D.PADRÃO	3	4,2	0,8
Liga AA 6351-T6 Fundidos			
MÉDIA	73,6	113,5	1,5
D.PADRÃO	3,7	8,6	0,4
Cavacos da liga AA 6351-T6 Fundidos			
MÉDIA	56,5	64,3	0,7
D.PADRÃO	5,4	10,6	0,3

5.5 RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS DE DUREZA BRINELL DAS LIGAS PRIMÁRIAS E SECUNDÁRIAS

Os ensaios de dureza das ligas de alumínio demonstram variações consideráveis de dureza entre as seis ligas estudadas, por outro lado mostra uniformidade nas ligas em particular, ou seja, todos os corpos de prova de cada liga apresentaram valores semelhantes entre eles.

Conforme a norma ASTM E10-01⁽⁵¹⁾ em cada corpo de prova deve ser feito três medidas de dureza Brinell, a média dessas três medições será a medida de dureza Brinell no corpo de prova. Assim partindo dessa premissa verifica-se na Tabela 16 as durezas Brinell das seis ligas estudadas.

Os ensaios de dureza na liga AA 6351 comercial foi o que apresentou os maiores valores de dureza Brinell entre as seis ligas estudadas nesse trabalho, esse resultado é explicado pelo fato da liga AA 6351 comercial sofrer tratamento térmico.

Os resultados de dureza Brinell nas ligas secundárias de AA 6351 mostraram valores bem inferiores 44,45% em relação a liga AA 6351 comercial, e 52,38% em relação a liga de cavacos AA 6351 o que é perfeitamente explicável por se tratarem de materiais de fabricação diferentes, já que a liga AA 6351 comercial é fabricada por processo de conformação e sofrem tratamento térmico, e as ligas secundárias são fabricadas por fundição em coquilha sem tratamento térmico.

As ligas derivadas do AA 413 comercial, apresentaram uma dureza Brinell mais próxima da liga AA 6351 comercial, sendo todas inferiores em 30,76% para AA 413 comercial, 21,27% para AA 413 fundida e 17,81% para cavacos de AA 413. Essa superioridade das ligas derivadas do AA 413 é explicada por Cunha⁽⁶²⁾ em 2012 que conclui que a dureza dos materiais é afetada significativamente pelas variações de silício nas concentrações estudadas, quanto maior o teor de silício, maior a dureza dos materiais. aumenta a dureza Brinell o que vai de encontro aos resultados do presente trabalho o que pode ser conferido na Tabela 16 e na Figura 49..

Tabela 16: Dureza Brinell e desvio padrão das ligas AA 413 e AA 6351 primárias e secundárias.

AA 413 comercial				AA 413 fundido			Cavacos AA 413		
CDP	CDP1	CDP2	CDP3	CDP1	CDP2	CDP3	CDP1	CDP2	CDP3
Média	70	75	73	84	82	82	89	87	83
1º medida	70	74	74	82	95	76	88	89	81
2º medida	71	75	73	76	76	78	89	83	85
3º medida	70	76	73	95	76	93	91	88	82
AA 6351 comercial				AA 6351 fundido			Cavacos AA 6351		
CDP	CDP1	CDP2	CDP3	CDP1	CDP2	CDP3	CDP1	CDP2	CDP3
Média	106	105	104	60	57	58	49	51	50
1º medida	106	104	105	61	55	60	51	51	48
2º medida	105	106	105	59	57	58	49	48	51
3º medida	108	105	103	59	59	57	46	54	50
RESULTADO MÉDIO DAS DUREZAS									
Liga	Fusão/Comercial	CDP1	CDP2	CDP3	Média	Desvio padrão			
6351	Comercial	106	105	104	105	1			
	Fundido	60	57	58	58	1,5			
	Cavaco	49	51	50	50	1			
413	Comercial	70	75	73	73	2,5			
	Fundido	84	82	82	83	1,2			
	Cavaco	89	87	83	86	3,1			

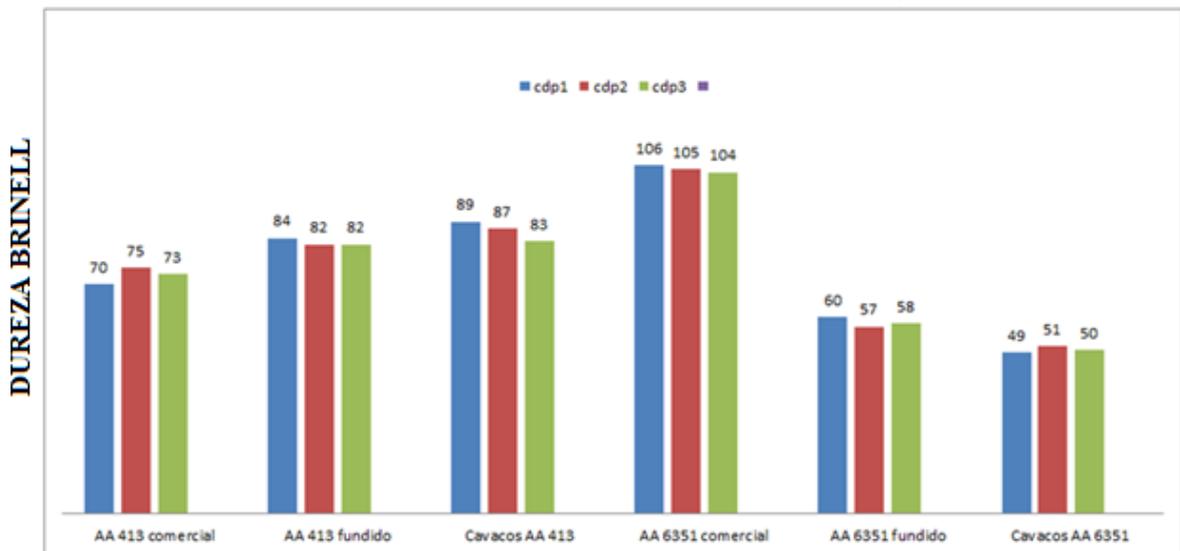


Figura 49: Resultado das durezas Brinell nas ligas primária e secundária de AA 413 e AA 6351

Durante a realização do presente estudo houve uma dúvida em relação às ligas derivadas de AA 6351, por esta sofrer tratamento térmico T6 poderia haver após a fundição um tratamento natural T4 durante um período de tempo prolongado. O que não se confirmou quando após 12 meses foram feitos novos ensaios de dureza, visto que qualquer variação ficou menor que o desvio padrão dos ensaios realizados, conforme pode ser verificado na Tabela 17.

Tabela 17: Revisão da dureza Brinell após 12 meses nas ligas primárias e secundárias de AA 6351.

AA 6351 comercial				AA 6351 fundido			Cavacos AA 6351		
CDP	CDP1	CDP2	CDP3	CDP1	CDP2	CDP3	CDP1	CDP2	CDP3
Média	107	107	106	60	58	60	53	55	52
1º medida	106	103	106	60	59	59	52	53	52
2º medida	107	111	106	59	56	61	53	56	52
D. Padrão	1	6	0	1	2	1	1	2	0

5.6 RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS DE IMPACTO DAS LIGAS PRIMÁRIAS E SECUNDÁRIAS

Os resultados dos ensaios de impacto Charpy das ligas de alumínio fundidas, tanto as em coquilha como em lingotes como o caso da liga AA 413 comercial nos apresenta uma tendência à fragilidade ao impacto, pois com exceção da liga AA 6351-T6 que é fabricada por

processo diferente das demais, essas obtiveram resistência inferiores a 5 joules ao impacto, como podemos observar na Tabela 18.

Tabela 18: Energia de impacto dos ensaios Charpy em joule.

Liga	Tipo de Fusão	CDP1	CDP2	CDP3	Média	Des. Padrão
AA 6351	Comercial	35,3	43,6	33,8	37,6	5,3
	Fundido	4,2	4,1	4,8	4,4	0,4
	Cavacos	4,7	4,3	4,1	4,4	0,3
AA 413	Comercial	0,8	1,1	0,9	0,9	0,1
	Fundido	1,6	1,2	1,2	1,3	0,2
	Cavacos	0,9	1,1	1,1	1,0	0,1

Analisando os valores da Tabela 18 e organizando os valores de maneira que mostre uma sequência de maior a menor, mas respeitando a natureza do processo de fabricação, pode-se notar na Figura 50 uma perda de resistência ao impacto a partir da liga AA 6351 comercial, aparecendo as ligas secundárias de AA 6351 com uma pequena superioridade em relação as primárias e secundárias de AA 413, a qual não apresentou variações consideráveis entre elas.

Também se pode relacionar com a dureza das ligas estudadas, onde ainda na década de 70 Ferraresi⁽⁶³⁾ já descrevia a tenacidade como inversa a dureza, o que mostra coerência nos resultados, pois as ligas secundárias de AA 6351 apresentaram maior eficiência em relação a resistência ao impacto em relação as secundárias de AA 413, já os resultados dos ensaios de dureza mostraram resposta inversa, com durezas maiores das ligas secundárias de AA 413.

O melhor desempenho das ligas secundárias de AA 6351 em relação ao impacto, pode ser explicado através das morfologias, visto que as ligas derivadas de AA 413 apresentam morfologias com geometria na forma mais elipsoidal o que indicam maior fragilidade do que a morfologia derivada de AA 6351-T6 conforme pode ser visto na Figura 44.

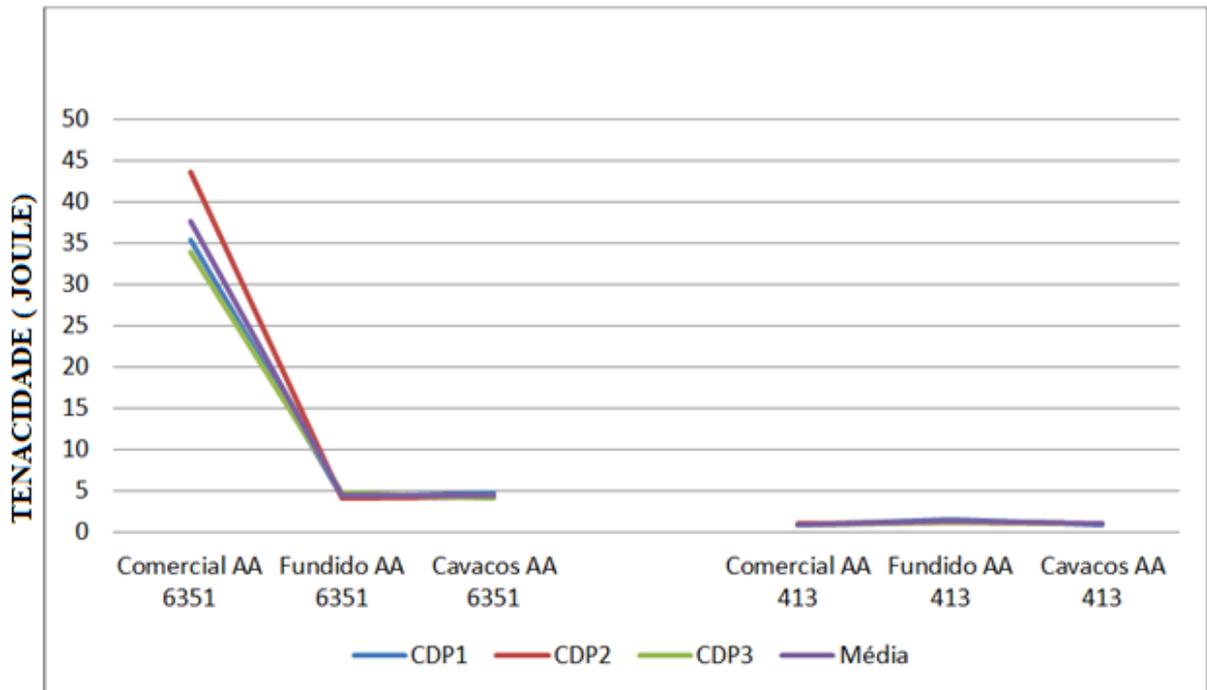


Figura 50: Resultado dos ensaios Charpy (joule) nas ligas primária e secundária de AA 413 e AA 6351.

5.7 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CORROSÃO POR VARIAÇÃO DE MASSA NAS LIGAS DE ALUMÍNIO PRIMÁRIAS E SECUNDÁRIAS DAS LIGAS AA 413 E AA 6351-T6

Os resultados dos ensaios de corrosão por variação de massa em NaCl 3,5% nas ligas de alumínio fundidos em coquilha, como em lingotes como o caso da liga AA 413 comercial ou a liga comercial AA 6351-T6 apresenta a formação de um produto de corrosão bastante aderente, que através de reações químicas no tempo de trinta dias que as ligas permaneceram em imersão, apresentaram um aumento da massa de todos os corpos de provas sem exceção, o que segundo Codaro⁽⁶⁴⁾ 2006 também observou esse comportamento quanto à imersão submetendo duas ligas de alumínio de AL 2024 e AL 7050 em NaCl 5%, durante 6 meses apresentando um aumento de massa das ligas para cada período de imersão sendo levemente maior na liga 2024.

5.7.1 Monitoramento de corrosão por variação de massa na liga de alumínio primária AA 6351-T6

O monitoramento diário dos testes de variação de massa em NaCl 3,5 % realizados antes da imersão dos corpos de prova padronizados estão dispostos nas Tabela 19 e Tabela 20, as quais mostram que nos dois testes onde houve um ganho de massa diariamente durante o tempo de estudo.

Tabela 19: Monitoramento da variação da massa de corrosão da liga AA 6351-T6 (1° Monitoramento).

Tabela Corpo de prova 1° Monitoramento	
Dia	Peso (g)
Dia da imersão	8,7549g
1° Dia de pesagem	8,7575g
2° Dia de pesagem	8,7586g
3° Dia de pesagem	8,7604g
8° Dia de pesagem	8,7595g
9° Dia de pesagem	8,7610g

Tabela 20: Monitoramento da variação da massa de corrosão da liga AA 6351-T6 (2° Monitoramento)

Tabela Corpo de prova na 2ª solução	
Dia	Peso (g)
Dia da imersão	8,7082g
1° Dia de pesagem	8,7095g
2° Dia de pesagem	8,7121g
3° Dia de pesagem	8,7117g
4° Dia de pesagem	8,7124g
5° Dia de pesagem	8,7134g
6° Dia de pesagem	8,7146g
7° Dia de pesagem	8,7138g
8° Dia de pesagem	8,7134g
9° Dia de pesagem	8,7127g
10° Dia de pesagem	8,7124g
11° Dia de pesagem	8,7121g
12° Dia de pesagem	8,7147g

5.7.2 Resultados dos ensaios de corrosão por variação de massa nas ligas de alumínio primárias e secundárias de AA 413 e AA 6351-T6

Para obter um resultado confiável os corpos de provas foram medidos com o uso da balança com resolução de 0,0001 gramas, no período de imersão de 30 dias. A Tabela 21 apresenta a variação da massa nos corpos de provas das ligas primárias e secundárias de AA 413 e AA 6351-T6.

Tabela 21: Variação da massa de corrosão em gramas das ligas primarias e secundarias.

VARIACÃO DE MASSA (g)						
Liga	Tipo de Fusão	CDP1	CDP2	CDP3	Média	Desvio padrão
AA 6351	Comercial	0,0119	0,0102	0,0078	0,0099	0,0021
	Fundido	0,0239	0,0224	0,0199	0,0221	0,0020
	Cavaco	0,0196	0,0181	0,0134	0,0170	0,0032
AA 413	Comercial	0,0366	0,0347	0,032	0,0344	0,0023
	Fundido	0,0248	0,0236	0,021	0,0231	0,0019
	Cavaco	0,0187	0,0177	0,0152	0,0172	0,0018

5.7.3 Aspectos dos corpos de prova do ensaio de corrosão por imersão das ligas AA 413, AA 6351-T6, primárias e secundárias

Após trinta dias em imersão em NaCl 3,5% , as amostras foram retiradas da solução e fotografadas no momento da retirada, logo após foram limpas conforme a norma da ASTM e fotografadas novamente. Num segundo momento foram pesadas para verificar a variação de massa, logo após a realização da pesagem e das macroimagens foi realizado microimagens em microscópio com o aumento de 50 vezes.

Na Figuras 51 pode-se verificar a liga AA 413 comercial antes da limpeza (imagem a esquerda) e após a limpeza (imagem a direita). A Figura 52 apresenta a microimagem da liga AA 413 comercial destacando uma corrosão generalizada.

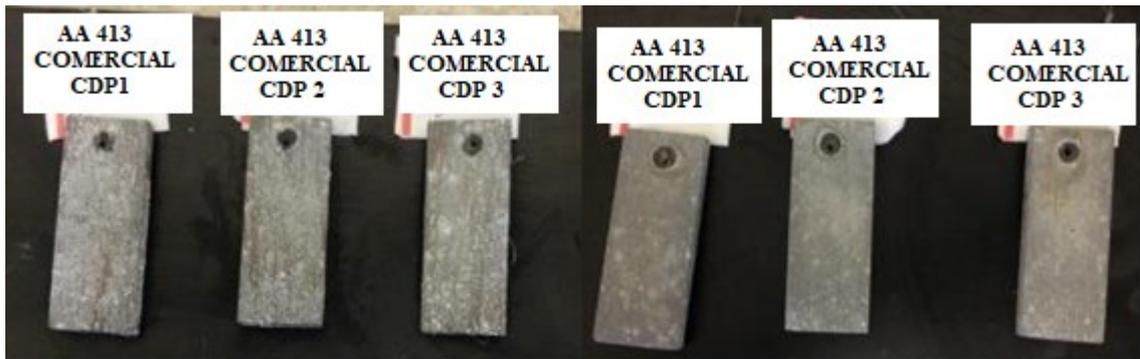


Figura 51: Corpos de prova da liga AA 413 comercial antes e após a limpeza.

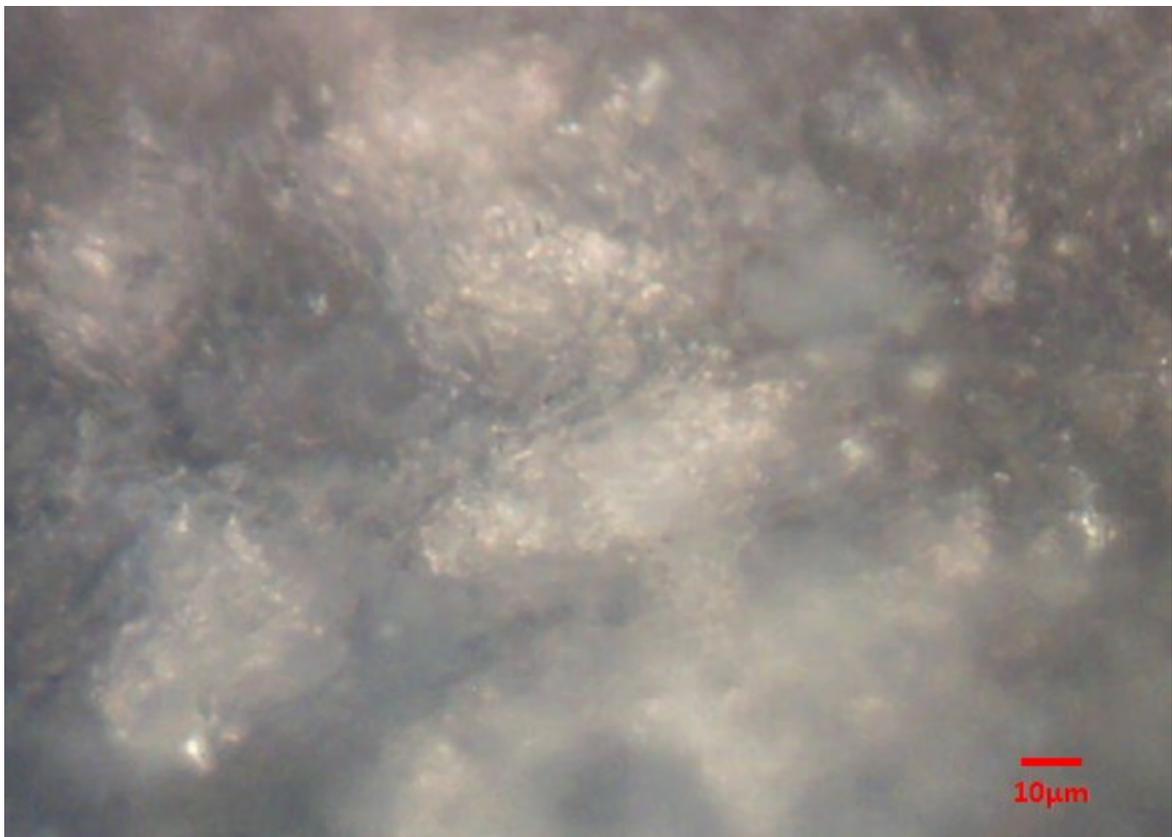


Figura 52: Corpos de prova dois da liga AA 413 comercial após imersão.

Nas Figuras 53 pode-se verificar a liga AA 413 fundido antes da limpeza (imagem a esquerda) e após a limpeza (imagem a direita). A Figura 54 apresenta a microimagem da liga AA 413 fundido destacando uma corrosão generalizada.

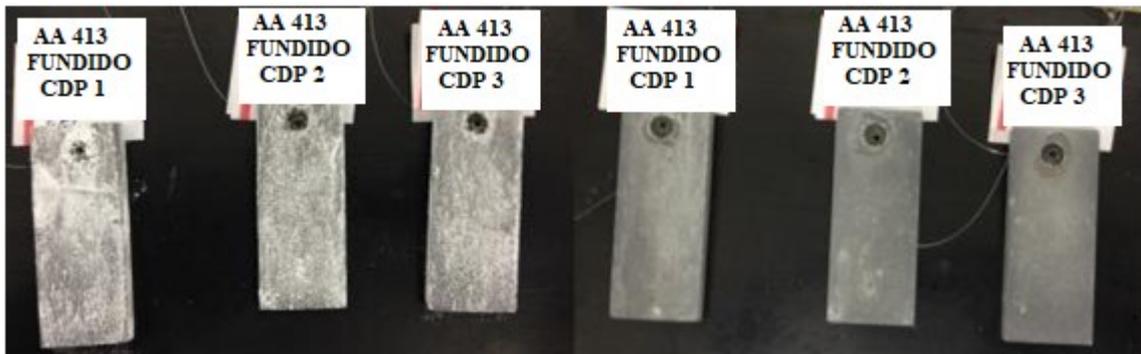


Figura 53: Corpos de prova da liga AA 413 fundido antes e após a limpeza.

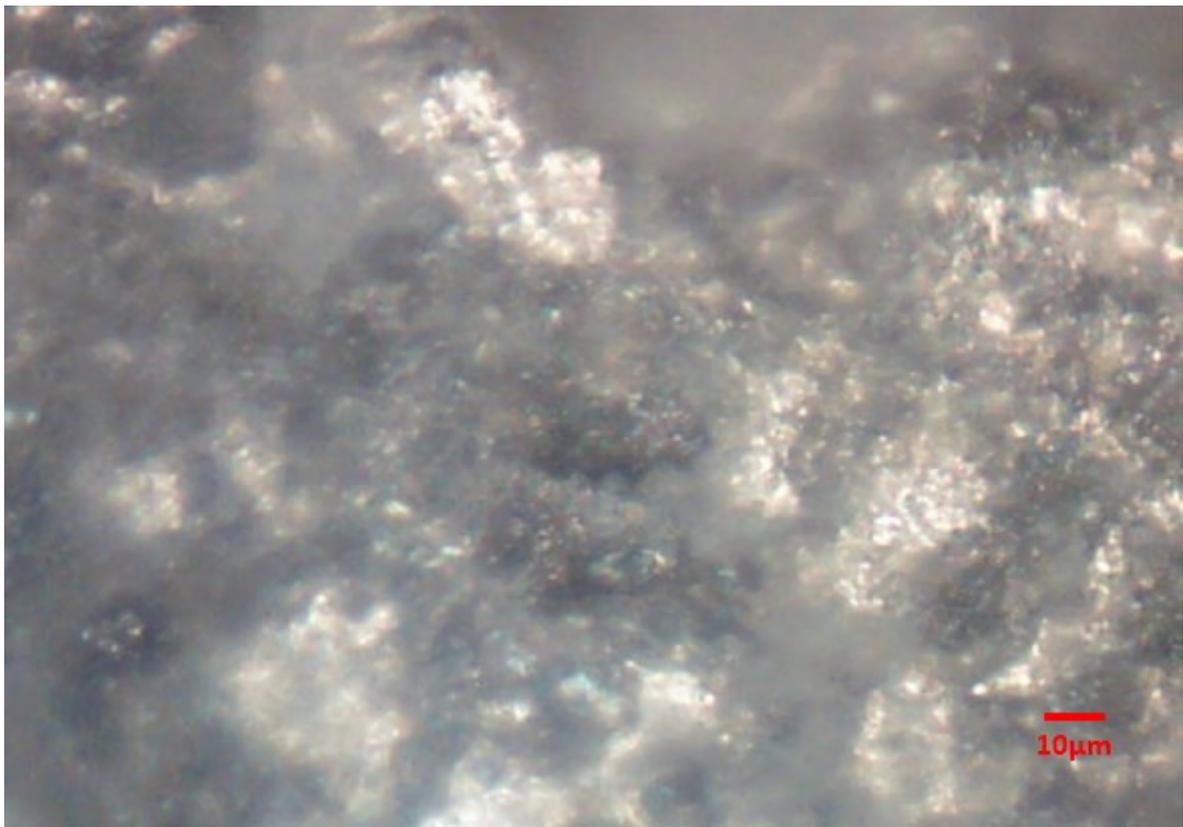


Figura 54: Corpos de prova dois da liga AA 413 fundido após imersão.

Nas Figuras 55 pode-se verificar a liga de cavacos AA 413 antes da limpeza (imagem a esquerda) e após a limpeza (imagem a direita). A Figura 56 apresenta a microimagem da liga de cavacos AA 413 destacando uma corrosão generalizada.

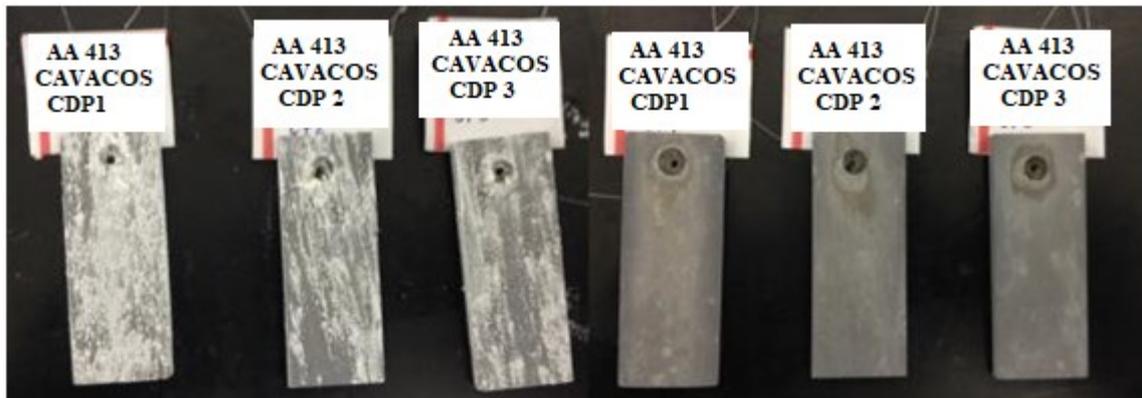


Figura 55: Corpos de prova de cavacos da liga AA 413 antes e após a limpeza.



Figura 56: Corpos de prova um de cavacos da liga AA 413 após imersão.

Nas Figuras 57 pode-se verificar a liga AA 6351-T6 comercial antes da limpeza (imagem a esquerda) e após a limpeza (imagem a direita). A Figura 58 apresenta a microimagem da liga AA 6351-T6 comercial destacando uma corrosão por pites.

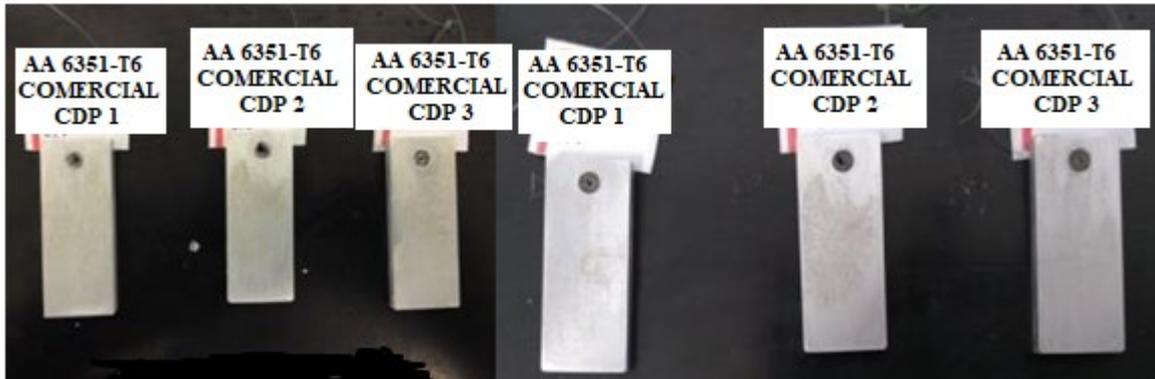


Figura 57: Corpos de prova da liga AA 6351 comercial antes e após a limpeza.



Figura 58: Corpos de prova três da liga AA 6351 comercial após imersão.

Nas Figuras 59 pode-se verificar a liga AA 6351-T6 fundido antes da limpeza (imagem a esquerda) e após a limpeza (imagem a direita). A Figura 60 apresenta a microimagem da liga AA 6351-T6 fundido destacando uma corrosão por pites.

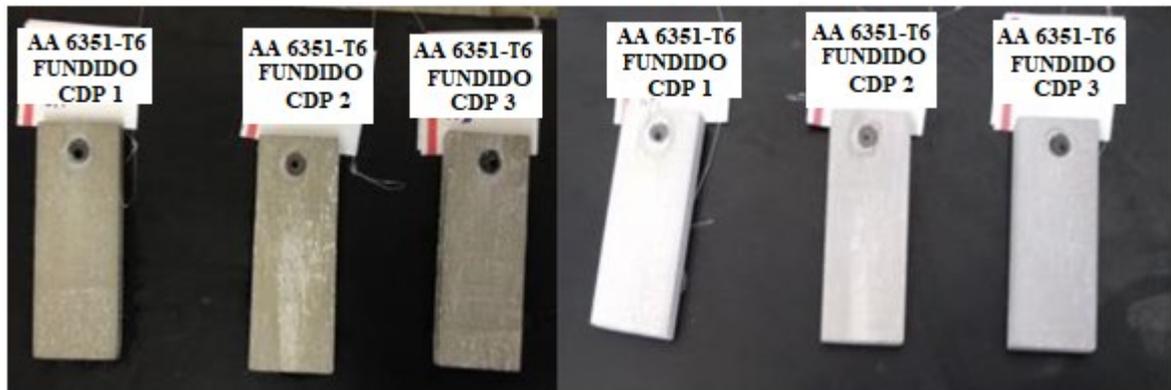


Figura 59: Corpos de prova da liga AA 6351 fundido antes e após a limpeza.



Figura 60: Corpos de prova três da liga AA 6351 fundido após imersão com presença de pites.

Nas Figuras 61 pode-se verificar a liga cavacos de AA 6351-T6 antes da limpeza (imagem a esquerda) e após a limpeza (imagem a direita). A Figura 62 apresenta a microimagem da liga de cavacos AA 6351-T6 destacando uma corrosão por pites.

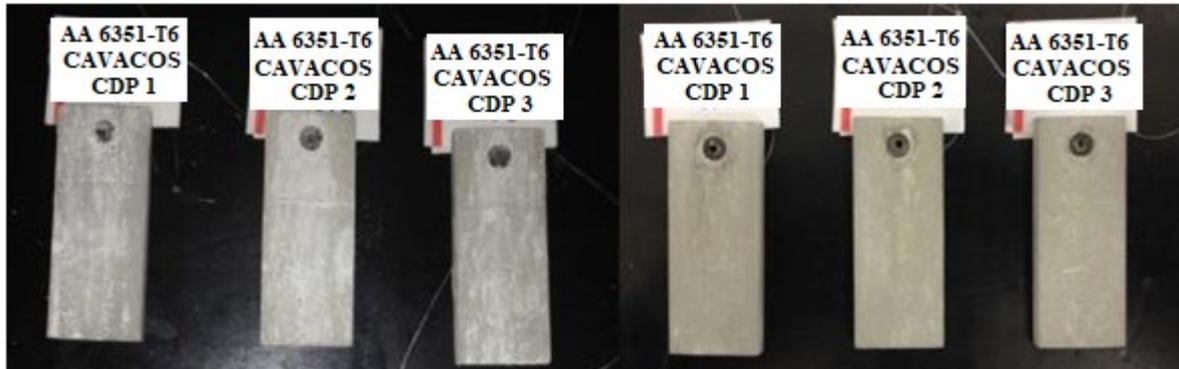


Figura 61: Corpos de prova de cavacos da liga AA 6351 antes e após a limpeza.



Figura 62: Corpos de prova dois de cavacos da liga AA 6351 após imersão compresença de pites.

Todos os corpos de prova submetidos ao ensaio de corrosão por variação de massa no período de trinta dias apresentaram um aumento de massa, devido à formação de um produto de corrosão bastante aderente.

A Figura 63 apresenta a variação de massa medida para cada corpo de prova, demonstrando que a liga AA 6351-T6 comercial tem o menor índice de aumento de massa e a liga AA 413 comercial apresentou um maior aumento da massa.

Considerando-se os valores da variação de massa segundo aos resultados encontrados em cada liga observa-se que a liga AA 413 comercial apresentou maior ganho de massa com 0,0344g, seguido da liga AA 413 fundido com 0,0231g, a liga AA 6351-T6 fundida em terceiro com 0,0221g, logo após em quarto a liga de cavacos fundidos de AA413 com 0,0172g, muito próxima com a liga de cavacos fundidos de AA 6351-T6 menor com 0,0170g e a liga AA 6351-T6 comercial com um produto de corrosão menor com apenas 0,0099g. Foi observado também em nas medidas, que as ligas fundidas provenientes de material maciço variaram positivamente mais massa do que as ligas provenientes de cavacos fundidos.

A corrosão da liga AA 6351-T6 apresenta ser muita mais localizada do tipo pite que a corrosão da liga AA 413 que aparenta ser mais generalizada, com menos pites e menos profundos. Ou seja a corrosão na liga AA 6351-T6 parece ser mais profunda rompendo o filme passivo formado na superfície do que a corrosão na liga AA 413 que se apresenta de uma forma mais generalizada mesmo com menor variação de massa.

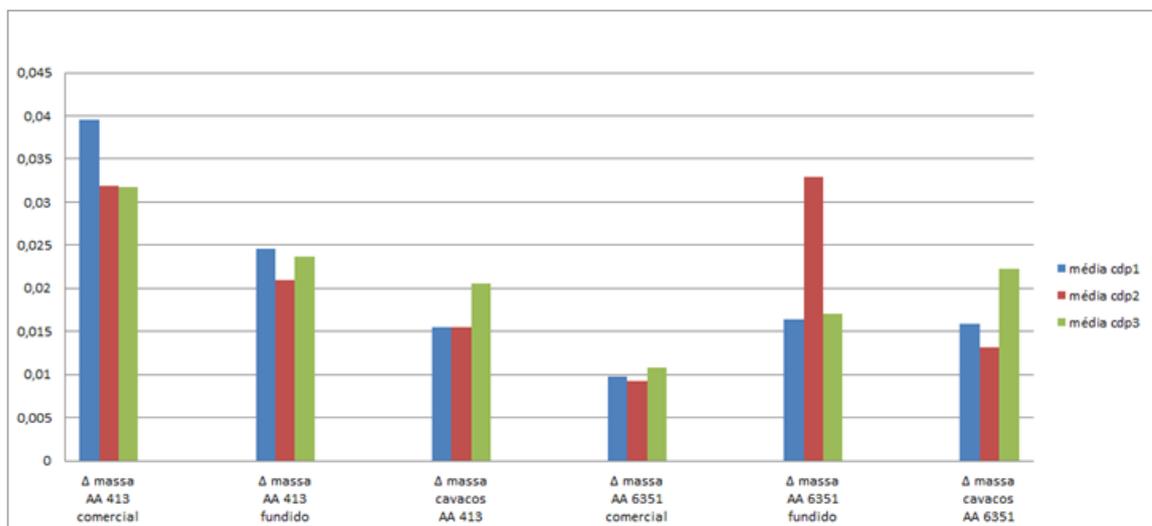


Figura 63: Resultado comparativo dos ensaios de corrosão de variação da massa em gramas das ligas AA 413 e AA 6351 primárias e secundárias.

5.8 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MONITORAMENTO DO POTENCIAL DE CIRCUITO ABERTO E POLARIZAÇÃO

O resultado do ensaio de monitoramento do potencial de circuito aberto das ligas de alumínio primária e secundária proveniente das ligas AA 413 e AA 6351-T6, foram realizadas em triplicata, admitindo o valor intermediário entre os três ensaios para servir como referência da liga em questão comparado às demais ligas estudadas nesse trabalho.

Conforme podemos verificar na Figura 64 e na Tabela 22 as amostras derivadas da liga AA 413 apresentaram potenciais semelhante às amostras da liga AA 6351.

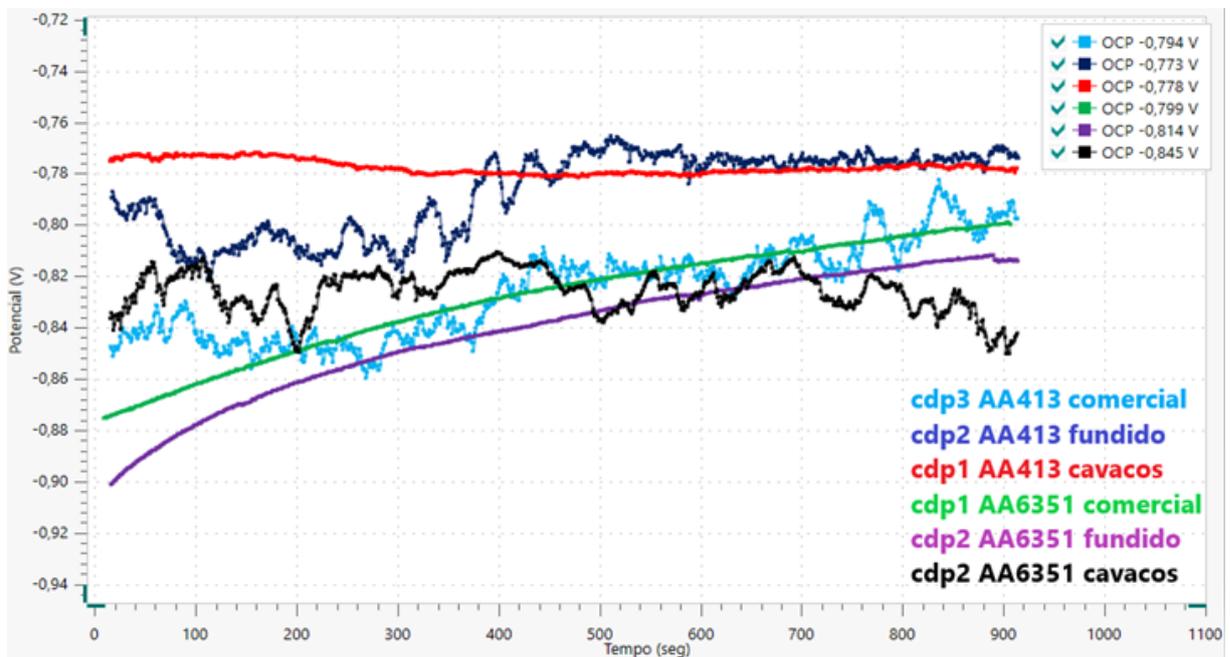


Figura 64: Monitoramento do potencial de circuito aberto para as ligas primárias e secundárias das ligas AA 413 e AA 6351 em solução de 3,5% NaCl.

Tabela 22: Potencial de circuito aberto de corrosão das ligas primárias e secundárias.

Liga	Tipo de Fusão	CDP1 V	CDP2 V	CDP3 V	Média V	D. Padrão
AA 6351	Comercial	-0,799	-0,798	-0,800	-0,799	0,001
	Fundido	-0,83	-0,814	-0,807	-0,817	0,012
	Cavaco	-0,83	-0,845	-0,857	-0,844	0,014
AA 413	Comercial	-0,793	-0,812	-0,794	-0,800	0,011
	Fundido	-0,780	-0,773	-0,765	-0,773	0,008
	Cavaco	-0,778	-0,771	-0,785	-0,778	0,007

Segundo Moreto⁽⁶⁵⁾ em 2014 oscilações que acompanham as medidas possivelmente são devidas a pites que contribuem para a descontinuidade do filme. A corrosão por pite é causada pela ação localizada de íons agressivos na sua maioria Cl^- .

Pelos valores obtidos para OCP das ligas, verifica-se o valor de potencial em que o material está propenso à corrosão. No caso, quanto mais baixo for o valor do potencial, o material estará mais propício à corrosão, e ao contrário, quanto maior for o valor do potencial o material estará menos propício a corrosão desde que as curvas catódicas permaneçam inalteradas no processo. Partindo deste princípio, considerando os valores do OCP e observando a Figura 64 e a Tabela 23, pode-se dizer que as ligas apresentam comportamento semelhante.

No entanto para análise das curvas de polarização apresentadas no item seguinte na Figura 65 vemos que as curvas catódicas da liga AA413 tendem a apresentar correntes maiores que as mesmas curvas para a liga AA 6351-T6. Esse comportamento deve estar relacionado a precipitados formados por elementos da liga onde as reações do oxigênio tem maior facilidade de se desenvolver em relação aos precipitados da outra liga. Esse comportamento da curva catódica também faz subir os potenciais de corrosão, não indicando necessariamente uma maior tendência a dissolução. Pode-se supor que o maior E_{corr} apresentado pela liga AA413 está associado a maiores correntes catódicas que desloca o potencial para valores mais positivos e não pela redução das correntes anódicas. No entanto, se esse comportamento catódico diferente entre as duas ligas, dificulta a comparação entre as resistências à corrosão entre elas, através do potencial de corrosão, pode-se, no entanto, comparar a resistência a corrosão nas três condições ensaiadas para cada liga isoladamente observando os valores mais altos de potencial como mais resistente a corrosão e valores mais negativos como sendo menos resistente. Pode-se ver pela Tabela 23, que para a liga AA6351-T6 os fundidos seriam mais suscetíveis a corrosão que a amostra comercial e considerando os resultados para a liga AA413 na mesma tabela, os valores de potencial são muito próximos entre as três condições, mas o comercial apresentaria uma leve tendência a se corroer mais que as fundida.

Os ensaios de polarização das ligas de alumínio primária e secundárias proveniente das ligas AA 413 e AA 6351, foram realizadas em triplicata, admitindo o valor intermediário entre os três ensaios para servir como referência da liga em questão comparado às demais ligas estudadas nesse trabalho.

Segundo Codaro⁽⁶⁴⁾ em 2006 o valor maior do pH torna o Ecorr mais negativos, baseado nesta afirmação, foi medido e controlado o pH da água do mar sintética e empregada como eletrólito nos ensaios, o qual ficou na ordem de pH com valor 7,0.

Tabela 23: Ecorr dos ensaios de polarização (Volts) das ligas primárias e secundárias.

Liga	Tipo de Fusão	CDP1	CDP2	CDP3	Média	D. padrão
AA 6351-T6	Comercial	-0,8104	-0,8096	-0,8079	-0,8093	0,0013
	Fundido	-0,8764	-0,8689	-0,8297	-0,8583	0,0251
	Cavaco	-0,8574	-0,8757	-0,895	-0,8760	0,0188
AA 413	Comercial	-0,7951	-0,7982	-0,7908	-0,7947	0,0037
	Fundido	-0,7849	-0,7849	-0,7561	-0,7753	0,0166
	Cavaco	-0,7759	-0,7627	-0,823	-0,7872	0,0317

Santana dos Santos⁽⁶⁶⁾ em 2012 afirma que ligas de silício apresentam um deslocamento anódico dos potenciais de corrosão em relação ao alumínio, o que mostra estar coerente com os resultados apresentados da Figura 65.

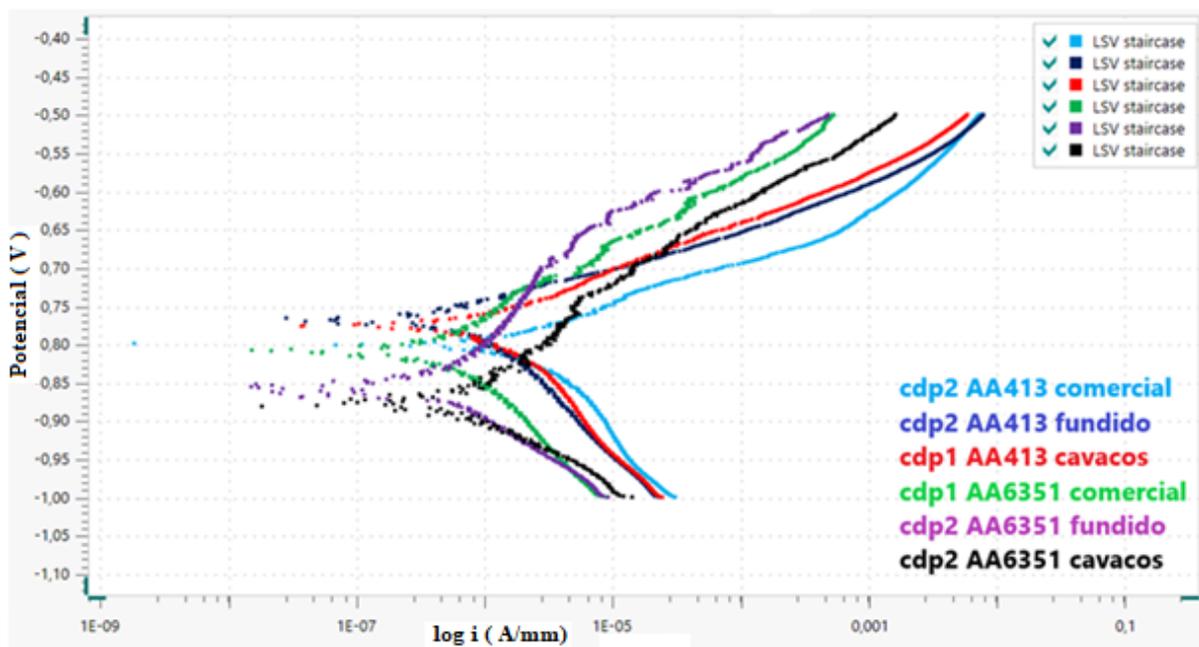


Figura 65: Curvas de polarização para ligas primárias e secundárias das ligas AA 413 e AA 6351 em solução de 3,5% NaCl.

De uma maneira geral os resultados das correntes de corrosão obtidas por resistência de polarização indicam resultado semelhante aos valores de perda de massa mostrados anteriormente, apresentando a liga AA 6351-T6 como liga mais resistente a corrosão que a liga AA 413 .

Observando a Figura 65 se pode verificar uma tendência a passivação no meio estudado da liga AA 6351 não observado para a aliga AA413 onde a corrente aumenta quase linearmente com o potencial. Essa diferença de comportamento apresentado nas curvas de polarização entre as ligas, explica a maior tendência a apresentar pites na liga AA 6351-T6 (Figuras 58, 60 e 62) em relação à liga AA413 que apresenta preferencialmente corrosão do tipo generalizada (Figuras 52, 54 e 56).

A partir das curvas de polarização (Figura 65), por extrapolação das retas de Tafel, pode-se obter os valores da densidade de corrente de corrosão - icorr (conforme apresentado na Tabela 24). Em ordem decrescente, a liga AA 413 comercial apresentou um valor para o icorr de $1,6 \times 10^{-6}$ A/cm², seguida pela a liga de cavacos de AA 413 que apresentou um valor para o icorr de $7,5 \times 10^{-7}$ A/cm², e pela liga AA 413 fundido que apresentou um valor para o icorr de $4,6 \times 10^{-7}$ A/cm². As ligas derivadas do AA 413 comercial apresentaram valores de icorr mais elevados do que as ligas provenientes do AA 6351 comercial, o qual ocupa o quarto lugar apresentando um valor para o icorr de $4,3 \times 10^{-7}$ A/cm², em quinto lugar a liga de cavacos AA 6351 que apresentou um valor para o icorr de $4,0 \times 10^{-7}$ A/cm² e em sexto lugar a liga AA 6351 fundido que apresentou um valor para o icorr de $1,6 \times 10^{-7}$ A/cm², sendo entre os materiais estudados, a condição que apresentou o melhor desempenho em relação ao icorr.

Pode-se ver que a amostra fundida a partir do cavaco da liga AA 413 tem correntes de corrosão próximas as correntes da liga fundida a partir de material maciço indicando comportamento semelhante em relação a corrosão e sendo essas menores que a taxa de corrosão da liga comercial, apresentando resultados coerentes com os obtidos através da análise da potencial de corrosão.

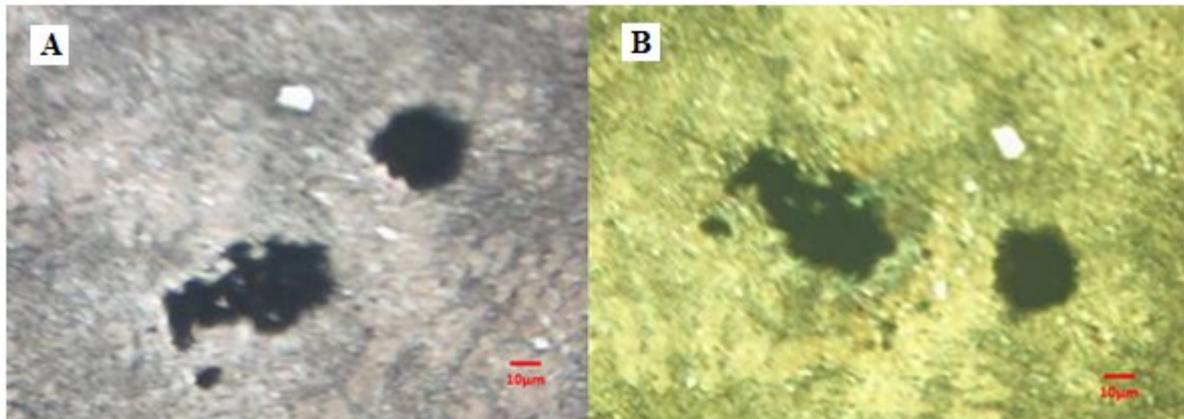
Em relação a liga AA 6351-T6, pode-se ver que o AA 6351-T6 fundido a partir de cavaco tem correntes de corrosão levemente maiores que o fundido utilizando material maciço indicando maior corrosão. Para essa liga parece que a presença de cavaco na fundição piora levemente o comportamento a corrosão, no entanto os valores de corrente são próximos.

A Tabela 24 apresenta os valores de icorr para todos os sistemas estudados primários e secundários.

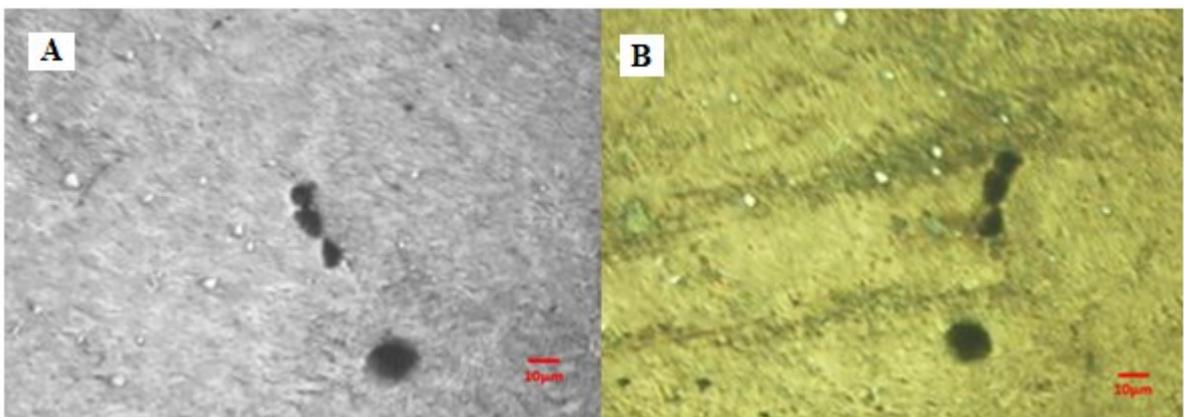
Tabela 24: Valores de icorr das ligas primárias e secundárias de AA 413 e AA 6351-T6.

Liga	Tipo de Fusão	Icor A/cm ²
AA 413	Comercial	$1,6 \times 10^{-6}$
	Cavaco	$7,5 \times 10^{-7}$
	Fundido	$4,6 \times 10^{-7}$
AA 6351-T6	Comercial	$4,3 \times 10^{-7}$
	Cavaco	$4,0 \times 10^{-7}$
	Fundido	$1,6 \times 10^{-7}$

A Figura 66 mostra os aspectos do material AA 413 comercial antes (A) e depois (B) do ensaio de polarização, buscando a geometria de poros do material como base da localização da mesma região.

**Figura 66:** Microscopia da liga AA 413 comercial, antes (A) e após (B) curvas de polarização.

A Figura 67 mostra os aspectos do material AA 413 fundido antes (A) e depois (B) do ensaio de polarização, buscando a geometria de poros do material como base da localização da mesma região.

**Figura 67:** Microscopia da liga AA 413 fundida, antes (A) e após (B) curvas de polarização.

A Figura 68 mostra os aspectos do material de cavacos de AA 413 fundido antes (A) e depois (B) do ensaio de polarização, buscando a geometria de poros do material como base da localização da mesma região.

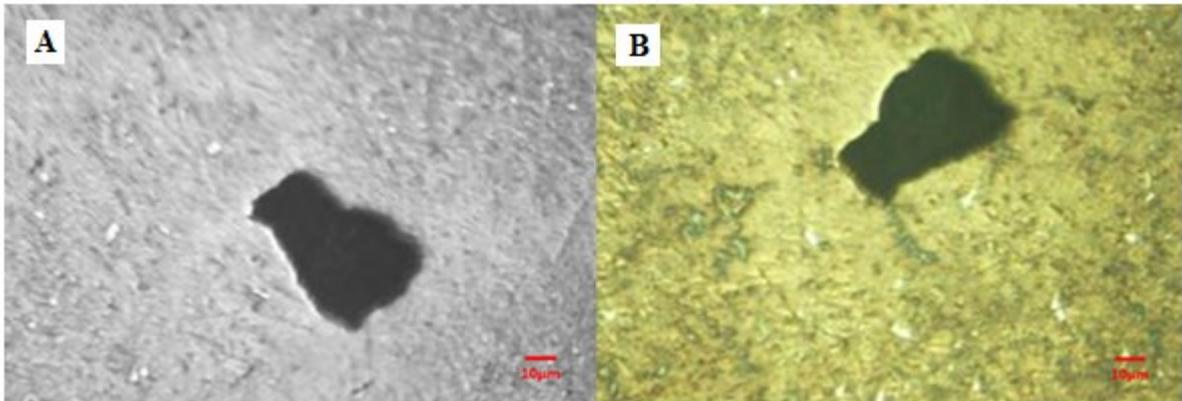


Figura 68: Microscopia da liga de cavacos de AA 413 fundido, antes (A) e após (B) curvas de polarização.

A Figura 69 mostra os aspectos do material AA 6351-T6 comercial antes (A) e depois (B) do ensaio de polarização, buscando a geometria de poros do material como base da localização da mesma região.

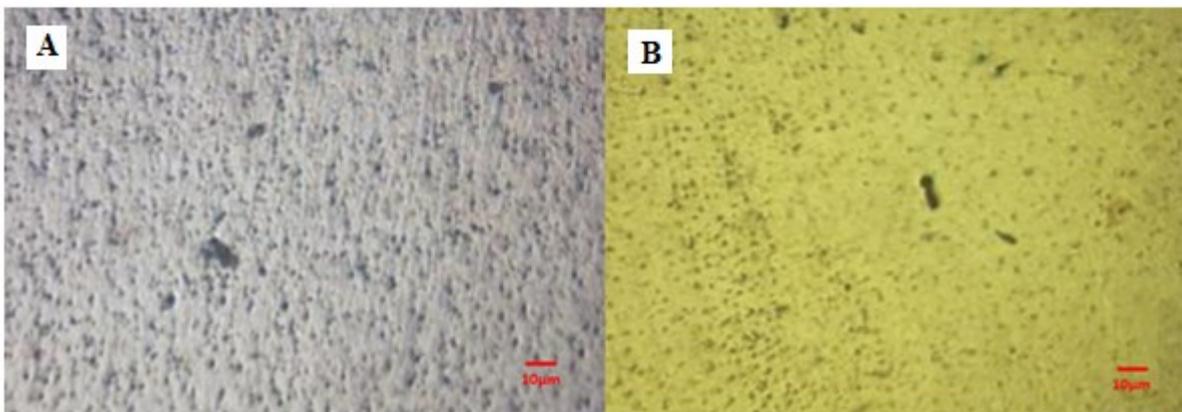


Figura 69: Microscopia da liga AA 6351 comercial, antes (A) e após (B) curvas de polarização.

A Figura 70 mostra os aspectos do material AA6351-T6 fundido antes (A) e depois (B) do ensaio de polarização, buscando a geometria de poros do material como base da localização da mesma região.

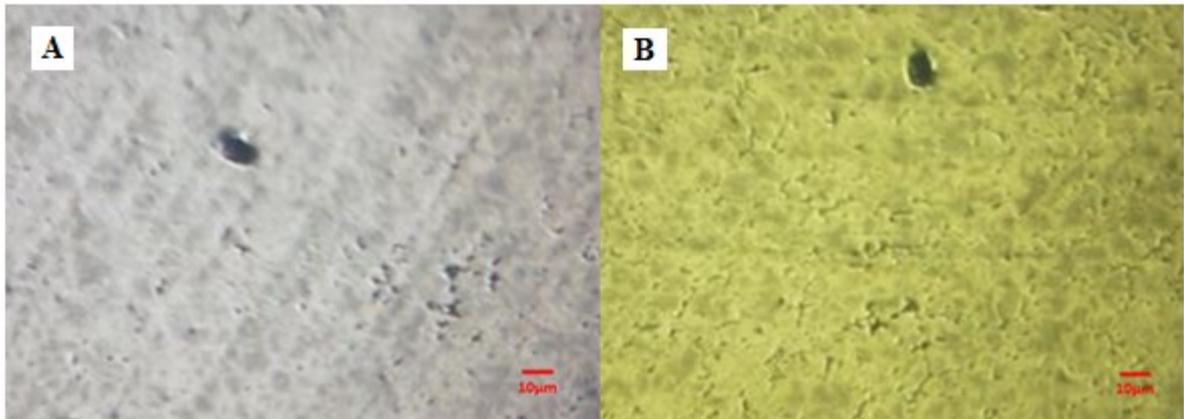


Figura 70: Microscopia da liga de AA 6351 fundido, antes (A) e após (B) curvas de polarização.

A Figura 71 mostra os aspectos do material de cavacos de AA 6351-T6 fundidos antes (A) e depois (B) do ensaio de polarização, buscando a geometria de poros do material como base da localização da mesma região.

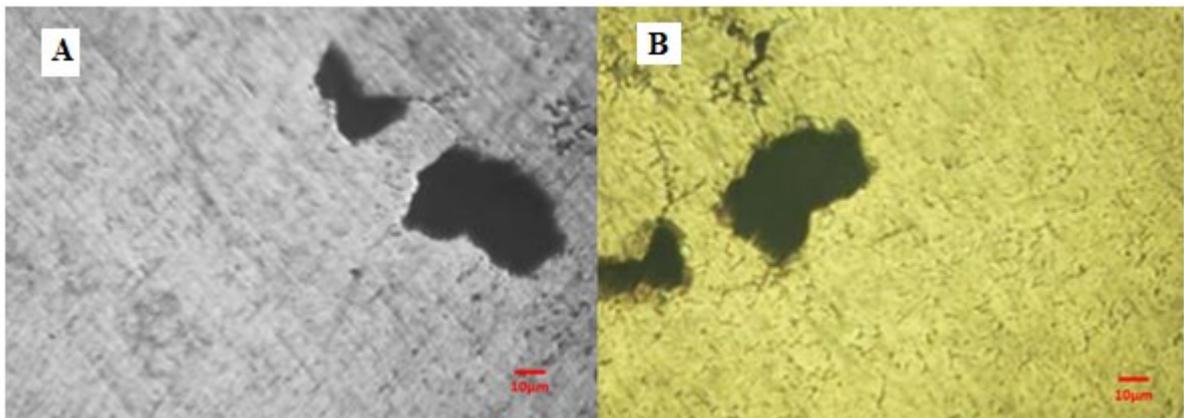


Figura 71: Microscopia da liga de cavacos de AA 6351 fundido, antes (A) e após (B) curvas de polarização.

6 CONCLUSÃO

Do trabalho experimental realizado com os parâmetros utilizados nesta pesquisa, chegam-se as seguintes conclusões:

- A) Todas as ligas secundárias apresentaram semelhança na composição química em relação as ligas primárias, mesmo com o baixo rendimento das fusões de cavacos, as ligas de cavacos preservaram as proporções da composição química da liga primária.
- B) As ligas secundárias de AA 413 foram mais resistentes à tração do que as ligas secundárias de AA 6351-T6 e a energia absorvida nos ensaios charpy mostram uma superioridade das ligas derivadas de AA 6351-T6, mostrando-se com maior tenacidade quando comparadas as ligas derivadas de AA 413.
- C) Nos ensaios de monitoramento da variação de massa com o tempo de imersão em NaCl 3,5%, todas as ligas estudadas aumentaram o peso após 30 dias. As ligas secundárias tanto de AA 413 como as de AA 6351-T6, obtiveram variação de massa semelhante, já entre as primárias a liga AA 413 ganhou mais massa do que a AA 6351-T6. As ligas derivadas de AA 413 apresentaram uma corrosão mais generalizada, enquanto que as ligas derivadas de AA 6351-T6 apresentaram corrosão por pites. Nos ensaios de polarização apesar das ligas provenientes de AA 413 apresentarem um potencial de corrosão mais altos devido ao ramo catódico das curvas, no entanto, mostraram-se mais suscetíveis a corrosão por apresentarem maiores valores de icor do que as ligas derivadas de AA 6351-T6.

A fundição de alumínio utilizando material na forma de cavacos apresenta grande perda para a escória por oxidação no processo, devido a sua grande área superficial em relação ao material maciço.

Os resultados encontrados nos ensaios realizados nos parâmetros estudados nesse trabalho entre os materiais fundidos a partir de material maciço e os fundidos a partir de cavacos oriundos do processo de usinagem, foram muito próximos para as duas ligas de alumínio estudadas, indicando ser possível a utilização desse tipo de material como matéria-prima para peças fundidas.

7 TRABALHOS FUTUROS

- A) Estudar para outras ligas metálicas se há a preservação da proporcionalidade da composição química, e se isso se confirma em outras situações de severas perdas por formação de escórias.
- B) Analisar as fases formadas nas escórias, visto que essas são formadas numa reação espontânea e reações espontâneas são irreversíveis poderá haver constituintes resistentes a corrosão ainda não conhecidos.
- C) Buscar entender melhor o mecanismo que protege a integridade da composição química variando a atmosfera na hora da fusão.
- D) Prover estudos para determinar mecanismo de formação de concentrados em forma de estrelas conforme mostra Figura 72.



Figura 72: concentrados em forma de estrelas em liga AA 6351 fundida.

8 REFERÊNCIAS

- 1 ABAL. Associação Brasileira do Alumínio. **Reciclagem no Brasil**. Disponível em: <<http://www.abal.org.br/reciclagem/brasil.asp>>.
- 2 SILVA, André Luiz Silva da. **História da utilização do alumínio**. Disponível em: <http://www.infoescola.com/curiosidades/historia-da-utilizacao-do-aluminio>. Acesso confirmado em: 16/09/2019
- 3 CALÇADA, Maurício Vieira. **Avaliação da mecânica e microestrutural da liga alumínio AA3104 empregado na indústria de fabricação de latas laminadas à frio com e sem interpasse**. 2018. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.
- 4 PEIXOTO, Eduardo Motta Alves. **Elemento Químico Alumínio**. 2001. Revista QUÍMICA NOVA NA ESCOLA. N° 13, MAIO 2001. Disponível em: <http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc13/13-aluminio.pdf>. Acesso confirmado em 13/09/2019.
- 5 EB SILVA FILHO, MCM ALVES, M DA MOTTA, Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas. **Revista Matéria**. 2007.
- 6 VARGEL, C. **Corrosion of Aluminium**. 1.ed. San Diego: Editora Elsevier, 2004.
- 7 SOUSA, B. B.; SOUSA, L. N. de; MOREIRA, A. L. S.; CARDOSO FILHO, J. C. Estudo da velocidade de corrosão em ligas de Al-3%Cu E Al-5%Cu. 2015. **XI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica**. Unicamp-Campinas/SP.
- 8 ALVES, G.J.T. **Nanocoloração de ligas de alumínio**. 2012. Dissertação de Mestrado em Química Aplicada. Universidade de Ponta Grossa.
- 9 Norma NBR ISSO 209 ALUMÍNIO E SUAS LIGAS-COMPOSIÇÃO QUÍMICA
- 10 <http://www.abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/ligas/>
- 11 TRATHO METAL QUÍMICA. **Alumínio**. Disponível em: <<http://www.tratho.com.br/pdf/Alum%EDnio.pdf>>
- 12 PIRES, M. S. T.; DOCA, T.; STEIER, V. F.; SILVA JR, W. M. da; Oliveira Jr., M. M. de. Caracterização da resistência ao desgaste da liga de alumínio SAE 305 após processo de anodização. 2017. Artigo. **Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia-RIPE**.
- 13 <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM233/N%E3o%20Ferrosos/Ligas%20de%20alumini%20fundidas.pdf>
- 14 MICENE, Katiele Tives. **Caracterização, estudo do comportamento eletroquímico e simulação numérica da liga hipereutética al-2%fe tratados por refusão a laser**. 2014. Dissertação de Mestrado- Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, Universidade Estadual de Ponta Grossa.

- 15 MOSSI, Charlen; RODRIGUES, Marcelo Colnaghi; FERREIRA, Carlos Raimundo Frick; BARCELLOS, Vinicius Karlinski de. Artigo. 2017. **Influência do tratamento de banho com modificador de silício nas propriedades mecânicas da liga de alumínio SAE 305.**
- 16 WARMUZEK, M. **Aluminum-Silicon Casting Alloys Atlas of Microfractographs**, ASM. Materials Park, 2004.
- 17 MELADO, Marcos Caetano. **Estudo das Tensões Residuais e Caracterização das Propriedades Mecânicas e Microestruturais de Juntas Soldadas de Liga de Alumínio AA5086.** Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa Francisco Eduardo Mourão Saboya de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFF como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica. Agosto de 2014.
- 18 https://www.alcoa.com/brasil/pt/resources/pdf/industria/catalogo_ligas_temperas_2010.pdf
- 19 BUZINELLI, Didiane Victoria. **Dimensionamento de elementos estruturais em alumínio.** Dissertação. 2000. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.
- 20 NASCIMENTO, Filipe Miguel Ferreira. **Processamento por Fricção Linear Caracterização e análise de ligas de alumínio processadas AA5083-O e AA7022-T6.** Dissertação. 2007. Universidade Técnica de Lisboa.
- 21 TAVARES, Sheron Stephany. **Soldagem por fricção convencional entre a liga de alumínio 6351-t6 e o aço SAE 1020 assistida por indução eletromagnética.** Dissertação. 2017. Universidade Federal de Minas Gerais Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
- 22 GUBICZA, J.; CHINH, N.Q.; HORITA, Z.; LANGDON, T.G. Effect of Mg addition on microstructure and mechanical properties of aluminum. **Materials Science and Engineering**, 2004.
- 23 BOILEAU, James M.; ZINDEL, Jacob W.; ALLISON, John E. The Effect of Solidification Time on the Mechanical Properties in a Cast A356-T6 Aluminum Alloy. **International Congress & Exposition Detroit**, Michigan February, 1997.
- 24 MOURA, Carlos Francisco do Amaral de. **Implementação da liga SAE 306 para redução de custo na injeção de alumínio.** 2006. Trabalho de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- 25 http://www.alumicopper.com.br/pdf/aluminio/info-tec- lumi_aluminio_6351
- 26 BERTRAM, M. **The global and european dimension of aluminium recycling.** Disponível em: http://www.aluminiumcentrum.nl/aluminiumcentrum.nl/files/Doc/Congres%202006/mod%20ule%20a/2-Mrs._Marlen_Bertram.pdf
- 27 REIS, Juliana Meni. **O desenvolvimento sustentável e a reciclagem de alumínio.** 2013. Monografia. Departamento de Contabilidade. Universidade Federal do Paraná.

- 28 VALENTIM, Antão Rodrigo. **Construção de um procedimento para avaliação da lucratividade e produtividade de ligas de alumínio reciclado**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2011.
- 29 http://www.pyrotek.inf/metallics._offices.
- 30 OLIVEIRA, Ivanir. L. de. **Influência das fontes de alumínio secundário na geração de escória: Uma análise estática**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento de Pós-Graduação Ponta Grossa – Paraná.
- 31 SCHMITZ, C. **Handbook of aluminium recycling: fundamentals, mechanical preparation, metallurgical processing e plant design**. Essen: Valkan-Vergal GmbH, 2006.
- 32 DINIZ, Adriana Gresielly Fabrini. **Elevação da rentabilidade e produtividade em fundições de alumínio**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2007.
- 33 GUIMARÃES, Eduardo do Nascimento; GIACAGLIA, Giorgio E. O. **Artigo** (2012) Universidade de Taubaté, São Paulo.
- 34 HUANG, H . Hui (2007). **Estudo teórico-experimental da distribuição de temperatura na zona de corte no processo de torneamento usando FEM utilizando o software Abaqus**. São Carlos, universidade de são Paulo.
- 35 SANTOS JR, M. C. **Emprego de ferramentas estáticas para avaliação da usinabilidade de ligas de alumínio**. 2012. 230f. Tese de doutorado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- 36 TAREK MABROUKI, CÉDRIC COURBON, YANCHENG ZHANG, JOËL RECH, DANIEL NÉLIAS, MUHAMMAD ASAD, HÉDI HAMDI, SALIM BELHADI, FERDINANDO SALVATORE. **Some insights on the modelling of chip formation and its morphology during metal cutting operations**. 2016 Académie des sciences. Published by Elsevier Masson SAS.
- 37 A.E.TEKKAAYA, M.SCHIKORRO, D.BECKER, D.BIERMANN, N.HAMMER, K.PANTKE. Hot profile extrusion AA 6060 aluminum chips. Journal of Materials processing Technology. July 2009.
- 38 **Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes, and Applications**”; American Foundry society, ASM International 2004.
- 39 SHABESTARI, S.G. **The effect of iron and manganese on the formation of intermetallic compounds in aluminum–silicon alloys S.G. Shabestari**. Article 2004. Department of Materials and Metallurgical Engineering, Iran University of Science and Technology.
- 40 LEVY, Rafael Simão. **Análise de porosidade em alumínio com adição de celulose**. 2018. 39 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Bacharelado em Engenharia Mecânica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2018.

- 41 RIBEIRO, Daniel Tadeu de Carvalho. **Estudo da viabilidade técnica do processo de fabricação de espumas metálicas por reciclagem de cavacos da liga AA356. 2011.** Dissertação de Mestrado. Comissão de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas/SP.
- 42 FARIA NETO, Antonio. **Revista Ciências Exatas.** vol.22, n.2, 2016, p.18. Universidade de São Paulo.
- 43 GENTIL, Vicente. **Corrosão.** 6.ed. Rio de Janeiro, 2012.
- 44 DUTRA, Aldo Cordeiro; NUNES, Laerce de Paula. **Proteção Catódica: Técnica de Combate à corrosão.** 5.ed. Rio de Janeiro, 2011.
- 45 GENTIL, Vicente. **Corrosão.** 3.ed. Rio de Janeiro, 1994.
- 46 MWEMA, F.M.; OLADIJO, O. P.; AKINLABI, S.A.; AKINLABI, E.T. Properties of Physically Deposited Thin Aluminium Film Coatings: A Review. University of Science and Technology, Botswana. **Journal of Alloys and Compounds.** 2018.
- 47 DMITRY, S. *et al.* Corrosion Inhibition of Aluminum Alloy AA6063-T5 by Vanadates: Microstructure Characterization and Corrosion Analysis. **Journal of The Electrochemical Society,** 2018.
- 48 JONES, D.A. **Principles and prevention of corrosion.** 2nd. Ed. New Jersey: Prentice-Hall, 1996.
- 49 ASTM E8/E8M-16^a Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.
- 50 GARCIA, Amauri. **Solidificação: Fundamentos e aplicações.** 2.ed. Campinas,SP: Editora da Unicamp, 2007.
- 51 ASTM E-10-01 Standard Test Methods for Brinell Hardness of Metallic Materials
- 52 ASTM E-23-05 Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials (2005) (cobre Charpy e Izod) e ASTM E23-12c. (2012). Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. EUA.
- 53 SANTOS, Bill Paiva dos. **Avaliação da degradação da tenacidade frente a uma falha dinâmica no aço API 5L X70.** 2017. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais PPGE3M.
- 54 ASTM G31-72 Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals.
- 55 ASTM TMO169/G31-12^a Standard Guide for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals.
- 56 ASTM Designation D1141-98 (Reapproved 2003) Standard Practice For the Preparation of Substitute Ocean Water.
- 57 CHINO, Yasumasa *et al.* **Corrosion and Mechanical Properties of Recycled 5083 Aluminum Alloy by Solid State Recycling.** 2003. Institute for Structural and

- Engineering Materials, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Nagoya, Japan.2003.
- 58 GRONOSTAJSKI, J.. **The recycling of metals by plastic deformation:** an example of recycling of aluminium and its alloys chips, Art Article 1999. Matuszak Institute of Production Engineering and Automation, Wrocław University of Technology, Wrocław, Poland.
 - 59 MELLO, Admir Francisco. **Avaliação da substituição do material da carcaça do Motorreductor Automotivo.** Artigo. 2013.
 - 60 FALAVIGNA, Diego. **Análise da influência do uso de lubrificante na qualidade superficial de peças de alumínio torneadas.** 2014. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico na Universidade de Caxias do Sul.
 - 61 TONOLI, César Salvarani. **Estudo sobre os efeitos de tensões residuais na vida em fadiga da liga de alumínio 6013-t6, em perfil tubular, submetida a shot peening.** Dissertação. 2009. Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.
 - 62 CUNHA, Daniel Fernandes da. **Influência do teor de silício na usinabilidade da liga de alumínio 6351-Avaliação através da força de corte e acabamento superficial.** Dissertação. 2012. Universidade Federal de Uberlândia.
 - 63 FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais.** São Paulo: Editora Edgar Blucher, 1977.
 - 64 CODARO, Eduardo Norberto. **Estudo da corrosão em ligas de alumínio utilizadas na indústria aeronáutica.** Tese. Universidade Estadual Paulista Campus De Guaratinguetá, 2006.
 - 65 MORETO, Jéferson Aparecido *et al.* Estudo do Efeito do Transporte de Massa nas Curvas de Polarização Potenciodinâmica em Ligas de Alumínio da Série 7XXX de aplicação Aeronáutica. Artigo.2014. **Revista Brasileira de Física Tecnológica aplicada.**
 - 66 SANTOS, Luana Santana dos. **Estudo eletroquímico de ligas metálicas Alumínio-Silício em meio ácido.** Dissertação. 2012. Universidade Federal do Pará.

APÊNDICE

Resultados dos ensaios em triplicatas.

Liga AA 413 Comercial			
Corpo de prova	Tensão escoamento (MPa)	Tensão máxima (MPa)	Deformação (%)
1	102,9	161,9	0,945
2	97	136	0,573
3	100,6	154,1	0,809
MÉDIA	100,2	150,7	0,8
D.PADRÃO	3,0	13,3	0,2

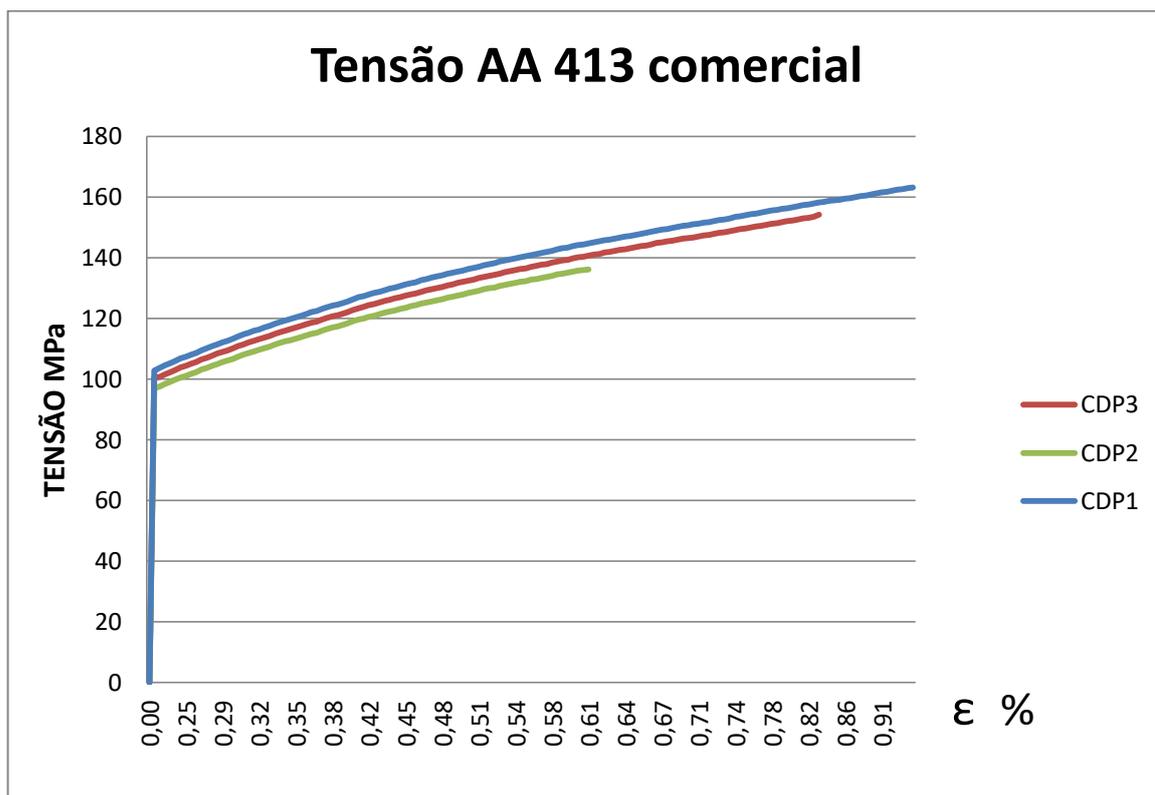
Liga AA 413 Fundido			
Corpo de prova	Tensão escoamento (MPa)	Tensão máxima (MPa)	Deformação (%)
1	95,4	163,9	0,9
2	91,5	157,3	0,8
3	100,0	199,8	1,4
MÉDIA	95,6	173,7	1,1
D.PADRÃO	4,3	22,9	0,3

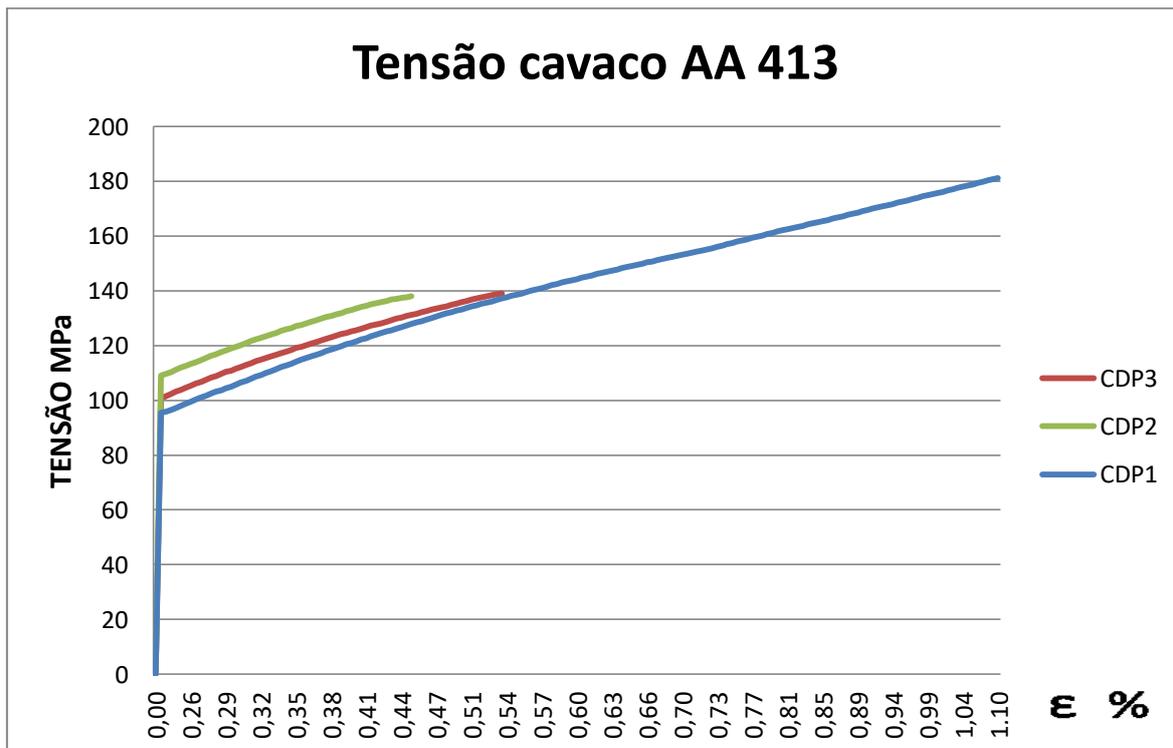
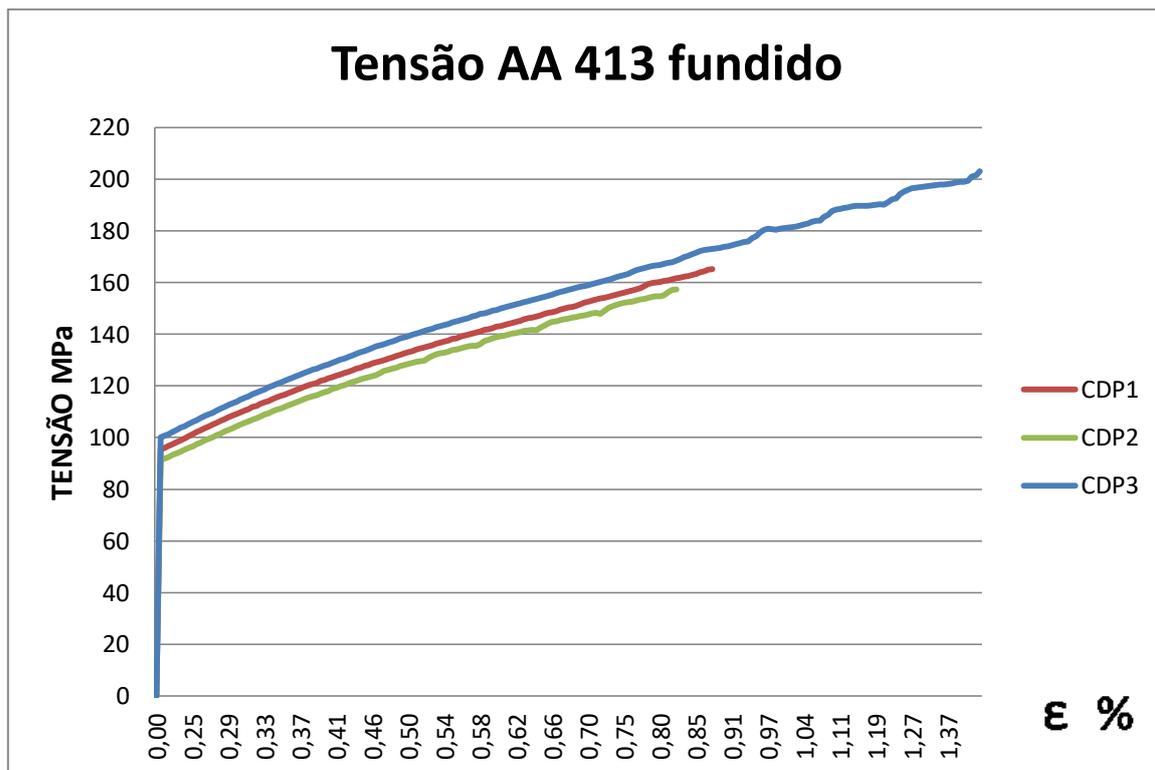
Cavacos da liga AA 413 Fundidos			
Corpo de prova	Tensão escoamento (MPa)	Tensão máxima (MPa)	Deformação (%)
1	95,4	181,2	1,1
2	109,0	137,1	0,5
3	101,0	138,9	0,6
MÉDIA	101,8	152,4	0,7
D.PADRÃO	6,8	25,0	0,3

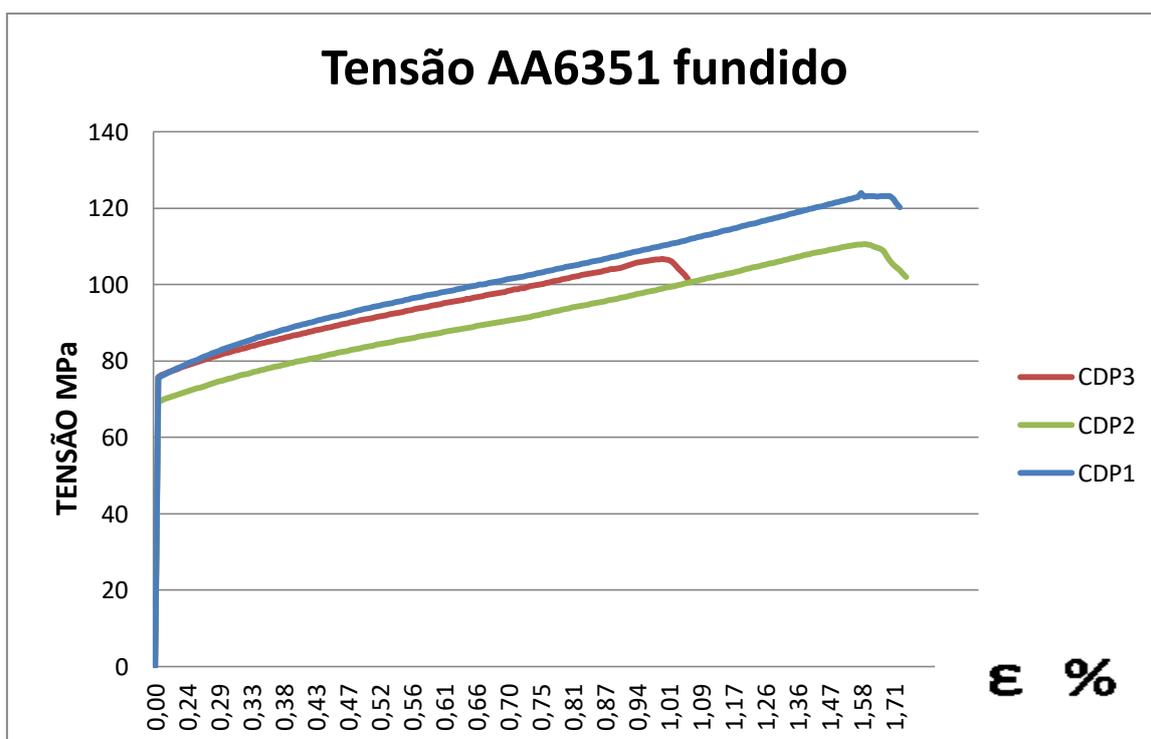
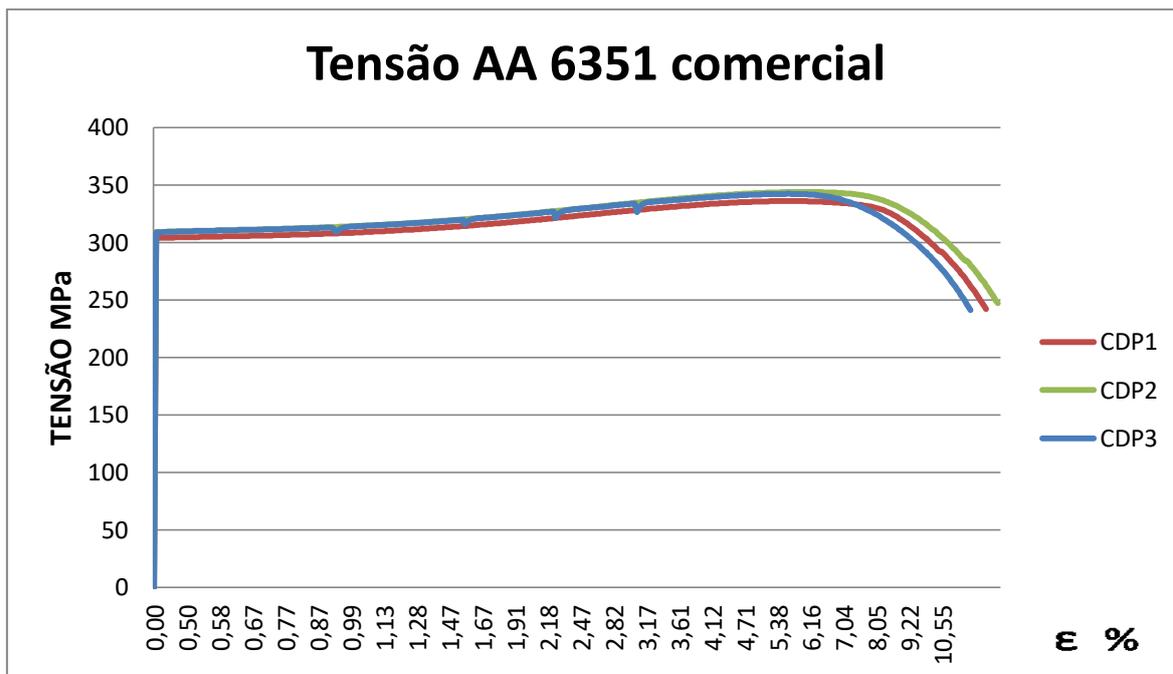
Liga AA 6351 Comercial			
Corpo de prova	Tensão escoamento (MPa)	Tensão máxima (MPa)	Deformação (%)
1	303,9	336,1	13,2
2	309,2	344	13,4
3	308,8	342,4	11,9
MÉDIA	307,3	340,8	12,8
D.PADRÃO	3,0	4,2	0,8

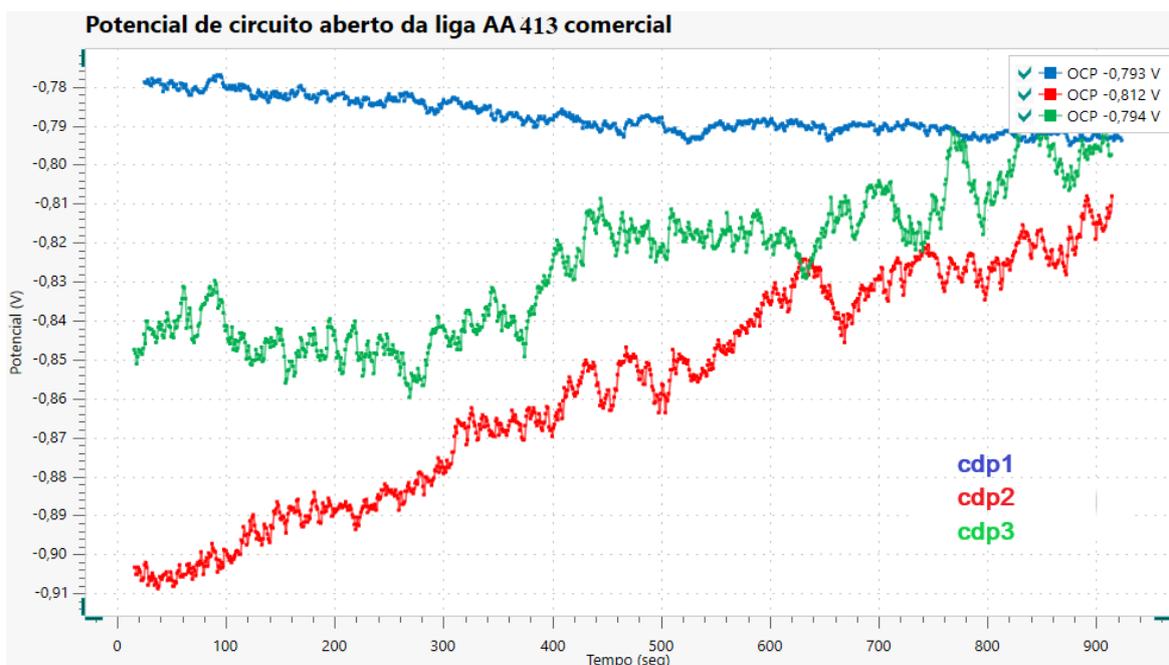
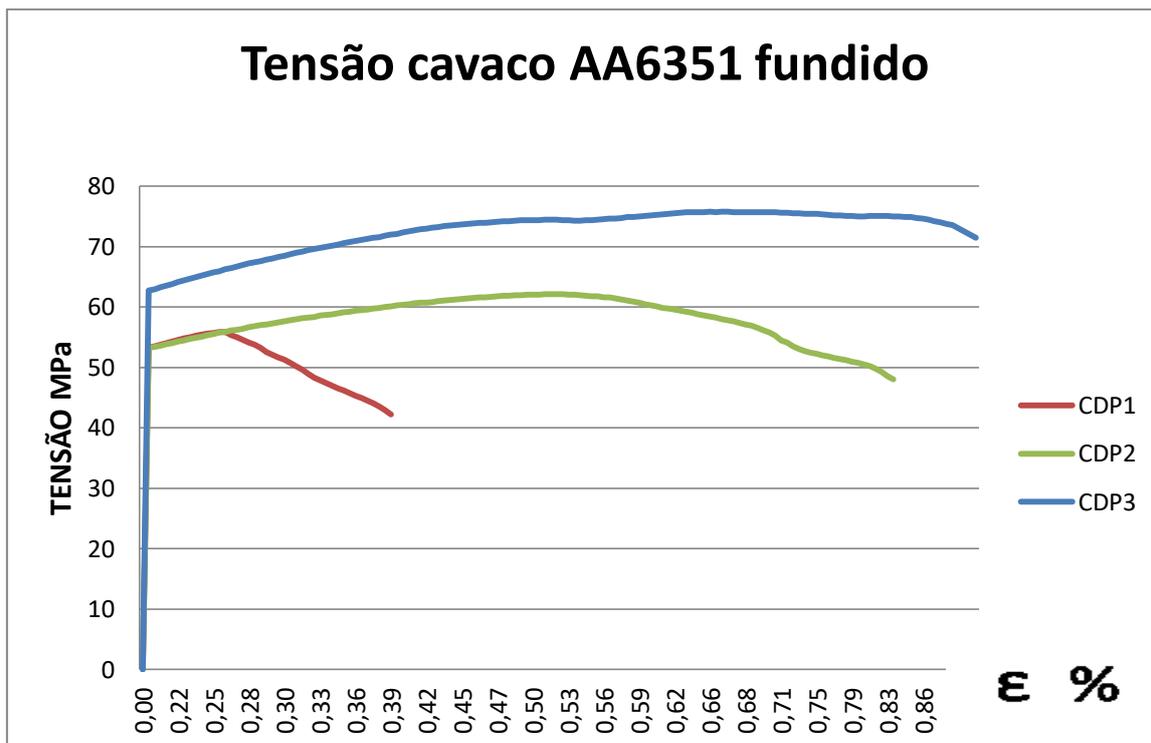
Liga AA 6351 Fundidos			
Corpo de prova	Tensão escoamento (MPa)	Tensão máxima (MPa)	Deformação (%)
1	75,8	123,1	1,7
2	69,4	110,6	1,8
3	75,7	106,7	1,0
MÉDIA	73,6	113,5	1,5
D.PADRÃO	3,7	8,6	0,4

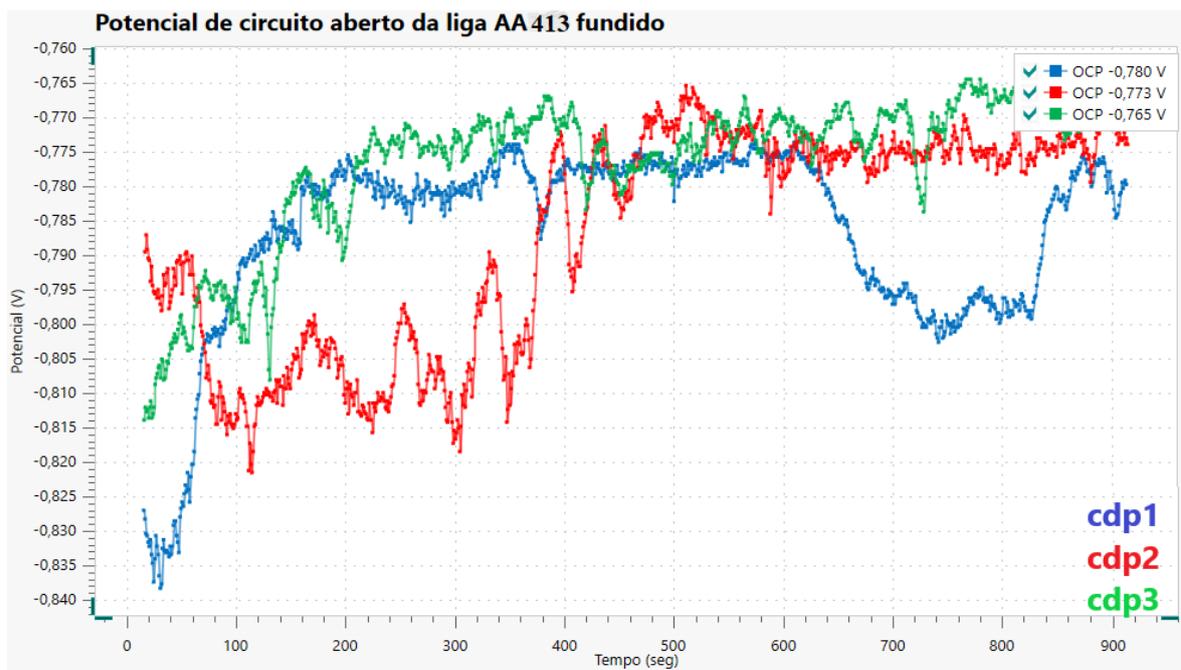
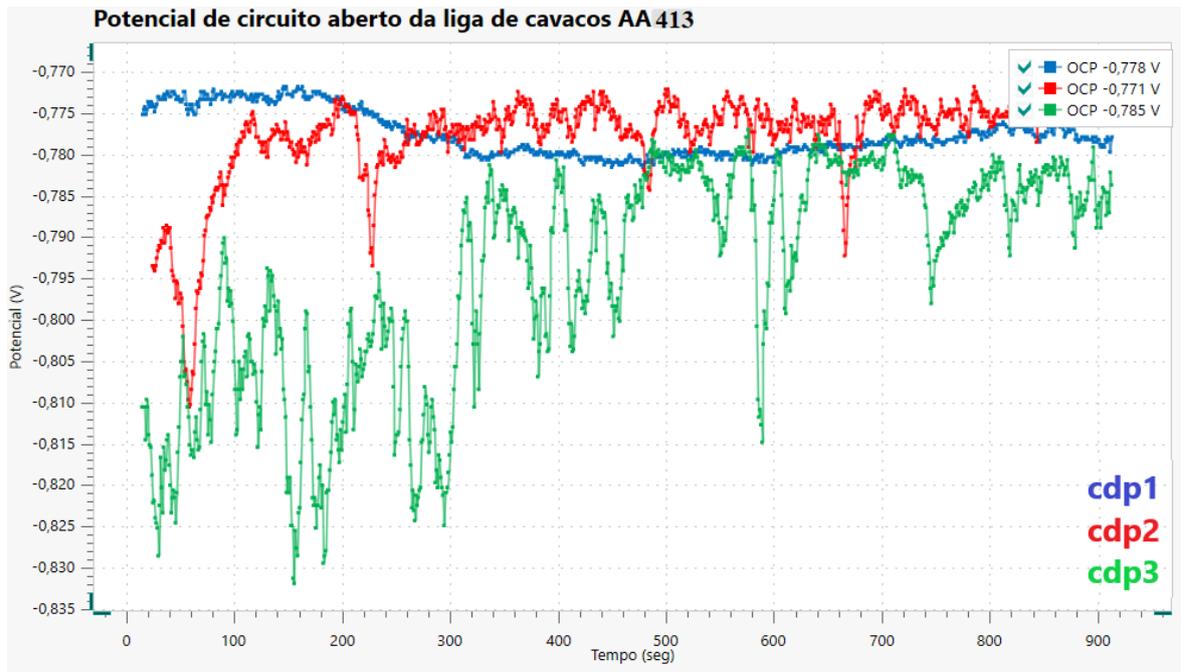
Cavacos da liga AA 6351 Fundidos			
Corpo de prova	Tensão escoamento (MPa)	Tensão máxima (MPa)	Deformação (%)
1	53,5	55,0	0,4
2	53,2	62,0	0,9
3	62,7	75,8	0,9
MÉDIA	56,5	64,3	0,7
D.PADRÃO	5,4	10,6	0,3

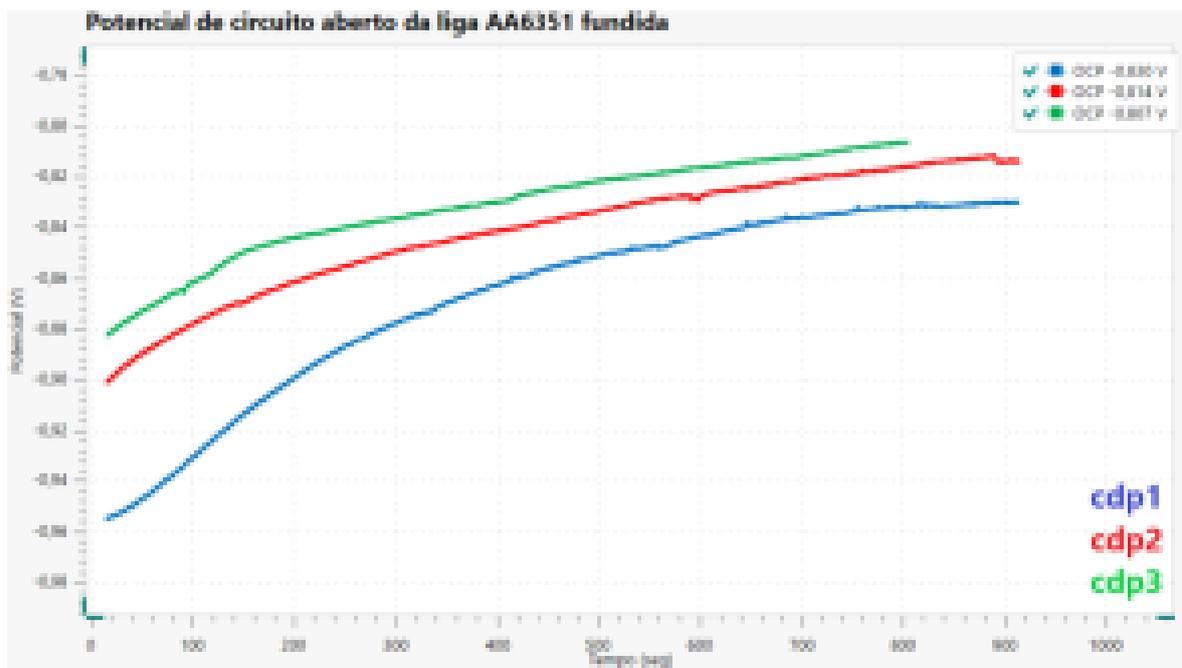
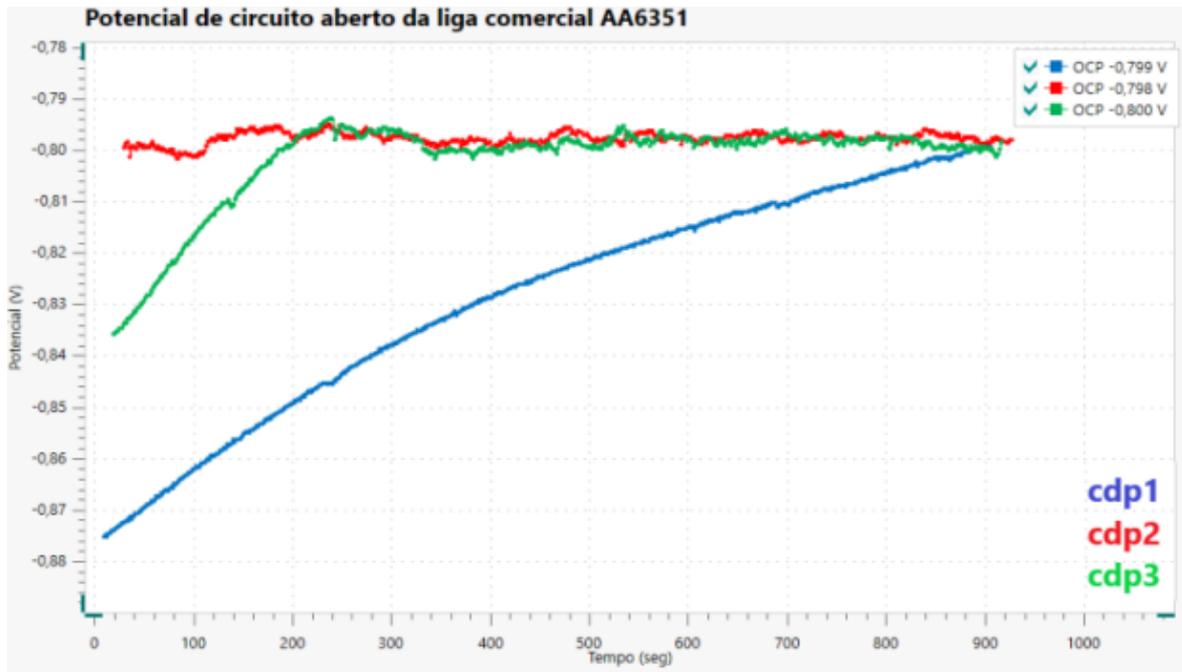






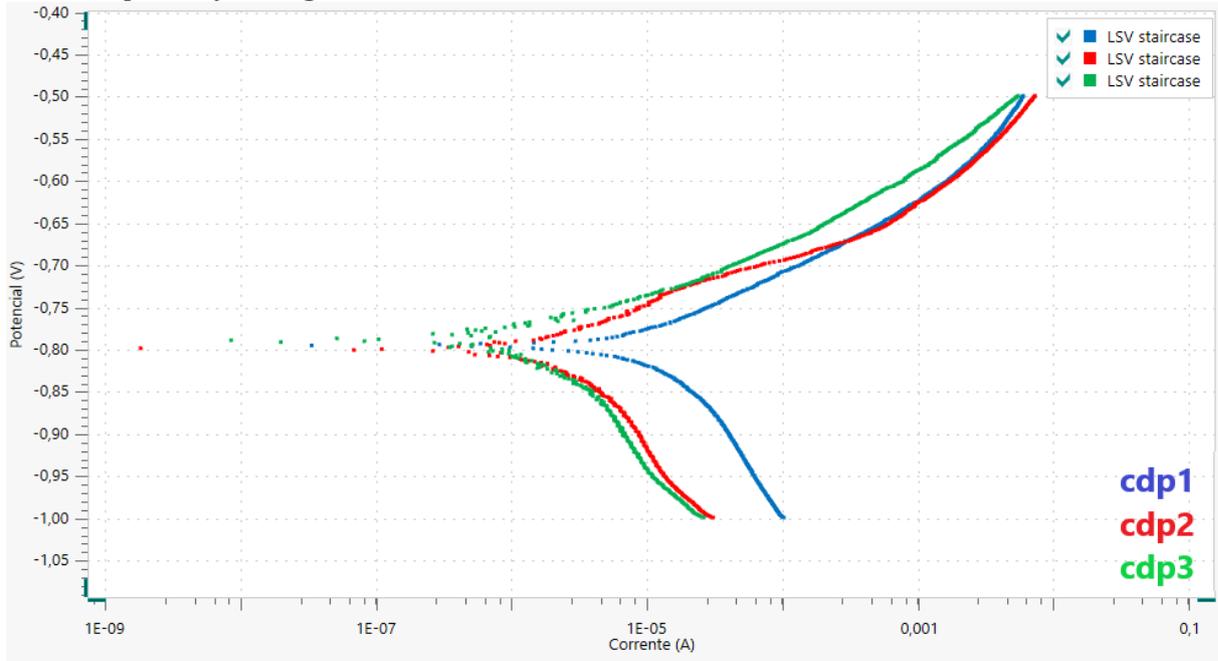




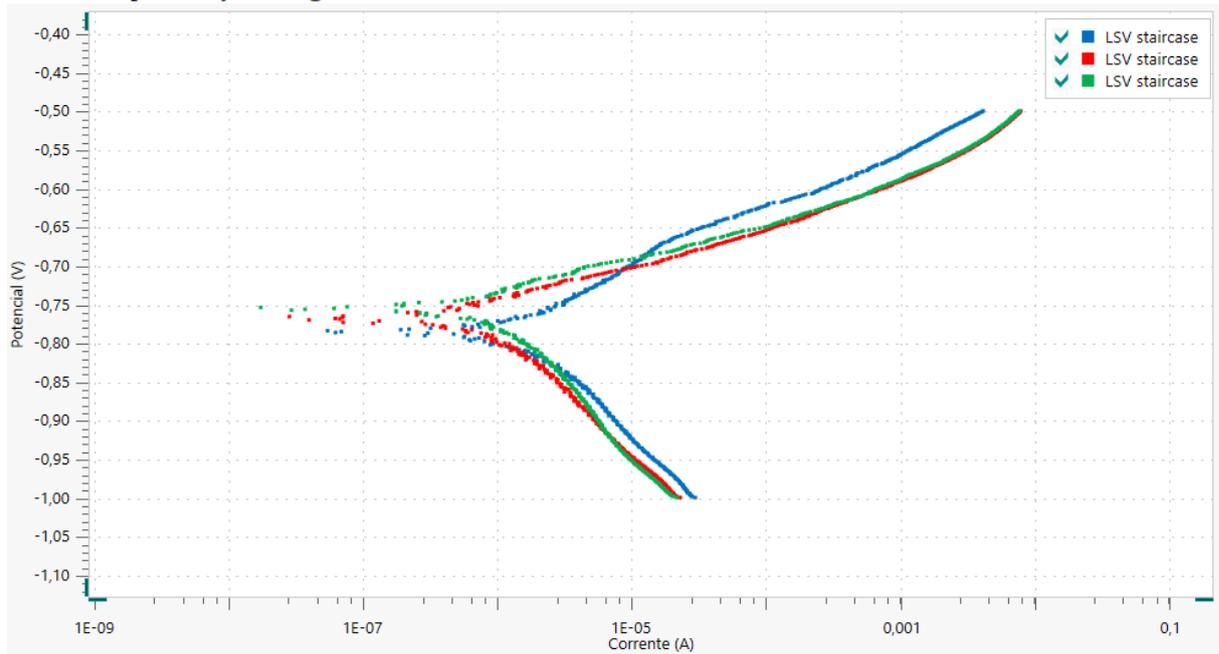




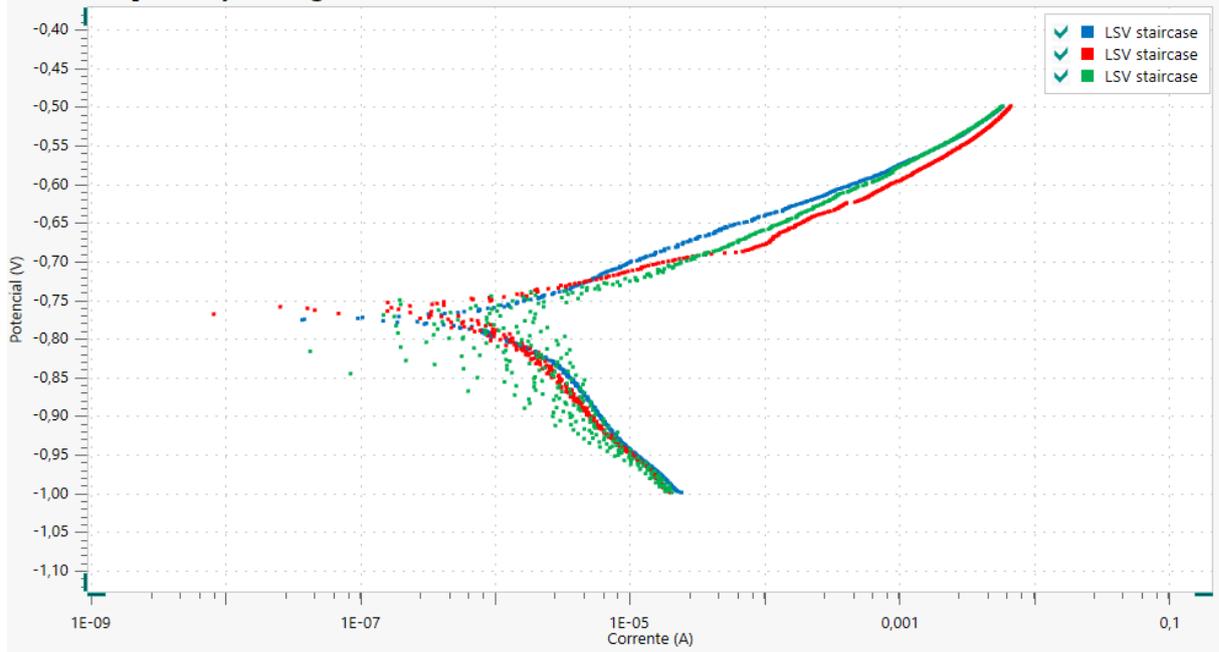
Curvas de polarização da liga AA413 comercial



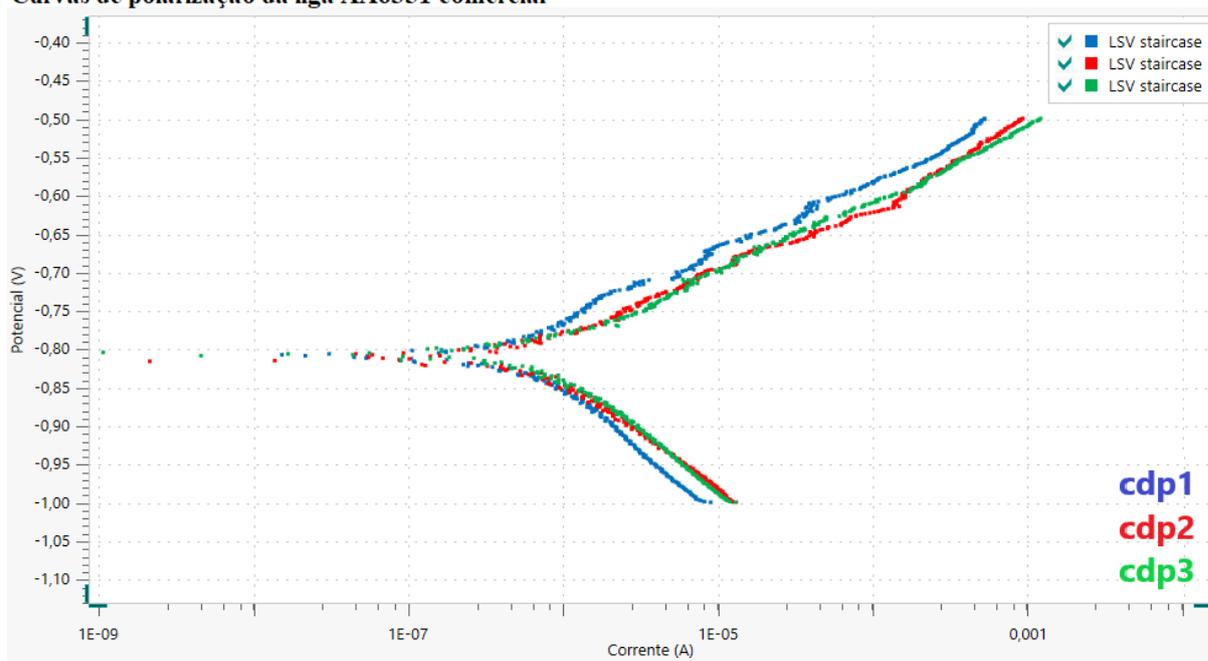
Curvas de polarização da liga AA413 fundido



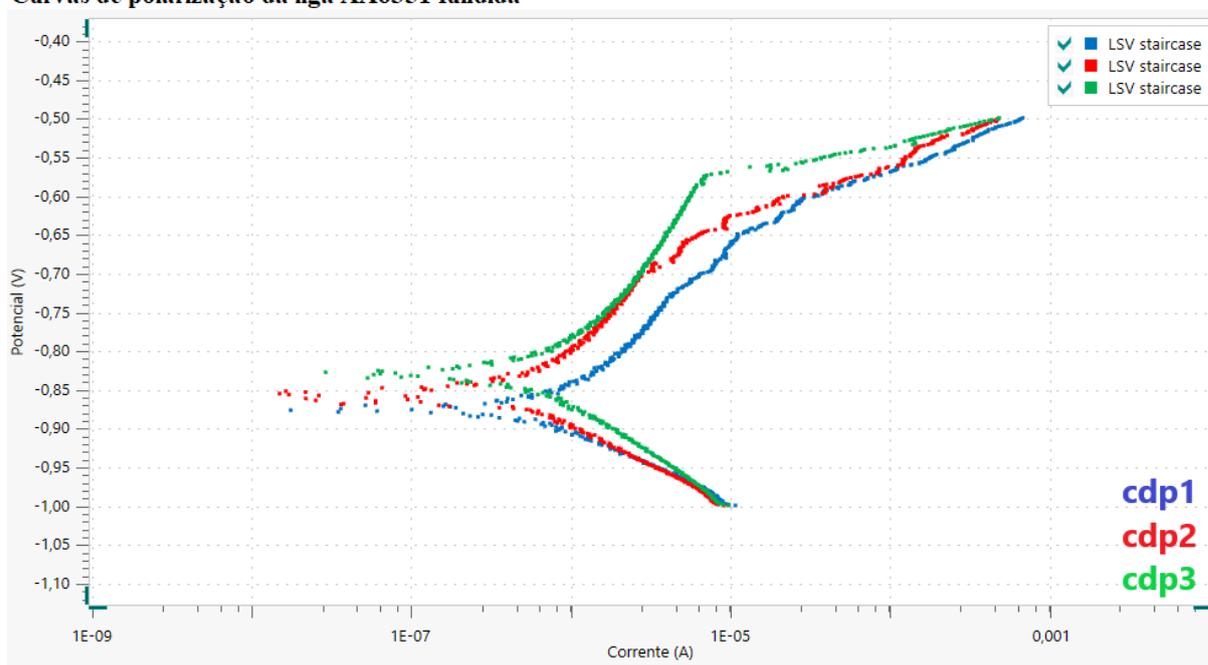
Curvas de polarização da liga AA413 cavacos



Curvas de polarização da liga AA6351 comercial



Curvas de polarização da liga AA6351 fundida



Curvas de polarização da liga AA6351 cavacos

