

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA

ÊVELYN DE ARAÚJO

**DESENVOLVIMENTO DE MANGAS DE EIXO DE VEÍCULO FORMULA SAE EM
LIGA AISi7Mg0,3 POR FUNDIÇÃO**

Joinville

2017

ÊVELYN DE ARAÚJO

**DESENVOLVIMENTO DE MANGAS DE EIXO DE VEÍCULO FORMULA SAE EM
LIGA AISi7Mg0,3 POR FUNDIÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Automotiva, da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus de Joinville, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel.

Orientador(a): Dr. Modesto Hurtado Ferrer

Joinville

2017

ÊVELYN DE ARAÚJO

**DESENVOLVIMENTO DE MANGAS DE EIXO DE VEÍCULO FORMULA SAE EM
LIGA AISi7Mg0,3 POR FUNDIÇÃO**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Automotiva, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville, 22 de novembro de 2017.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Modesto Hurtado Ferrer
Orientador

Dr. Alexandre Mikowski
Membro

Eng. Raniel Maciel
Membro

Dedico este trabalho aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

A Deus por permitir chegar até aqui.

Aos meus pais, que com muito esforço me deram a oportunidade de estudar e com muito carinho me incentivaram em todas minhas decisões.

Aos meus amigos, que tiveram grande importância e influenciaram fortemente no meu desempenho acadêmico.

Ao meu orientando, que mesmo em meio a uma grande carga de horário de trabalho me auxiliou no desenvolvimento desse trabalho.

Aos membros da equipe Fórmula CEM que fizeram parte de todo processo de desenvolvimento e disponibilizaram todas informações que fossem necessárias para a construção desse trabalho, em especial ao Lucas Bezerra de Menezes e ao Ariel Gustavo Avi.

E a empresa Alutec que apoiou esse trabalho e disponibilizou todas as ferramentas necessárias para desenvolvê-lo, em especial ao Eng. Raniel Maciel e ao Eng. João Carlos Germani.

RESUMO

A cada ano é crescente a utilização do alumínio na indústria, este crescimento ocorre principalmente devido à expansão do setor automotivo. A principal característica do alumínio que o torna um material competitivo é a sua baixa densidade e sua alta capacidade de absorção de energia. As mangas de eixo produzidas em ligas de alumínio são utilizadas em casos onde a redução de massa possui uma alta demanda, como em carros esportivos e de competição. Neste trabalho utilizam-se os conceitos de fabricação por fundição de ligas de alumínio para sugerir a utilização da liga $AlSi7Mg0,3$ com tratamento de envelhecimento artificial, para o desenvolvimento das mangas de eixo, dianteiras, aplicáveis em veículos de Competição FórmulaSAE. O trabalho apresenta procedimento de trabalho desde a concepção e desenvolvimento até a validação do componente, com auxílio de ferramentas computacionais para o modelamento geométrico e numérico, bem como do minucioso processo de fabricação do fundido. Os controles nos processos de fundição e de tratamento térmico conferiu à liga $AlSiMg0,3$ um conjunto de propriedades, superior ao estabelecido em normas, atendendo plenamente aos níveis de esforços obtidos por simulação numérica do projeto, mostrando-se como uma escolha adequada para este tipo de componentes.

Palavras chave: Liga $AlSi7Mg0,3$, Fundição de alumínio, Envelhecimento artificial, Mangas de Eixo, FórmulaSAE.

ABSTRACT

Every year the utilization of aluminum in the industry increases, and this growth is mainly due to the expansion of the automotive industry. The main characteristics of this material, which makes it competitive, are its low density and high energy absorption. Axle sleeves made of aluminum alloys are used in situations where there is a strong need for mass reduction, such as in race and competition vehicles. This work uses manufacturing concepts for aluminum alloy casting to propose the use of the AlSi7Mg0,3 alloy with artificial ageing treatment for developing front axle sleeves applicable to FormulaSAE competition vehicles. The work presents the working procedure from the design and development until the component validation, with the aid of computational tools for geometric and numeric modelling, as well as the detailed manufacturing process of the cast. The control during the casting and thermal treatment granted the AlSi7Mg0,3 alloy a set of properties which are superior to values established in standards, fully complying with the stress levels previously obtained during numeric simulations of the project, showing that it is an appropriate choice for this type of component.

Keywords: AlSi7Mg0,3 alloy, Aluminum casting, Artificial ageing, Axle sleeves, FormulaSAE.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Relação peso em função do consumo do veículo.....	15
Figura 2 Potencial de diminuição de peso por peça	16
Figura 3 Produção de alumínio em diferentes países	17
Figura 4 Influência do encruamento sobre alumínio e suas ligas.....	20
Figura 5 Diagrama Alumínio-Silício.....	25
Figura 6 Diagrama Alumínio-Magnésio.....	26
Figura 7 Detalhamento do Diagrama Alumínio-Magnésio.....	27
Figura 8 (a) Diagrama pseudo-ternário AlMg ₂ Al, (b) Diagrama ternário Al-Mg-Si	30
Figura 9 Principais grupos de liga de alumínio	31
Figura 10 Região intercelular.....	32
Figura 11 Forno de cadinho, tipo estacionário	35
Figura 12 Compactação mecânica (a) pela utilização de um dispositivo vibratório; (b) comprimindo a areia no interior da caixa de moldar; (c) enchendo o molde com excesso de areia e nivelando.....	37
Figura 13 Modelo em uma caixa de moldar	38
Figura 14 Representação esquemática do ciclo de tratamento térmico T6.....	39
Figura 15 Exemplo de uma solução sólida: solubilidade do cobre no alumínio.....	41
Figura 16 Diagrama de fases de uma liga com potencial de endurecimento	42
Figura 17 (a) microestrutura com silício eutético modificado em estado bruto de fundição (b) mesma estrutura após T6.....	43
Figura 18 Dureza de ligas de alumínio quando envelhecidas por diferentes processos.....	43
Figura 19 Dureza em função do tempo de ligas Al-Cu a (a) 130 °C e (b)190 °C.....	45
Figura 20 Conjunto da manga de eixo ao cubo de roda do protótipo de 2015.....	47
Figura 21 Manga de eixo do protótipo de 2016.....	49
Figura 22 Design inicial da manga de eixo	50
Figura 23 Manga de eixo após a redução de massa.....	51
Figura 24 Geometria final da manga de eixo	51
Figura 25 Tensão de Von Misses na manga de eixo por meio da simulação	52
Figura 26 Tensão de Von Mises encontrada na manga de eixo do ano de 2015 considerando cargas laterais	53
Figura 27 Pontos de concentração de tensão de compressão na manga de eixo atual	53

Figura 28 Simulação de tensão da manga de eixo do ano de 2015	54
Figura 29 Modelo da manga de eixo dianteira	57
Figura 30 Areia seca sendo misturada ao silicato	58
Figura 31 Modelo sendo coberto por uma solução de grafite	59
Figura 32 Posicionamento da peça no molde	59
Figura 33 Injeção de CO ₂ pelos orifícios do molde.....	60
Figura 34 Liga Al-Si ₇ -Mg _{0,3} fundida.....	61
Figura 35 Obtenção da composição da liga por meio de espectrometria de emissão óptica.....	62
Figura 36 Molde com suas cavidades preenchidas de alumínio fundido	64
Figura 37 Manga de eixo antes da retirada do molde de areia	64
Figura 38 Manga de eixo sem o processo de acabamento.....	65
Figura 39 Retirada do massalote e dos canais	66
Figura 40 Representação do ciclo de tratamento realizado nas mangas de eixo.....	67
Figura 41 Formato dos corpos de prova para ensaios de resistência a tração segundo a NBR ISO 6892 - 2002	67
Figura 42 Curva característica de tensão vs deformação da liga AlSi ₇ Mg _{0,3}	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Ligas de alumínio trabalhadas	19
Tabela 2 Principais tipos de liga de alumínio para fundição	23
Tabela 3 Composição majoritária da liga 3xx.x	29
Tabela 4 Diferentes fases da série 3xx.x	30
Tabela 5 Porcentagens nominais do Al Si 7Mg0,3	61
Tabela 6 Porcentagem de cada elemento presente dentro da liga na primeira análise	63
Tabela 7 Porcentagem de cada elemento presente dentro da liga na segunda análise	63
Tabela 8 Limite de resistência máxima (LRT), limite de escoamento (LR) e alongamento total (At) da liga AlSi7Mg0,3 tratada termicamente	68
Tabela 9 Comparação dos valores obtidos em testes com os valores exigidos em norma para o material	69
Tabela 10 Custo da fabricação da manga de eixo dianteira	69

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivo Geral	13
1.2	Objetivo Específico.....	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
2.1	Aplicações do alumínio na Engenharia Automotiva	14
2.2	Alumínio e suas ligas	18
2.2.1	Nomenclatura das ligas de alumínio	18
2.2.2	Classificação das Ligas de Alumínio Fundidas.....	21
2.3	Características metalúrgicas das ligas de alumínio.....	23
2.3.1	Fundamentos da Liga Al-Si-Mg.....	29
2.4	Solidificação de Ligas com Composição Complexa.....	30
2.5	Tecnologia de Fundição de Ligas de Alumínio	33
2.5.1	Fundição em areia	36
2.6	Tratamento térmico em ligas fundidas.....	38
2.6.1	Tratamento Térmico T6.....	39
3	INTRODUÇÃO AO ESTUDO DE CASO	46
3.1	Histórico da manga de eixo desenvolvida em protótipos anteriores	47
3.2	Desenvolvimento em CAD	49
3.3	Seleção do processo e do material	54
3.4	Projeto do Modelo da Manga	55
3.5	Desenvolvimento do molde	57
3.6	Fusão do material	60
3.7	Vazamento da liga e desmoldagem	64
3.8	Acabamento	65
3.9	Tratamento térmico das mangas.....	66

3.10	Orçamento.....	69
4	CONCLUSÕES	71
5	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	72

1 INTRODUÇÃO

A cada ano é crescente a utilização do alumínio na indústria, este crescimento ocorre principalmente devido à expansão do setor automotivo, podendo ser aplicado em: automóveis, caminhões, máquinas agrícolas, motocicletas, entre outros, desde a parte estrutural até em componentes de motores.

Na indústria automotiva a sua aplicação tem ganhado destaque por possuir forte potencial em aumentar a performance do veículo mantendo sua segurança, aumentando sua durabilidade, oferecendo bom custo benefício e tornando o veículo mais sustentável.

A principal característica do alumínio que o torna um material competitivo na indústria automotiva é a sua baixa densidade e sua alta capacidade de absorção de energia, podendo chegar ao dobro da capacidade do aço, material que ainda é predominante nas partes constituintes do veículo, deixando o alumínio em segunda posição.

Visto que o custo benefício do alumínio é superior ao aço, para algumas aplicações, existe uma forte tendência que a predominância das ligas ferrosas seja invertida pelas ligas não-ferrosas, dando espaço a veículos mais ecológicos e eficientes.

Nesse contexto, os componentes utilizados para sustentar os subsistemas de um chassi tem recebido atenção dos engenheiros e projetistas em termos de redução de massa, resultando em geometrias complexas e o ganho no desempenho veicular. Destes componentes, os que estão relacionados ao controle veicular e a segurança são priorizados, como é o caso da manga de eixo.

A manga de eixo é um componente estrutural, responsável por conectar os diferentes elementos pertencentes aos sistemas de controle veicular, por exemplo, o braço de esterçamento no sistema de direção, a geometria e acoplamentos da suspensão, itens de freios e a ponta de eixo da transmissão.

Em veículos de competição modelo FórmulaSAE, a complexidade das mangas é significativa, pois se procura ao máximo atender os requisitos de redução de massa, melhoria de desempenho, existência de dispositivos de ajuste, somados ao fato de que os componentes são produzidos em pequena escala, portanto, possuem uma maior liberdade quanto ao material e método de fabricação.

Mangas de eixo mais modernas geralmente são feitas de alumínio ou ferro. Os processos de fundição, forjamento e estampagem podem ser utilizados. Como requisito, as suas ligas devem atender aos critérios de rigidez, tensão de escoamento, ductilidade, resistência à fadiga, resistência à corrosão, usinabilidade e custo acessível.

As mangas de eixo produzidas em ligas de alumínio são utilizadas em casos onde a redução de massa possui uma alta demanda, como em carros esportivos e de competição.

Diante deste cenário neste trabalho utilizam-se os conceitos de fabricação por fundição de ligas de alumínio para sugerir a utilização da liga AlSi9Mg0,3 para o desenvolvimento das mangas de eixo, dianteiras, aplicáveis nos veículos de Competição FórmulaSAE a combustão e Elétrico, da Equipe FórmulaCEM.

1.1 Objetivo Geral

- Concepção e desenvolvimento do processo de fabricação por fundição das mangas de eixo dianteiras em liga de alumínio AlSi9Mg0,3 e do tratado térmico de envelhecimento.

1.2 Objetivo Específico

- Concepção e desenvolvimento do projeto do produto das mangas dianteira por fundição de alumínio;
- Estudo de viabilidade da aplicação do alumínio em relação aos materiais em uso;
- Desenvolvimento do procedimento de fundição das peças;
- Desenvolvimento dos procedimentos de tratamento térmico de solubilização seguida de envelhecimento;
- Caracterizar mecanicamente o material;
- Simular a estrutura utilizada com o intuito de avaliar a sua adequação para a aplicação.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O seguinte capítulo irá apresentar uma revisão do conteúdo que é necessário para o entendimento do estudo a seguir.

2.1 Aplicações do alumínio na Engenharia Automotiva

Muitas peças de automóveis são produzidas por meio da fundição do alumínio devido aos benefícios encontrados em seu uso quando comparado ao aço. Segundo a ABAL (Associação Brasileira do Alumínio), o alumínio absorve duas vezes mais a energia de impacto em uma colisão e oferece o dobro da resistência quando comparado ao aço.

Além de sua baixa densidade, que é de grande interesse a indústria automotiva, o alumínio também pode ser reciclável por inúmeras vezes sem perder suas propriedades mecânicas, sendo que cerca de 90% do alumínio contido nos veículos fora de uso podem voltar ao ciclo de produção e mais de 55% do alumínio presente nos veículos é proveniente de reciclagem (FILLETI, 2010).

Na confecção de pistões, por exemplo, emprega-se ligas contendo de 17 a 24% de silício, 1 a 1,75% de cobre e, eventualmente, manganês, magnésio, níquel, zinco, cromo e titânio.

Em outras partes do veículo, as ligas chegam a conter de 5 a 12,5% de silício, de 0,1 a 5% de cobre, de 0,5 a 0,6% de manganês, de 0,1 a 0,5% de magnésio, de 0,2 a 0,5% de níquel, de 0,1 a 3% de zinco, de 0,4 a 2% e ferro e eventualmente, estanho, chumbo e titânio (CHIAVERINI; 1986c).

O esforço em busca da diminuição de peso do veículo é constante, a procura de potencializar a sua força motriz com uma quantidade menor de energia, como mostra a Figura 1, nesta figura podemos ver a relação direta do peso bruto do veículo com o consumo de combustível, a qual possui uma relação proporcional.

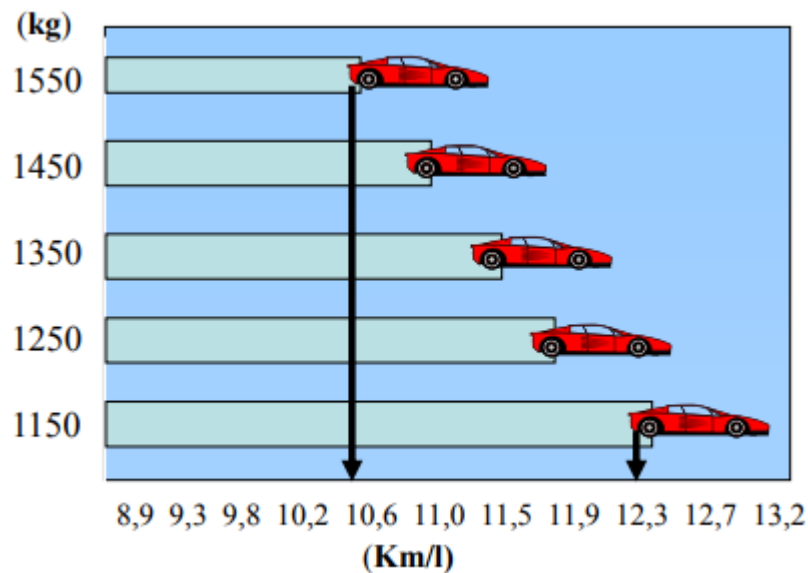
Porém, apesar da utilização do alumínio potencializar o desempenho do veículo, não é apenas esse o foco de sua aplicação, um menor consumo de combustível envolve também a implementação de veículos mais sustentáveis.

Uma pesquisa realizada pela Ducker Worldwide junto a montadoras americanas apontou a diminuição da massa do veículo como um dos itens mais importantes na redução de

emissões veiculares, e chegaram a afirmar ainda que 50% da solução está relacionado diretamente com o powertrain e 50% com a redução de peso do veículo (FILLETI, 2010).

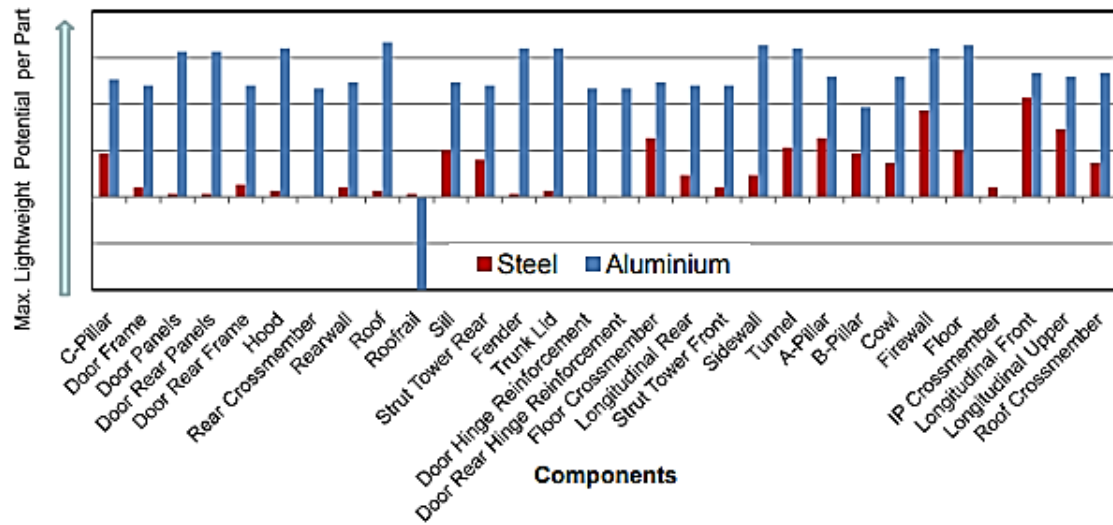
O gráfico da Figura 2 mostra o potencial do alumínio na diminuição de peso de um veículo comparado ao aço em diferentes peças do veículo. Nesta figura são apresentados os alguns componentes do veículo como : (Sill) peitoril, (Strut Tower Rear) torre de suspensão traseira,(Fender) paralamas, (Trunk Lid) porta do porta malas, (Door Hinge Reinforcement) reforço da dobradiça da porta, (Door Rear Hinge Reinforcement) reforço da dobradiça da porta traseira, (Floor Crossmember) crossmember do assoalho, (Strut Tower Front) torre de suspensão dianteira, (Sidewall) lateral do pneu, (Tunnel) túnel central, (A-Pillar) coluna A, (B-Pillar) coluna B, (Cowl) capô, (Floor) assoalho.

Figura 1 Relação peso em função do consumo do veículo



Fonte: Filletti (2010)

Figura 2 Potencial de diminuição de peso por peça

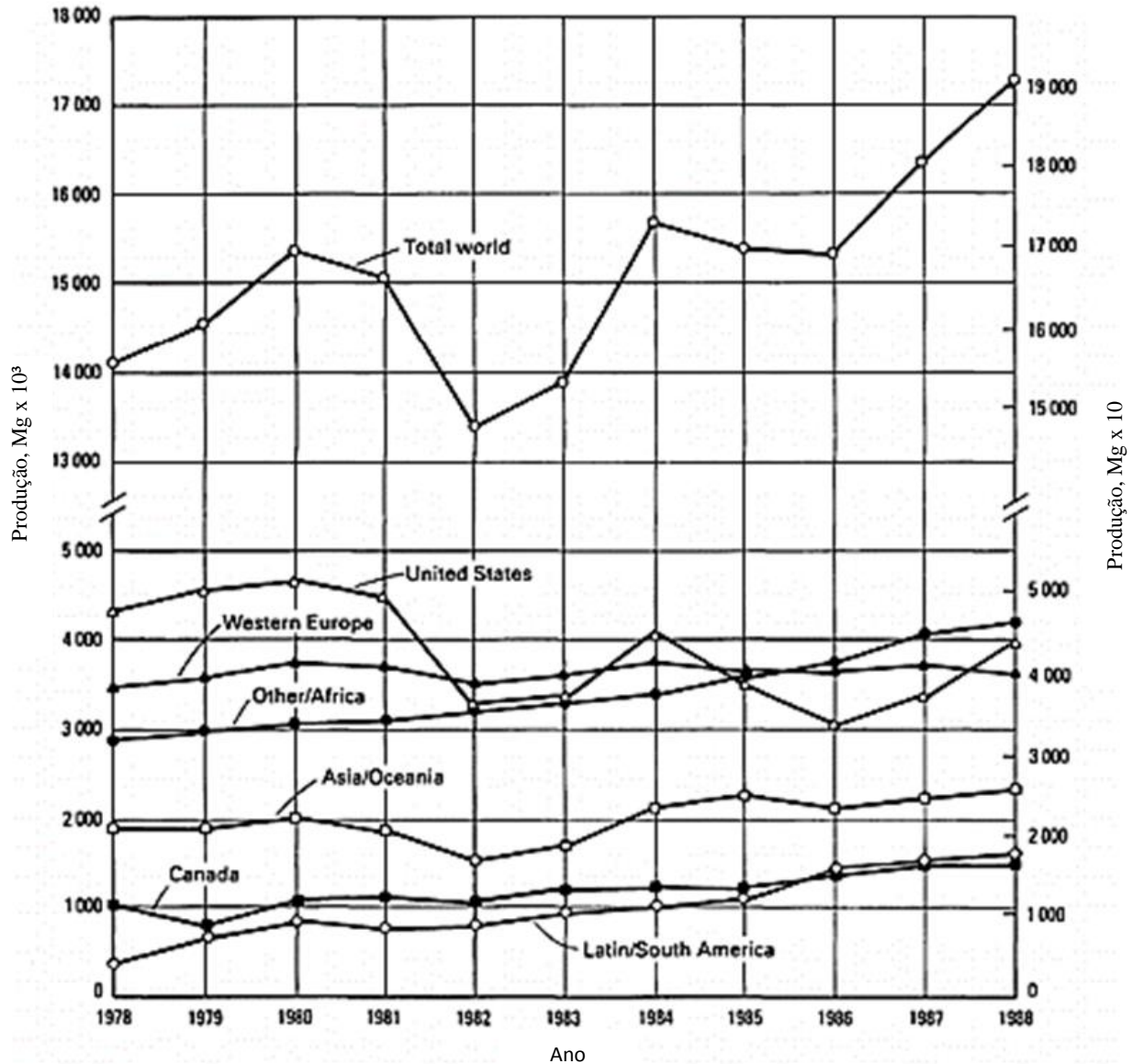


Fonte: Filletti (2010)

A indústria do alumínio se mostra cada vez mais aquecida, e é uma peça chave para manter o setor automotivo competitivo. Estima-se que em 2025 os veículos norte americanos utilizem cerca de 230 kg de alumínio, 50 kg a mais da quantia utilizada em 2015 (DRIVE ALUMINUM, 2015).

No Brasil, a produção e utilização do alumínio é muito inferior se comparado a países desenvolvidos, como mostra a Figura 3. Apesar do gráfico ser antigo, ainda mostra a tendência de crescimento e a comparação da produção nacional com a produção no exterior.

Figura 3 Produção de alumínio em diferentes países



Fonte: ASM Handbook (1990)

No entanto, com as exigências ambientais de emissão de poluentes emitidos pelos automóveis, a tendência é que esse número cresça cada vez mais, não apenas nos Estados Unidos, como em outros países também.

2.2 Alumínio e suas ligas

As ligas de alumínio de grande relevância e que oferecem boas propriedades mecânicas ao metal são inúmeras, desta forma, as ligas para fundição exigem maiores cuidados devido ao grande risco de contaminação do metal na panela. Além disto, composições minoritárias presentes na liga podem ser benéficas para algumas ligas e prejudiciais a outras, por esse motivo, esses elementos devem ser também devidamente controlados.

Um exemplo de composição minoritária são os modificadores do silício: sódio, estônio, antimônio e fósforo. Esses elementos alteram a cinética de nucleação e crescimento do silício nas ligas Al-Si com o intuito de produzir precipitado de forma mais compacta. No entanto, uma contaminação de ligas de sódio ou estônio modificado em ligas de fósforo ou antimônio podem impedir esse efeito, por esse motivo devem estar presentes em doses adequadas.

Outro exemplo de contaminação que pode ter um impacto positivo e negativo nas ligas de alumínio para fundição é o hidrogênio. O alumínio reage com a atmosfera incorporando o hidrogênio a sua composição e produzindo porosidades durante a solidificação, o que altera diretamente sua resistência mecânica, todavia, em peças que não são submetidas a esforços mecânicos, o hidrogênio pode ser favorável na prevenção de empenamento.

O controle da composição química do alumínio é difícil, para que o alumínio seja reciclado necessita que passe por vários processos de separação e purificação (NUNE et al,1988).

2.2.1 Nomenclatura das ligas de alumínio

Todas as ligas à base de alumínio podem ser divididas em dois grupos principais: ligas para trabalho mecânico ou trabalhadas e ligas de fundição.

A- Ligas para Trabalho Mecânico

As ligas para trabalho mecânico são aquelas em que o metal é mecanicamente trabalhado, devem suportar deformações plásticas para que possam ser trabalhadas a quente e a frio pelos processos de trefilação, extrusão, repuxo, laminação, forjamento, entre outras.

Sendo que devem apresentar baixos teores de elementos de liga e altas propriedades mecânicas, onde sobressaem as ligas que sejam tratadas termicamente.

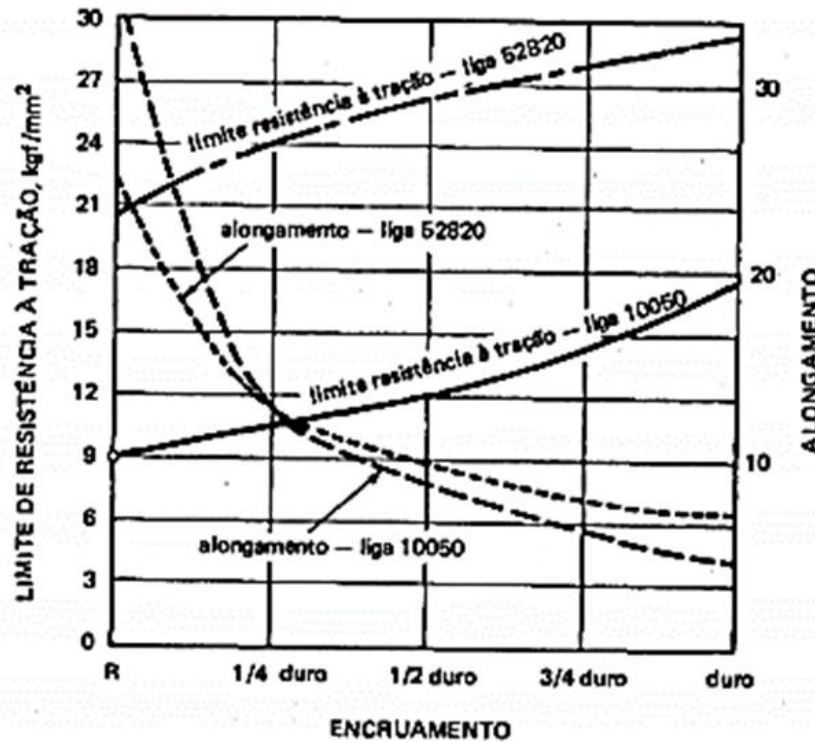
As ligas encruáveis, que fazem parte das ligas de alumínio trabalhadas, são apresentadas na Tabela 1, segundo a designação da ABNT. Essas ligas apresentam boas propriedades de resistência mecânica, resistência a corrosão e ductilidade, sendo que a quantidade de encruamento a qual o material é submetido pode influenciar diretamente nessas propriedades, como mostrado na Figura 4.

Tabela 1 Ligas de alumínio trabalhadas

Designação ABNT	Elementos de liga, %							
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
15040	—	—	—	—	—	—	—	—
10050	1,0	c/ o Si	0,05/0,2	0,05	—	—	—	—
16020	0,25	0,35	0,05	0,03	0,03	0,03	—	0,03
31220	0,60	0,70	0,5/0,2	1/1,5	—	—	—	—
51020	0,40	0,70	0,20	0,20	0,5/1,1	0,10	—	—
51030	0,40	0,70	0,20	0,10	1,1/1,8	0,10	0,10	—
52820	0,45	c/ o Si	0,10	0,10	2,2/2,8	0,15/0,35	0,10	—
58840	0,45	c/ o Si	0,10	0,10	3,1/3,9	0,15/0,35	0,20	0,20
54330	0,40	0,40	0,10	0,3/1	4,0/4,9	0,05/0,25	0,25	0,15

Fonte: Chiaverini (1986 c, p.185)

Figura 4 Influência do encruamento sobre alumínio e suas ligas



Fonte: Chiaverini (1986 c, p. 186)

B- Ligas de Fundição

As ligas para fundição são aquelas utilizadas no processo de fundição que podem ser por moldes metálicos (coquilha), areia e sob-pressão.

Estas ligas podem ser subdivididas em tratáveis e não-tratáveis.

- I. Ligas tratáveis apresentam melhores propriedades mecânicas, pois devido à composição química aceitam tratamento térmico de solubilização e precipitação. Isto é possível, pois possuem elementos com alta solubilidade no alumínio como: Si-Mg, Mg-Cu, Mg-Cu-Si, Mg-Zn e outros.
- II. Ligas não tratáveis, as composições químicas são definidas no processo de fundição. Segundo Molinari “ as ligas que contém elementos como manganês, cromo, zircônio ou manganês-magnésio, suas propriedades podem ser melhoradas através da dispersão das fases intermetálicas na matriz de alumínio pelo processo de deformação mecânica. Onde esse melhoramento é obtido através da modificação das fases presentes e refino do grão da matriz”.

2.2.2 Classificação das Ligas de Alumínio Fundidas

Atualmente não existe um único sistema internacional de identificação de alumínio, por isso cada país adota seu próprio sistema, porém grande maioria opta pela designação baseada na composição química da liga.

A Aluminum Association “AA” estabelece que as ligas para a fundição são classificadas em séries, onde cada série agrupa as ligas que possuem na sua composição os mesmos elementos de liga principal. A designação é feita por quatro dígitos, sendo que o último é separado por um ponto dos três primeiros (xxx.x)

Esta norma ainda define que o primeiro dígito à esquerda indica a série da liga em função do seu elemento principal, assim tendo:

1xx.x – Alumínio puro com 99% de pureza mínima;

2xx.x – Ligas de alumínio cobre;

3xx.x – Ligas de alumínio-silício-magnésio, alumínio-silício-cobre, alumínio-silício-cobre-magnésio;

4xx.x – Ligas de alumínio silício;

5xx.x – Ligas de alumínio magnésio;

6xx.x – Ligas de alumínio zinco;

8xx.x – Ligas de alumínio estanho.

Os dígitos seguintes identificam a liga dentro do grupo, exceto o grupo 1xx.x onde os dois números indicam a pureza do alumínio.

O último dígito à direita indica a forma de fornecimento do produto sendo:

xxx.0 – Peças fundidas;

xxx.1 – Lingotes fundidos, geralmente a partir de fusão de peças, retornos, e outros;

xxx.2 – Lingotes das ligas cuja composição é controlada. São feitos a partir do alumínio primário (alumínio com pureza acima de 99%).

Em muitas ligas, uma letra antecede os números. Esta serve para distinguir as ligas em relação a pequenas variações de impurezas ou dos elementos com pequenos percentuais.

Quanto ao processo de fundição a indicação é feita pelas letras:

D – *Die casting* (sob-pressão);

P – *Permanent molding* (coquilha);

S – *Sand casting* (areia).

As letras que antecedem a designação indicam o processo de fundição, sendo:

GB – Lingotes (ligas);

V – Lingotes pré-ligas;

G – Fundição em areia;

GK – Fundição em coquilha;

GD – Fundição sob-pressão;

GF – Fundição de precisão.

A designação do tipo de tratamento (estado de fornecimento) é feita com letras após a designação das ligas, ou seja:

g – normalizado ou recozido (equivalente ao estado O);

Ka – solubilizado com envelhecimento natural (equivalente ao T4);

Wa – solubilizado com envelhecimento artificial (equivalente ao T6).

Inúmeras são as ligas de alumínio adequadas para a produção de peças fundidas, isso devido a sua ampla versatilidade e sua capacidade de alcançar diferentes características (KAUFMAN, ROY, 2004). Elas podem ser classificadas da seguinte forma:

- Ligas binárias – com um único elemento de liga adicionado;
- Ligas complexas – com dois ou mais elementos de liga adicionados (CHIAVERINI; 1986c).

A Tabela 2 a seguir mostra alguns tipos de ligas de alumínio para fundição.

Tabela 2 Principais tipos de liga de alumínio para fundição

Designação		Processo de fundição*	Elemento de liga, %								
AA	ABNT		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Sb	Tl
1050	15070	A	0,15	0,2/0,4	—	—	—	—	—	—	—
295.2	24460	A – T	0,7/1,2	0,8	4,0/5,0	0,3	0,03	—	0,3	—	0,2
222.2	29560	T	2,0	1,2	9,2/10,7	0,5	0,2/0,35	0,5	0,5	—	0,2
242.2	24860	A – T	0,6	0,6	3,5/4,5	0,10	1,3/1,8	1,7/2,3	0,1	—	0,2
443.2	43020	A, M, P	4,5/6,0	0,6	0,10	0,10	0,05	—	0,1	—	0,2
355.2	42230	A, M – T	4,5/5,5	0,15/0,25	1,0/1,5	0,05	0,5/0,6	—	0,05	—	0,2
A413.2	46030	P	11,5/12,5	0,5	0,10	0,05	—	—	0,05	—	—
360.2	45520	P	9,0/10,0	0,7/1,1	0,10	0,10	0,45/0,60	0,1	0,1	—	0,2
384.2	46220	P	10,5/12,0	0,6/1,0	3,0/4,5	0,10	0,1	0,1	0,1	0,1	—
518.2	59.060	P	0,25	0,70	0,10	0,10	7,6/9,5	0,05	—	0,05	—
A850.2	82660	A, M – T	2,0/3,0	0,50	0,7/1,3	0,10	0,10	0,3/0,7	—	5,5/7,0	0,2

*A = fundição em areia
M = fundição em coquilha, por gravidade
P = fundição sob pressão
T = liga stocet (ível de tratamento térmico)

Fonte: Chiaverini (1986 c, p.200)

A principal diferença encontrada por esses dois grupos de liga de alumínio é a moldabilidade das ligas fundidas, enquanto as ligas trabalhadas são produzidas intermitentemente em grandes seções e com pouca variação geométrica. Desta forma as ligas fundidas permitem a fabricação de geometrias mais complexas, no entanto, peças fundidas necessitam de ligas com capacidade de escoar e preencher a cavidade de forma uniforme e completa, além de enfrentar diferentes taxas de solidificação, o que requer um bom comportamento de solidificação do material a ser utilizado para que uma peça de qualidade seja produzida.

Problemas encontrados durante a fundição como trincas na solidificação e fluidez insuficiente do material são solucionados por meio de quantidades adequadas de ligas de silício, por esse motivo, em ligas para fundição, o silício é encontrado em grandes quantidades quando comparado as ligas trabalhada (KAUFMAN,ROY,2004).

2.3 Características metalúrgicas das ligas de alumínio

Os metais, ao se solidificarem, “cristalizam”, ou seja, os seus átomos que, no estado líquido, estavam se movimentando, localizam-se em posições relativamente definidas e

ordenadas; que se repetem em três dimensões, formando uma figura geométrica regular que é o cristal (CHIAVERINI; 1986a, p.19).

Nas ligas de alumínio fundidas, metais e substâncias metalóides como o silício se dissolvem em meio a essa rede cristalina. Quando o alumínio se resfria e volta a seu estado sólido, alguns dos elementos de liga dissolvidos ficam retidos na rede cristalina em solução sólida, isso faz com que a estrutura atômica do metal se torne mais rígida.

Por isso, o grande alcance que as ligas de alumínio oferecem à indústria com uma grande variedade de combinações de resistência mecânica, resistência à corrosão e ao ataque de substâncias químicas, condutibilidade elétrica, usinabilidade, ductibilidade, formabilidade, entre outros benefícios.

A função de cada elemento da liga se altera de acordo com a quantidade dos elementos presentes na liga e com a sua interação com outros elementos. Em geral, podemos dividir os elementos entre:

- A- Elementos que conferem à liga a sua característica principal (resistência mecânica, resistência à corrosão, fluidez no preenchimento de moldes, etc.);
- B- Elementos que têm função acessória, como o controle de microestrutura, de impurezas e traços que prejudicam a fabricação ou a aplicação do produto, os quais devem ser controlados no seu teor máximo.

A seguir serão apresentados os efeitos dos elementos de liga de maior interesse para o desenvolvimento deste trabalho.

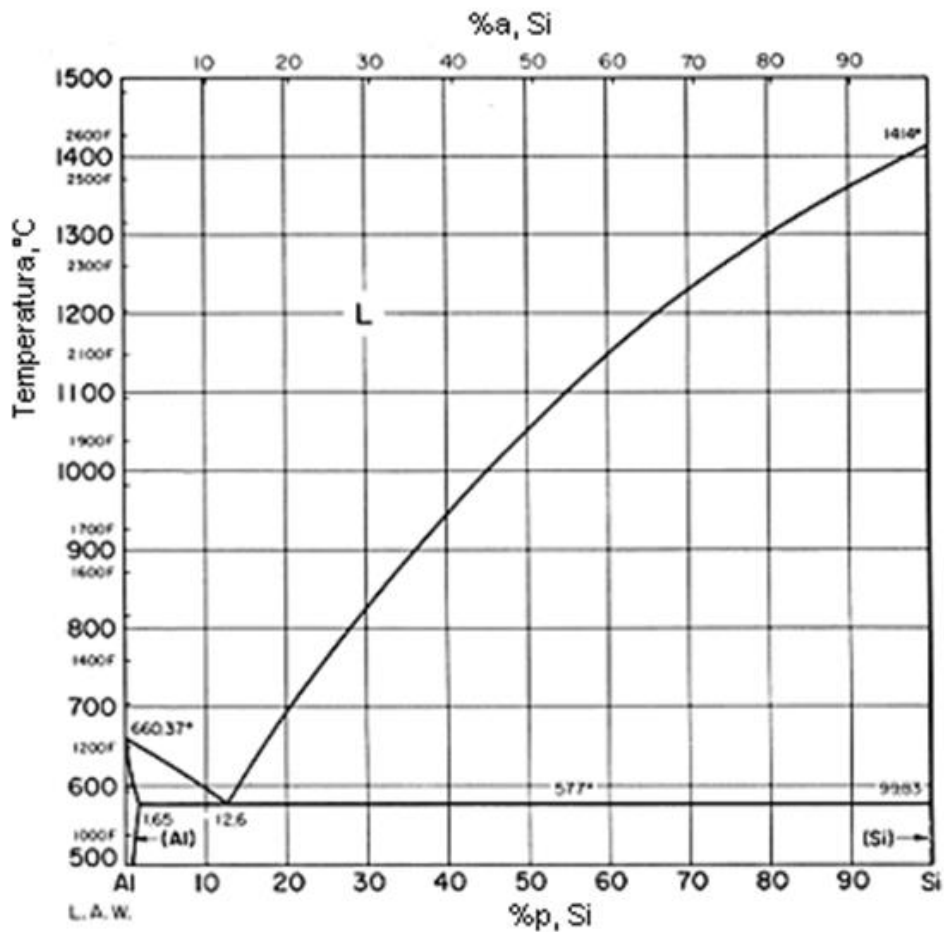
a. Silício

O silício se expande durante a solidificação, compensando a contração volumétrica da liga. Nas faixas entre 6 a 12% de silício a contração varia entre 3 e 4%, enquanto a contração varia apenas de 1 a 2% no intervalo de 20 e 24% de silício.

A fluidez da liga pode variar em função da faixa de adição deste elemento, considerando-se: péssima entre 3 e 4% e ótima com 17%.

O diagrama de fases Al-Si, mostrado na Figura 5, que é conhecido como diagrama de fase eutético binário.

Figura 5 Diagrama Alumínio-Silício.



Fonte: Metals Handbook (1985)

Um número grande de características neste diagrama é observado. Primeiro de todos, observa-se no diagrama três regiões de única fase chamadas de (α , β e L). A fase α é uma solução sólida rica em alumínio e com o silício como componente soluto e uma estrutura cristalina de CFC (corpo de face centrada). A fase solução sólida β , também tem uma estrutura cristalina de CFC, mas o alumínio é o soluto.

Na temperatura abaixo de 577°C, a linha limite de solubilidade limite de sólido separando as regiões α e ($\alpha + \beta$) chamada de linha solvus. O limite AB entre os campos α e ($\alpha + L$) é nomeada de linha solidus. A linha horizontal BEG, na qual é paralela com os eixos de composições e estende entre as posições de solubilidade máxima, também pode ser considerada sendo uma linha de solidus, que representa a mais baixa temperatura na qual uma fase líquida pode existir para toda liga Al-Si que está no equilíbrio.

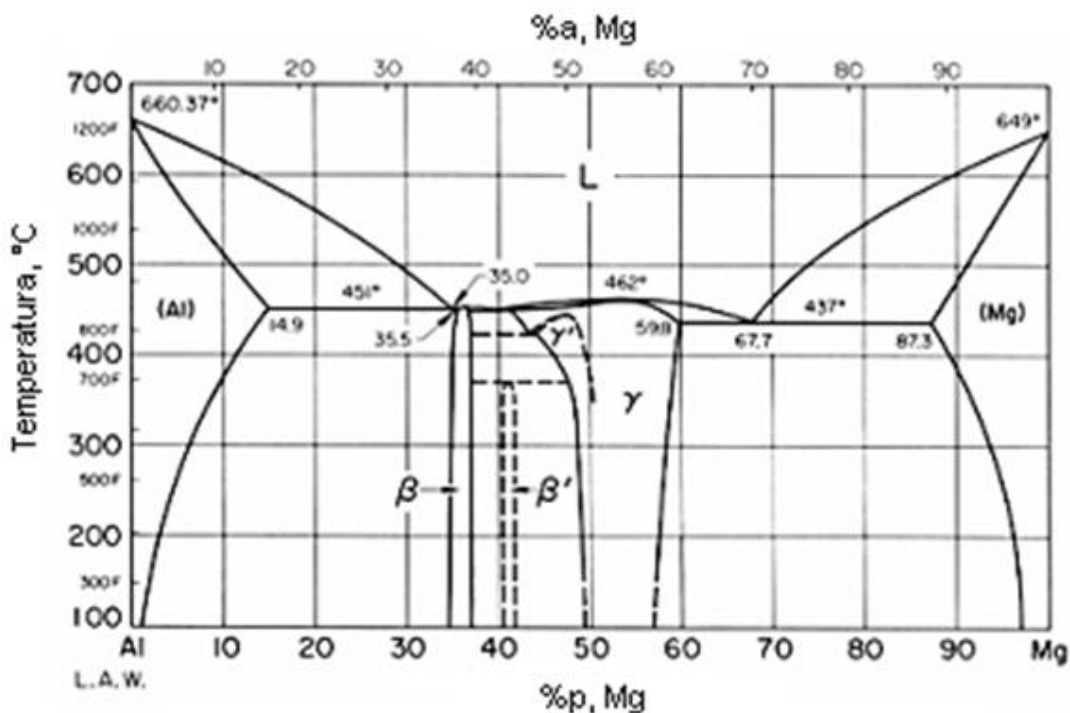
O sistema Al-Si, com solubilidade sólida limitada em ambas as extremidades, forma um eutético simples à temperatura de 580 °C para um teor de 12,5 % de silício.

A solubilidade é baixa – 1,65 % na reação eutética e 0,01 % na temperatura ambiente. Sendo assim, o silício apresenta-se sob a forma de precipitado na matriz de alumínio, sendo que o tamanho e a forma deste precipitado dependem do percentual presente, velocidade de resfriamento e da presença de outros elementos de liga. As fases formadas durante a solidificação podem ser observadas na figura 5, diagrama de equilíbrio Al-Si.

b. Magnésio

Conforme o diagrama binário Al-Mg (Figura 6), a temperatura eutética dessa liga é de 450°C e o teor de magnésio que corresponde ao ponto eutético é de 35%. A fase em equilíbrio com o alumínio é de Al_3Mg_2 (37,3 % de magnésio), embora esta composição esteja um pouco fora da faixa que corresponde a essa estequiometria (34,8 a 37,1 %). A fase Al_8Mg_5 (36 % de magnésio) corresponde à composição da fase sólida e é muito facilmente encontrada nas ligas Al-Mg. A solidificação em equilíbrio termodinâmico só pode ser obtida com taxas de resfriamento inferiores a 0,000005 °C/h.

Figura 6 Diagrama Alumínio-Magnésio.

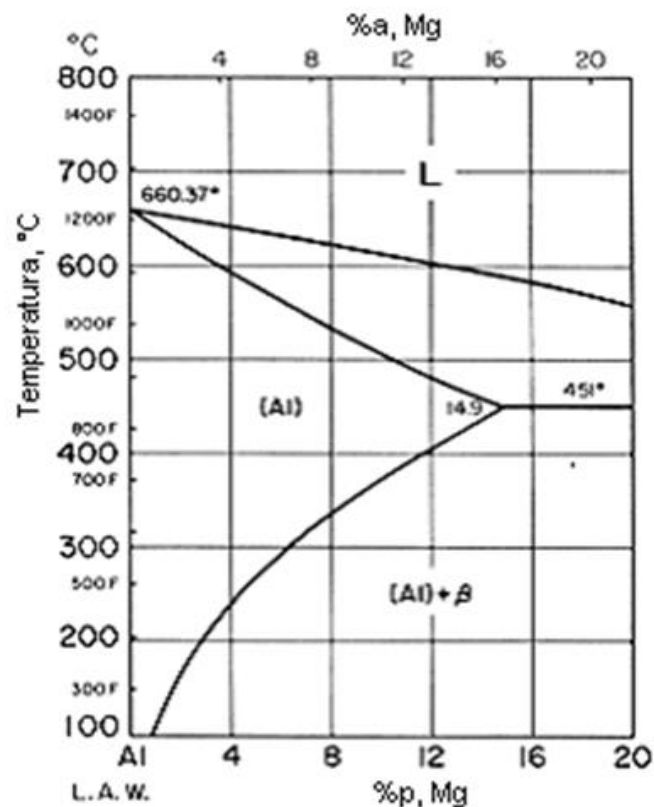


Fonte: Metals Handbook (1985)

A solidificação em condições de não equilíbrio leva à segregação, com a fase Al_8Mg_5 aparecendo para teores de magnésio tão baixos como 4 ou 5 %. Esta fase é frágil abaixo de 330 °C, mas apresenta alguma plasticidade em temperaturas mais altas.

Entretanto, como a solubilidade do magnésio no alumínio é elevada, na maioria das vezes o alumínio permanece em solução sólida no magnésio, embora à medida que o teor de magnésio aumenta o mesmo passa a aparecer no eutético contendo Al_3Mg_2 . Quando o teor de silício nas ligas Al-Mg é relativamente alto (cerca de 0,5 %, por exemplo), forma-se a fase Mg_2Si , a mesma fase responsável pelo endurecimento por precipitação nas ligas Al-Mg-Si. Nas ligas Al-Mg quando o teor de magnésio supera 3,5 % a fase Al_3Mg_2 (indicada na Figura 7), que corresponde a fase β no diagrama Al-Mg, pode se precipitar nos contornos de grão ou dentro dos grãos, o que geralmente ocorre mediante aquecimento a temperatura relativamente baixa.

Figura 7 Detalhamento do Diagrama Alumínio-Magnésio.



Fonte: Metals Handbook (1985)

O cromo é um elemento importante e pode formar dispersóides do tipo $\text{Al}_{18}\text{Cr}_2\text{Mg}_3$. Quando o manganês está presente às fases ricas em ferro tornam-se complexas, havendo a formação de dispersóides do tipo Al_6Mn , mas que também podem conter cromo. O trabalho a

frio de ligas Al-Mg produz acentuadas bandas de deformação, contendo precipitados ricos em magnésio.

c. Ferro

Geralmente, o ferro é considerado como impureza nas ligas de alumínio, entretanto, em algumas situações pode formar parte da composição química da liga com teores acima de 1,5%, quando considerado elemento de liga. Nesta condição elevados teores de ferro podem levar à formação de partículas grosseiras de fase AlFeSi, prejudicando as propriedades mecânicas.

Por outro lado, teores mais baixos de ferro minimizam a tendência da liga Al-Si à soldagem da mesma 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 α (Al₈Fe₂Si) e β (Al₅FeSi). Outras fases, menos comuns, são a δ (Al₄FeSi), que aparece em ligas de alto teor de silício, e a γ (Al₃FeSi), 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 esta última morfologia mais favorável às propriedades mecânicas.

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 freqüente o aparecimento de outras fases, tais como: Al₆Fe, Al₆FeSi e Al₄FeSi₂.

O tratamento térmico, ao proporcionar a difusão dos átomos, permite modificar a forma dessas partículas, o que inviabiliza sua identificação através da morfologia somente.

d. Titânio

A maior utilização do titânio nas ligas de alumínio está no refinamento de grãos e pode ser utilizado em conjunto com o Boro, o que constitui um mecanismo de endurecimento do material.

O titânio reduz a condutibilidade elétrica, este efeito pode ser reduzido com a adição de boro.

O Ti também pode influenciar nos resultados obtidos em tratamentos térmicos de precipitação. A modo de exemplo, as ligas A356 e A357 geralmente são submetidas a

tratamentos de envelhecimento por tempos relativamente curtos, até 4 horas, a partir do qual obtém-se uma boa combinação de resistência mecânica e ductilidade.

M.S. Mirsa e K. J. Oswalt (1997) verificaram a ocorrência de um segundo pico de alongamento, para longos tempos de envelhecimento que coincide com um ponto de ótimas propriedades mecânicas. A queda inicial no alongamento é decorrente da presença de $TiAl_3$, que provavelmente interfere na cinética da precipitação de Mg_2Si . Outro fato observado foi à influência do tamanho de grão no pico secundária de alongamento. O segundo pico só aparece em grãos mais refinados, para uma granulometria mais grosseira este fenômeno já não é tão intenso.

2.3.1 Fundamentos da Liga Al-Si-Mg

A adição de magnésio às ligas de alumínio-silício levou a criação de uma série de ligas de alumínio de fundição (3xx.x), que combinam excelentes características de escoamento e propriedades mecânicas notáveis quando tratadas termicamente. Além dessas características, essa liga possui ótima resistência à corrosão, o que a torna de grande viabilidade a fundição de peças em areia e coquilha (KAUFMAN, ROY, 2004).

A composição referente a essa liga é apresentada na tabela a seguir:

Tabela 3 Composição majoritária da liga 3xx.x

Série	%Si	%Mg	%Cu	%Fe	%Ni	%Zn
3xx.x	4,5 - 23,0	0,03 - 1,5	0,03-0,05	0,06 - 1,5	0,10-3,0	0,03 – 4,0

Fonte: Adaptado de Moraes (2015, p.6)

Essas ligas apresentam diversas microestruturas distintas devido as suas diversas fases, apresentadas na Tabela 4, e por esse motivo distintas propriedades mecânicas do material são encontradas. A microestrutura pode variar conforme os elementos de liga presentes, a solubilidade do material no banho, a maneira como é solidificado e, se for o caso, o tratamento térmico a qual é submetido (MORAIS, 2015).

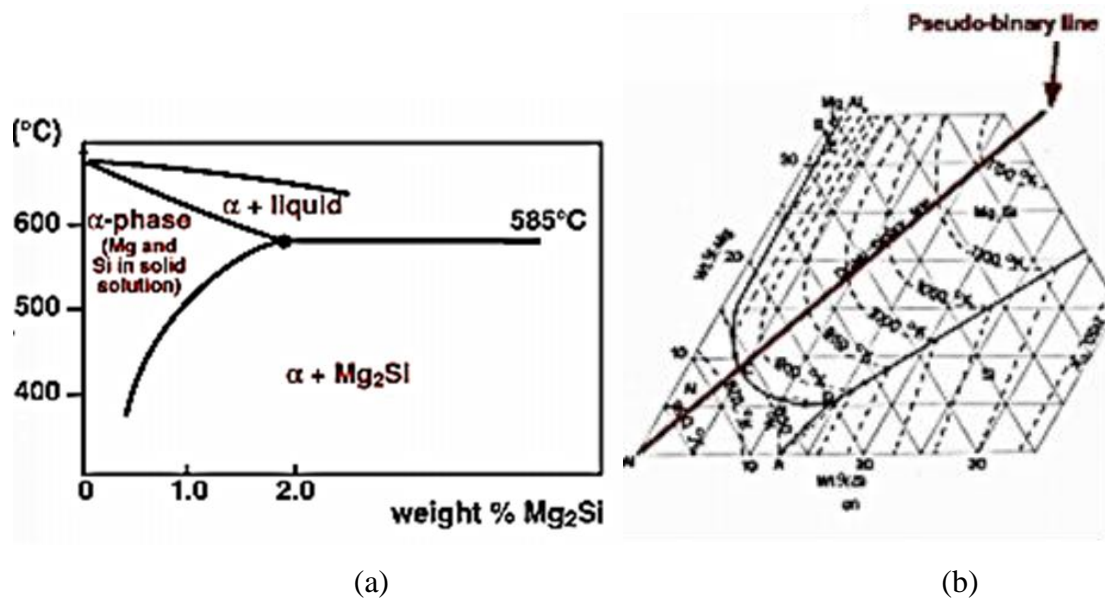
Tabela 4 Diferentes fases da série 3xx.x

Série	Fases
3xx.x	Si, Al ₂ CuMg, Al ₂ Cu ₂ Fe, Al ₅ Cu ₂ Mg ₈ Si ₆ , β -AlFeSi, α -Al(FeMgSi), AlCuFeNi, Al ₆ Cu ₃ Ni, Mg ₂ Si, Al ₃ Ni, Al ₉ NiFe, Al ₈ Mg ₃ FeSi ₂

Fonte: Adaptado de Moraes (2015, p.7)

A liga de alumínio Al-Mg-Si é um sistema ternário, no entanto a maioria das ligas utilizadas na engenharia podem ser representadas por um sistema pseudo-binário composto por Al-x% Mg₂Si como mostra a Figura 8a, retirado de um diagrama ternário, mostrado na Figura 8b (JACOBS, 1999).

Figura 8 (a) Diagrama pseudo-ternário AlMg₂Al, (b) Diagrama ternário Al-Mg-Si



Fonte: Adaptado de Jacobs (1999, p.26)

A fase Mg₂Si, que representa o precipitado endurecido, está em equilíbrio com todas as outras fases no estado bruto de fundição e é encontrada em quase todas as ligas em estado sólido. A sua solubilidade decai com o aumento da porcentagem de silício e as propriedades mecânicas da liga, conferidas a estes precipitados, podem ser melhoradas (MORAIS, 2015).

2.4 Solidificação de Ligas com Composição Complexa

A solidificação do alumínio acontece na temperatura de 660°C, no caso do alumínio puro a solidificação acontece na seguinte sequência:

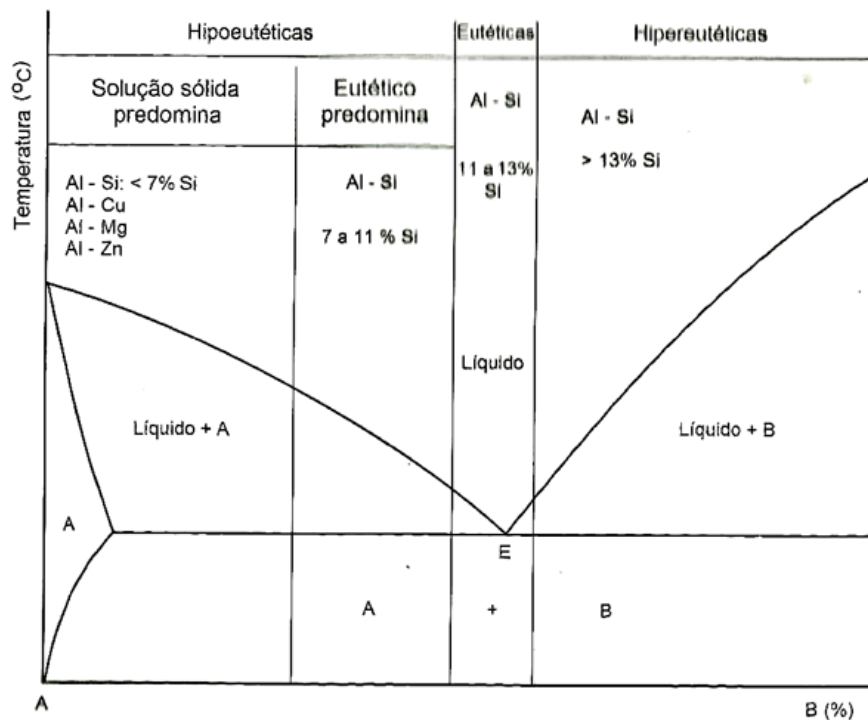
- i) A liga está no estado líquido;
- ii) Aparecem os primeiros cristais sólidos;
- iii) Os cristais crescem;
- iv) Solidificação acontece por completo.

Na solidificação de ligas hipoeutéticas o processo é um pouco diferente:

- i) A liga está no estado líquido;
- ii) Aparecem os primeiros cristais sólidos dendríticos na liga líquida;
- iii) Crescem os cristais sólidos;
- iv) Solidificação acontece com completo, com formação de mistura eutética entre os braços das dendritas em proporções menores (DUARTE; OLIVEIRA, 2009).

O esquema dos principais grupos de ligas de alumínio em um diagrama de fase genérico é apresentado na Figura 9.

Figura 9 Principais grupos de liga de alumínio



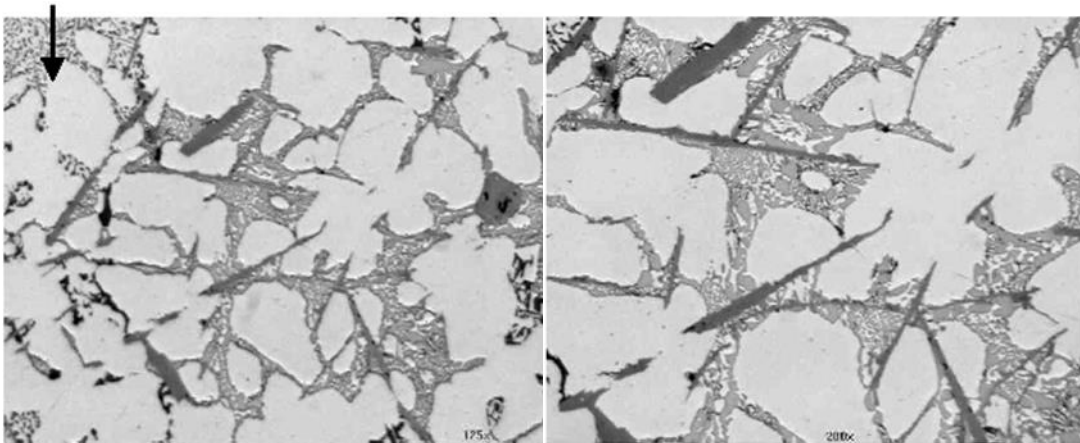
Fonte : Duarte e Oliveira (2009, p.37)

Na presença de outros elementos de liga, tais como magnésio e cobre, ocorre a formação de outras reações eutéticas após o eutético principal Al-Si, respectivamente (α +Mg₂Si) e (α +CuAl₂). Estes eutéticos apresentam temperaturas características para sua formação de 555 e 520°C, respectivamente. Entretanto, na presença de ferro em proporções consideráveis (acima de 0,30%) estas temperaturas são abaixadas até 480°C.

As microestruturas brutas de fundição são constituídas por uma rede de dendritas de fase α , com células eutéticas na região interdendrítica e na presença de Mg ou Cu, formam-se os eutéticos (α +Mg₂Si) e ou (α +CuAl₂) nas regiões interdendríticas e intercelulares.

A Figura 10, detalha a região intercelular da liga Al-Si-Mg, exibindo a formação de eutéticos ricos em cobre do tipo α +CuAl₂, além de plaquetas ricas em ferro do tipo α +Al₃FeSi.

Figura 10 Região intercelular.



Fonte: Fuoco (2001, p.46)

A solidificação de ligas com composição química complexa pode ser bem exemplificada pela liga 380. O magnésio, portanto, constituirá eutéticos de baixo ponto de fusão em relação ao Al-Si.

De forma aproximada pode-se descrever a microestrutura bruta de fundição como sendo constituída de dendritas de fase α (30 %), células eutéticas α + β (40 %), apresentando nas regiões intercelulares a presença de eutéticos entre fase α e fases ricas em ferro, cobre e/ou magnésio (30 %).

As adições de magnésio e cobre aumentam a dureza e a resistência mecânica da liga, melhoram a usinabilidade e desenvolvem o caráter pastoso da solidificação, aumentando a tendência à formação de microporosidades.

O fato da solidificação não ocorrer em uma única etapa, mas em uma série de reações ao longo de um intervalo de temperaturas (580-480 °C) caracteriza a solidificação da liga como sendo pastosa, ou seja, com a convivência simultânea de fases líquida e sólida. Indubitavelmente, as dendritas de fase α são as principais responsáveis pelo modo de solidificação pastosa das ligas.

O modo de solidificação em casca ou pastosa é importante para definição da técnica de alimentação a ser aplicada nas peças.

Para processos de fundição por gravidade, a formação da rede de dendritas favorece a formação de microporosidades distribuídas independentemente da utilização de massalotes (os pontos de ligação massalotes / peça são os de menor velocidade de resfriamento, o que favorece o crescimento dos poros). Isto é ressaltado pela utilização de ligas de baixo teor de silício.

Ao mesmo tempo, a formação de microporosidades distribuídas diminui a tendência à formação de rechupes, mas não elimina a necessidade de massalotes para evitá-los em regiões mais grossas.

A total eliminação de massalotes só pode ser alcançada em ligas de baixo silício, contendo alto teor de hidrogênio e em peças sem grandes variações de seção. Nestes casos, usa-se fundir as peças pela região superior, de modo a promover uma solidificação direcional para o canal de vazamento. Entretanto, o nível de microporosidades desenvolvido é elevado e o vazamento por cima pode promover a formação de bolhas de ar preso e de inclusões de óxidos.

2.5 Tecnologia de Fundição de Ligas de Alumínio

O processo de fundição foi introduzido na Europa no século XV pela china, onde o processo já era conhecido desde 600 d.C. Até o século XIX o processo de fundição foi aperfeiçoado pelos europeus e a sua expansão para as américas se dá apenas em 1800, antes disso não há relatos do processo na região. Antes da colonização dos Estados Unidos e Canadá pela Inglaterra, França e Alemanha no século XVI e XVII, peças fundidas não eram produzidas pelos norte-americanos e a metalurgia ainda não era uma técnica dominada. No entanto, o novo mundo começa a emergir da Idade da Pedra apenas quando essa tecnologia passa a ser conhecida (ASM HANDBOOK, 1988).

Hoje essa tecnologia é difundida por todo mundo, e muito dominada dentro das indústrias. A quantidade de estudos e pesquisas realizadas sobre o processo e a tecnologia

disponível permitem que a maioria dos parâmetros que possam influenciar no processo sejam muito bem controlados e peças de alta qualidade seja produzidas.

Dentre todos esses anos de estudo e desenvolvimento, muitas vertentes do processo surgiram, podendo assim destinar de forma mais adequada o processo as características desejadas a peça final.

Para a produção de uma peça fundida, muitos são os fatores que podem influenciar na seleção do processo mais adequado. Desses, os mais importantes são:

- Parâmetros do processo de fundição: escoabilidade, minimização da tendência empenamento e resistência da fratura a quente;
- Propriedade mecânicas requeridas: resistência e ductilidade, dureza, resistência a fadiga, resistência ao impacto, limites de especificação;
- Propriedades físicas requeridas: condutibilidade térmica e elétrica, densidade específica, características de expansão e contração do material;
- Processos pós fundição: soldabilidade, acabamento químico, usinabilidade;
- Condições de aplicação: pressão de aperto, resistência a corrosão, estabilidade dimensional e térmica, resistência a elevadas temperaturas, resistência ao desgaste;
- Custo-benefício: volume, produtividade, custo do material, processos posteriores, ferramentas, máquinas, tratamentos posteriores.

A fundição é um processo que possui várias vertentes com diferentes características, algumas delas são: Fundição por gravidade; Fundição sob pressão; Fundição por centrifugação; Fundição de precisão.

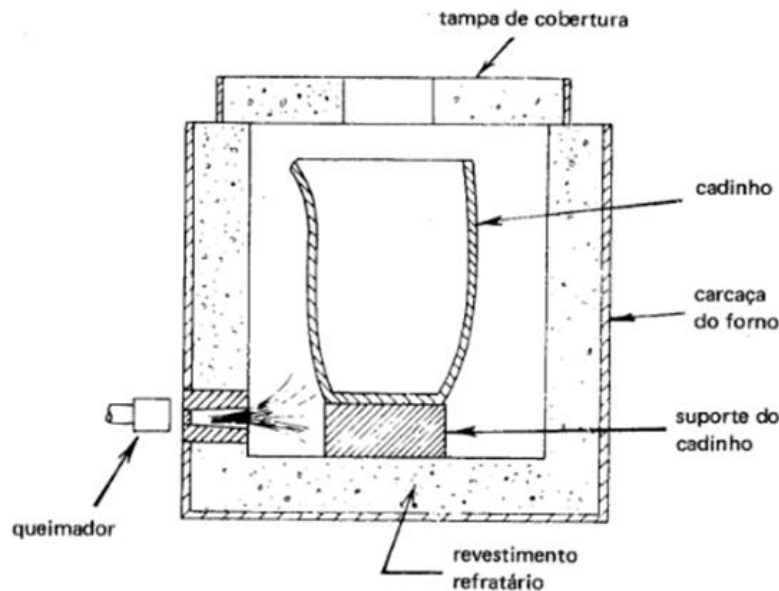
Muitas ligas podem ser produzidas por diferentes processos, no entanto, na maioria dos casos, requerimentos como dimensão, características do design da peça e as propriedades requeridas limitam as possibilidades de processos a serem empregados na fundição (KAUFMAN; ROY, 2004).

A fundição foi o processo que introduziu o alumínio ao mercado de forma relevante. Inicialmente teve aplicações na produção de pequenos objetos cotidianos como lâmpadas decorativas, espelhos de mão, fechos de cintos e detalhes em chapéus devido a seu baixo peso e chamativo acabamento prateado.

A medida que o preço do alumínio começa a diminuir, maiores aplicações na indústria começam a surgir e no final do século XIX torna-se viável sua aplicação em vários processos de engenharia fundição (KAUFMAN; ROY, 2004).

Atualmente existem vários processos de fundição aplicáveis ao alumínio, sendo que o mais utilizado é o forno de cadinho, aquecido a óleo ou a gás por intermédio de um queimador, como mostra a Figura 11.

Figura 11 Forno de cadinho, tipo estacionário



Fonte : Chiaverini (1986b, p. 49)

Os fornos podem ser do tipo estacionário, no qual o cadinho é retirado para o vazamento do metal líquido, ou basculante, onde o cadinho é fixo na carcaça e é necessário um bico de vazamento para a retirada do fundido.

A maioria dos metais e ligas sofrem oxidação durante o processo de fundição, no caso do alumínio e suas ligas, além de possuírem a tendência de oxidação, o material absorve hidrogênio quando aquecido, causando porosidade na peça.

Uma forma de evitar a oxidação da peça e a absorção de hidrogênio é manter a casca formada pela oxidação da superfície juntamente a absorção de gases e outras impurezas (CHIAVERINI, 1986b).

Os moldes utilizados no processo de fundição do alumínio são classificados como descartáveis ou reutilizáveis. No caso de fundição em areia, por exemplo, o molde é desfeito para que a peça final seja retirada, já em outros processos, como o processo de fundição em coquilha, os moldes podem ser reutilizados, porém possuem uma durabilidade limitada pelo número de vezes em que é utilizado (KAUFMAN; ROY, 2004).

2.5.1 Fundição em areia

A moldagem da peça por meio da impressão da geometria desejada em areia é chamada de fundição em areia, podendo utilizar areia verde ou areia seca como matéria prima principal, associada a argila e água, no caso da areia verde ou a resina e óleo ou outros agentes de liga, no caso da areia seca.

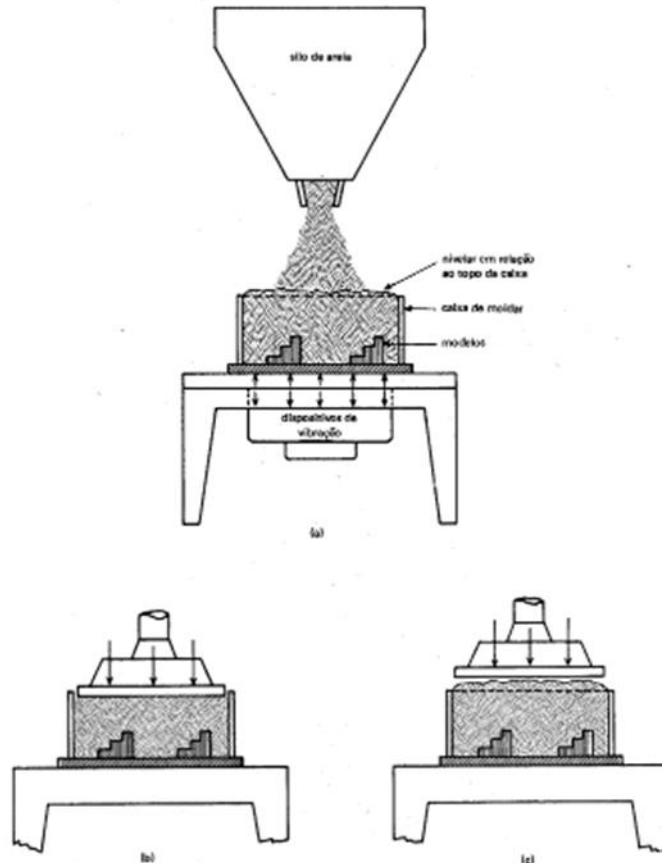
O molde em areia deve assegurar duas condições principais: deve possuir resistência suficiente para manter a forma da peça durante o processo, e garantir permeabilidade aos gases formados enquanto o metal fundido é despejado saiam da cavidade (KAUFMAN; ROY, 2004).

A geração de gases dentro da cavidade ocorre como resultado da decomposição térmicas dos aglutinantes e outros aditivos ou contaminantes da areia. Se a porosidade presente no molde não for suficiente para permitir que os gases escapem, a pressão dentro da cavidade irá aumentar, impedindo o escoamento de forma adequada. Todavia, essa pressão gerada dentro da cavidade devido aos gases previnem a penetração do metal na areia, assim, um balanço entre a permeabilidade do molde e a pressão gerada pelos gases deve ser encontrado.

Tanto no processo com areia verde quanto com areia seca o molde é formado compactando a areia em um recipiente onde o modelo é alocado. A areia pode ser compactada de forma manual ou automatizada, sendo que máquinas para moldagem proporcionam uniformidade e maior produtividade ao processo.

A Figura 12 mostra as formas de compactação mecânica utilizadas.

Figura 12 Compactação mecânica (a) pela utilização de um dispositivo vibratório; (b) comprimindo a areia no interior da caixa de moldar; (c) enchendo o molde com excesso de areia e nivelando



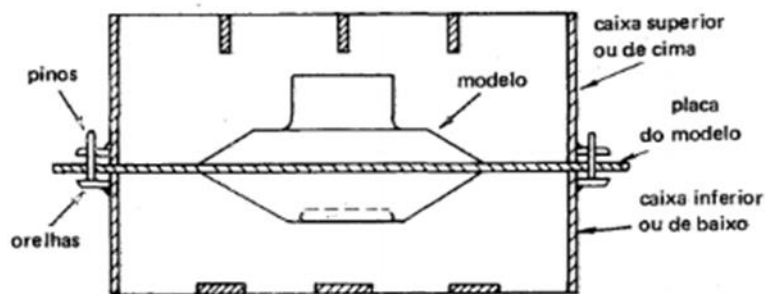
Fonte : Chiaverini (1986b, p. 22)

Geralmente a caixa de moldagem se constitui de duas estruturas (Figura 13), metálicas e de alta rigidez para suportar a pressão exercida sobre a areia na operação de moldagem, bem como a pressão do metal líquido (CHIAVERINI, 1986b).

É pelos canais de alimentação que o material é despejado na cavidade sendo que seus orifícios são moldados no momento da compactação da areia, juntamente com o orifício do modelo. Eles podem estar vinculados ao modelo, ou podem ser alocados manualmente.

O modelo utilizado para formar a cavidade do molde deve possuir as dimensões da peça final considerando a contração que o material sofre no momento da solidificação, assim suas medidas devem sempre ser ligeiramente superiores as medidas da peça.

Figura 13 Modelo em uma caixa de moldar



Fonte : Chiaverini (1986b, p.18)

Além do processo de fundição em areia verde e areia seca existe ainda o processo de fundição com CO_2 e o processo de moldagem plena. O processo CO_2 os moldes são de areia aglomerada, assim como nos processos anteriormente citados. Depois da compactação, o molde passa por um tratamento com CO_2 , que consiste na passagem de uma corrente de gás através de sua seção com o intuito de endurecer o molde em curto período de tempo, tornando o molde mais resistentes a maiores pressões de trabalho.

No processo de moldagem plena, ao invés de possuir uma cavidade no interior do molde, o molde é preenchido com poliestireno, que evapora em contato com o metal líquido no momento do despejo (CHIAVERINI, 1986b).

2.6 Tratamento térmico em ligas fundidas

As ligas de alumínio têm uma designação própria para os tratamentos térmicos usuais. A letra T, seguida de números, indica o tratamento térmico efetuado na liga, que se dividem basicamente nos seguintes tratamentos:

- a) T1 – Envelhecimento natural após tratamento de conformação em temperatura elevada;
- b) T2 – Reozimento;
- c) T3 – Solubilização com trabalho mecânico posterior a frio;
- d) T4 – Solubilização e envelhecimento natural (precipitação à temperatura ambiente);
- e) T5 – Envelhecimento artificial sem solubilização prévia (precipitação artificial);
- f) T6 – Solubilização e envelhecimento artificial;
- g) T7 – Solubilização e superenvelhecimento;
- h) T8 – Solubilização, trabalhado a frio e envelhecimento artificial;

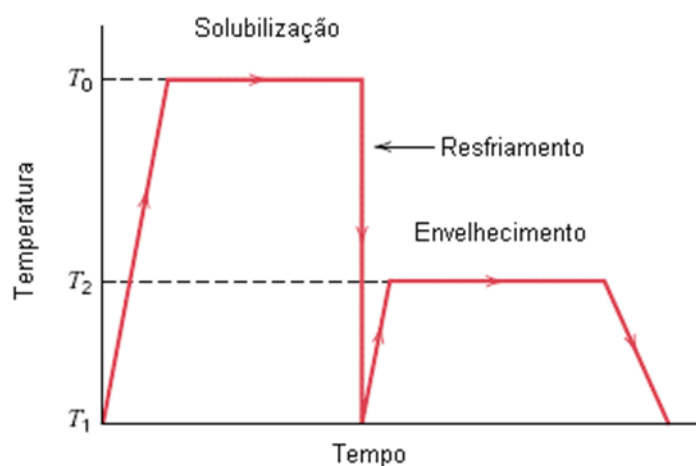
- i) T9 – Solubilização, envelhecimento artificial e encruamento;
- j) T10 – Envelhecimento artificial sem prévia solubilização e trabalho a frio.

Para caracterizar uma variação nos detalhes da técnica, sem mudança do tipo de tratamento, produzindo mudanças aceitáveis nas propriedades mecânicas, então se criam índices adicionais. Por exemplo, usando-se um tratamento T6 com uma técnica diferente e obtendo-se sistematicamente melhores propriedades mecânicas, este novo tipo de tratamento poderia ser chamado de T61. Estes segundos números, no caso de ligas fundidas, em geral, são arbitrários, sem significado particular.

2.6.1 Tratamento Térmico T6

O tratamento térmico T6 é o mais comum, baseado no endurecimento por precipitação, desenvolvendo aumentos de dureza, limite de escoamento e limite de resistência a tração dos componentes com pequenas reduções na ductilidade. O tratamento T6 é iniciado com a primeira etapa de solubilização em seguida, resfriado bruscamente (têmpera) e posteriormente levado a uma estufa para a última etapa, de envelhecimento artificial. A Figura 14 abaixo traz uma representação esquemática do ciclo de tratamento T6.

Figura 14 Representação esquemática do ciclo de tratamento térmico T6.



Fonte: Callister (2002, p. 349)

Este tipo de tratamento visa à mudança de morfologia dos elementos de liga solúveis. O alumínio e suas ligas não apresentam comportamento martensítico, que são à base dos

tratamentos térmicos dos aços. Entretanto, através de solubilizações controladas e a precipitação de elementos de liga solúveis, a resistência mecânica de algumas ligas pode ser notavelmente aumentada. A obtenção dessas mudanças estruturais e de propriedades mecânicas nas ligas de alumínio está baseada no conhecimento e aplicação das relações de equilíbrio no estado sólido.

a- Tratamento de Solubilização

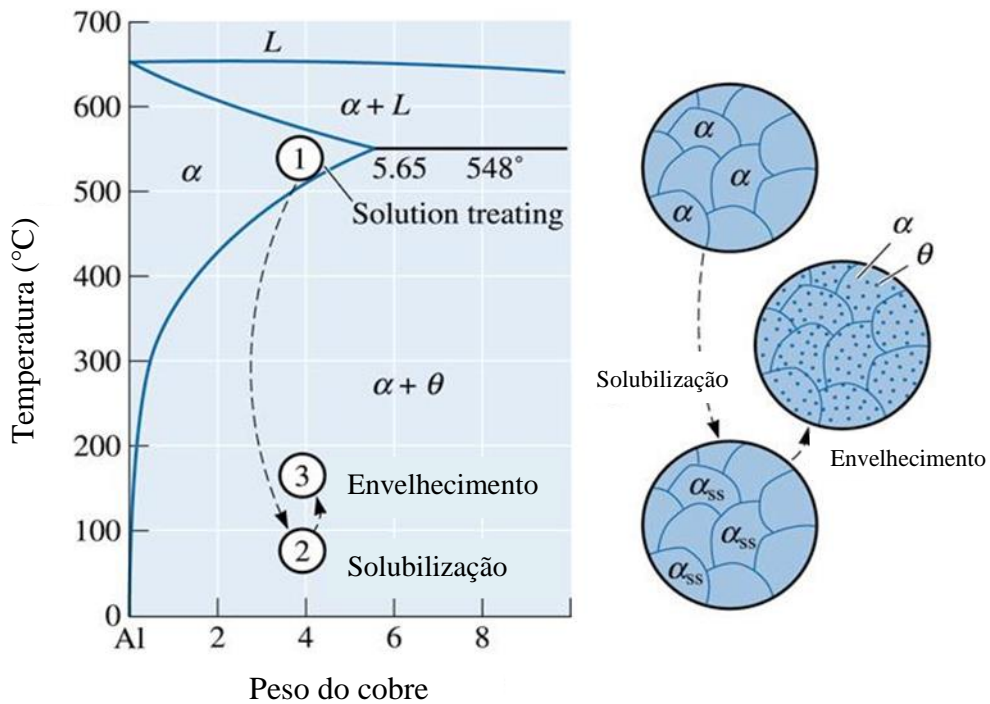
O tratamento térmico de solubilização consiste em aquecer uma liga tratável a uma temperatura exata, mantê-la a essa temperatura por um tempo requerido e resfriá-la rapidamente. A teoria metalúrgica do tratamento térmico é complicada, e a continuação só se dá no resumo do seu mecanismo:

Quando dois metais são fundidos juntos e aparentemente combinados deixando-se a mistura, os metais podem estar completamente dissolvidos entre si, ou somente dissolvidos em parte, de modo que se forma uma mistura dos cristais e dos metais não dissolvidos, e de uma solução sólida. Ademais, também é possível que estas ligas contenham compostos intermetálicos ou constituintes como são chamados. A solubilidade de um metal no outro depende em grande parte da temperatura com no caso da água com sal.

Em certa quantidade de sal em um copo de água, este dissolve até que a água fique saturada considerando a uma temperatura ambiente, porém se aumentarmos a temperatura da água também aumentará a quantidade de sal que pode ser dissolvido. Se a água esfria, o excesso de sal a temperatura normal se precipita. Porém se a solução se esfria rapidamente não se precipitará todo o excedente de sal e a solução ficará supersaturada. Esta condição não é estável e se corrige pela precipitação gradual do sal em excesso de uma saturação.

Os metais também podem ser solúveis entre si, exceto quando uma solubilização ou precipitação puder ocorrer no estado sólido. O cobre, por exemplo, tem uma solubilidade de aproximadamente 0,5% a uma temperatura ambiente, porém a 520°C a solubilidade aumenta até 4,0% no alumínio. A ação do cobre no alumínio está indicada na Figura 15.

Figura 15 Exemplo de uma solução sólida: solubilidade do cobre no alumínio.



Fonte: Callister (2002)

Se esta liga se esfria lentamente até uma temperatura ambiente, quase os 4% de cobre tem que precipitar-se e sair da solução. Devido à sua massa ser sólida e devido ao cobre não poder precipitar como o sal no fundo da solução, este tem que permanecer disperso na solução sólida. Porém se esta solução sólida é reaquecida a 520°C e se esfria rapidamente em água fria, o cobre permanece em solução que então estará supersaturada.

Todas as ligas que são tratadas termicamente por este modo se designam com tratadas termicamente por solubilização.

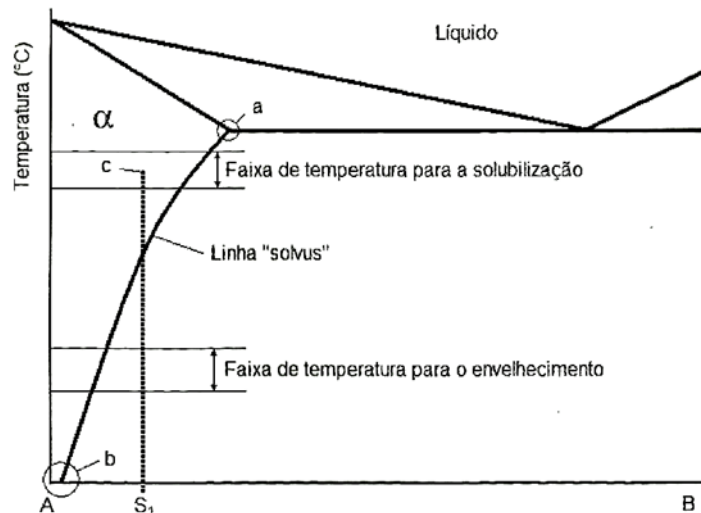
Nas Ligas Al-Si, observa-se que com o aumento da temperatura do ponto “b” até o ponto “a” a solubilidade aumenta (Figura 16). Ao elevar a temperatura até o ponto “c”, o elemento B estará dissolvido por completo na matriz α. Para que o elemento B se mantenha em solução a temperatura ambiente, é necessário que um resfriamento rápido ocorra, desta maneira, não haverá tempo para que o elemento B seja precipitado, esse fenômeno de resfriamento brusco é chamado de têmpera. O objetivo da têmpera é reter a maior quantidade possível de precipitado e diminuir tensões internas ao mínimo.

Na liga AlSi7Mg0,3 o tratamento de solubilização tem os seguintes efeitos:

- a) Dissolver as partículas de Mg₂Si em Al α;
- b) Homogeneizar a estrutura;

- c) Alterar a morfologia do Si eutético. (DUARTE; OLIVEIRA, 2009 ; KAUFMAN; ROY, 2004).

Figura 16 Diagrama de fases de uma liga com potencial de endurecimento



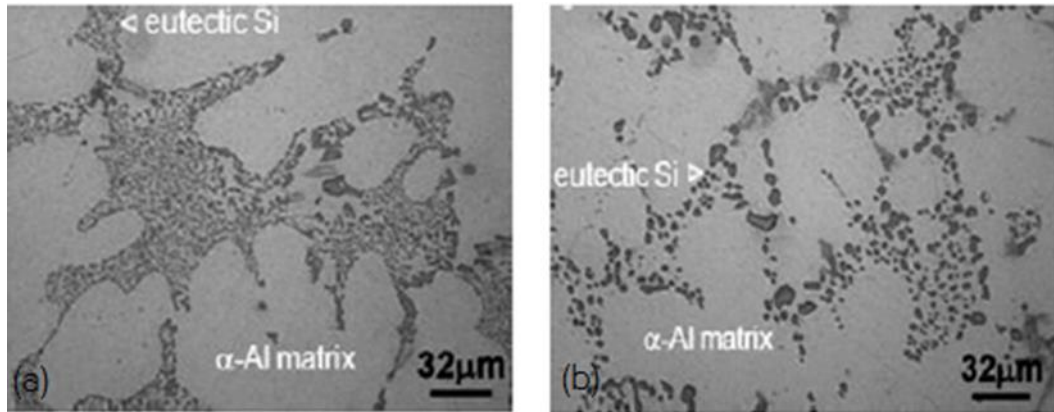
Fonte: Duarte e Oliveira (2009, p.155)

Um dos efeitos da solubilização nas ligas AlSi7Mg0,3 é o aumento do tamanho das partículas do silício eutético, devido sua tendência de “engrossar” e esferodizar e ao coalescimento provocado pela solubilização.

b- Envelhecimento

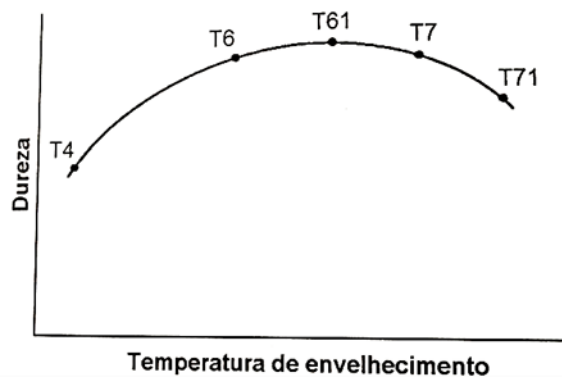
A segunda fase do tratamento térmico T6 é o envelhecimento. Nesta etapa é realizada a precipitação do soluto Mg_2Si de forma controlada e dispersa pela matriz (Figura 17). Esses precipitados serão os responsáveis por garantir o endurecimento da liga e o aumento da resistência, isso acontece devido a sua capacidade em restringir deslocamentos durante a deformação (MORAIS, 2015). A Figura 18 mostra a variação da dureza dos diferentes tratamentos de envelhecimento de ligas de alumínio.

Figura 17 (a) microestrutura com silício eutético modificado em estado bruto de fundição (b) mesma estrutura após T6



Fonte: Morais (2015, p. 28)

Figura 18 Dureza de ligas de alumínio quando envelhecidas por diferentes processos.



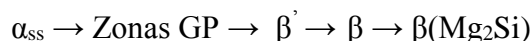
Fonte: Duarte e Oliveira (2009, p.182)

Após o processo de solubilização, a liga está fora de equilíbrio e a solução só lida apresentada se encontra supersaturada e com energia suficiente para precipitar outras fases durante o processo de envelhecimento.

O primeiro precipitado a ser nucleado no processo de envelhecimento é chamado de zona de Guinier e Preston (GP). A energia de deformação já foi em partes consumida quando o precipitado adquiri forma de disco e a deformação aumenta a tensão no reticulado cristalino da matriz Al α .

Após a formação das zonas de GP, ocorre a precipitação das fases metaestáveis de transição, as quais se formam antes da fase de equilíbrio estável. A sequência de precipitação

podem variar conforme a composição da liga. Na liga de AlSi7Mg0,3 a sequência de precipitação é:



A fase semicoerente com a matriz é β' , o máximo valor de dureza encontrado é verificando antes da formação das fases β (DUARTE; OLIVEIRA, 2009).

A temperatura e o tempo a qual o processo é submetido são variáveis cruciais para que as propriedades mecânicas adequadas sejam encontradas. Isso porque as propriedades podem variar conforme a duração da etapa de solubilização e o tempo e temperatura da etapa de envelhecimento, assim para um processo onde o tempo de solubilização é de 2 horas a 540 °C e a temperatura de envelhecimento de 180 °C, o máximo endurecimento não é atingido.

No entanto, submetendo o mesmo material a um processo de solubilização durante ¼ horas a 540°C e a um envelhecimento a 180 °C a maior dureza é alcançada ao fim de 3 horas.

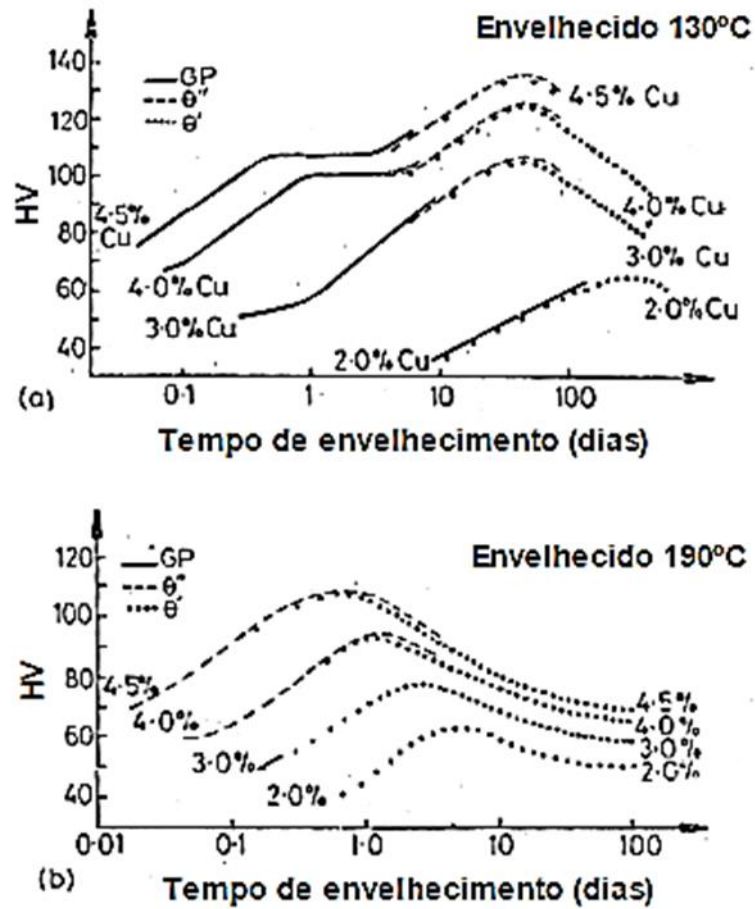
Por esse motivo é necessário encontrar um ciclo térmico adequado de modo a potencializar o endurecimento da liga sem a ocorrência de efeitos indesejados. Além desse efeito, outro fenômeno indesejado quando o processo de solubilização é prolongado é a difusão do magnésio presente na matriz para as regiões porosas da peça, impedindo a precipitação de Mg_2Si (MORAIS, 2015).

A Figura 19 mostra ligas de Al-Cu solubilizadas em uma região monofásica do diagrama e em seguida envelhecidas a 130 °C e a 190 °C em diferentes concentrações de cobre. As curvas mostram como a dureza do material varia conforme o tempo de envelhecimento e com o aparecimento das zonas de GP, θ' e θ'' na microestrutura.

Pelo gráfico nota-se que logo após a solubilização a dureza do material ainda é baixa e começa a aumentar com o aumento das zonas de GP, isso ocorre devido à alta tensão requerida nesta situação para que as discordâncias se movimentem através das zonas coerentes.

A dureza continua a aumentar quando se inicia a formação dos precipitados coerentes θ'' porque as discordâncias nesse instante são forçadas através da matriz que se encontra altamente deformada em resultado de um desvio perpendicular das placas de θ'' .

Figura 19 Dureza em função do tempo de ligas Al-Cu a (a) 130 °C e (b) 190 °C



Fonte: Dallabona e Pries (2007,p.67)

Com o início da formação de θ' o espaçamento entre os precipitados aumenta de modo que as discordâncias ganham mais espaço para se movimentar (DALLABONA; PRIES, 2007).

3 INTRODUÇÃO AO ESTUDO DE CASO

A equipe Fórmula CEM é formada por alunos da Universidade Federal de Santa Catarina e foi criada no ano de 2010. Desde então desenvolve veículos fórmula para competir na SAE Brasil que ocorre anualmente. A equipe iniciou sua jornada desenvolvendo apenas veículos movidos a combustão e em 2017 começou sua jornada no segmento de veículos movidos por motores elétricos.

As buscas por melhorias são constantes, pois além de conquistar boa pontuação nas provas da competição, também, se deseja um melhor desempenho em provas práticas. Uma das formas de conquistar um melhor desempenho e eficiência do veículo é a redução de peso do veículo.

A dinâmica de um veículo possui relação direta com o seu peso, desde sua distribuição nos eixos até o seu valor total calculado. Reduzir a massa de um veículo significa reduzir os esforços necessários vindos do sistema de powertrain para que se mova e realize manobras.

Dentro da competição uma das premissas para reduzir a massa total do veículo é garantir que a segurança e funcionalidade do veículo se mantenha independente das circunstâncias criadas para que houvesse redução.

Uma forma de reduzir a massa do veículo é utilizando materiais alternativos que apresentem densidade inferior, no entanto, apresentam resistência equivalente ou superior a resistência requerida. A escolha do material a ser utilizado em cada peça deve exigir uma análise detalhada dos esforços sofridos na região.

A peça a ser estudada em questão é a manga de eixo dos veículos a combustão e elétrico. A manga de eixo do veículo é a responsável por conectar todos os sistemas presentes no veículo, o sistema de direção, suspensão, freio e transmissão. Por esse motivo a manga de eixo deve resistir a esforços vindos do conjunto mola amortecedor, da balança, do cubo de roda, da pinça de freio e da barra de direção.

3.1 Histórico da manga de eixo desenvolvida em protótipos anteriores

A manga de eixo desenvolvida para o primeiro protótipo da equipe foi constituída de aço 1045 e produzida por meio de um processo de usinagem. A seleção desse material foi motivada por suas boas propriedades mecânicas no quesito resistência e custo.

No entanto, o processo escolhido e o material utilizado apresentaram grandes limitações a geometria da peça. A usinagem de peças com geometria complexa possui um custo elevado, o que exigiu que o design da manga fosse simples e o que limitou a realização de um ângulo para o ajuste de câmbio impedindo alterações para o ganho de desempenho.

Outra desvantagem da utilização do aço 1045 foi sua elevada densidade, que resultou em um componente final alcançando 2,40 kg de massa, resultando em um item superdimensionado, como mostrado na Figura 20 (SANTOS, 2016).

Figura 20 Conjunto da manga de eixo ao cubo de roda do protótipo de 2015



Fonte: Santos (2016, p.37)

A partir desse projeto desenvolvido e por meio de um benchmarking das concepções utilizadas pelas equipes competidoras foram identificados fatores importantes a serem considerados no projeto da manga de eixo:

- Possuir ajuste para geometria de suspensão (camber, caster, inclinação do pino-mestre e convergência);
- Ser fácil de conectar aos componentes adjacentes;
- Deve ser fácil de fabricar;
- Ter a geometria simples;
- Ser rígido, minimizando a interferência da flexibilidade na cinemática do sistema de suspensão;
- Ser leve.

A partir dessas premissas se iniciou um novo projeto para a manga de eixo para o ano seguinte, mantendo alguns conceitos anteriores e modificando estrategicamente outros. O novo projeto passou a ser simétrico, para que pudesse ser aplicado tanto do lado direito do veículo como do lado esquerdo e sua complexidade fosse diminuída. Assumiu-se como material base para a concepção o ferro fundido nodular ISO 1083/JS/500-10 com alto teor de silício. Esse material possuía a vantagem de permitir que a peça fosse fabricada tanto por fundição quanto por usinagem, abrindo mais opções no seu desenvolvimento.

Essas adaptações realizadas fornecera além de uma geometria mais adequada (Figura 21) para o bom desempenho do protótipo uma redução de peso de 34 %, alcançando o valor de 1,58 kg de massa e a seguinte geometria (SANTOS, 2016):

Figura 21 Manga de eixo do protótipo de 2016



Fonte: Santos, (2016, p.76).

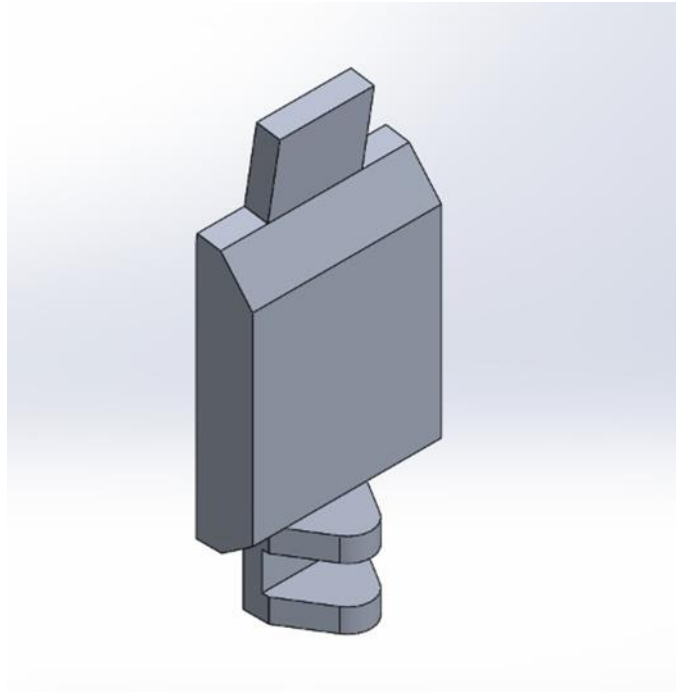
Para o desenvolvimento da manga de eixo em 2017 pretende-se aumentar ainda mais a porcentagem de redução de peso, para esse fim, um novo projeto será desenvolvido.

3.2 Desenvolvimento em CAD

O desenvolvimento da manga de eixo em CAD teve como partida os pontos onde a suspensão seria conectada.

Todos esses pontos coordenados foram calculados e transferidos para que uma geometria abrangendo todas essas regiões fosse desenvolvida. O design inicial da manga foi obtido em *Software Computer Aided Design (CAD) Solidworks 2015* como mostra a Figura 22.

Figura 22 Design inicial da manga de eixo

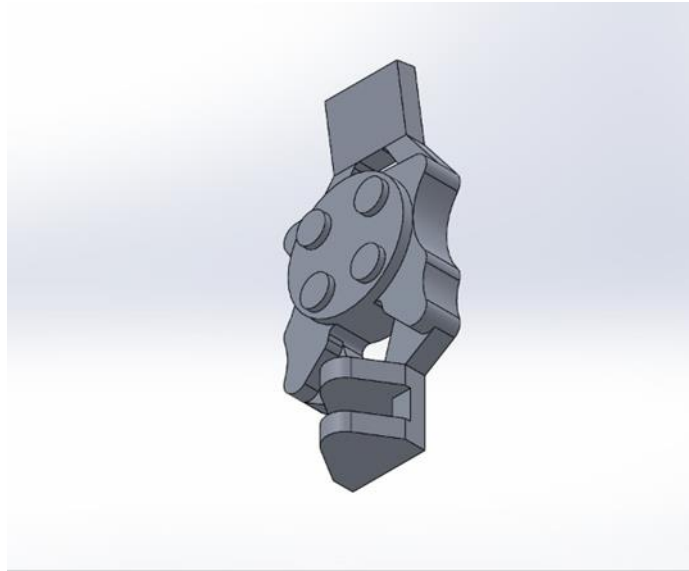


Fonte: A Autora (2017)

Para que a extração de massa da peça em pontos onde não havia grande requisição de tensão fosse realizada o software Solidthinking Spire foi empregado, resultando uma geometria mais complexa, porém mais leve e adequada a aplicação como mostra a Figura 23.

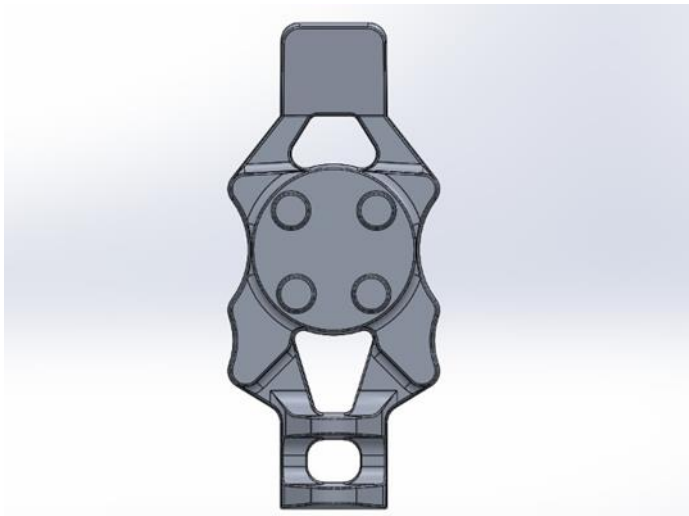
Essa geometria foi importada novamente ao *Solidworks 2015* para que ajustes como filetes e ângulos fossem realizados (Figura 24).

Figura 23 Manga de eixo após a redução de massa



Fonte: A Autora (2017)

Figura 24 Geometria final da manga de eixo



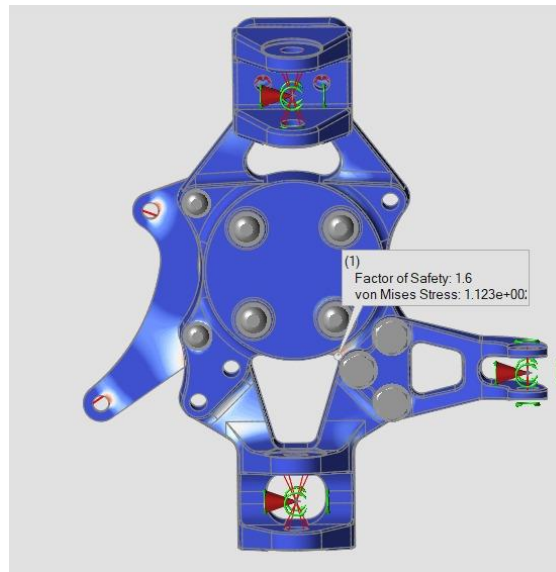
Fonte: A Autora (2017)

A análise estrutural deste elemento levou em consideração que a principal causa de falha que ocorre em um material dúctil é o deslizamento que ocorre ao longo dos planos de contato dos cristais orientados aleatoriamente e que formam o material. Para tanto, se um corpo de prova for submetido a um ensaio de tração pode-se analisar por meio dos resultados do ensaio como a tensão a qual o corpo de prova foi submetido irá provocar o escoamento do material (HIBBELER;2009).

As análises realizadas por meio do software Solidthinking Inspire 2017 mostraram a tensão a qual toda peça é submetida em serviço em toda sua área. O carregamento considerado na simulação são as cargas a qual a manga de eixo será submetida em condições críticas de trabalho. Para isso foi considerado que o veículo se encontrava em frenagem repentina e realizando uma curva de modo que a manga de eixo simulada esteja sendo solicitada lateralmente e longitudinalmente.

O resultado obtido das simulação é apresentados na Figura 25:

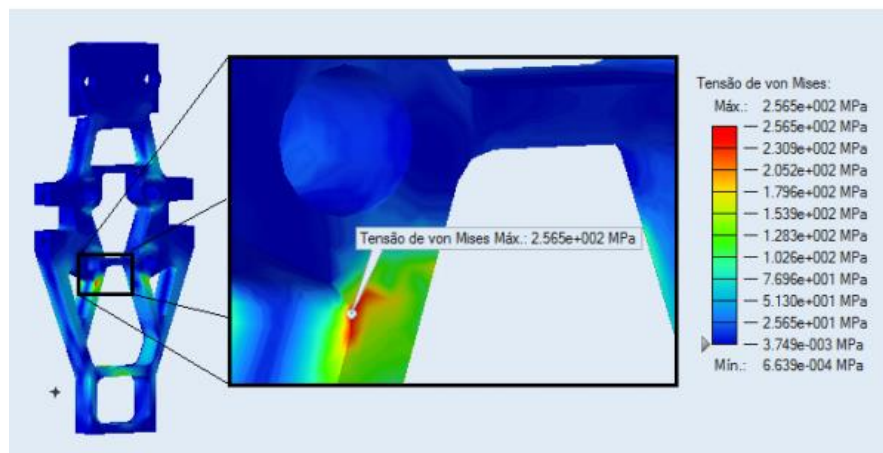
Figura 25 Tensão de Von Misses na manga de eixo por meio da simulação



Fonte: A Autora

A manga de eixo do ano de 2015 foi simulada em condições diferentes, levando em consideração apenas cargas laterais em situações extremas como mostra a Figura 26. No entanto, ainda assim, a maior tensão encontrada na configuração atual onde maiores solicitações foram consideradas possuem valores menores que 50% dos valores de tensão encontrado na configuração antiga. Esses valores comprovam a eficácia na resistência da peça produzida com o material e processo sugerido.

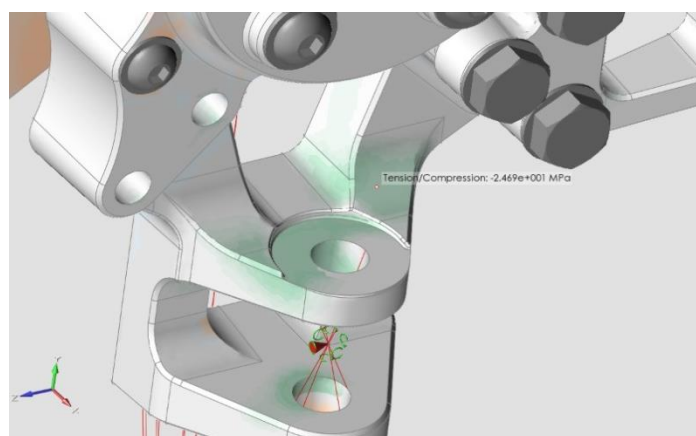
Figura 26 Tensão de Von Mises encontrada na manga de eixo do ano de 2015 considerando cargas laterais



Fonte: A Autora

Outros dados obtidos foram as tensões de tração e compressão máxima, mostrados na Figura 27.

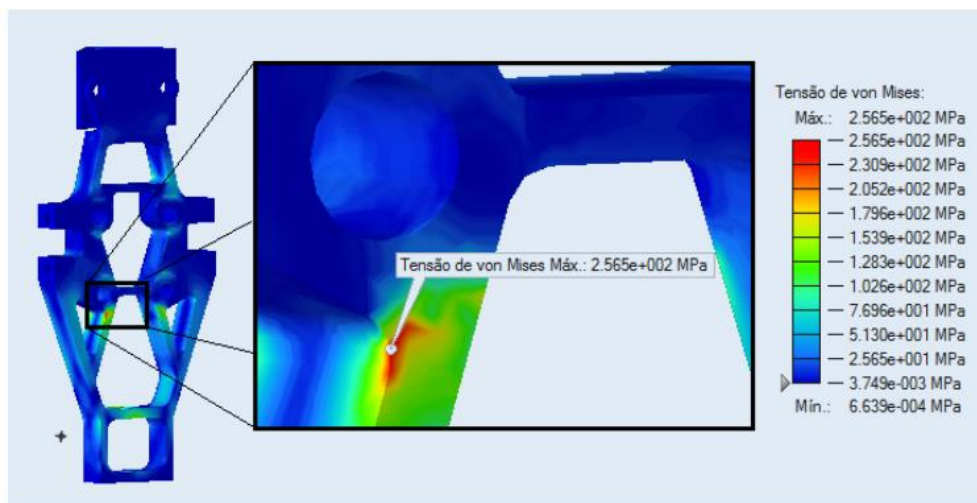
Figura 27 Pontos de concentração de tensão de compressão na manga de eixo atual



Fonte: A Autora

Pelas simulações as maiores tensões encontradas no conjunto manga / ponta de eixo são de 350 MPa de tração e de 338 MPa na compressão em pontos localizados de concentração de tensão na ponta de eixo, e de 113MPa da manga em questão. Se comparado as simulações realizadas na manga de eixo utilizada no ano de 2015 os valores encontrados são bastante inferiores devido à sua geometria mais simples, como mostra a Figura 28.

Figura 28 Simulação de tensão da manga de eixo do ano de 2015



Fonte : Santos (2016, p.74)

A manga de eixo desenvolvida em 2015 foi submetida a simulações considerando separadamente cargas laterais e cargas longitudinais, diferentemente das simulações do manga de eixo atual, a qual considerou uma condição extrema na qual as duas cargas atuavam. Sob cargas longitudinais e tensão máxima de von misses encontrada na manga de eixo foi de 325 Mpa e considerando cargas laterais a tensão máxima encontrada na manga de eixo foi de 256 Mpa.

É interessante notar que mesmo considerando as duas cargas sobre a manga de eixo atual, o seu valor é bem inferior a tensão encontrada nas simulações da manga de eixo anterior considerando cargas separas.

3.3 Seleção do processo e do material

Visto que a geometria resultante dos programas utilizados obteve grandes variações de ângulos e arestas, considerou-se que a geometria da manga de eixo era de alta complexidade, o que descartou a possibilidade de utilizar processos convencionais de usinagem assim como havia sido utilizado nas mangas de eixo produzidas anteriormente. Desta forma, um processo mais adequado foi requerido. Além disso, ainda se buscava uma maior redução de peso no componente final.

Uma das soluções encontradas na indústria automotiva atualmente para a redução de peso nos componentes, como já mostrado, é a utilização do alumínio. No cenário mundial tem se observado o interesse cada vez maior no emprego de peças fundidas e componentes

estruturais produzidos em ligas de baixa densidade e boa resistência mecânica visando reduzir massa e, conseqüentemente, o consumo de combustível e a emissão de poluentes na atmosfera (DUARTE, 2009). O seu uso no exterior tem crescido cada vez mais e essa é a tendência que vem chegando ao Brasil.

As propriedades proporcionadas pelo alumínio são ideais para a aplicação na indústria automotiva. Baixa densidade, alta resistência e diminuição de emissão de poluente são as características mais visadas no ramo, propriedades bem supridas pelo alumínio. Apesar disso, o alumínio apresenta um comportamento dúctil e requer que ligas sejam adicionadas para a obtenção de melhores propriedades.

As ligas de Al-Si constituem cerca de 85 a 90% do total das ligas de alumínio fundidas, isso porque o principal efeito do Si nas ligas de alumínio é na melhoria de características de fundição. A adição de silício aumenta a fluidez, a resistência a trinca a quente e reduz a formação de rechupes através da menor contração da liga na solidificação, esse fatores contribuem para a elevada importância comercial das ligas de Al-Si (DUARTE, 2009).

A adição de magnésio ao Al-Si é justificada por sua capacidade em aumentar a dureza, limite de escoamento e resistência da liga. O silício combinado com o magnésio forma a fase Mg_2Si , a qual se dissolve no tratamento térmico de solubilização e precipitação, resultando em melhor resistência mecânica.

Analisado esses fatores, o processo utilizado para a fabricação da manga de eixo foi o processo de fundição com liga AlSi9Mg0,3, fornecida pela empresa Alutec, a qual patrocina o projeto.

A possibilidade encontrada na fundição de desenvolver geometrias sem restrições tornou esse processo vantajoso para esta aplicação, isso permitiria eliminar a maior quantidade de massa em excesso da peça, reduzindo de forma relevante a massa em relação a massa das peças produzidas nos anos anteriores.

3.4 Projeto do Modelo da Manga

A prototipagem rápida é uma técnica que permite tornar físico um modelo virtual com baixo custo e tempo. A utilização de prototipagem na engenharia tem se tornado cada vez mais comum por sua praticidade e precisão.

Uma importante característica da prototipagem é a sua natureza experimental, envolvendo um ciclo repetitivo de tentativas que incluem produção do protótipo, avaliação e correção até que as expectativas sejam satisfeitas (SAFFARO, 2007).

Uma outra forma de aplicar a prototipagem é na manufatura de peças em pequena escala de produção, já que o processo dispensa o uso de ferramentarias personalizadas de alto custo.

Outro objetivo do processo é o de acelerar o tempo de resposta da investigação. É comum utilizar simultaneamente mais de um protótipo focado para estudar o desempenho global do produto, sendo que, em geral, um deles analisa a aparência do produto e outro o aspecto operacional (SAFFARO, 2007).

O uso de manufatura aditiva para o desenvolvimento de um modelo prévio se justificou pela agilidade e custo do processo, além de permitir contato direto com a geometria física da peça antes mesmo de sua produção, evitando a necessidade de ajustes na peça posterior a fabricação.

O modelo da manga de eixo foi prototipado em ácido polilático (PLA), termoplástico biodegradável. Sua utilização se deu devido a sua alta precisão ocasionada por sua boa fluidez de extrusão e sua baixa contração, permitindo maior fidelidade aos detalhes e cantos mais acentuados. É indicado para protótipos que não são submetidos a esforços mecânicos, atritos e altas temperaturas.

A manga foi prototipada com uma tolerância dimensional de 1 %, esse valor foi utilizado considerando a contração que ocorre no alumínio no processo de solidificação, que chega a ser de 1,2. O modelo prototipado é mostrado na Figura 29.

O ângulo de saída aconselhado para aplicar a peça com o intuito de tornar possível a manufatura do molde é, geralmente, superior a 5 °. Como o ângulo de saída utilizado na manga de eixo foi de 3 °, a retirada do modelo do molde foi complicada e exigiu reparos posteriores as cavidades.

Figura 29 Modelo da manga de eixo dianteira



Fonte: A Autora (2017)

3.5 Desenvolvimento do molde

O processo de moldagem em areia é um dos mais versáteis entre os processos existentes devido a sua capacidade de produzir as mais diferentes formas geométricas e tamanhos com alta qualidade. De acordo com a American Foundryme Society (AFS), aproximadamente 90% de todas peças fundidas anualmente nos Estados Unidos são produzidos por meio desse processo.

O processo de moldagem por areia é classificado em relação ao tipo de areia em que se utiliza, sendo a areia verde a mais utilizada para a aplicação. A areia de fundição deve apresentar certas características que permitem uma moldagem fácil e segura. Dentre elas, as mais importantes são: plasticidade e consistência, moldabilidade, dureza, resistência e refrateriedade e para a determinação dessas características são necessários ensaios em laboratório (ASM HANDBOOK, 1988; CHIAVERINI, 1986).

A granulometria e formato dos grãos de areia também são fatores importantes para a qualidade do processo. Os grãos da areia devem possuir geometria irregular de forma que não se acomodem aproximados uns aos outros permitindo que canais microscópicos sejam encontrados em toda estrutura do molde, esses canais serão responsáveis por eliminar os gases produzidos no vazamento do metal líquido.

A areia utilizada para a fabricação da manga de eixo foi a areia branca disponibilizada pela empresa Alutec para o procedimento com especificações controladas de módulo de finura (70 a 80 AFS), teor de sílica (mínimo 95 %), umidade (máximo 0,1 %) e argila (máximo 0,2

%). A areia selecionada para a produção do molde se apresentou viável para a obtenção da qualidade e precisão requerida no produto final.

A areia de fundição é preparada em misturadores especiais, onde os componentes ainda secos são ligas por meio da adição de água e silicato até a completa homogeneização. Esta areia, após o processo e reaproveitada quase por completo.

A areia seca utilizada no processo em questão foi misturada ao silicato de sódio alcalino C112 e homogeneizados em um intervalo de 3 a 6 min (Figura 30) para que fosse iniciada a confecção do molde.

Figura 30 Areia seca sendo misturada ao silicato



Fonte: A Autora (2017)

O desenvolvimento do molde foi completamente manual, posto que um processo manual traria maior custo benefício que um processo mecânico. A areia é compactada em um recipiente suficientemente grande para o modelo por meio de um soquete.

Tanto o modelo como a caixa do molde são cobertos por uma solução de grafite para que a areia não crie aderência a essas superfícies, como mostrado na Figura 31.

Figura 31 Modelo sendo coberto por uma solução de grafite



Fonte: A Autora (2017)

O modelo é posicionado esquematicamente, considerando os canais de alimentação, que para a peça em questão não é necessário, o posicionamento dos massalotes e as saídas para os gases (Figura 32).

Figura 32 Posicionamento da peça no molde



Fonte: A Autora (2017)

Alguns orifícios são confeccionados em vários pontos do molde. É por esses orifícios que o gás CO_2 é injetado secando o molde e garantindo a união entre os grãos da areia e a resistência do molde aos esforços de trabalho.

O processo de CO₂ é um processo relativamente recente no mercado e pode ser aplicado em moldes das mais variadas dimensões (Figura 33). A sua função é reagir com o silicato de sódios formando sílica gel, carbonato de sódio e água. Essa reação resulta no endurecimento do molde em um tempo relativamente curto (CHIAVERINI, 1986).

Figura 33 Injeção de CO₂ pelos orifícios do molde



Fonte: A Autora (2017)

A retirada do modelo do macho é realizada de forma cuidadosa, pois não deve retirar e principalmente acrescentar areia no molde. Em todos os casos, ainda é preferível que falte areia no macho do que sobre. Em uma peça onde excesso de areia for encontrado no molde, sua estrutura apresentará perfurações irreversíveis, e que não podem ser ajustadas posteriormente. Em caso de peças onde foi encontrado falta de areia no molde, um processo de usinagem e acabamento posterior é suficiente para tornar a peça conforme.

No modelo da manga de eixo, o baixo ângulo de saída da peça dificultou a retirada do modelo, danificando algumas áreas que foram consertadas em seguida.

Alguns canais que ligam a cavidade do macho até a extremidade do molde são desenhados para que a eliminação dos gases produzidos seja completa e a manga não possua porosidades.

3.6 Fusão do material

Todo o processo de fundição segue a norma EN 1706, similar a norma A356. Para o processo de fundição da liga de alumínio é utilizado um forno de fusão inicialmente, para tornar o material líquido, após a fusão (Figura 34), o material é encaminhado para o forno de

manutenção. É neste local que são feitas as correções químicas e o processo de purificação da liga.

Os lingotes de alumínio utilizados no processo possuem pureza e 99,7 %, e passam a ter outra composição após as correções realizadas no forno de manutenção. São adicionados modificadores como Sódio e Estrôncio e os componentes da liga como o silício e o magnésio, os quais possuem especificações adequadas de concentração para cada liga.

Figura 34 Liga Al-Si7-Mg0,3 fundida



Fonte: A Autora (2017)

A liga de alumínio utilizada foi a liga Al-Si7Mg0,3 com as porcentagens nominais apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 Porcentagens nominais do Al Si 7Mg0,3

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	outros
6,5 a 7,5	0,19	0,05	0,10	0,25 a 0,45	-	0,07	-	-	0,08 a 0,25	0,05

Fonte: A Autora (2017)

O processo de desgaseificação ocorre com o auxílio de uma unidade de desgaseificação de fundição (FDU), que funciona como um rotor o qual distribui o gás uniformemente dentro da liga fundida.

Esse procedimento é necessário para que gases e impurezas não fiquem retidos a liga, causando porosidade. O uso de gás inerte tem aumentado nos últimos anos devido ao desenvolvimento de um equipamento que utiliza um rotor de grafite para introduzir bolhas finas e dispersas do gás (DUARTE, 2009).

O gás N_2 , gás inerte utilizado no processo, é responsável por extrair o hidrogênio e outras impurezas da mistura por meio de arraste mecânico. As pequenas bolhas de N_2 empurram as bolhas de H_2 presentes dentro da liga, forçando sua saída. Uma placa defletora é inserida juntamente a FDU com a função de evitar uma zona turbulenta na superfície do forno, impedindo a reinsertão de oxigênio na liga.

Existem ainda outras opções de gases utilizados para a desgaseificação como o Cl_2 por exemplo, no entanto são gases que alto custo e reativos, que podem trazer malefícios a saúde.

Após esse processo, uma análise química da liga é realizada por meio de uma amostra, chamada de moeda, a qual possui sua superfície usinada para a melhor obtenção do resultado como mostra a Figura 35.

Figura 35 Obtenção da composição da liga por meio de espectrometria de emissão ótica



Fonte: A Autora (2017)

Após a retirada da amostra do forno e a usinagem da superfície da mesma, esta é submetida espectrometria de emissão Ótica. Essa ferramenta fornece em detalhe a composição do fundido permitindo verificar se a liga se encontra adequada para a aplicação em questão. As porcentagens encontradas por esse processo são mostradas na Tabela 6.

Tabela 6 Porcentagem de cada elemento presente dentro da liga na primeira análise

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti
6,89	0,185	0,030	0,0058	0,304	0,0078	0,07	0,020	0,0072	0,093

Fonte: A Autora (2017)

A partir dos desses dados, uma comparação aos valores exigidos em norma é necessária. As quantidades de alguns elementos da liga devem ser bem controladas a fim de evitar propriedades indesejadas. A quantidade de Fe é uma delas, excepcionalmente se a fundição ocorrer utilizando ferramentas ferrosas, como o processo de coquilha. Uma quantidade baixa de ferro na liga irá fazer com que a liga retire ferro das ferramentas, danificando o ferramental de alto custo, no entanto, uma alta porcentagem de ferro irá formar fases de eutéticos secundários complexos na forma de plaquetas, danificando a resistência do material.

Já o magnésio, elemento de interesse na liga utilizada, por ser um elemento responsável pela resistência da liga, deve possui porcentagens acima de 0,30. E apesar de ter apresentado valores aceitáveis e dentro do especificado, teve sua porcentagem acrescidas para que o fator de segurança fosse elevado. Os dados foram novamente analisados após o acréscimo de Mg e são mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 Porcentagem de cada elemento presente dentro da liga na segunda análise

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti
7,43	0,19	0,020	0,0021	0,357	0,0086	0,041	0,022	0,012	0,0086

Fonte: A Autora (2017)

A verificação da temperatura do material é feita por meio de um pirômetro, e é importante para informar se o material se encontra fundido por completo. A temperatura de fusão do material é a base para o processo, tendo em vista que o alumínio possui temperatura de fusão de 650 °C, e que o pirômetro se estabilizou em 750°C, conclui-se que o material se fundiu completamente.

A faixa de temperatura a qual se utiliza para a vazão do material ao molde é de 720 a 780°C.

3.7 Vazamento da liga e desmoldagem

Com auxílio do cadinho o alumínio fundido é despejado nas cavidades do molde e solidificado. Quando resfriado o suficiente para ser retirado o molde (Figura 36, Figura 37) é desfeito e as peças são imersas em banho para a retirada de impurezas superficiais.

Figura 36 Molde com suas cavidades preenchidas de alumínio fundido



Fonte: A Autora (2017)

Figura 37 Manga de eixo antes da retirada do molde de areia



Fonte: A Autora (2017)

As cavidades do massalote inicialmente produzidas não foram suficientemente volumosas a ponto que o rechupe fosse evitado na manga de eixo, dessa forma, massalotes de maiores dimensões foram utilizados para a produção das peças seguintes.

3.8 Acabamento

Após a retirada do molde a peça possui ainda rebarbas e seus orifícios se encontram preenchidos de alumínio (Figura 38).

Figura 38 Manga de eixo sem o processo de acabamento



Fonte: A Autora (2017)

Para a retirada desse excesso de material resultante do processo de fundição, a manga de eixo é submetida a sucessivos processos de usinagem que darão melhor aparência e o acabamento a peça como mostrados na Figura 39.

Figura 39 Retirada do massalote e dos canais



Fonte: A Autora (2017)

3.9 Tratamento térmico das mangas

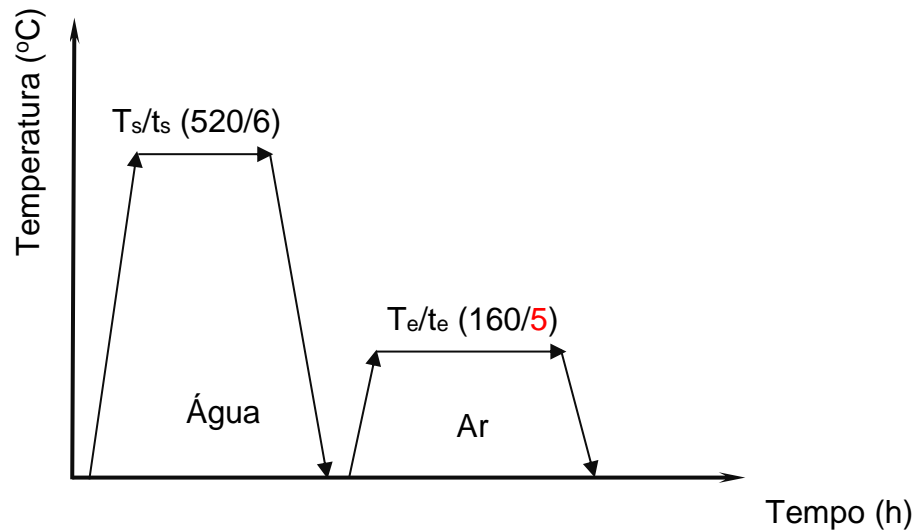
Os tratamentos térmicos realizados em ligas de alumínio consistem basicamente na solubilização, envelhecimento e alívio de tensão buscando a melhoria das propriedades mecânicas. Para que a liga seja solubilizada a solubilidade do soluto deve ser diretamente proporcional ao decréscimo da temperatura, como é o caso das ligas de AlSiMg (DUARTE, 2009).

Para a peça em estudo, a resistência mecânica é uma propriedade muito importante uma vez que a manga de eixo sofre esforços mecânicos consideráveis. A utilização de aço 1045 e ferro fundido, nos protótipos anteriores, pôde ser justificada pelos esforços sofridos pela manga. Em relação às exigências mecânicas, esses materiais supriam com excelência suas necessidades. No entanto, em relação a porcentagem de massa que acresciam ao veículo, deixavam a desejar.

A possibilidade de submeter as ligas de alumínio a tratamentos térmicos foi um dos fatores que motivou a utilização desse material na manga de eixo. Após o tratamento térmico da peça a sua resistência é capaz de equivaler aos esforços requeridos nos locais mais vulneráveis da manga.

O tratamento térmico T6 consistiu em solubilização a 520°C seguida de envelhecimento artificial 160°C, por tempo de 6 e 5 horas, respectivamente. Um esquema do tratamento realizado é representado na Figura 40.

Figura 40 Representação do ciclo de tratamento realizado nas mangas de eixo



Fonte: A Autora (2017)

Também, foram submetidos ao mesmo ciclo de tratamento térmico cinco corpos de prova para determinar as propriedades mecânicas do material, de modo a validar o comportamento que é esperado, para atender os critérios do projeto estrutural.

Os corpos de prova foram confeccionados com o mesmo metal que foi utilizado para fundir as mangas, sendo que o vazamento foi realizado em coquilha. A geometria dos corpos de prova atende às especificações estabelecidas pela Norma NBR ISO 6892 – 2002. A Figura 41 mostra o formato final dos corpos de prova utilizados.

Figura 41 Formato dos corpos de prova para ensaios de resistência a tração segundo a NBR ISO 6892 - 2002

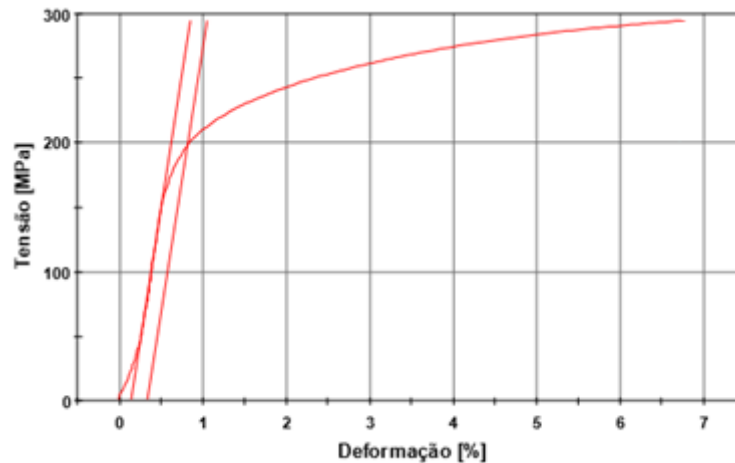


Fonte: A Autora

Os ensaios mecânicos foram realizados junto ao Laboratório de Caracterização Mecânica (LATECME) do Instituto Senai de Inovação, em Joinville-SC, para o qual utilizou-

se uma máquina universal de ensaios mecânicos Instron, modelo 5988, com capacidade de carga de 400 KN. Uma curva característica do comportamento mecânico é ilustrada na Figura 42, o valor médio do limite de resistência a tração (LRT), limite de escoamento (LE) e alongamento total (At) é indicado na Tabela 8.

Figura 42 Curva característica de tensão vs deformação da liga AlSi7Mg0,3



Fonte: A Autora

Tabela 8 Limite de resistência máxima (LRT), limite de escoamento (LR) e alongamento total (At) da liga AlSi7Mg0,3 tratada termicamente

CP	LRT(MPa)	LE(MPa)	At _{0,2} (%)
1	284,8	191,1	4,30
2	286,1	197,1	3,60
3	291,1	202,3	4,40
4	290,1	194,1	7,00
5	294,1	198,4	6,70
Média	289,24	196,6	5,20

Fonte: A Autora

A Tabela 9 apresenta o comportamento mecânico obtido na liga AlSi7Mg0,3 com tratamento T6 junto aos valores recomendados pela norma UNS A 13560, mostrando correspondência entre os valores obtidos experimentalmente com os estabelecidos pela norma, atendendo ao nível de esforço solicitado às mangas através dos critérios adotados na simulação numérica.

Tabela 9 Comparação dos valores obtidos em testes com os valores exigidos em norma para o material

Identificação	LRM(MPa)	LE(MPa)	At _{0,2} (%)
AlSi7Mg0,3 - T6 (experimental)	289,24	196,6	5,20
UNS A 13560	235	165	3,50

Fonte: A autora

Do ponto de vista experimental constatou-se que os valores do limite de resistência mecânica, de escoamento e de alongamento total são superiores aos estabelecidos em norma, podendo estar associado à estratégia de temperatura e tempo adotados durante o envelhecimento que pode provocar níveis de variáveis de respostas, conforme a pesquisa desenvolvida por Dallabona & Pries, 2007.

3.10 Orçamento

Um dos valores mais altos encontrados em um processo de fabricação é o valor referente ao tempo de fabricação de uma peça, dentro desse valor está incluso o tempo de uso de uma máquina, o custo dos funcionários que fizeram parte do desenvolvimento da peça, a manutenção devido ao uso da máquina entre outras despesas.

Os valores orçados no desenvolvimento da manga de eixo dianteira consideram a quantidade de material utilizado na peça, o tempo necessário desde o processo de fundição do material até o processo de acabamento e tratamento térmico da peça e o custos que essa valor resulta para a empresa e a quantidade produzida de cada peça.

Desta forma o custo final para a manga de eixo desenvolvida pela Alutec é apresentado na Tabela 10 a seguir:

Tabela 10 Custo da fabricação da manga de eixo dianteira

Peça	Quantidade	Massa	R\$/Kg	R\$/Peça	Total
Manga de eixo	9	1,466	96,75	141,83	1276,52

Fonte: A autora

4 CONCLUSÕES

Os valores encontrados pelas simulações da geometria da manga de eixo utilizada no ano de 2015 e a atual geometria permitiram concluir que a liga AlSi7Mg0,3 foi uma escolha assertiva para a peça.

Através do processador de fundição em areia possibilitou ganhar liberdade geométrica na peça, viabilizando a eliminação da maior quantidade de massa possível da manga de eixo. Esse processo se mostrou muito vantajoso na construção do veículo por permitir que as mais variadas geometrias fossem executadas sem grandes problemas.

Outro fator que tornou a fundição do alumínio mais sustentável foi a diminuição da massa devido a geometria obtida e a baixa densidade do alumínio, impactando na redução da massa total do veículo.

O tratamento térmico empregado conferiu ao material um conjunto de propriedades, superior ao estabelecido em normas, atendendo plenamente aos níveis de esforços obtidos por simulação numérica do projeto, mostrando-se como uma escolha adequada para este tipo de componentes.

A comparação entre os valores encontrados pela simulação e pelos testes de tração permitiram verificar a eficácia da manga de eixo para a sua aplicação, validando a peça para a utilização no protótipo formula.

As propriedades mecânicas conferidas no resultado final foram muito superiores as desejadas pela norma e requerida pela manga de eixo em condições extremas de uso, o que garantiu um alto fator de segurança a peça.

Os requisitos inicialmente desejados de redução de peso foram alcançados, resultando em um valor final de 1,015kg de massa.

5 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Devido ao curto período de tempo para o desenvolvimento deste estudo, alguns testes e validações não puderam ser realizados, assim, seguem algumas sugestões para trabalhos futuras:

- Realizar um estudo mais criterioso para correlacionar as variáveis do tratamento térmico com os aspectos microestruturais e mecânicos para esta aplicação de engenharia;
- Analisar a melhora na eficiência do veículo de competição resultante da utilização das peças fundidas em liga de alumínio.
- Utilizando acelerômetros avaliar a tensão a qual a manga de eixo foi submetida durante a competição e comparar os valores encontrados na prática aos valores obtidos de forma teórica.

REFERÊNCIAS

ASM HANDBOOK, **Metals Handbook Casting**. 9ª Ed. Vol. 15. 1988.

ASM HANDBOOK, **Metals Handbook: Properties and Selection: nonferrous alloys**. 10ª ed, ed. A.I. Handbook. Vol. 2. 1990.

BARTOLOMEU, A. F; JUNIOR F. G. T; SILVEIRA, M. F. **Ligas da série alumínio-magnésio-silício (6xxx)**. Centro Universitário do Leste de Minas Gerais. 2013.

CALLISTER, William. **Ciência E Engenharia de Materiais: Uma Introdução** . Grupo Gen-LTC, 2002.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica – Estruturas e Propriedades da Liga**. 2 ed. São Paulo: Mc-Grae Hill, Vol. 1. 1986a.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica – Materiais de Construção Mecânica**. 2 ed. São Paulo: Mc-Grae Hill, Vol. 3. 1986c.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica - Processos de Fabricação e Tratamento**. 2 ed. São Paulo: Mc-Grae Hill, Vol. 2. 1986b.

DALLABONA, A; PRIES, R. **Influência do tempo e temperature de envelhecimento na microestrutura e propriedades mecânicas da liga AlSi10Mg**. 2007. 84 p. Trabalho de conclusão de curso, Instituto Superior Tupy, Joinville, SC. 2007.

DRIVEALUMINUM, **Aluminum: The Growth Story**. Disponível em: <<http://www.drivealuminum.org/aluminum-101/>>. Acesso em: 3 de set. 2017.

DUARTE, I. R; OLIVEIRA, C. A. S. **Processamento de ligas de alumínio fundidas**. 1ed. Joinville: Editora Nova Letra. 2009.

FILLETI, A. **As novas Aplicações para o alumínio na indústria automotiva – ABAL**. 7 de jun 2016. 72 slides.

FUOCO, R. **Fundição de ligas de alumínio**. IPT, São Paulo, Novembro 2001.

HIBBELER, Russell C. **Resistência dos materiais**. 7ed. Pearson Prentice Hall, 2006.

JACOBS, M.H. **Precipitation Hardening-TALAT**. 1999, EAA - European Aluminium Association.

KAUFMAN, G. J; ROOY, E. L. **Aluminum Alloy Casting : Properties, Processes and applications**. 1 ed. Estados Unidos : ASM international. 2004.

MORAIS, T. A. A. **Processamento de uma liga de alumínio: Efeitos da modificação e do tratamento térmico T6**. 2015. 85p. Dissertação de mestrado – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Portugal. 2015.

SAFFARO, F. A. **Uso da prototipagem para gestão do processo de produção da construção civil**. 2007. 237p. Tese de doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2007.

SANTOS, R. K. P. **Desenvolvimento de produto para sistema de suspensão de veículo de competição**. 2016. 84p. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville. 2016.