

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
Etec TRAJANO CAMARGO
Curso Técnico em Metalurgia

Antônio José Gomes dos Santos
Jeferson Gomes
Renan Moraes Ozello
Roberto de Souza Santos Neto

A INFLUÊNCIA DO ELEMENTO QUÍMICO FERRO NA LIGA DE
ALUMÍNIO A-356

Limeira – SP

2021

**A INFLUÊNCIA DO ELEMENTO QUÍMICO FERRO NA LIGA DE
ALUMÍNIO A-356**

Antônio José Gomes dos Santos

Jeferson Gomes

Renan Moraes Ozello

Roberto de Souza Santos Neto

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso Técnico em
Metalurgia da Etec Trajano Camargo,
orientado pelo Prof. Edenil, como
requisito parcial para obtenção do título
de técnico em Metalurgia.

Limeira – SP

2021



FICHA DE AVALIAÇÃO DO TCC

AVALIAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – TCC - ANO 2021	
ETEC: TRAJANO CAMARGO	
Aluno(a): Antônio José Gomes dos Santos Jeferson Gomes Renan Moraes Ozello Roberto de Souza Santos Neto	
Turma: Noite Módulo: 3	
Habilitação Profissional Técnica de Nível Médio de Técnico em	
Professor Responsável:	
Tema do Trabalho:	

Trabalho Escrito (obrigatório)

Item	MB	B	R	I	Observações
Pertinência do tema do trabalho à Habilitação Profissional					
Coerência e consistência teórico-metodológica (justificativa, objetivos, referencial teórico, metodologia, análises e resultados)					
Atendimento da forma (padrão definido)					
Nível de abrangência (profundidade, originalidade e aplicabilidade)					
Apresentação oral: utilização de termos técnicos e da modalidade padrão da língua portuguesa					
Criatividade					
Aplicabilidade no mercado de trabalho					

Análise (Considerando os critérios adotados): Os critérios estabelecidos para aprovação do Trabalho de Conclusão de Curso foram atingidos satisfatoriamente.

O Trabalho de Conclusão de Curso – TCC, submetido à avaliação docente, atendeu as exigências estabelecidas no Plano de Curso da Habilitação Profissional, correspondendo à carga horária suplementar de 120 horas a serem certificadas no Histórico Escolar.

Assinatura do Professor Responsável:

Data: // 2021

De acordo,

Adriana Justina Rizzo - Diretor de Escola
Limeira, de _____ de 2021.

AGRADECIMENTOS

A Deus por me dar a oportunidade de vir a este mundo e contribuir de alguma forma para as pessoas.

A minha família e aos meus amigos pelo apoio de sempre.

Ao meu orientador José Edenil Gomes Santos por toda paciência, dedicação e suporte para que este trabalho pudesse ser realizado.

Agradeço a todos os professores e colegas de classe pela troca de experiência e conhecimento adquiridos ao longo do curso, mesmo sendo remotamente, pelo momento que estamos vivendo, fica aqui a honra de fazer parte desta turma e da oportunidade dada pela Etec Trajano Camargo.

Agradeço em especial ao professor João Rafael pelo apoio dado nas aulas de metalografia e análise metalográfica, tendo tanta paciência no acompanhamento das tarefas no laboratório.

Agradeço ao professor José Edenil Gomes pelo apoio na montagem e elaboração do trabalho conclusão de curso.

A professora Valderez pela ajuda, dada na correção do abstract e parte da referência bibliográfica.

RESUMO

O projeto de trabalho de conclusão do Curso de Metalurgia esboça o levantamento de informações referente ao efeito do ferro, no comportamento mecânico e da microestrutura das ligas de alumínio, através da adição do ferro, ocorrendo no processo de refusão do massalote, (Filtro usado no processo de retenção de óxidos). Os processos de fundição representam boa parte dos custos da fabricação de rodas de ligas de alumínio e o controle de qualidade da microestrutura e propriedades mecânicas das rodas fundidas, exerce uma grande influência no desempenho do produto. Um defeito não detectado no processo de controle da microestrutura e propriedades mecânicas pode gerar sérias consequências ao fabricante da peça, pôr ser um produto de segurança de grande relevância, na área automotiva, ocorrendo perda de vidas humanas.

Palavra(s)-chave: Massalote, Microestrutura, Refusão.

ABSTRACT

The work project for the conclusion of the Metallurgy Course outlines the gathering of information regarding the effect of iron, on the mechanical behavior and the microstructure of aluminum alloys, through the addition of iron, occurring in the remelting process of the massalote oxide retention). The casting processes represent a large part of the costs of manufacturing aluminum alloy wheels and the quality control of the microstructure and mechanical properties of the cast wheels, exerts a great influence on the product's performance. An undetected defect in the microstructure and mechanical properties control process can have serious consequences for the part manufacturer, as it is a safety product of great relevance in the automotive area, resulting in loss of human lives.

Keywords: Massalote, microestructure, remelting.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
1.1 Objetivo	13
1.2 Justificativa	14
2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 Ligas Metálicas.....	15
2.2 Alumínio.....	15
2.3 Ligas de Alumínio	17
2.4 Importância das Ligas das Alumínio.....	18
2.4.1 Ligas do grupo 1000 (1050/1100/1200).....	18
2.4.2 Ligas do grupo 3000 (3003/3104/3105).....	20
2.4.3 Ligas do grupo 5000 (5052/5086/5083/5754).....	20
2.4.4 Ligas do grupo 6000 (6082/6061).....	21
2.4.5 Ligas do grupo 7000 (7021/C-330R/7475/7075).....	22
2.4.6 Ligas do grupo 8000 (8006, 8011, 8017).....	23
2.5 Propriedades mecânicas do alumínio.....	23
2.6 Metalografia das ligas de alumínio	26
2.7 Microestrutura das ligas de alumínio	27
2.8 Liga de alumínio A-356.....	27
2.9 Propriedades mecânicas da liga A-356	28
2.9.1 Microestrutura da liga A-356	28
2.9.2 Liga Al-Si	32
2.9.3 Processos de fundição	35

2.9.4 Influência do elemento ferro nas ligas de alumínio.....	37
3. METODOLOGIA.....	38
3.1 Métodos e Materiais.....	38
4. RESULTADOS E ANALISES DOS RESULTADOS.....	41
4.1 Resultado de Dureza.....	41
4.2 Composição e Análise Química.....	42
4.3 Ensaio de Tração.....	45
4.4 Análise Metalografica.....	49
5. CONCLUSÃO.....	54
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55

1. INTRODUÇÃO

O alumínio é o material metálico mais abundante na superfície do planeta, sendo utilizado em vários setores industriais. Porém, ele não é encontrado isolado, e sim em sua forma de minério, a bauxita.

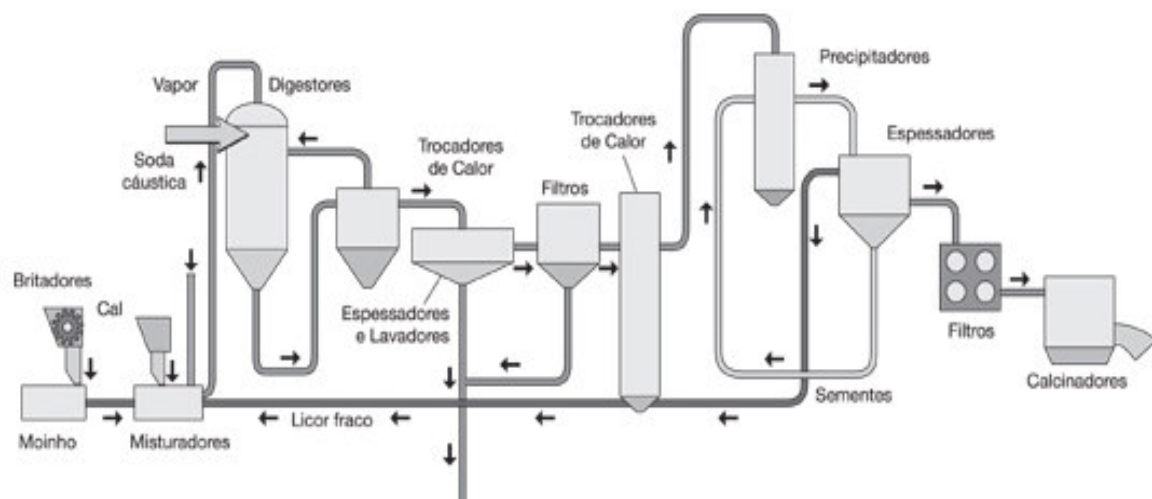
É de grande importância comercial devido a leveza, condutividade elétrica, resistência à corrosão e baixo ponto de fusão, o que possibilita sua aplicação em diferentes áreas, especialmente na engenharia aeronáutica.

Apesar de oferecer baixo custo no processo de obtenção e reciclagem, o gasto energético necessário para a redução do mineral, o que acarreta em impactos ambientalmente negativos.

A bauxita é um minério muito farto em solo brasileiro. Para que sua obtenção seja viável, deve-se conter, no mínimo, 30% de óxido de alumínio no minério de origem.

Foi Friedrich Wöhler que isolou o alumínio pela primeira vez, em 1827. Após a retirada das camadas do solo e beneficiamento do minério, segue-se para o processo de refinaria.

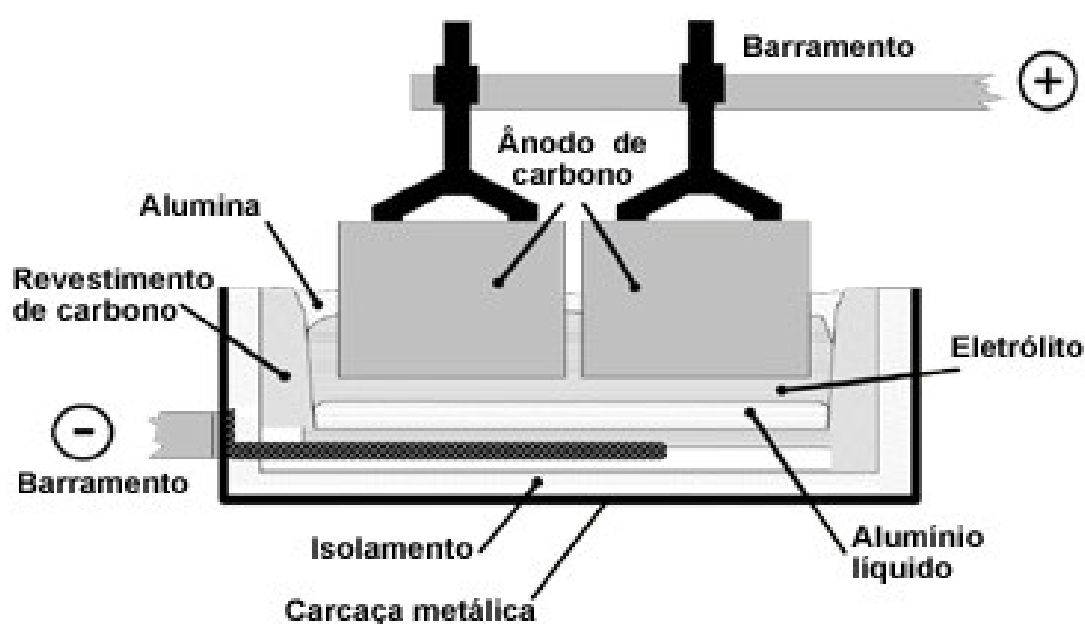
Figura 1- Esquema de obtenção do Alumínio.



Fonte: Associação Brasileira do Alumínio.

Primeiramente, ocorre a moagem e dissolução da alumina em soda cáustica. Em seguida, a filtração da alumina para separar o material sólido. Por conseguinte, ocorre a concentração do filtrado para cristalização da alumina. A partir desse momento, os cristais são secados, precipitados e calcinados. Assim, obtém-se o pó de alumina pura, o qual segue para o processo de redução eletrolítica, conhecido como Hall-Hérout.

Figura 2- Esquema de redução do Alumínio.



Fonte: Associação Brasileira do Alumínio.

Por fim, a última etapa do processo, ocorre a redução da alumina calcinada em cubas eletrolíticas, sendo necessárias duas toneladas do material para produzir uma tonelada de alumínio, sem contar a quantidade exacerbatante de energia gasta no processo. Ao final, obtém-se os lingotes e tarugos do metal primário. <https://materiaisjr.com.br/tudo-sobre-o-aluminio>.

As ligas de alumínio silício são as mais utilizadas entre todas as ligas de alumínio fundidas em função de sua ampla aplicação na produção de produtos comerciais. O silício é um elemento de liga que confere excelente fundibilidade à liga, ou seja, pelo fato de possuir excelente fluidez, permite a perfeita reprodução da geometria do molde com o mínimo de defeitos (NIELS SKAT, TIEDJE, JOHN A. TAYLOR, E MARK A. EASTON, 14 de Julho 2012).

A importância destas ligas também está baseada na baixa contração em comparação com o metal base bem como na boa soldabilidade e resistência à corrosão (W. KALIFA, A. M. SAMUEL, F. H. SAMUEL, H. W. DOTY e S. VALTIERRA, vol. 19, pp. 156- 166, 2006).

O uso destas ligas tem aplicação crescente na indústria automobilística, pois permite a redução do peso do veículo e, conseqüentemente, menor consumo de combustível. Outros elementos químicos, tais como o Cu, Mg, Mn, Zn, Sr, Ti e B são incorporados às ligas de alumínio-silício com a finalidade de melhorar a tenacidade à fratura e a resistência à corrosão, ampliando o limite de utilização destas ligas (R. S. RANA, RAJESH PUROHIT, e S. DAS, p. 1-7, Junho 2012).

Em ligas primárias de elevado grau de pureza, o ferro contido é relativamente baixo, geralmente entre 0,02 e 0,15% em peso. Isso se deve ao fato de que na bauxita existe alguma contaminação de ferro, que não pode ser completamente eliminado nos processos de obtenção do alumínio. Outra fonte de contaminação de ferro ocorre na elaboração das ligas primárias de alumínio-silício, uma vez que o silício comercialmente puro pode apresentar até 0,6% de Fe (J.A. TAYLOR, p. 19-33, 2012).

No manuseio do alumínio líquido nas fundições também pode acontecer alguma contaminação por ferro via ferramentas de aço que mantêm contato com o alumínio líquido ou mesmo contaminação com retornos que contêm insertos de aço. Estes fatores contribuem para um crescente aumento do teor de ferro nas ligas de alumínio-silício. Não se conhece ainda nenhum processo economicamente viável para a remoção do ferro nas ligas de alumínio durante o processo de elaboração. A única maneira de reduzir o teor deste elemento é por diluição com adição de alumínio comercialmente puro.

Quando ligas recicladas são utilizadas na produção de peças em moldes de areia ou em coquilha, os teores de ferro são mais elevados, da ordem de 0,4 e 0,6% em peso. Nestas ligas existe a necessidade comercial de contrabalançar os benefícios de redução de custo da matéria prima com uma perda aceitável da compatibilidade de processo e das propriedades mecânicas finais (J.A. TAYLOR, p. 19-33, 2012).

Como o ferro tem baixo limite de solubilidade no alumínio sólido a 655°C (0,03% em peso), o excedente a este valor formará compostos intermetálicos com o alumínio e o silício.

Destes compostos, o mais comum nas ligas de alumínio-silício é a fase β -Al₅FeSi, cuja morfologia em plaquetas interrompe a continuidade da matriz, tornando se locais preferenciais para nucleação e crescimento de trincas.

Além disso, durante o processo de solidificação das peças, restringem o fluxo do líquido interdendrítico, dificultando a alimentação destas regiões e contribuindo para a formação de micro porosidades, principalmente em componentes fundidos por gravidade (J. Y. HWANG, H. D. DOTY, M. J. KAUFMAN, p. 496-504, 2008).

Segundo (MOHAMED, A. M. 2009, p. 2457-2469) os compostos comuns em ligas comerciais multicomponentes são as fases β -Al₅FeSi e α -Al₁₅(Fe, Mn)₃Si₂. A fase intermetálica β -Al₅FeSi se forma nas ligas comerciais como finas plaquetas, altamente facetadas.

Por conta desta morfologia atuam como eficientes concentradores de tensões, o que reduz significativamente a ductilidade e a tenacidade à fratura da liga.

O componente intermetálico α -Al₁₅(Fe, Mn)₃Si₂, pode apresentar morfologia poligonal, quando sua precipitação ocorre a partir de uma reação primária, ou pode apresentar morfologia do tipo “escrita-chinesa”, quando se forma a partir de uma reação pós-dendrítica.

Segundo (Makhlouf, M.M.,2002 p. 5-18) a formação pós-dendrítica da fase α -Al (Fe, Mn) Si tem sido bastante discutida na literatura, porém, poucos trabalhos têm tratado da formação-primária do composto intermetálico e sua influência nas propriedades mecânicas das ligas de alumínio.

1.1 Objetivo

Demonstrar através dessa pesquisa, quais os danos causados pelo efeito do ferro nas ligas de alumínio, escolhemos a liga SAE-A356, pela relevância do produto, sendo a liga mais usada pelas fundições pra se fundir rodas de liga leve, Com isso fundiremos seis corpos de prova com teores de ferro diferentes um corpo de prova contendo 0,20% máx. que é a condição normal das ligas pra se fundir rodas de liga leve, e outra com à adição do ferro a teor de 0,60% simulando à contaminação da liga, com à obtenção dos corpos de prova faremos o análise da composição química, análise metalográfica e ensaio de tração, e através desses teste observaremos os resultados obtidos, e os danos causados a sua microestrutura e propriedades mecânicas da liga de alumínio A-356.

Objetivo do trabalho é de ajudar a melhorar os processos de fundições a minimizar os impactos sofridos com a contaminação do ferro, na sua microestrutura e propriedades mecânicas, tentando gerar melhores resultados nos processos de peças fundidas.

1.2 Justificativa

Há uma enorme busca por soluções dos contaminantes das ligas fundidas de alumínio, um desses elemento é o ferro, que em certos processos de fundição é altamente fragilizante para sua microestrutura e propriedades mecânicas.

Venho através dessa literatura aborda, de uma maneira geral à influência do elemento químico ferro, em peças usadas pela indústria automotiva.

Peças de alta relevância no setor automotivo pela criticidade de segurança que são exigidas dos órgãos competentes.

Com isso no desenvolvimento do trabalho pretende utilizar equipamentos laboratoriais para se fazer ensaios de tração, espectrometria óptica, varredura microscópica se tornou inevitável devido à complexidade envolvida no projeto.

Na elaboração do trabalho utilizaremos estas informações no esclarecimento de características das propriedades mecânicas e dos ensaios realizados.

Este exercício de comparação entre estes materiais para uma determinada aplicação possibilitará a melhora nos processos de fundição de rodas de ligas leves.

Utilizaremos neste trabalho comparativo os seguintes materiais: liga de alumínio A-356, cavacos de ferro pra adição na liga, que nos proporcionam diferentes resultados em propriedade mecânica, risco de contaminação do banho (criação do óxido de ferro).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1- Ligas Metálicas

Os metais e as ligas têm diversas propriedades tecnicamente úteis, propriedades estas que encontram uma vasta aplicação em projetos industriais.

O ferro e suas ligas (principalmente o aço) contribuem com cerca de 90% da produção mundial de metais (SMITH, 1998), fundamentalmente devido à combinação de uma boa resistência, tenacidade e ductilidade com o preço relativamente baixo.

Cada metal tem propriedades especiais para determinadas aplicações na engenharia industrial.

As ligas a base de ferro são denominadas de ligas ferrosas e as ligas a base de outros metais são designadas por ligas não ferrosas.

Os metais e suas ligas ferrosas são consumidos em quantidades extraordinariamente grandes, pois eles possuem uma enorme variedade de propriedades mecânicas, podem ser fabricados com relativa facilidade, e são econômicos de serem produzidos.

Entretanto, eles possuem algumas limitações bem definidas como densidade relativamente alta, condutividade elétrica comparativamente baixa e suscetibilidade inerente a corrosão em alguns ambientes usuais.

Assim sendo, para muitas aplicações torna-se vantajoso ou até mesmo necessário utilização de ligas não ferrosas que possuam combinações de propriedades mais apropriadas (CALLISTER, 2002).

2.2- Alumínio

O alumínio é um metal leve, macio e resistente. Possui um aspecto cinza prateado e fosco, devido à fina camada de óxidos que se forma rapidamente quando exposto ao ar. O alumínio não é tóxico como metal, não magnético, e não cria faíscas quando exposto a atrito. O alumínio puro possui tensão de cerca de 19 megapascal (MPa) e 400 MPa se inserido dentro de uma liga. A sua densidade é aproximadamente de um terço do aço ou cobre.

É muito maleável, muito dúctil, apto para a mecanização e fundição, além de ter uma excelente resistência à corrosão e durabilidade devido à camada protetora de óxido. É o segundo metal mais maleável, sendo o primeiro o ouro, e o sexto mais dúctil.

<https://wikipedia.org>

Algumas propriedades do alumínio:

- Excelente condutor de calor.
- Resistência à corrosão
- Baixa densidade
- Condutor de corrente elétrica
- Possui baixo ponto de fusão

Na indústria, é usado para fabricar latas, é usado em tintas na forma de pó de alumínio, por ser um bom condutor de eletricidade é usado em cabos suspensos. Sua leveza, resistência à corrosão e baixo ponto de fusão, lhe conferem uma multiplicidade de aplicações, especialmente na aeronáutica. Considerando a quantidade e o valor do metal empregado, o uso do alumínio excede o de qualquer outro metal, exceto o aço. É um material importante em múltiplas atividades econômicas.

Outras utilizações do alumínio são:

- Embalagens como papel de alumínio, latas e outras.
- Usado como material estrutural em aviões, barcos, automóveis, tanques, blindagens e outros.
- Em janelas, portas, divisórias, grades e outros.
- Utensílios de cozinha, ferramentas e outros.
- Transmissão elétrica.

<https://mundoeducacao.uol.com.br> (publicado por Lilia Alves de Souza, acessado 05-06-21).

As combinações exclusivas de propriedades fornecidas pelo alumínio e suas ligas fazem com que o alumínio seja um dos materiais mais versáteis, econômicos e atraentes para uma ampla gama de aplicações. A baixa densidade ($2,7 \text{ g/cm}^3$) aliada à alta resistência mecânica de determinadas ligas de alumínio (podendo ser superior à do aço estrutural) permite o projeto e construção de estruturas e peças leves e resistentes.

Segundo Gruzleski e Closset (1990) além da baixa densidade, as ligas de alumínio possuem outras vantagens, como temperaturas de fusão relativamente baixas, baixa solubilidade de gás (com exceção do hidrogênio), boa usinabilidade e acabamento superficial, boa resistência à corrosão e boa condutividade elétrica e térmica. Em adição, Davis (2001) destaca a facilidade com que o alumínio pode ser fabricado nas mais diferentes formas, podendo ser moldado em diferentes métodos de fundição, e assim competindo de maneira bem-sucedida com materiais mais baratos que exigem maior trabalhabilidade na moldagem.

2.3 Ligas de Alumínio

O alumínio fundido dissolve outros metais e substâncias metalóides como o silício (que atua como metal).

Quando o alumínio se resfria e se solidifica, alguns dos constituintes da liga podem ser retidos em solução sólida. Isto faz com que a estrutura atômica do metal se torne mais rígida. Os átomos podem ser visualizados como sendo arranjados em uma rede cristalina regular formando moléculas de tamanhos diferentes daqueles do elemento de liga principal. A principal função das ligas de alumínio é aumentar a resistência mecânica sem prejudicar as outras propriedades. Assim, novas ligas têm sido desenvolvidas combinando as propriedades adequadas a aplicações específicas.

O metal quente pode manter mais elementos de liga em solução sólida do que quando frio. Conseqüentemente, quando resfriado, ele tende a precipitar o excesso dos elementos de liga da solução. Este precipitado pode ser na forma de partículas duras, consistindo de compostos intermetálicos, tais como: CuAl_2 ou Mg_2Si . Estes agregados de átomos metálicos tornam a rede cristalina ainda mais rígida e endurecem a liga.

A descoberta do “envelhecimento” das ligas que contém magnésio e silício conduziu ao desenvolvimento das principais ligas estruturais utilizadas hoje na engenharia. Este foi um trabalho pioneiro no campo das ligas de alumínio-magnésio, amplamente utilizadas atualmente na indústria naval.

Outro importante emprego do alumínio é sua utilização nas ligas de fundição, que permitem um maior aproveitamento das sucatas de aviões.

<https://abal.org.br/>

As ligas são utilizadas para a fundição em alumínio para melhorar suas características de fundição. Entre elas consta a fluidez, a resistência química, a condutividade e a resistência à tração. As ligas possuem forma de lingote, e o processo de fundição ligas de alumínio é reconhecido por sua eficiência e economia em relação a preço, o que constitui uma relação custo -benefício muito positiva. Na fundição ligas de alumínio, existem diversas ligas de alumínio desenvolvidas de acordo com normas padronizadas por entidades internacionais para melhorar suas características de fundição e aplicação final da peça.

Entre as características dos elementos determinantes em cada liga de alumínio a serem empregadas na fundição ligas de alumínio, podem conferir propriedades como a fluidez, resistência a corrosão, condutividade, propriedades mecânicas e estanqueidade.

As ligas fornecidas pelos transformadores para uma fundição ligas de alumínio podem ser através de alumínio primário (processado pelo minério da bauxita ou reciclagem de latinhas), ou alumínio secundário (provenientes de material reciclado ou sobras como latas, estamparia, painéis, chaparia, perfilados e peças automotivas).

2.4 A importância das ligas de alumínio

A fundição ligas de alumínio tem entre suas funções atender o amplo mercado industrial que necessita de peças fundidas e usinadas em ligas de alumínio. Em meio à ampla gama de clientes do setor, constam as seguintes ramificações industriais: aeroespacial, naval, mecânica, automobilística, elétrica, de energia, construtoras civis, do setor alimentício, de mineração e ferroviário.

<http://www.fremar.com.br/fundicao-ligas-aluminio.html>.

2.4.1- Ligas do grupo 1000 (1050/1100/1200)

As ligas do grupo 1000 são ligas que têm como características a alta resistência à corrosão devido ao seu alto nível de alumínio em sua composição. São muito indicadas para sofrerem anodização. Têm baixa dureza e são maleáveis, de modo a serem muito usadas em estamparias e demais processos

onde se exige conformabilidade. Estas ligas apresentam uma dureza que varia entre 20 HB e 28 HB.

Estas ligas podem ser fornecidas em chapas ou bobinas.

Exemplos de aplicação:

- Painéis e Utensílios domésticos.
- Peças que necessitam ser estampadas.
- Luminárias.
- Tubos tipo bisnaga e aerossol.
- Indústrias de haletados para radiadores.
- Carrocerias de furgões.

Tabela 1: Composição da liga 1050

Elemento	Silício (Si)	Ferro (Fe)	Cobre (Cu)	Manganês (Mn)	Magnésio (Mg)	Cromo (Cr)	Zinco (Zn)	Titânio (Ti)	Outros	Alumínio (Al)
Qntd. (%)	0,25	0,40	0,05	0,05	0,05	-	0,05	0,03	0,03	99,5

2.4.2 - Ligas do grupo 3000 (3003/3104/3105):

As ligas do grupo 3000 são ligas que têm como características boa quantidade de manganês em sua composição, o que dá a liga boa formabilidade e resistências mecânicas moderadas. Estas ligas, que podem ser fornecidas em chapas lisas, bobinas ou chapas corrugadas (xadrez), têm durezas que variam de 28 HB no estado “O” até 55 HB com o encruamento de máxima dureza.

Exemplos de Aplicação:

- Placas de veículos
- Silos
- Tanques para indústria química
- Placas de trocadores de calor
- Carrocerias de ônibus

Tabela 2: Composição da liga 3105.

Elemento	Silício (Si)	Ferro (Fe)	Cobre (Cu)	Manganês (Mn)	Magnésio (Mg)	Cromo (Cr)	Zinco (Zn)	Titânio (Ti)	Outros	Alumínio (Al)
Qntd. (%)	0,60	0,70	0,30	0,30 - 0,80	0,20 - 0,80	0,20	0,40	0,10	0,15	93,25

2.4.3- Ligas do grupo 5000 (5052/5086/5083/5754)

As ligas do grupo 5000 são ligas que têm como características boa quantidade magnésio, excelente soldabilidade e alta resistência à corrosão, também têm bom desempenho em processos de anodização e mesmo não sendo uma liga que facilita a usinabilidade é amplamente aplicada onde não se têm grandes restrições de projeto. Estas ligas, que podem ser fornecidas em chapas lisas, bobinas ou chapas corrugadas (xadrez), têm durezas que variam de 47 HB no estado “O” até 77 HB com encruamento de máxima dureza

Exemplos de Aplicação:

- Barcos e cascos
- Carrocerias de ônibus
- Tanques de combustível
- Estruturas soldadas
- Recipientes de alta pressão
- Implementos agrícolas e rodoviário

Tabela 3: Composição da liga 5052

Elemento	Silício (Si)	Ferro (Fe)	Cobre (Cu)	Manganês (Mn)	Magnésio (Mg)	Cromo (Cr)	Zinco (Zn)	Titânio (Ti)	Outros	Alumínio (Al)
Qntd. (%)	0,25	0,40	0,10	0,10	2,20-2,80	0,15-0,35	0,10	-	0,15	93,75

2.4.4- Ligas do grupo 6000 (6082/6061)

As ligas do grupo 6000 são ligas que têm como características grandes quantidades de magnésio e silício em sua composição. São ligas que têm boa aceitação de anodização e uma usinabilidade muito boa em comparação com as ligas já estudadas.

As aplicações mecânicas destas ligas já passam a ser mais técnicas e onde se exige uma resistência mecânica maior. Um exemplo disso é o limite de escoamento que, nas ligas do grupo 5000, gira em torno de 80 MPa, e já nas ligas como a 6082-T6, esse valor chega aos 240 MPa.

Além destas aplicações, esta liga é muito utilizada para moldes dos mais variados processos. Essas ligas são geralmente fornecidas em blocos ou vergalhões de variados diâmetros. Suas durezas oscilam entre 90 HB e 105 HB.

Essas ligas são geralmente fornecidas em blocos ou vergalhões de variados diâmetros. Suas durezas oscilam entre 90 HB e 105 HB.

Exemplos de aplicação

- Moldes de média e alta produtividade
- Estruturas, construção naval, veículos, indústria moveleira
- Rebites, vagões e oleodutos

Tabela 4: Composição da liga 6082

Elemento	Silício (Si)	Ferro (Fe)	Cobre (Cu)	Manganês (Mn)	Magnésio (Mg)	Cromo (Cr)	Zinco (Zn)	Titânio (Ti)	Outros	Alumínio (Al)
Qntd. (%)	0,70-1,30	0,50	0,10	0,40-0,10	0,60-1,20	0,25	0,20	-	0,25	95,20

2.4.5- Ligas do grupo 7000 (7021/c-330r/7475/7075):

As ligas do grupo 7000 são ligas que têm como características grandes quantidades de magnésio, cobre e zinco em suas composições. São ligas que atingem altíssimas durezas e refinadas resistências mecânicas. Seus limites de escoamento e de resistência à tração são notoriamente mais altos que os das ligas dos grupos 5000, por exemplo.

Estas ligas são geralmente comercializadas em chapas (7075), blocos (7075 e 7021). As durezas variam de 110 HB, nas ligas mais primárias como 7021 à 160 HB em ligas mais refinadas como a 7075-T6, por exemplo. Tabela 6: Composição da liga 7075. Estes materiais tem excelente usinabilidade, porém não se comporta bem aos sofrer processos de solda ou anodização. Suas aplicações são muito variadas, mas sempre tendem a uma utilização em um campo onde o material sofrerá desgaste e onde exista alto risco, como carros de corrida, ou aviões.

Tabela 5: Composição da liga 7075.

Elemento	Silício (Si)	Ferro (Fe)	Cobre (Cu)	Manganês (Mn)	Magnésio (Mg)	Cromo (Cr)	Zinco (Zn)	Titânio (Ti)	Outros	Alumínio (Al)
Qntd. (%)	0,40	0,50	1,20-2,00	0,30	2,10-2,90	0,18-0,28	5,10-6,10	-	0,30	87,22

2.4.6- Ligas do grupo 8000 (8006, 8011, 8017):

A série 8xxx é o grupo de alumínio onde o Ferro e o níquel são usados para aumentar a resistência sem perder a condutividade elétrica significativamente, característica esta das ligas condutoras como 8017.

Exemplos de aplicação: alertas para evaporadores (indústria de refrigeração)

Indústria de embalagens: farmacêuticos, alimentícios, flexíveis em geral

Tubos helicoidais.

Tabela 6: Composição da liga 8006.

Elemento	Silício (Si)	Ferro (Fe)	Cobre (Cu)	Manganês (Mn)	Magnésio (Mg)	Cromo (Cr)	Zinco (Zn)	Titânio (Ti)	Outros	Alumínio (Al)
Qntd. (%)	0,40	1,00-2,00	0,30	0,30-1,00	0,10	-	0,10	-	0,05	Restante

<https://metalthaga.com.br/ligas-de-aluminio/>

2.5 Propriedades Mecânicas das Ligas de Alumínio

As propriedades mecânicas são determinadas por ensaios rotineiros de amostras selecionadas como sendo representativas do produto. Estes ensaios mecânicos são normalmente destrutivos de modo que não devem ser efetuados em produtos acabados, pois alteram suas condições de funcionalidade.

Obtém-se corpos-de-prova de amostras que tenham sido elaboradas do mesmo modo que o produto, exceto no caso de peças fundidas e forjadas. Os ensaios

de peças fundidas são feitos em corpos-de-prova do mesmo vazamento do metal da peça fundida e elaborados ao mesmo tempo. Com as peças forjadas, os ensaios, geralmente, são feitos em pedaços cortados do mesmo metal da peça.

Os valores das propriedades mecânicas podem dividir-se em dois grupos:

Valores garantidos: parâmetros mínimos estabelecidos pelas especificações.

Valores típicos: obtidos por meio de dados estatísticos propiciados por ensaios rotineiros, que garantem que o material obedece às especificações:

Limite de Resistência à Tração:

É a máxima tensão que o material resiste antes de haver sua ruptura. Calcula-se dividindo a carga máxima (em quilogramas) aplicada durante o ensaio, pela seção transversal em milímetros quadrados do corpo-de-prova. Para o alumínio puro recozido, essa razão é de aproximadamente 48MPa (4,9 kg/mm²). O valor aumenta em função da liga, do trabalho a frio e do tratamento térmico (quando possível).

Limite de Escoamento:

Consiste na tensão em que o material começa a deformar-se plasticamente e que para o alumínio é de 0,2% do comprimento original medido em um corpo-de-prova normal.

É importante definir este grau de deformação permanente porque as ligas de alumínio não possuem limite de escoamento tão pronunciado como a maioria dos aços. O limite do alumínio puro é de aproximadamente 12,7 Mpa (1,3 kg/mm²).

Alongamento:

O alongamento é expresso em porcentagem relativamente ao comprimento original medido em um corpo-de-prova normal e é calculado pela diferença entre os pontos de referência, antes e depois do ensaio de tração. Esse alongamento indica a ductilidade do metal ou da liga. Quanto mais fino o corpo-de-prova, menor será o alongamento e vice-versa.

Dureza:

Define-se como a medida da resistência de um metal à penetração. Existem várias maneiras de se determinar a dureza de um material. Para os metais, os mais comuns são os métodos de Brinell, Vickers e Rockwell. Não existe uma relação direta entre o valor da dureza e as propriedades mecânicas das várias ligas de alumínio.

Os elementos de liga aumentam em muita sua resistência com o alumínio, assim como o tratamento térmico e o endurecimento pelo trabalho a frio. Entretanto a dureza é significativamente mais baixa do que a maioria dos aços.

Módulo de Elasticidade (Young):

O módulo de elasticidade do alumínio do alumínio é de 7030 kg/mm². A adição de outros materiais nas ligas não altera esse valor consideravelmente, que pode chegar a até 7500 kg/mm². Portanto, o índice do alumínio representa um terço do módulo de elasticidade do aço. Essa propriedade dá ao alumínio a vantagem de dar às estruturas de alumínio uma elevada capacidade de amortecer golpes e reduzir as tensões produzidas pela variação da temperatura.

Tensão de Fadiga:

Quando uma tensão oscilante é aplicada por um certo número de vezes sobre um mesmo material, mesmo que os impactos tenham força inferior ao seu limite de resistência à tração, é previsível uma falha por fadiga.

Em muitas ligas de alumínio não há um limite inferior de tensão abaixo do qual a fadiga nunca possa ocorrer, mas quanto menor a tensão, maior o número de ciclos necessários para produzir a falha. No alumínio, em testes normais, o limite de resistência chega a 50 milhões de inversão de tensão e pode variar de 25% a 50% da tensão de ruptura, conforme a liga.

Temperaturas Elevadas:

O alumínio puro funde a 660°C e várias ligas possuem um ponto de fusão inferior a esse.

O metal puro e muitas ligas perdem um pouco a sua resistência, ficando sujeitas a uma lenta deformação plástica, chamada de fluência, se permanecer sob tensão por longos períodos em temperaturas acima de 200°C. Por outro lado, ligas feitas para serviços em altas temperaturas, como às usadas em pistões, retêm suas propriedades adequadamente, funcionando satisfatoriamente dentro da faixa de temperatura de trabalho requerida.

Temperaturas Baixas:

Quando exposto a temperaturas abaixo de zero, o alumínio não se torna frágil. Sua resistência aumenta sem perder a ductilidade.

Esta é a característica que leva uma liga de AlMg ser escolhida para a construção de tanques soldados para armazenamento de gás metano liquefeito, em temperaturas de -160°C . <https://abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/propriedades-mecanicas/#accordion8>.

2.6 Metalografia das ligas de fundição de alumínio

A crescente inovação tecnológica e demanda por materiais com melhores propriedades impulsiona pesquisas sobre novos materiais e novas ligas. Para tanto, foram desenvolvidas as ligas de alumínio, dentre elas a A-356 T6, possuindo diversas aplicações como na indústria aeronáutica, militar, máquinas e equipamentos, em moldes para injeção de plástico e em estruturas. Para estudar e compreender propriedades, características e principalmente a microestrutura do material, a preparação metalográfica é essencial. Este trabalho apresenta novas metodologias para realizar a metalografia de corpo de prova da liga A-356 T6.

<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/119367>.

Ligas de alumínio de fundição são utilizadas para a fabricação de uma série de componentes para a indústria automotiva, náutica e aeronáutica. São adequadas a quase todos os processos convencionais e não convencionais de fundição (incluindo os processos near net shape como: die casting, squeeze casting, reofundição e investment casting).

Entre as ligas que apresentam as melhores características de fundição encontram-se as da série A 3XX.X, sendo o silício o constituinte majoritário da série.

O silício, como elemento de liga, promove o aumento da fluidez no estado líquido, através da diminuição da tensão superficial do banho, reduz a ocorrência de trinca à quente e diminui a contração térmica, motivos pelos quais a maioria das peças fundidas em alumínio pertencem à série AA 3XX.X. <https://www.aquecimentoindustrial.com.br/metalografia-de-ligas-de-aluminio-de-fundicao/>.

2.7 Microestrutura das Ligas de Alumínio

A microestrutura bruta de solidificação das ligas binárias Al-Si é formada por dendritas Al-a, partículas primárias equiaxiais de silício (tipo plaquetas), agulhas pré-eutéticas Al_5FeSi e script chineses formada com $Al_{15}(Mn, Fe)_3Si_2$. As agulhas, assim como as plaquetas de silício de maior tamanho, diminuem drasticamente a ductilidade do material.

Agentes modificadores como sódio, estrôncio ou antimônio são adicionados ao banho entre 0,005 e 0,02% em peso, para promover alterações no crescimento das plaquetas de silício, que passam a exibir uma morfologia mais refinada, o que contribui para o aumento da ductilidade das ligas Al-Si.

Além do silício, outros elementos como o cobre e o magnésio podem ser adicionados para aprimorar algumas propriedades tecnológicas e acrescentar outras as ligas da série AA 3XX.X.

O magnésio torna as ligas alumínio-silício endurecíveis por precipitação com o tratamento térmico de solubilização seguido de envelhecimento.

2.8 Liga de Alumínio A-356

A liga A365 é uma liga composta da série 3xx.x, de ligas compostas por Al-Si com adições de Cu e ou Mg. As ligas desta série são amplamente utilizadas em peças fundidas em areia e moldes permanentes. Possuem boa fundibilidade e podem ser tratadas termicamente, permitindo a obtenção de elevados níveis de resistência com moderada ductilidade.

A especificação de composto química da Liga A356, segunda a norma NBR 6834, é apresentada a seguir na tabela abaixo:

Tabela 1: Especificação de composição química da liga A356, segundo a norma NBR 6834 (% em peso).

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
6,5-7,5	0,20 Máx.	0,20 Máx.	0,10 Máx.	0,25-0,45	0,10 Máx.	0,20 Máx.	Balanço

As principais propriedades mecânicas da liga A365.0, em diversas condições de processamento são apresentadas na Tabela 2, no tópico a seguir.

2.9 Propriedades Mecânicas da Liga A-356

Tabela 2: Propriedades mecânicas da liga A356.0 fundida em areia e molde metálico (coquilha), no estado bruto e após tratamento térmico T6 (6).

Tabela 1: Propriedades Mecânicas Da liga A-356

Ligas	LRT (MPA)	Alongamento (%)	Dureza (HB)
A356.0 areia	157	5	40-70
A356.0 areia T6	205	3	55-85
A356 Coquilha	177	4	40-70
A356 coquilha T6	230	3	65-95

LTR – Limite de Resistência à tração (mínimo recomendado).

Como demonstrado pela tabela 2, as propriedades mecânicas da liga A356.0 podem ser melhoradas por tratamento. Cabe lembrar que as propriedades mecânicas de ligas fundidas, como as do tipo Al-Si-Mg, são determinadas basicamente pela composição química, pelo processamento do metal líquido, pela técnica de fundição e pelo tratamento térmico.

O tratamento térmico destas ligas consiste na solubilização da liga á uma temperatura próxima à do eutético, seguida do resfriamento e envelhecimento. O aumento das propriedades mecânicas da liga A356.0 tem sido atribuído à formação de precipitados do tipo de Mg₂ Si no interior das dendritas primárias durante o envelhecimento, assim como pela mudança.

2.9.1 Microestrutura da liga A-356

Tradicionalmente são utilizados três processos de produção para fabricação de peças fundidas em ligas de alumínio: fundição sob pressão, fundição em coquilha e fundição em moldes de areia. Fundição sob pressão - O processo de produção de peças fundidas de maior utilização é o de fundição sob pressão. Neste processo a liga

de alumínio no estado líquido é injetada a velocidades da ordem de 20 a 60 m/s na cavidade do molde por meio de um pistão hidráulico. Os moldes são feitos de aço refrigerados com água ou óleo e trabalham normalmente em temperaturas da ordem de 200°C. Como os moldes não recebem pinturas de proteção (seria inviável manter uma pintura devido à alta velocidade do jato de metal durante a injeção), as ligas de alumínio devem ser saturadas em ferro para evitar problemas de agarramento das peças fundidas nos moldes. Resumindo, as peças injetadas apresentam uma microestrutura extremamente refinada em função das elevadas velocidades de solidificação impostas pelos moldes a baixas temperaturas. As taxas de resfriamento são da ordem de 50°C/s e promovem microestruturas com SDAS da ordem de 10µm, o que é muito positivo para as propriedades mecânicas das peças fundidas. Com isto, as peças injetadas apresentam níveis de resistência mecânica de 200 a 300 MPa no estado bruto de fundição. Ao mesmo tempo, as elevadas velocidades de injeção do metal líquido promovem uma elevada turbulência durante o preenchimento da cavidade do molde, resultando na geração de uma grande quantidade de inclusões de óxidos e de bolhas de ar preso que prejudicam a sanidade interna da peça. Além disto, para evitar os problemas de colamento ou solda das peças nos moldes (reduzindo a vida útil dos moldes), as ligas injetadas apresentam níveis de ferro da ordem de 0,8 a 1,2%, com grande quantidade de plaquetas de fases ricas em ferro na microestrutura. A presença de inclusões de óxidos, bolhas de ar preso e de partículas duras ricas em ferro na microestrutura das peças injetadas limitam a ductilidade das peças produzidas por este processo, sendo frequente a obtenção de valores de alongamento em torno de 1%. Como o processo de fundição sob pressão apresenta enormes vantagens de produtividade, qualidade superficial, precisão dimensional e elevada resistência mecânica, nas últimas décadas surgiram alguns processos de fundição que procuram contornar o problema de baixa ductilidade das peças injetadas. Os processos especiais de maior aplicação industrial são: a fundição sob pressão a vácuo, a fundição sob pressão com metal no estado semi-sólido e a fundição sob pressão de baixa velocidade de injeção (squeeze casting). Nestes processos é possível produzir peças com elevada sanidade interna, exibindo níveis de alongamento de 5 a 15%. Fundição em coquilha (molde metálico) – Este é o segundo processo de produção mais utilizado para peças fundidas em ligas de alumínio. Originalmente, este processo foi desenvolvido para vazamento do metal líquido por gravidade nos moldes metálicos. Nesta condição de preenchimento, a velocidade do

metal líquido encontra-se entre 200 a 400 cm/s dependendo da altura de queda 26. Considerando-se que a maior velocidade que as ligas de alumínio poderia estar exposta sem absorver os filmes de óxidos em sua superfície é da ordem de 50 cm/s (13), na grande maioria dos casos, com sistemas de canais mal projetados, o preenchimento é turbulento e gera bolhas de ar preso e inclusões de óxidos, que prejudicam a ductilidade final das peças fundidas. Como o projeto de sistemas de canais com cuidados especiais em turbulência não é uma tarefa frequente nas fundições, foram desenvolvidas variantes do processo de fundição por gravidade que controlam mais eficientemente o preenchimento das cavidades - a fundição em coquilha por basculamento e a fundição em coquilha por baixa pressão. Estas variantes permitem a produção de peças sem problemas associados à turbulência do preenchimento, sem a necessidade de projetos elaborados de sistemas de canais. De uma forma geral, as velocidades de preenchimento das cavidades em coquilha são relativamente baixas, é possível utilizar pinturas protetoras dos moldes sem o problema de destacamento da tinta. Com isto, é possível produzir peças fundidas com ligas de elevada pureza (ligas primárias), que apresentam maior ductilidade, exibindo alongamentos da ordem de 4 a 10% nas peças fundidas. Como as velocidades de preenchimento são relativamente baixas, o tempo de vazamento da cavidade é relativamente longo, da ordem de 10 a 30s, dificultando a utilização de moldes refrigerados com água, sem problemas de preenchimento incompleto. Com esta limitação, os moldes normalmente trabalham com temperaturas entre 300 e 450°C, impondo uma velocidade de solidificação às peças da ordem de 10°C/s, o que resulta em SDAS da ordem de 50 μm . Em consequência, as peças fundidas em coquilha apresentam níveis de resistência mecânica da ordem de 150 a 200 MPa. Estes valores podem ser bastante aumentados com o uso posterior de tratamento térmico de endurecimento por precipitação. Fundição em moldes de areia – Este é o processo de produção menos utilizado dentre os tradicionalmente aplicados na indústria. O processo é bastante semelhante ao processo em coquilha, mas por utilizar moldes de areia de baixa condutividade térmica, apresenta velocidades de solidificação muito menores, da ordem de 1 a 2°C/s, elevando os valores de SDAS para níveis em torno de 100 μm . Em consequência, os valores de limite de resistência ficam limitados a 150 MPa e de alongamento a 3%. Outro problema das baixas velocidades de resfriamento é a formação de micro porosidades distribuídas, que limita ainda mais a obtenção de elevados valores de ductilidade nas peças fundidas. Em determinadas aplicações,

como em blocos de motor de elevada complexidade geométrica, este processo pode ser empregado com a utilização de resfriadores metálicos nas regiões críticas.

A Tabela resume as principais características dos processos tradicionais de fundição de ligas de alumínio e das peças produzidas por cada um destes processos, bem como os níveis de propriedades mecânicas típicos. Os valores de limite de resistência e de alongamento típicos de peças fundidas em ligas Al-Si em função dos processos de fundição.

Tabela 03: Principais características dos processos tradicionais de fundição de ligas de alumínio e das peças produzidas por cada um destes processos, bem como os níveis de propriedades mecânicas típicos.

Processos de Fundição	Preenchimento	Alimentação	Velocidade de resfriamento	Limite de Resistência	Sanidade	Ductilidade
Fundição sob pressão	Turbulento	Sob pressão	Muito Alta	Alto 250-200 MPa	Baixa Bolhas de ar preso	Baixa -1% Alto Fe e baixa Sanidade
Coquilha por Gravidade	Exige projeto de canais	Gravidade porosidade de rechupe se houver solidificação direcional	Alta	Alto 150-200 MPA.	Alta	Alta 4-10%
Basculante ou baixa pressão	Controle de processos	Gravidade porosidade de rechupe se houver solidificação direcional	Alta	Alto 150-200 MPA.	Alta	Alta 4-10%
Areia gravidade	Exige projeto de canais	Gravidade porosidade de rechupe se houver solidificação direcional	Baixa	Baixo 130-150 Mpa.	Baixa Microporosidades	Baixa 1-3% Microporosidades Exceto resfriador.

2.9.2 Ligas Al-Si

As ligas do sistema Al-Si, também consideradas não tratáveis termicamente, são muito mais utilizadas como ligas de fundição (série 4XX.X), ou seja, para a fabricação de peças fundidas, como por exemplo, pistões para motores de automóveis e aviões, mas também encontram algumas aplicações como produtos trabalhados, como metais de adição para soldagem (caso da liga 4043), principalmente, embora também possam ser usados para a fabricação de pistões forjados e também em algumas aplicações arquitetônicas .

O amplo uso das ligas Al-Si em aplicações nas quais a qualidade da estrutura resultante da solidificação é tão importante (fundição e soldagem) está relacionado com as características que o seu principal elemento de liga, o silício, confere às ligas de alumínio. Nestas ligas o silício é usado em teores de até 12 ou 13 % e aumenta a fluidez do alumínio líquido permitindo que o mesmo flua melhor através das cavidades do molde de fundição, permitindo a obtenção de produtos com formatos mais complexos. Também propicia a redução da contração durante o resfriamento, reduz a porosidade nas peças fundidas, reduz o coeficiente de expansão térmica e melhora a soldabilidade. Em teores mais elevados dificulta a usinagem. Ao ser combinado com o magnésio torna a liga tratável termicamente. Deve estar preferencialmente presente sob a forma de cristais arredondados e dispersos na liga de alumínio, o que pode ser obtido pelo tratamento de "modificação", que consiste na adição de um pequeno teor de sódio às ligas Al-Si, alterando a microestrutura da liga favoravelmente sob o ponto de vista das propriedades mecânicas, já que a microestrutura de placas angulares de silício provocariam concentração de tensões, prejudicando as propriedades mecânicas da mesma. O tratamento

térmico (recozimento) permite o coalescimento e a esferoidização do silício. A dureza das partículas de silício promove o aumento da resistência ao desgaste destas ligas. O sistema Al-Si, com solubilidade sólida limitada em ambas as extremidades, forma um eutético simples à temperatura de 580 °C para um teor de 12,5 % de silício.

O ferro, normalmente presente nas ligas de alumínio como impureza, se estiver presente em teores elevados (acima de 1,5 %), pode levar à formação de partículas grosseiras de fase $AlFeSi$, prejudicando as propriedades mecânicas desses materiais.

Entretanto, em teores mais baixos o ferro minimiza a tendência da liga Al-Si soldar-se ao molde metálico na fundição em molde permanente (coquilhas e outros tipos). As duas fases ternárias AlFeSi que podem estar em equilíbrio com o alumínio são a fase alfa ($\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$) e beta (Al_5FeSi). Outras fases, menos comuns, são a delta (Al_4FeSi), que aparece em ligas de alto teor de silício, e a gama (Al_3FeSi), que se forma em ligas com alto teor de ferro e de silício. A fase α aparece geralmente sob a forma de "escrita chinesa" ("Chinese script") ou como partículas arredondadas muito pequenas, sendo mais favorável às propriedades mecânicas no último caso. A fase β surge como plaquetas ou agulhas finas e compridas, sendo em geral mais nocivas às propriedades mecânicas das ligas de alumínio. Estas fases também podem surgir em outros tipos de liga de alumínio, desde que os teores de ferro e silício não sejam muito baixos. Como a maioria das ligas comerciais são produzidas em condições de não equilíbrio termodinâmico, é frequente o aparecimento de outras fases como Al_6Fe , Al_3Fe , Al_6FeSi e Al_4FeSi_2 . O tratamento térmico, ao proporcionar a difusão dos átomos, permite modificar a forma dessas partículas, o que inviabiliza sua identificação através da morfologia somente.

O cobre também pode ser adicionado às ligas do sistema Al-Si, dando origem ao subgrupo Al-Si-Cu. Sua principal virtude, como nas ligas Al-Cu, é aumentar a resistência mecânica da liga, tanto antes como após tratamento térmico. Sendo assim, o cobre torna as ligas Al-Si-Cu tratáveis termicamente, ou seja, passíveis de endurecimento mediante tratamento térmico de envelhecimento (endurecimento por precipitação).

O cobre é adicionado em teores entre 3 e 11 %, que permitem que este elemento esteja total ou parcialmente solúvel no alumínio em temperaturas logo abaixo do ponto de fusão. Do ponto de vista do processo de fundição, favorece a diminuição da contração interna durante o resfriamento e a melhoria da usinabilidade das peças fundidas.

Entretanto, ao contrário do silício, acarreta fragilidade a quente e menor fluidez, além de reduzir a resistência à corrosão.

A fragilidade a quente é maior no limite de solubilidade sólida, quando a quantidade de eutético na liga é mínima. No sistema Al-Si-Cu não se formam fases ternárias, as fases em equilíbrio são Al_2Cu e silício. Numa liga de alumínio a presença de um segundo elemento de liga normalmente reduz a solubilidade sólida do primeiro

e vice-versa. A solidificação em condições de não equilíbrio praticamente não altera as características de cada fase presente na liga.

O magnésio, ao ser adicionado às ligas Al-Si, torna as mesmas termicamente tratáveis, devido à formação da fase Mg_2Si , que é a responsável pelo endurecimento das ligas Al-Mg-Si (série 6XXX). Entretanto, no caso das ligas Al-Si o teor de magnésio não poder ser muito elevado a ponto de dificultar a fundição, devido à formação da borra (oxidação excessiva do banho). Por outro lado, o magnésio melhora a resistência à corrosão e a usinabilidade.

O titânio é adicionado em pequenos teores (de 0,05 a 0,20 %) como refinador de grão, tendo como consequência o aumento da resistência à tração e da ductilidade, reduzindo porém a condutividade térmica.

O boro é empregado em teores ainda mais baixos (até 0,01%), juntamente com o titânio, tem por efeito reforçar o efeito deste e torná-lo mais duradouro em caso de refusões.

Outros elementos podem ser adicionados de modo complementar para a obtenção de efeitos específicos. É o caso do ferro, manganês, cromo, níquel e zinco.

O ferro, por exemplo, é adicionado para reduzir a contração, mas também ajuda a refinar o grão e favorece a extração das peças fundidas ao molde, diminuindo o agarramento. Entretanto, seu teor deve ser controlado, geralmente entre 0,15 a 1,2 %, pois acima desta faixa causa sérios prejuízos às propriedades mecânicas.

O manganês age como refinador de grão e permite reduzir a contração durante o resfriamento/solidificação, além de proporcionar melhoria na resistência à tração em alta temperatura. Entretanto, seu teor não pode ser muito elevado, já que nesse caso, juntamente com o ferro, leva à formação de partículas grosseiras que causam perda de ductilidade.

O cromo é utilizado como refinador de grão, ao ser adicionado juntamente como o titânio. Também é usado para diminuir a incidência de trincas resultantes de tensões e de corrosão sob tensão, além de proporcionar aumento de resistência mecânica em temperaturas elevadas.

O níquel permite melhorar a estabilidade dimensional e a resistência mecânica em temperaturas elevadas, sendo portanto muito usado na fabricação de pistões para

motores. Entretanto, um teor de níquel da ordem de 5 % causa elevada contração. Sendo assim, comercialmente utiliza-se o níquel em teores que vão de 0,5 a 3 %.

O zinco, especialmente quando adicionado conjuntamente com o magnésio, resulta em maior resistência ao impacto, alta resistência à tração e ótima ductilidade. Em ligas que contêm cobre pequenos teores de zinco proporcionam melhor usinabilidade. Contudo, altos teores de zinco apresentam inconvenientes tais como a fragilidade a quente elevada contração.

<https://www.infomet.com.br/site/metais-e-ligas-conteudo-ler.php>

2.9.3 Processos de Fundição

A fundição sob baixa pressão é um processo de manufatura que ocorre, mediante a transferência do metal líquido para o interior de um molde metálico, sob a ação de injetar ar dentro do forno, que empurra o metal através do tubo conectado com o molde, preenchendo assim suas cavidades. As peças obtidas através deste processo possuem altas características mecânicas e tolerâncias dimensionais restritas.

Durante o processo de fundição sob baixa pressão o molde é preenchido e o metal solidificado mediante baixos níveis de pressão, que podem variar de 0,2 e 1 bar. O metal, na maioria das vezes, fica em um forno, abaixo do molde sendo que, esse metal é injetado no molde diretamente do forno. As peças extraídas da fundição sob baixa pressão costumam apresentar boas propriedades mecânicas na condição bruta ou após tratamento térmico, produtos como, cabeçotes de motor, rodas de liga leve e carcaças são os mais produzidos através deste processo.

<https://www.modelacao-universal.com.br/fundicao-baixa-pressao>

No processo de fundição sob pressão, a presença do ferro em teores da ordem de 0,8 a 1,2% se faz necessária para diminuir a afinidade do alumínio com o ferro presente na superfície do molde. Em consequência disto, fica reduzida a possibilidade de ocorrer o efeito de aderência da peça sobre a superfície do molde, impedindo a formação uma fase intermetálica, diminuindo o ataque do alumínio líquido à matriz e aumentando a vida útil do ferramental (Q. HAN e S. VISWANATHAN, 2003).

No processo de fundição de baixa pressão, a presença do ferro em teores da ordem de 0,30 a 0,60% se faz prejudicial ao processo, aumentando o gradiente de atrito do alumínio com a superfície do molde. Em consequência disto, aumentando defeitos de aderência da peça sobre superfície do molde, ocorrendo problemas de agarramento e metalizações no visual do fundido. Com isso causando a formação de uma fase intermetálica, aumentando o ataque do alumínio líquido à matriz e diminuindo a vida útil do ferramental (Q. HAN e S. VISWANATHAN, 2003).

O alumínio é um dos metais mais versáteis dos comumente usados na indústria de fundição. Uma das mais prejudiciais impurezas das ligas de alumínio é o ferro, o qual junto com o alumínio e outros elementos de liga comuns formam fases intermediárias que podem ser prejudiciais ao processo e às propriedades do produto final. Nas indústrias secundárias de alumínio, é grande a possibilidade de contaminação do banho por ferro devido a uma volumosa sucata de aço existente no mercado, que, na coleta, vem junto com a sucata de alumínio, além da já existente sucata de alumínio com altos teores de ferro. Foram estudadas composições com base na liga A356.

Na produção de fundidos com boas propriedades mecânicas pelos processos de gravidade em molde metálico e de areia, uma das impurezas mais prejudiciais é o ferro que junto com o alumínio e outros elementos de liga comum são impurezas, tais como Mn, Cu, Mg e Si, formam fases intermediárias que são prejudiciais às propriedades do produto final.

Durante a solidificação das ligas de alumínio, usadas em fundição por gravidade, normalmente a fase primária formada é o alumínio, ficando os demais constituintes da liga dispersos na região remanescente entre os grãos da fase primária. A contaminação com ferro pode provocar a mudança na sequência de solidificação, surgindo fases primárias contendo ferro antes da cristalização dos grãos de alumínio. Essas fases contendo ferro, por se formarem antes do alumínio, têm possibilidade de crescer livremente gerando cristais grosseiros na fase líquida. As ligas fundidas, normalmente, baseiam-se no fato de o silício diminuir a viscosidade do líquido (ou, em outras palavras, aumentar a fluidez), portanto, de uma forma geral, pertencem ao sistema Al-Si. No caso da contaminação como Fe, o sistema que serviria como base de estudo seria o Al-Fe-Si.

Entretanto, para as ligas do sistema Al-Fe-Si, a solubilidade do ferro no líquido ainda seria relativamente alta, mesmo após a remoção dos cristais primários contendo ferro. Assim, é necessário diminuir-se ainda mais o campo de cristalização primária do alumínio e também a solubilidade do ferro no líquido. Esse efeito pode ser conseguido com a adição de Mn, passando-se o sistema do ternário Al-Fe-Si para o quaternário Al-Fe-Mn-Si.

Portanto o refino do ferro seria feito essencialmente através da adição de um elemento de liga, no caso Mn, que altera o processo de solidificação das ligas, favorecendo a precipitação de fases intermediárias contendo Fe e também atuando na diminuição da concentração residual de ferro no líquido para os níveis aceitáveis em fundição sob baixa pressão.

https://www.researchgate.net/publication/26369810_Remocao_de_ferro_do_banho_de_aluminio_de_sucata_por_filtragem.

2.9.4 A influência do elemento químico ferro nas ligas de alumínio

Como o ferro tem baixo limite de solubilidade no alumínio sólido a 655°C (0,03% em peso), o excedente a este valor formará compostos intermetálicos com o alumínio e o silício. Destes compostos, o mais comum nas ligas de alumínio-silício é a fase β -Al₅FeSi, cuja morfologia em plaquetas interrompe a continuidade da matriz, tornando-se locais preferenciais para nucleação e crescimento de trincas. Além disso, durante o processo de solidificação das peças, restringem o fluxo do líquido interdendrítico, dificultando a alimentação destas regiões e contribuindo para a formação de micro porosidades, principalmente em componentes fundidos por gravidade (J. Y. HWANG, H. D. DOTY, M. J. KAUFMAN, p. 496-504, 2008).

Segundo (MOHAMED, A. M. 2009, p. 2457-2469) os compostos comuns em ligas comerciais multicomponentes são as fases β -Al₅FeSi e α -Al₁₅(Fe, Mn)₃Si₂. A fase intermetálica β -Al₅FeSi se forma nas ligas comerciais como finas plaquetas, altamente facetadas. Por conta desta morfologia atuam como eficientes concentradores de tensões, o que reduz significativamente a ductilidade e a tenacidade à fratura da liga.

O componente intermetálico α -Al₁₅(Fe, Mn)₃Si₂, pode apresentar morfologia poligonal, quando sua precipitação ocorre a partir de uma reação primária, ou pode

apresentar morfologia do tipo “escrita-chinesa”, quando se forma a partir de uma reação pós-dendrítica.

Segundo (Makhlouf, M.M.,2002 p. 5-18) a formação pós-dendrítica da fase α -Al (Fe, Mn) Si tem sido bastante discutida na literatura, porém, poucos trabalhos têm tratado da formação-primária do composto intermetálico e sua influência nas propriedades mecânicas das ligas de alumínio.

A presença da fase β -Al₅FeSi causa impacto considerável sobre as propriedades mecânicas. Como esta fase intermetálica apresenta morfologia em plaquetas, característica frágil e pouca interação com a matriz de alumínio, as propriedades mecânicas da liga são comprometidas. A resistência à tração e a ductilidade diminuem na presença deste intermetálico. Durante esforços mecânicos, a matriz de alumínio (fase α) tende a se deformar, induzindo tensões sobre as partículas de fase β -Al₅FeSi que sofrem microfissuras, se descolam da matriz de alumínio ou mesmo por conta de fissuras pré-existentes em função da nucleação do intermetálico sobre o bi-filme de óxidos, dando início ao 0,5, 1,5, 2,5, 3 %. Fe em peso. A área de porosidade em porcentagem com Sr, indica o processo de fratura do material e proporcionando um percurso mais fácil para a propagação das microfissuras. Uma fratura em uma amostra com alto teor de Fe submetida ao ensaio de tração. A fratura se propaga ao longo de uma partícula frágil de β -Al₅FeSi.

3. METODOLOGIA

3.1 Materiais e Métodos

As ligas foram fundidas em um forno de indução (Figura 01) contendo um cadinho de refratário com capacidade de 5kg de vazão, e um cabo prolongador. O forno de indução (Figura 01) e a coquilha metálica que foi feita a vazão dos corpos de prova, foi concebida pelo laboratório de fundição da Etec Trajano Camargo.

Foi utilizado pré-lingotes fundidos da liga ASTM A-356 (Figura 02). Em uma primeira etapa da elaboração dos teste, foram obtidos corpos de prova da liga ASTM A-356, para servir como referência dos estudos.

O espectrômetro usado nesse trabalho para se fazer o análise da composição química, foi disponibilizado pela empresa x que atua na área metalúrgica.

Figura 01: Forno de indução**Figura 02:** pré-lingotes fundidos.

Em seguida foi adicionada a liga de Al-Fe 1,0% com a finalidade de se obter corpos de provas com teores de Fe na ordem de 0,60%, 0,80% e 1,50% em peso.

As ligas fundidas foram feita à escorificação com o escorificante da Alfa Trend A32 para remoção da escória superficial e em seguida modificadas com 200 ppm de estrôncio com adição de Al-10% Sr.

Para a obtenção do pré lingotes fundidos, foi levantada uma quantia pelo grupo no valor de R\$ 50,00, fomos comprar em uma usina de reciclagem.

A modificação visa facilitar a identificação das plaquetas da fase β -Al₅FeSi devido à sua morfologia ser muito parecida com a fase β -Silício. A temperatura de vazamento foi de 760°C.

A coquilha foi pintada com o auxílio de um pincel com uma tinta Dycote 39 (fornecida pela empresa x, e utilizada conforme recomendação do fornecedor) para garantir o preenchimento da cavidade e facilitar a extração do produto, que foi posteriormente pré aquecida em torno de 300°C. Após o resfriamento, os corpos de prova foram identificados e separados do sistema de canais por corte em serra de fita e também remoção das rebarbas.

Com a obtenção dos corpos de prova (Figura 03), com teores de ferro (0,60%,0,80%,1,50%). Foram feitos os cortes dos canais, com uma serra fita da empresa x, que disponibilizou o equipamento.

Figura 03: Corpo de Prova



Figura 04:Corpo Prova Usinado



Foram feitos a usinagem de 6 corpos de prova (Figura 04) pra ensaio de tração em um torno de usinagem disponibilizado pela empresa x.

Foram feitos os ensaios de tração e propriedades mecânicas, no equipamento de tração disponibilizado pela empresa x.

Foram embutidas as amostras (Figura 05) pra se medir a dureza, em uma embutidora (Figura 06) do laboratório da LabTeste, concedido pelo Mestre José Edenil Gomes, proprietário do laboratório de análises técnicos metalúrgicos.

Figura 05: Amostras Dureza**Figura 06: Embutidora.**

4. RESULTADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Resultado de Dureza

Neste ensaio foi realizada medição da dureza dos corpos de prova da liga de alumínio ASTM A-356, com teores de ferro de 0,60%, 0,80%, 1,50%.

Sendo que os corpos de prova 01,02 tem teor de ferro de 0,60%, os corpos de prova 03,04 tem teor de ferro de 0,80%, e os corpos de prova 05,06 tem teor de ferro de 1,50%.


Foram medidas a dureza na escala HRB, com ponta de esfera 5 com carga de 250 kgf. Foi usado um durômetro pra se medir a dureza das amostras, do laboratório da Etec Trajano Camargo. As amostras 01 e 02 são as amostra correspondente ao teor de que equivale 0,60% de Fe na sua composição química. Tendo em vista que foram feitas três medições de dureza, tanto na amostra 01 e 02 pra se tirar uma média equivalente aos valores encontrados.

Como podemos observar no Relatório de Ensaio na tabela 01^a baixo mostra à amostra de corpo de prova (CP1 e CP2), que corresponde ao teor de Fe de 0,60%,

que apresentou diferença da amostra padrão que o teor de Fe, está entre 0,10 e 0,15%.

Como podemos observar na tabela à amostra do corpo de prova (CP3 e CP4), que corresponde ao teor de Fe de 0,80%, apresentou uma dureza com uma pequena relevância comparando com as outras amostras. Como podemos observar na tabela à amostra do corpo de prova (CP5 e CP6), que corresponde ao teor de Fe de 1,50%, apresentou uma dureza com nível abaixo comparando com as outras amostra, nesse resultado podemos observar que à influência do elemento químico Fe influenciando na dureza do material.

Tabela 01: Relatório de Ensaio




LABTESTE
Laboratório Metalúrgico

RELATÓRIO DE ENSAIO
Nº: **0001.06668-21A/AC-DU**

VIA ORIGINAL

Pg.:2/2



Ensaios
NBR ISO/IEC
17025
CRL 0355

RESULTADOS OBTIDOS

1 Ensaio de Dureza:

Local		Dureza média	Incerteza expandida*
CP 1	Núcleo	67 HBW5/250	± 1,9 HB
CP 2		64 HBW5/250	± 8,9 HB
CP 3		69 HBW5/250	± 2,8 HB
CP 4		67 HBW5/250	± 3,0 HB
CP 5		64 HBW5/250	± 1,4 HB
CP 6		62 HBW5/250	± 1,4 HB

HR_ = Dureza Rockwell (escala) HB_ = Dureza Brinell (safera/carga) HV_ = Dureza Vickers (carga)

Realização do Ensaio: Conforme a norma ASTM E10:2018
Condições Ambientais: Temperatura: 22 °C
Local da Realização do ensaio: Laboratório de Ensaio de Dureza do LABTESTE

Instrumentos Utilizados: LT-164-1 - Máquina de Ensaio EMIC - Dureza Brinell >250kgf - Certificado de Calibração RBC Nº 28.575/21
 LT 082-1 - Reticulo Graduado 0 à 10mm (Microscópio Portátil) - Certificado de Calibração RBC Nº 48505-109
 LT 048 - Termohigrômetro Nº 968 - Certificado de Calibração Nº 55191-108


* A incerteza expandida declarada é baseada em uma incerteza padronizada combinada, multiplicada por um fator de abrangência k=2 fornecendo um nível de confiança de aproximadamente 95%.

Data recebimento da amostra: 26/10/2021 **Data final do ensaio:** 04/11/2021


Ensaio Alisson	Revisão Crystian
--------------------------	----------------------------

Data de Emissão, 5 de novembro de 2021

Autorizado por:



Eng. Msc. J. Edenil dos Santos
Diretor Técnico e Gerente da Qualidade



Crystian Ramos
Superintendente Financeiro

4.2 Composição e Análise Química

O corpo de prova de análise química da liga ASTM A-356, para ser usado como padrão de referência, foi disponibilizado pela empresa x.

Essa liga ASTM A-356 é muito usada pelas fundições de rodas de liga leve e bloco de motores, devido a suas boas propriedades mecânicas.

O espectrômetro usado para fazer o análise química da liga, foi disponibilizado pela empresa x.

Já os corpos de prova das ligas com teores de Fe de 0,60%,0,80%,1,50%, foram retiradas dos próprios canais fundidos.

Foram todos marcados e numerados, após o resfriamento e separados pra ser levadas a empresa x, que disponibilizou o seu espectrômetro para que fosse feitas as queimas das amostra fundidas, os corpos de prova foram separados de acordo a sua composição química.

Tabela 01: Composição química padrão da liga ASTM A356.

Si (%)	Fe (%)	Cu (%)	Mn (%)	Mg (%)	Sr (%)	Ti (%)
6,5-7,5	0,10 Máx.	0,10 Máx.	0,40 Máx.	0,25- 0,45	0,20 Máx.	0,002 Máx.

Essa liga ASTM A-356 é conhecida pela fundições como ALSi7Mg, a diferença da liga pra a A-356 é os elementos de liga que são adicionados ao banho, essa liga nas fundições pra se obter as melhores propriedades mecânicas são feitos o refino de grão através da adição do Tibal, e a modificação do silício eutético.

Tabela 02: Composição usada como referência no trabalho

Si (%)	Fe (%)	Cu (%)	Mn (%)	Mg (%)	Sr (%)	Ti (%)
7,40	0,109	0,0019	0,0026	0,27	0,0154	0,0014

A tabela acima representa a composição química dos pré-lingotes, que foram fundidos para a execução dos ensaios pertinentes

Com a fusão dos pré-lingotes adicionamos o elemento químico Fe no banho, com a intenção de obter ligas com teores de Fe diferentes foram fundidos seis corpos de prova, com 0,60%,0,80%,1,50%.

Tabela 03: Composição química das amostras 1 e 2 do teste realizado com adição do elemento Fe com o teor de 0,60%.

Si (%)	Fe (%)	Cu (%)	Mn (%)	Mg (%)	Sr (%)	Ti (%)
7,20	0,60	0,0022	0,0180	0,240	0,0112	0,162

Observação a composição química das amostras 1 e 2 é a média do resultado das duas amostras.

Tabela 04: Composição química das amostras 3 e 4 dos teste realizado com adição do elemento químico Fe com teor de 0,80%.

Si (%)	Fe (%)	Cu (%)	Mn (%)	Mg (%)	Sr (%)	Ti (%)
7,40	0,80	0,0019	0,0164	0,270	0,0154	0,114

Observação a composição química das amostras 1 e 2 é a média do resultado das duas amostras.

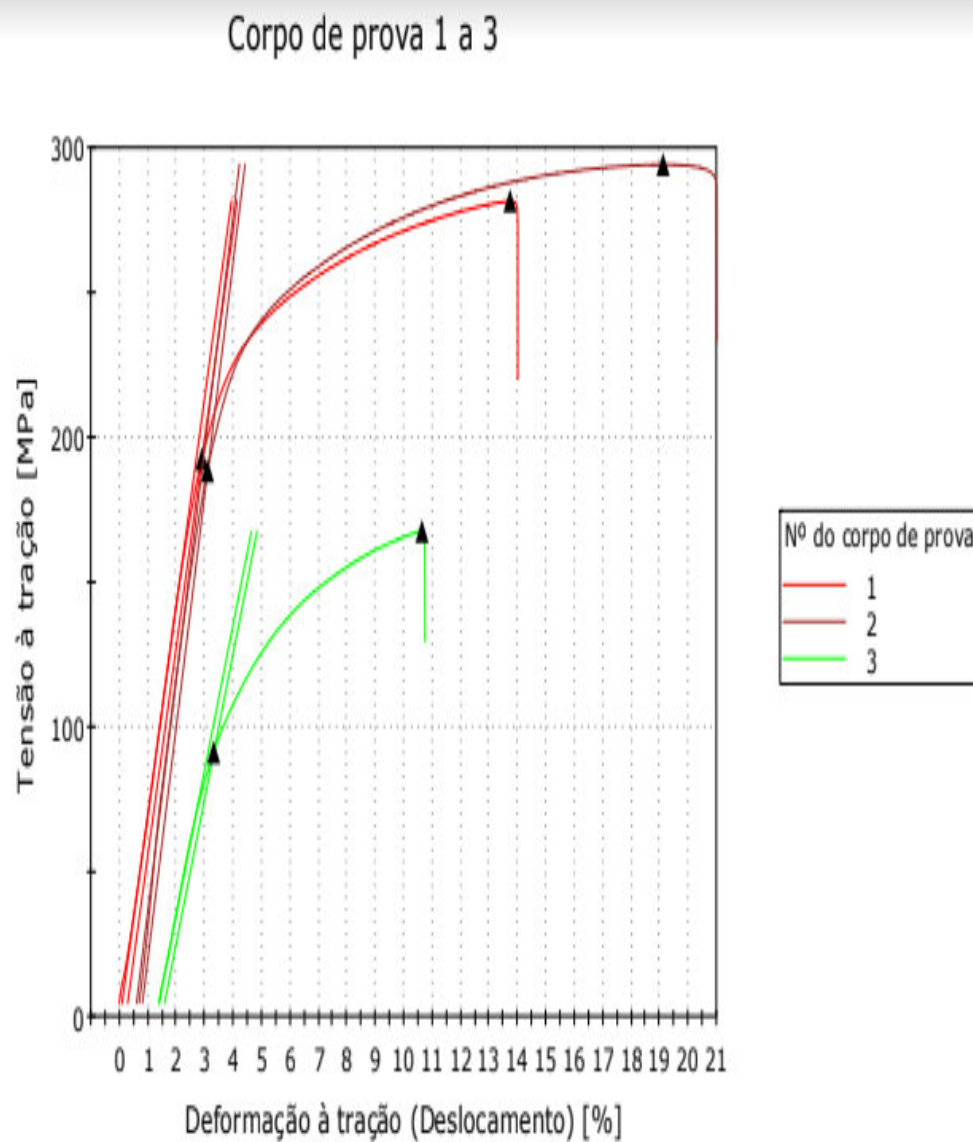
Tabela 05: Composição química das amostras 5 e 6 dos teste realizado com adição do elemento químico Fe com teor de 1,50%.

Si (%)	Fe (%)	Cu (%)	Mn (%)	Mg (%)	Sr (%)	Ti (%)
7,00	1,50	0,0018	0,0155	0,260	0,0130	0,166

Observação a composição química das amostras 1 e 2 é a média do resultado das duas amostras.

4.3 Ensaio de Tração

Gráfico 01: Curva do ensaio de tração da Liga ASTM A-356



	Posição	Força Máxima [N]	Tensão no Escoamento 0,2% [MPa]	Limite de Resistência [MPa]	ALONGAMENTO FISICO	OBSERVAÇÃO
1	OUTER RIM FLANGE 01	8017	193	282	8,0	CP OK
2	OUTER RIM FLANGE 02	8348	189	294	11,9	CP OK
3	SPOKE 01	4749	92	168	4,0	CP OK
Média		7038	158	248	8,0	
Desvio padrão		1989	57,123	70	3,9	
Coefficiente de Variação		28	36,202	28	49,2	

Esse ensaio de tração retrata os resultados de três corpos de prova que foi usado como referência pra o trabalho, os corpos de prova são da liga ASTM A-356 esses corpos de prova são retirados de rodas de liga leve que foram disponibilizados pela empresa x.

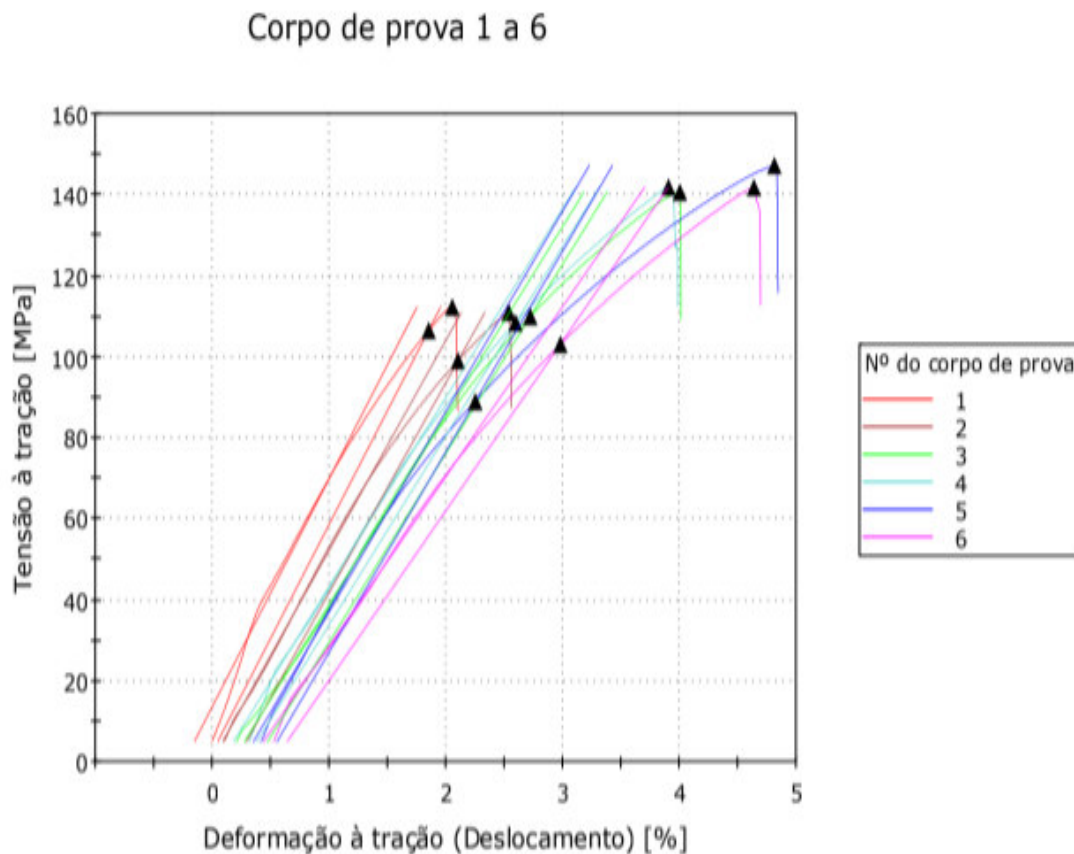
Esse corpos de prova são retirados da borda e meio de raio de rodas de liga leve, como podemos observar na foto abaixo, a esquerda um corpo de prova sem ser usinado, em seguida são usinados e condicionados à máquina de tração.

No ensaio de tração se análise as propriedades mecânicas da roda fundida se está conforme especificado pelo cliente.

Não foi usado extensador nos ensaios realizados nos corpos de prova.

Figura 1: Corpo de prova: borda externa e corpo de prova usinado



Gráfico 02: Curva do ensaio de tração da liga ASTM A-356

	Posição	Força Máxima [N]	Tensão no Escoamento 0,2% [MPa]	Limite de Resistência [MPa]	ALONGAMENTO FÍSICO	OBSERVAÇÃO
1	SPOKE 01	3176	107	112	0,7	SAMPLE WITH EXTERNAL POROSITY
2	SPOKE 02	3128	99	111	1,0	SAMPLE WITH EXTERNAL POROSITY
3	SPOKE 03	3978	110	141	1,3	SAMPLE WITH SLAG IN FRACTURE
4	SPOKE 04	4013	108	142	1,9	SAMPLE WITH SLAG IN FRACTURE
5	SPOKE 05	4191	89	147	2,0	SAMPLE WITH SLAG IN FRACTURE
6	SPOKE 06	4023	103	142	1,7	SAMPLE WITH SLAG IN FRACTURE
Média		3751	103	132	1,4	
Desvio padrão		470	7,759	16	0,5	
Coefficiente de Variação		13	7,551	12	38,0	

Esse gráfico retrata o resultado do ensaio de tração dos corpos de prova 1 e 2 da liga ASTM A-356 com o teor do elemento químico Fe de 0,60 representado no gráfico em Vermelho e roxo.

Esse gráfico retrata o resultado do ensaio de tração dos corpos de prova 3 e 4 da liga ASTM A-356 com o teor do elemento químico Fe de 0,80 representado no gráfico em Verde claro e verde escuro.

Esse gráfico retrata o resultado do ensaio de tração dos corpos de prova 5 e 6 da liga ASTM A-356 com o teor do elemento químico Fe de 1,50 representado no gráfico em Azul marinho e Lilás.

Foram retirados dois corpos de prova de cada liga, sendo um a prova e outro à contra prova.

Há avaliar o teste de tração, nota-se a total influência do elemento químico Fe em peças fundidas de alumínio em baixa pressão ou gravidade.

Ao usar os corpos de prova para realizar o ensaio de tração, foi realizado antes um ensaio Macrográfico podendo visualizar defeitos de fundição como: porosidade visíveis, óxidos na região de quebra da tração, com isso fica visivelmente claro que a influência do elemento químico Fe afeta as propriedades mecânicas da liga, diminuindo limite de resistência de escoamento e o alongamento, podemos analisar essas diferenças nos gráficos mostrado acima Gráfico 01 (Curva do ensaio de tração da Liga ASTM A-356 padrão) e Gráfico 02 (Curva do ensaio de tração da liga ASTM A-356 com a adição do elemento químico Fe).

O Fe em teores abaixo de 0,20% em liga de alumínio fundidas em processos de baixa pressão e gravidade em coquilha metálica, o Fe eleva a resistência ao desgaste, a resistência mecânica a quente e atua como refinador de grão, exceto em nas ligas fundidas em areia. O Fe também diminui a tendência ao rechupe por reduzir a contração.

A liga de alumínio com teores de Fe acima de 0,50% reduzem a resistência à tração e mesmo em pequenos teores tem efeito prejudicial ao alongamento e resistência ao impacto.

O efeito do Fe depende muito da velocidade de resfriamento durante a solidificação.

4.4 Análise Metalográfica

Figura 01: Amostra 1 (50 x)

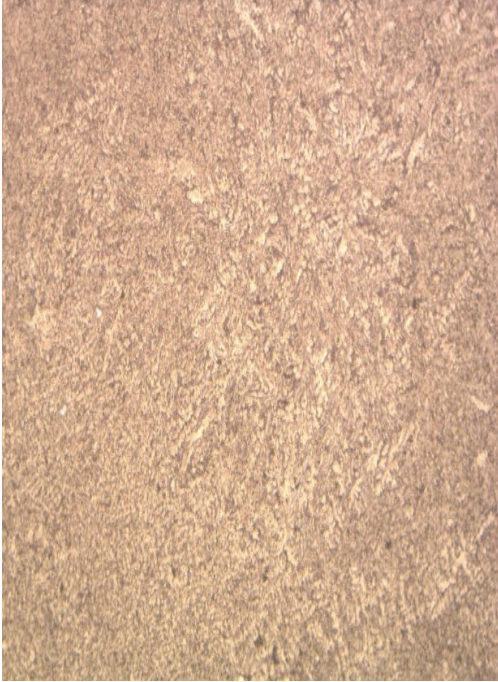


Figura 02: Amostra 1 (100x)

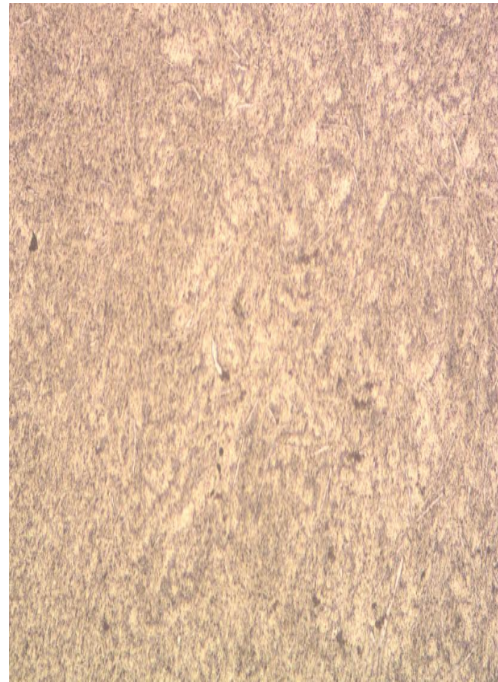


Figura 03: Amostra 1 (500)

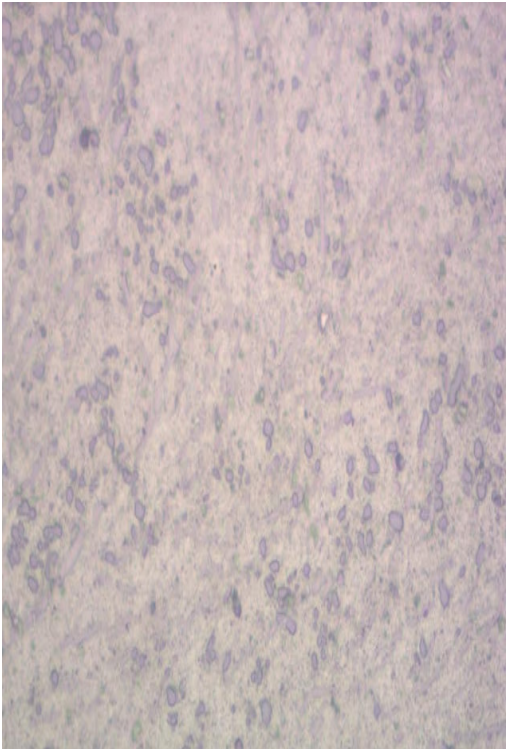


Figura 04: Amostra 1 (1000)



Essas figuras acima representa análise metalográfica da liga ASTM A-356, retirada de uma roda de liga leve, especificamente da borda externa do fundido.

Foi retirada uma secção do corpo de prova feito o embutimento em baquelite, foi usado a embutidora do laboratório de fundição da Etec Trajano Camargo.

Essas fotos da micro estrutura da liga ASTM A-356, usada pra fundir rodas de liga leve e bloco de motor foram observadas no microscópio do laboratório de metalografia da Etec Trajano Camargo.

Podemos observar pelas fotos que a micro estrutura da liga mostra uma boa uniformidade e homogeneidade dos grãos de silício, sendo que a liga é a padrão de referência do trabalho sendo liga tratada termicamente, modificada e refinada.

Figura 05: Amostra 2 (100x)

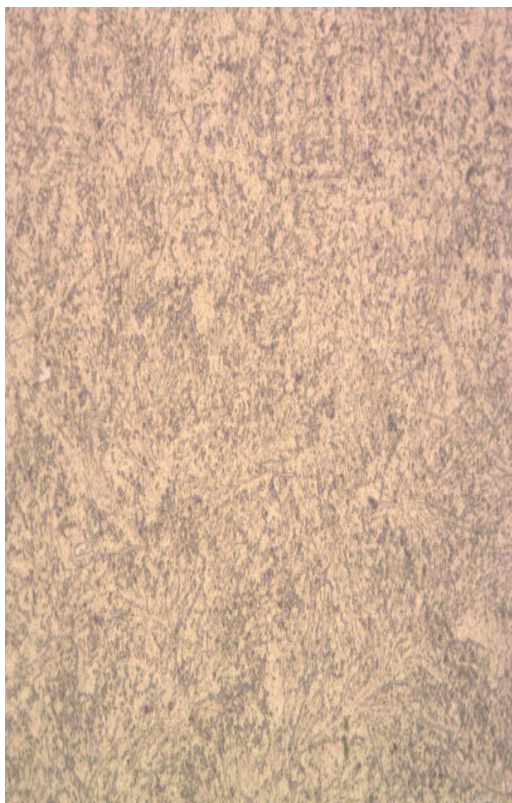


Figura 06: Amostra 2 (200x)

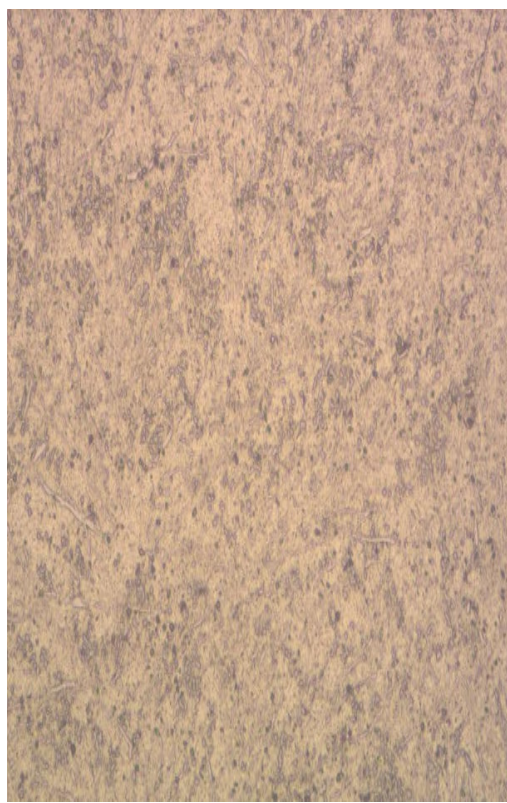
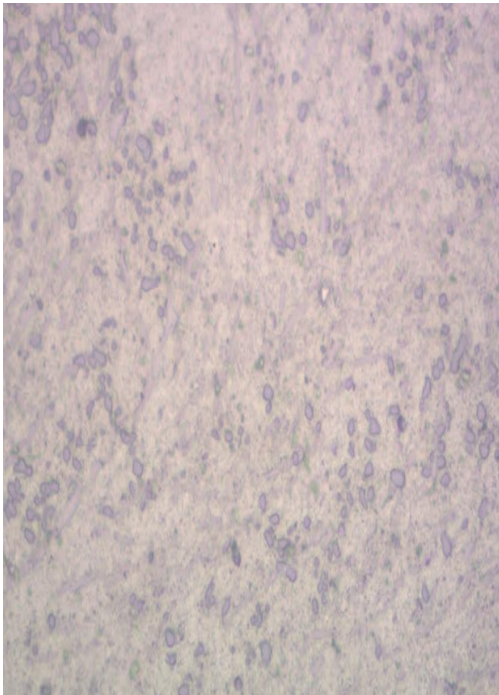
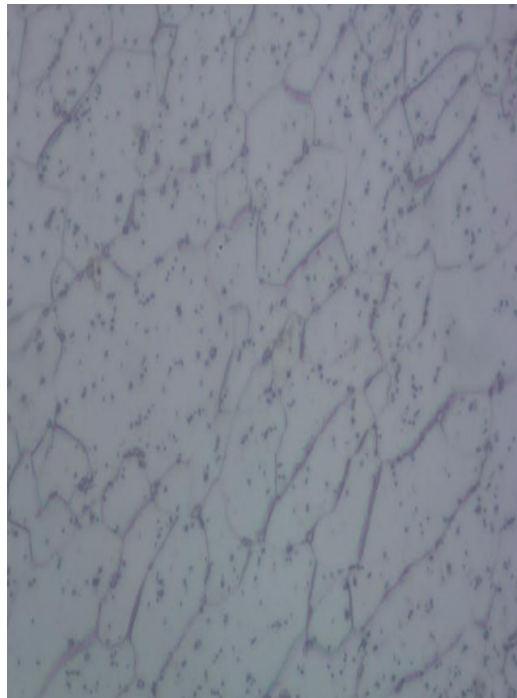


Figura 07: Amostra 2 (500x)**Figura 08:** Amostra 2 (1000x)

Essas fotos representa ensaio metalográfico das amostra 2 com elemento químico Fe, com teor de 0,60% na sua composição química, podemos visualizar a presença das lamelas de ferro presente na micro estrutura da liga, podendo assim está diminuindo a sua propriedade mecânica e resistência a tração.

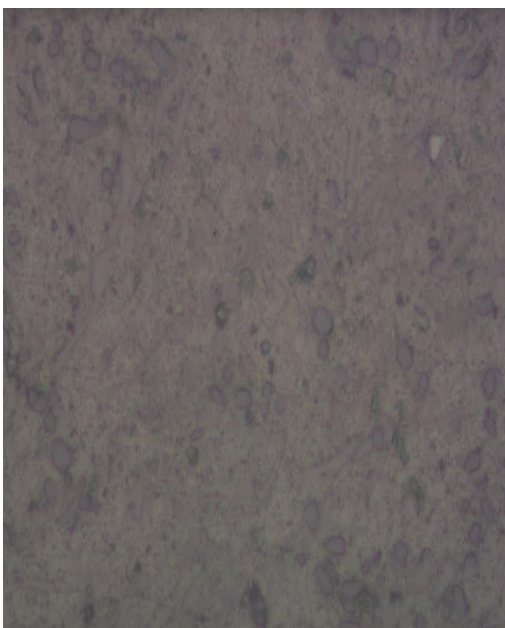
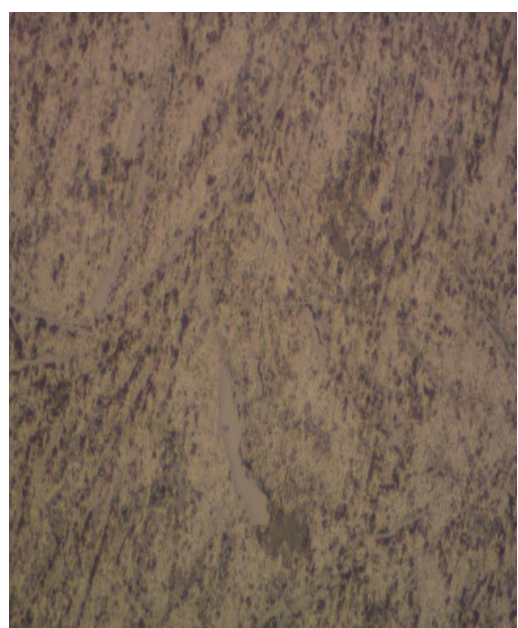
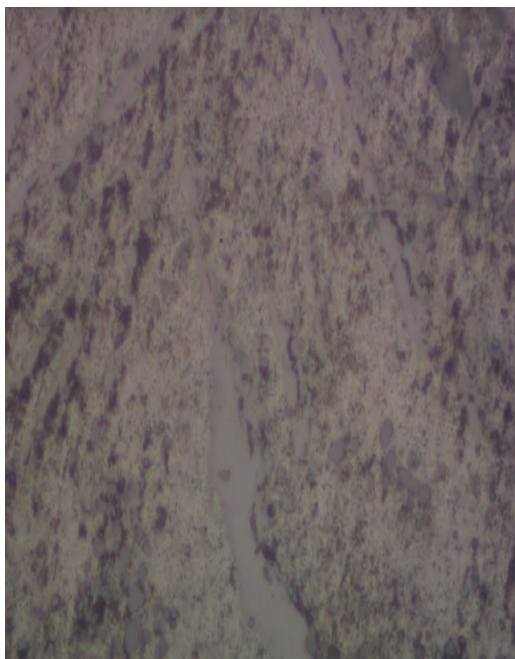
Figura 09: Amostra 3 (200x)**Figura 10:** Amostra 3 (500x)

Figura 11: Amostra 3 (1000x)

Essas fotos retrata a micro estrutura liga da A-356 com adição do elemento químico ferro com teor de 1,50% na sua composição química.

Podemos observar na foto na lente aumentada em 1000x que as lamelas de ferro são bem contundente na micro estrutura, podendo assim fragilizar a micro estrutura, criando intermetálicos e afetando a suas propriedades mecânica da liga e resistência a tração.

As seguintes tabela abaixo representa o comparativo entre as ligas A-356 padrão, usada como referência do trabalho, e a outra liga A-356 com teores de Fe fora do especificado pela norma ASTM.

Tabela 1: Amostra Padrão da liga ASTM A-356 (AlSi7Mg)

Tabela da Amostra Padrão					
	Posição	Força Maxima (N)	Tensão no Escoamento 0,2C%	Limite de Resistencia (Mpa)	Alongamento Físico
CP 1	Borda externa 1	8017	193	282	8
CP 2	Borda Interna 2	8348	189	294	11,9
CP 3	Raio	4749	92	168	4
Média		7038	158	248	8
Desvio Padrão		1989	57,123	70	3,9
Coefficiente de variação		28	36,202	28	49,2

Tabela 2: Comparativa entre os resultados da média da liga A-356 padrão e a A-356 com o teores de Fe 0,60, 0,80 e 1,50.

Comparativo da Amostras				
	Força Maxima (N)	Tensão no Escoamento 0,2% ϵ	Limite de Resistencia (Mpa)	Alongamento Físico
Valor Média Amostra Padrão	7038	158	248	8
Valor Média Amotra Experimento	3751	103	132	1,4
Valor Médio Perca de Propriedades	5394,5	130,5	190	4,7

Tabela 3: Comparativa dos resultados obtidos do ensaio de dureza da liga padrão e da liga com teores de Fe fora do especificado da norma.

Resultados de Dureza			
Amostra Padrão		Amostra Fe Elevado	
Ensaio CP 1	93	Ensaio CP 1	67
Ensaio CP 2	87	Ensaio CP 2	64
Ensaio CP 3	94	Ensaio CP 3	69
Ensaio CP 4	89	Ensaio CP 4	67
Ensaio CP 5	85	Ensaio CP 5	64
Ensaio CP 6	87	Ensaio CP 6	62
Media Total :	89,16666667	Media ToTal :	65,5

5. CONCLUSÃO

As principais conclusões deste trabalho são: que os resultados de análise química mostra que as ligas fundidas com teores de Fe 0,60%, 0,80% e 1,50% utilizadas neste trabalho não atendem as especificações da norma.

Devido à presença de óxidos e lamelas de Fe que fragilizam a microestrutura da liga, afetando a sua propriedade mecânicas e resistência a tração.

As ligas fundidas em molde permanente o que foi usado no trabalho, apresentou porosidade média superior nos corpos de prova de tração e análise metalográfica.

Apresentaram porosidades superficial no corpo de prova, devido à falta de degaseificação do metal fundido e temperatura de vazamento muito alta na casa de 760 graus.

Detectamos também defeitos de fundição como: porosidades e óxidos nos corpos de prova fundidos.

Ao se avaliar o teste de tração notou-se a influência do elemento químico Ferro diminuindo o limite de resistência, limite de escoamento e alongamento dos corpos de provas ensaiados, com isso chegamos à conclusão que o Ferro na liga ASTM A356 fundidas em molde metálicos com teores de Ferro acima de 0,50% deixa sua microestrutura fragilizada formando intermetálicos entre seus grão de Silício.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALUMINIO. Wikipédia, a enciclopédia livre. Disponível em: <https://wikipedia.org> Acesso em: 05 de junho 2021.

ALVES D. S. Lilian. Propriedades do alumínio. Mundo educação. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br>. Acesso em: 05 de junho 2021.

CALLISTER, Willian D. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução, 5 Edição 2002.

FUNDIÇÃO sob baixa pressão. Universal solutions our business. Disponível em: <https://www.modelacao-universal.com.br/fundicao-baixa-pressao>. Acesso em: 29 de junho 2021.

GRUZLESKI, J. E; Closset, B. M. O tratamento de ligas de alumínio-silício líquidas The American Foundrymen's Society - AFS 1990.

IMPORTANCIA das ligas de alumínio. Metalúrgica Fremar. Disponível em: <http://www.fremar.com.br/fundicao-ligas-aluminio.html>. Acesso em: 07 de junho 2021.

J. A. TAYLOR, "Ferro contendo fases intermetálicas em ligas de fundição à base de Al-Si", *Procedia Materials Science*, pp. 19-33, 2012.

J. Y. HWANG, H. D. DOTY, M. J. KAUFMAN, "O efeito de Mn na microestrutura e propriedades mecânicas de ligas de fundição de Al-Si-Cu," *Materials Science and Engineering A*, pp. 496-504, 2008.

J. Y. HWANG, H. D. DOTY, M. J. KAUFMAN, "O efeito de Mn na microestrutura e propriedades mecânicas de ligas de fundição de Al-Si-Cu," *Ciência e Engenharia de Materiais A*, pp. 496-504, 2008.

JÚNIOR, Materiais. Tudo sobre o Alumínio – um metal abundante: Alumínio materiais e aplicações. [S. l.], 16 set. 2020. Disponível em: <https://materiaisjr.com.br/tudo-sobre-o-aluminio>. Acesso em: 22 de maio 2021.

LIGAS AL SI. Metais e Ligas. Disponível em: <https://www.infomet.com.br/site/metais-e-ligas-conteudo-ler.php>. Acesso em: 14 de junho 2021.

LIGAS de alumínio. Associação Brasileira do alumínio. Disponível em: <https://abal.org.br>. Acesso em: 07 de junho 2021.

LIGAS de alumínio. Metalthaga. Disponível em: <https://metalthaga.com.br/ligas-de-aluminio>. Acesso em: 09 de junho 2021.

LIU, L., MOHAMED, A. M. A., SAMUEL, A. M., SAMUEL, F.H. DOTY, H. W., VALTIERRA, S. Precipitação de plaquetas da fase β -Al₅FeSi em ligas de fundição à base de Al-Si. Transações Metalúrgicas e de Materiais A, Volume 40A, 2009, p. 2457-2469.

MAKHLOUF, M. M., APELIAN, D. Características de Fundição de Ligas de Fundição de Alumínio. Fundição Avançado de pesquisa no centro Worcester Polytechnic Institute Worcester, Massachusetts, 2002, p. 5-18.

METALOGRAFIA das ligas de alumínio. Repositório Institucional UNESP. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/119367>. Acesso em: 10 de junho 2021.

METALOGRAFIA das ligas de alumínio. Portal aquecimento Industrial. Disponível em: <https://www.aquecimentoindustrial.com.br/metalografia-de-ligas-de-aluminio-de-fundicao>. Acesso em: 13 de junho 2021.

NIELS SKAT TIEDJE, JOHN A. TAYLOR e MARK A. EASTON, "Alimentação e distribuição de porosidade em ligas de Al-Si fundidas como função da composição e modificação da liga", Transações Metalúrgicas e de Materiais A, no. Publicado online: 14 de julho de 2012, julho de 2012.

POPRIEDADES Mecânicas das ligas. Associação Brasileira de Alumínio. Disponível em: <https://abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/propriedades-mecanicas/#accordion8>. Acesso em: 10 de junho 2021.

Q. HAN e S. VISWANATHAN, "Análise do mecanismo de soldagem em molde de alumínio," Metalúrgica e Transações de Materiais A, 2003.

R. S. RANA, RAJESH PUROHIT e S. DAS, "Avaliações sobre as influências dos elementos de liga na microestrutura e propriedades mecânicas das ligas de alumínio e composições de ligas", International Journal of Scientific and Research Publications, pp. 1-7, junho de 2012.

REMOÇÃO do ferro no banho de alumínio. Metalurgia e Materiais. Disponível em:

<https://www.researchgate.net/publication/26369810> Remocao de ferro do banho de aluminio de sucata por filtragem. Acesso em: 30 de junho 2021.

SMITH, William F.- Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais, 3 Edição, 1998.

W. KALIFA, AM SAMUEL, FH SAMUEL, HW DOTY e S. VALTIERRA, "Observações metalográfica da fase b-Al₅FeSi e seu papel na formação de porosidade em ligas Al-7% Si," International Journal of Cast Metals Reseach, vol. 19, pp. 156-166, 2006.