

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**PROJETO DE FUNDIÇÃO DA CARÇAÇA DA CAIXA DE  
REDUÇÃO DE UM PROTÓTIPO MINI BAJA 4X4**

**ROBERTA BENEDITA COSTA**

**SÃO CARLOS - SP**

**2025**

# **PROJETO DE FUNDIÇÃO DA CARÇA DA CAIXA DE REDUÇÃO DE UM PROTÓTIPO MINI BAJA 4X4**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Guilherme Zepon

São Carlos - SP

2025



## ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)

**NOME:** Roberta Benedita Costa

**RA:** 791038

**TÍTULO:** Projeto de fundição da carcaça da caixa de redução de um protótipo mini baja 4x4

**ORIENTADOR(A):** Prof. Dr. Guilherme Zepon

**DATA/HORÁRIO:** 11/07/2025, 16h

### BANCA – NOTAS:

	Monografia	Defesa
Prof. Dr. Guilherme Zepon	10,0	10,0
Profa. Dra. Danielle Cristina Camilo Magalhães	10,0	10,0
<b>Média</b>	10,0	10,0

### BANCA – ASSINATURAS:

Prof. Dr. Guilherme Zepon

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** GUILHERME ZEPON  
Data: 11/07/2025 16:37:30-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Danielle Cristina Camilo

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** DANIELLE CRISTINA CAMILO MAGALHAES  
Data: 13/07/2025 14:09:18-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Magalhães

*Aos meus pais: Sandra e  
Roberto.*

## **AGRADECIMENTOS**

Esse projeto foi desenvolvido ao longo de dois anos, e sua conclusão só foi possível devido ao esforço e à dedicação de muitas pessoas que estiveram diretamente envolvidas.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à minha família, por ter sido a minha primeira rede de apoio. Por terem me apoiado de todas as formas possíveis, mesmo sem disporem de todos os recursos necessários para isso. Obrigada por me permitirem sonhar com aquilo que vocês mesmos não puderam. Vocês são o início de tudo isso — e também a razão para continuar.

Também agradeço ao projeto de extensão Baja UFSCar, por confiarem esse projeto a mim e ao professor Guilherme Zepon, pelas valiosas orientações e por ter acreditado em mim, quando eu mesma não acreditei.

Ao grupo MAGMA Engenharia do Brasil, por terem auxiliado na otimização do modelo e tornado possível a execução do projeto com grande sucesso; ao professor Eduardo Backes, por ter se disponibilizado a confeccionar o modelo por meio de impressão 3D; e aos técnicos Edson Roberto (Beto) e Rover Belo, pelas semanas de esforço dispensadas à construção do molde e vertimento da peça. Nada do que foi construído aqui teria saído do papel sem a ajuda de todas essas pessoas.

Além disso, gostaria de agradecer a todas as pessoas que me tocaram ao longo desse emocionante caminho que foi a graduação.

Aos meus amigos Anna Julia, Diogo, Mayumi e Nádima, pelas profundas e felizes conversas que guardarei para sempre comigo, e aos professores Walter José Botta Filho e Mariano Eduardo Moreno por serem grandes inspirações do tipo de profissional que eu almejo ser. Aos professores Francisco Coury e Lucas Otani, pelos inestimáveis ensinamentos.

Ao Fernando: obrigada por tudo e por tanto. Obrigada por ter me acompanhado e auxiliado em cada mínimo momento desse projeto.

Por fim, agradeço ao DEMa UFSCar, por ter sido o lugar onde vivi algumas das minhas memórias mais felizes e enriquecedoras.

*“Se te perderes, acha-te nas coisas que amas.”*

*— Victor Hugo*

## RESUMO

Ligas de alumínio frequentemente são processadas por meio de diferentes processos de fundição, associação essa, que costuma ser particularmente benéfica para o setor automotivo. No entanto, a execução de processos de fundição pode representar um grande desafio, principalmente quando se objetiva produzir geometrias com alto grau de complexidade. Assim, o presente trabalho visa desenvolver todo o projeto de fundição de um componente automotivo do tipo mini BAJA SAE, desde a sua concepção até a execução do projeto e análise das peças obtidas. Para tal, o projeto foi realizado com base nos conceitos típicos definidos na literatura e, posteriormente, otimizado por meio de ferramentas de simulação numérica. A relação de iteração entre essas duas rotas permitiu, portanto, corrigir erros que poderiam ser catastróficos para o desempenho do projeto. Por fim, a integridade das peças produzidas foi analisada por meio de microscopia óptica e ensaios de dureza.

**Palavras-chave:** Fundição, Simulação, Otimização, Automobilístico.

## **ABSTRACT**

Aluminium alloys are frequently processed through various casting methods, an association that is particularly advantageous for the automotive sector. However, the execution of casting processes can pose significant challenges, especially when aiming to produce components with high geometrical complexity. Therefore, the present work aims to develop the complete casting project of an automotive component for a Baja SAE vehicle, from its conception to the execution of the project and analysis of the manufactured parts. To achieve this, the project was initially based on conventional concepts established in the literature and subsequently optimized using numerical simulation tools. The iterative relationship between these two approaches allowed for the correction of errors that could have been catastrophic to the performance of the project. Finally, the integrity of the produced components was evaluated through optical microscopy and hardness testing.

**Keyword:** Casting, Simulation, Optimization, Automotive.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Protótipo BAJA UFSCar. Retirado de: [1].....	14
Figura 2 - Projeto da carcaça da caixa de redução. Fonte: Autoral.....	16
Figura 3 - Estratégia usada para o processo de seleção de materiais. Adaptado de: [2].....	17
Figura 4 - Visão esquemática da formação de bifilme em ligas fundidas. Adaptado de: [6].....	20
Figura 5 - Diagrama de fases do sistema Al-Si. Fonte: [18].....	25
Figura 6 - Frente de solidificação do eutético. Adaptado de: [19].....	26
Figura 7 - Componentes de um molde de fundição. Adaptado de: [26].....	32
Figura 8 - A geometria do canal de descida. Adaptado de: [26].....	34
Figura 9 - Impressora 3D utilizada para a impressão do modelo, canais de alimentação e massalotes do projeto. Fonte: Autoral.....	38
Figura 10 - Vista esquemática das medidas de diâmetro retiradas para a verificação de da segurança dimensional do componente. Fonte: Autoral.....	39
Figura 11 - Microscópio óptico utilizado. Fonte: Autoral.....	40
Figura 12 - Durômetro Brinell utilizado. Fonte: Autoral.....	41
Figura 13 - Seções nas quais a peça foi subdividida. Fonte: Autoral.....	42
Figura 14 - Áreas definidas para cada canal. Fonte: Autoral.....	45
Figura 15 - Sistema de canais dimensionados analiticamente. Fonte: Autoral.....	45
Figura 16 - Posicionamento do canal de ataque. Fonte: Autoral.....	47
Figura 17 - Aprisionamento de ar em diferentes momentos do vertimento do metal líquido no molde. A) Entrada do metal líquido na cavidade do molde. B) preenchimento da base, com aprisionamento do ar na extremidade final. C) completo preenchimento do molde com aprisionamento de ar nos massalotes. Fonte: Cortesia de MAGMA Engenharia do Brasil.....	48
Figura 18 - Perfil de temperaturas da peça após o completo vertimento do metal líquido. Fonte: Cortesia de MAGMA Engenharia do Brasil.....	48
Figura 19 - Perfil de velocidades do metal líquido. A) Entrada do líquido no molde. B) Preenchimento parcial do molde. Fonte: Cortesia de MAGMA Engenharia do Brasil..	49
Figura 20 - Pequena seção do molde trabalhando sem preenchimento do metal líquido. Fonte: Cortesia de MAGMA Engenharia do Brasil.....	50
Figura 21 - Presença de pequenos pontos quentes no sistema. Fonte: Cortesia de MAGMA Engenharia do Brasil.....	51
Figura 22 - Formação de rechupes na extremidade superior dos massalote. A) Corte da peça para facilitar a visualização dos rechupes. Fonte: Cortesia de MAGMA Engenharia do Brasil.....	51
Figura 23 - Projeto de canais de alimentação após todas as otimizações propostas pelo software MAGMA. Fonte: Autoral.....	52
Figura 24 - Montagem final do modelo. Fonte: Autoral.....	53
Figura 25 - Finalização da construção do molde de areia onde: A) é a parte inferior do molde, B) é a parte superior do molde e C) é o molde já fechado. Fonte: Autoral...	54

Figura 26 - Evolução gradual da fusão do alumínio. Fonte: Autoral.....	55
Figura 27 - Molde preenchido. Fonte: Autoral.....	56
Figura 28 - Posicionamento das mantas térmicas cobrindo o topo dos massalotes. Fonte: Autoral.....	56
Figura 29 - Peça final obtida, onde A) é a peça em seu estado bruto, B) é a parte superior da mesma com os massalotes e canais de alimentação removidos e C) a sua parte inferior. Fonte: Autoral.....	57
Figura 30 - Etapa de usinagem pela qual o componente passou. Fonte: Autoral....	58
Figura 31 - Posicionamento dos componentes internos da caixa de redução. Fonte: Autoral.....	60
Figura 32 - Micrografias das peças esquerda e direita. A) Micrografia da parte esquerda com aumento de 50x e B) aumento de 100x. C) micrografia da parte direita com aumento de 50x e d) com aumento de 100x. Fonte: Autoral.....	61
Figura 33 - Micrografias com um aumento de 500x mostrando a porosidade das peças produzidas. A) Peça 1 e B) Peça 2. Fonte: Autoral.....	62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores descritivos das subdivisões da peça.....	43
Tabela 2 - Módulo dos massalotes e dos pescoços para cada seção da peça.....	43
Tabela 3 - Dimensionamento dos massalotes pelo requisito térmico.....	43
Tabela 4 - Dimensionamento dos massalotes pelo requisito volumétrico.....	44
Tabela 5 - Dimensionamento dos pescoços com base no requisito volumétrico.....	44
Tabela 6 - Dimensões obtidas para as peças produzidas comparadas com as dimensões esperadas.....	57
Tabela 7 - Erros percentuais de cada medida.....	58
Tabela 8 - Medidas de dureza aferidas para as duas peças em estado bruto de solidificação.....	62

## LISTA DE SIGLAS

SAE	Society of Automotive Engineers
CVT	Continuously Variable Transmission
TPRE	Twin Plane Re-entrance Edge
CAD	Computer Aided Design
PLA	Poliácido Láctico

## LISTA DE SÍMBOLOS

$k$	Coeficiente de partição do soluto
$C_s$	Concentração do soluto na fase sólida
$C_L$	Concentração de soluto na fase líquida
$T_I$	Temperatura liquidus
$Q$	Vazão do canal
$Q_m$	Vazão média
$v$	Velocidade do fluido
$A$	Área da seção transversal do canal
$g$	Gravidade
$h$	Altura
$t$	Tempo de solidificação da seção de interesse
$C$	Constante de Chvorinov
$V_{res}$	Volume de material resfriado pelo molde
$A_{res}$	Área de material resfriado pelo molde
$RT$	Requisito térmico
$M_{massalote}$	Módulo térmico do massalote
$M_{peça}$	Módulo térmico da peça
$V_{peça}$	Volume da peça
$b$	Coeficiente global de contração volumétrica
$\eta$	Rendimento do massalote
$D$	Diâmetro
$E$	Erro
$HB$	Dureza Brinell
$kgf$	Quilograma força

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>15</b>
2.1. OBJETIVOS GERAIS.....	15
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
<b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>16</b>
3.1. CARCAÇA DA CAIXA DE REDUÇÃO.....	16
3.2. SELEÇÃO DE MATERIAIS.....	17
3.2. O PROCESSO DE FUNDIÇÃO EM AREIA.....	18
3.3.1. A formação de filmes óxidos em ligas de alumínio.....	19
3.3.2. Gases em solução.....	20
3.3. AS LIGAS DO SISTEMA ALUMÍNIO-SILÍCIO.....	22
3.4.1. Efeitos dos principais elementos de liga.....	23
3.4.2. Fundamentos de solidificação em ligas de Al-Si fundidas.....	24
3.4.2. Redistribuição do soluto e seus efeitos.....	28
3.4. SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO.....	29
<b>4. METODOLOGIA.....</b>	<b>30</b>
4.1. SELEÇÃO DE MATERIAIS.....	30
4.2. PROJETO DE FUNDIÇÃO.....	31
4.2.1. Projeto de canais.....	31
4.2.2. Projeto de massalotes.....	35
4.3. VALIDAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DO PROJETO DE FUNDIÇÃO.....	37
4.4. PRODUÇÃO DO MODELO E DOS MOLDES.....	37
4.5. MANUFATURA DA PEÇA.....	38
4.6. ANÁLISE DIMENSIONAL DO COMPONENTE.....	39
4.7. ANÁLISE MICROESTRUTURAL DO COMPONENTE.....	40
<b>5. RESULTADOS.....</b>	<b>41</b>
5.1. SELEÇÃO DE MATERIAIS.....	41
5.2. PROJETO DE FUNDIÇÃO.....	42
5.3. VALIDAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DO PROJETO DE FUNDIÇÃO.....	46
5.4. PRODUÇÃO DO MODELO E DOS MOLDES.....	52
5.5. MANUFATURA DA PEÇA.....	54
5.6. ANÁLISE DIMENSIONAL DO COMPONENTE.....	58
5.7. ANÁLISE MICROESTRUTURAL DO COMPONENTE.....	60
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>63</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>64</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O Baja UFSCar é um projeto de extensão que visa desenvolver, manufaturar e testar um protótipo *off-road* apto a participar de competições regionais, nacionais e internacionais organizadas pela SAE (*Society of Automotive Engineers*). Nesse sentido, a iniciativa conta com uma parte crucial para o seu desenvolvimento como um todo: a concepção e a manufatura de componentes complexos de maneira sustentável e financeiramente viável, que darão origem ao protótipo final.



**Figura 1** - Protótipo BAJA UFSCar. Retirado de: [1].

Até o ano de 2024, os protótipos desenvolvidos pela equipe, tal como o mostrado pela Figura 1, contavam com um sistema de tração 4x2. Esse sistema foi modificado em razão de mudanças realizadas no regulamento BAJA SAE Brasil 2023, que visava tornar a modalidade mais competitiva e, para tal, introduziu a opção de que as equipes pudessem construir seus protótipos agora com um sistema de tração 4x4. Diante disso, a Equipe BAJA UFSCar se viu diante do desafio de modificar drasticamente o seu projeto, principalmente no que diz respeito aos componentes do *powertrain* — conjunto que conta com o motor, sistema de transmissão (CVT) e a caixa de redução.

Diante dos novos requisitos, um novo projeto de *powertrain* foi proposto, e um novo desafio surgiu, uma vez que a carcaça da caixa de redução possuía geometria consideravelmente complexa e não poderia ser manufaturada de maneira

similar aos outros componentes (engrenagens e eixos). Desse modo, o presente trabalho visa tornar possível o desenvolvimento de um projeto de fundição da peça, seguido de sua manufatura e avaliação do componente final, mantendo o grau de exigência técnica requisitado e os ideais da competição.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVOS GERAIS**

O presente trabalho objetiva manufaturar uma carcaça de caixa de redução, por meio do desenvolvimento do projeto de fundição do componente, seguido de sua otimização e validação, manufatura e avaliação da peça, em prol de torná-la apta a participar de competições promovidas pela SAE.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

O seguintes objetivos específicos foram definidos em prol de se alcançar os objetivos gerais anteriormente dispostos:

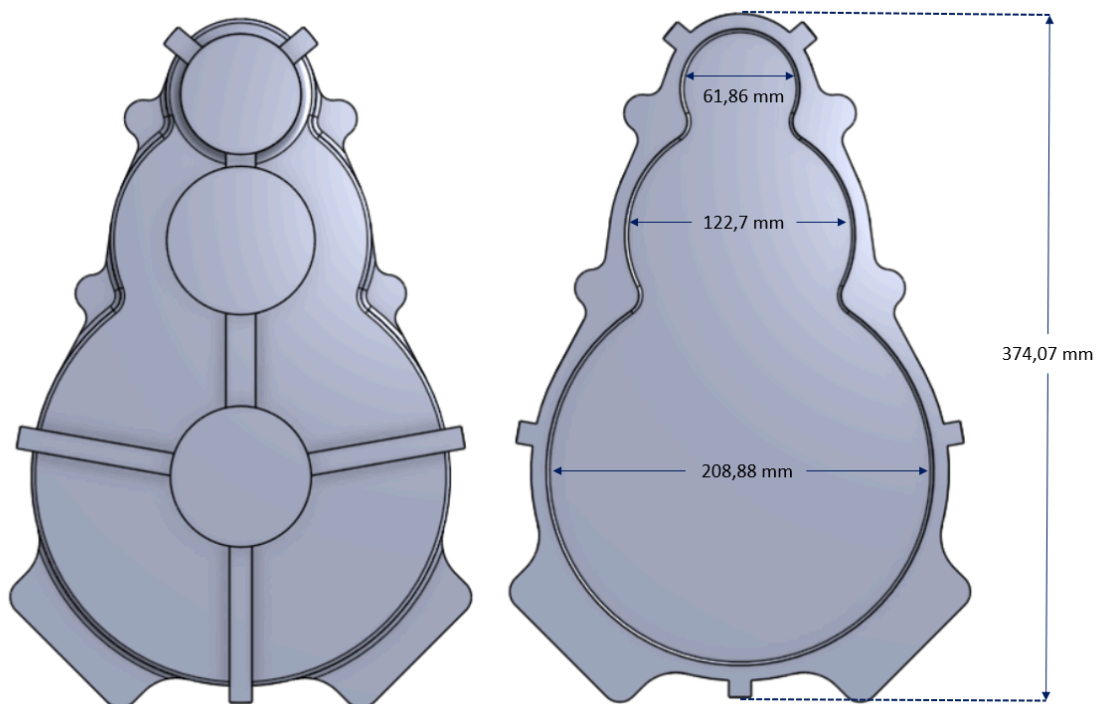
- Realizar a seleção de materiais para a produção do componente de interesse;
- Desenvolver o projeto de fundição com base em princípios determinados pela literatura;
- Otimizar o projeto de fundição por meio de simulações numéricas, corrigindo possíveis erros;
- Manufaturar o modelo, moldes e peças com base no projeto otimizado;
- Analisar a integridade das peças obtidas por meio de análise dimensional, microscopia ótica e ensaios de dureza.

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1. CARÇA DA CAIXA DE REDUÇÃO

A carcaça da caixa de redução de um protótipo BAJA SAE é um componente do subsistema de *powertrain*, que tem por finalidade isolar o sistema de redução (eixos e engrenagens) do exterior, além de manter o sistema completamente imerso em óleo para garantir seu bom funcionamento. Desse modo, o principal requisito técnico dessa carcaça não é mecânico, mas sim ser estanque, para garantir que o conteúdo em seu interior se mantenha constante.

Além disso, é crucial que o componente mantenha a precisão dimensional, de modo que os outros elementos (eixos, engrenagens e rolamento) possam ser alocados em seu interior, bem como possuir geometria que acompanha esses elementos, de maneira a minimizar a área ocupada, conforme mostrado na Figura 2.



**Figura 2** - Projeto da carcaça da caixa de redução. **Fonte:** Autoral.

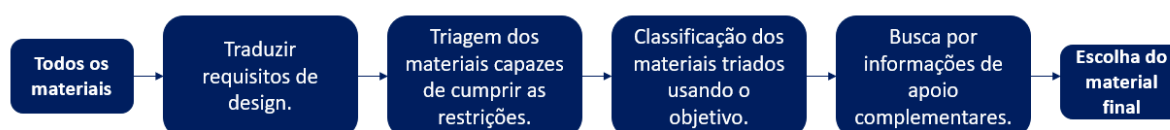
Diante dos requisitos citados anteriormente, os processos de usinagem ou conformação mecânica tornam-se inviáveis e, levam o projeto a depender de um processo de fabricação baseado na fundição do componente.

No entanto, processos de fundição constantemente levam a falhas relacionadas a porosidade dos elementos fundidos, a depender do tipo de material trabalhado, fazendo com que seja necessário um rigoroso estudo do projeto de fundição e uma rigorosa execução do mesmo, para que se obtenha o componente final com as melhores propriedades possíveis para o tipo de aplicação requerida.

### 3.2. SELEÇÃO DE MATERIAIS

Um dado projeto exibe um perfil determinado e necessário como, por exemplo, baixa massa, elevada resistência ou custo modesto. Por outro lado, um material possui atributos, como a sua densidade, resistência e custo, fazendo com que, desse modo, o processo de seleção de materiais atue de maneira a estabelecer uma relação entre o material e a função a ser executada.

O processo de seleção de materiais pode ser subdividido em quatro etapas principais: tradução, triagem, classificação e informações de apoio, como demonstrado graficamente pela Figura 3. A etapa de tradução examina os requisitos de projeto para identificar quais são as restrições que esses requisitos impõem à escolha do material. Qualquer componente de engenharia possui uma ou mais funções e isso deve ser alcançado pelo material escolhido para compor o mesmo, ou seja, certos parâmetros podem ser ajustados ou otimizados, mas ao final do processo é necessário que o material seja capaz de cumprir com o objetivo definido inicialmente [2].



**Figura 3** - Estratégia usada para o processo de seleção de materiais. **Adaptado de:** [2].

Na triagem todos os materiais selecionados ao longo da tradução são considerados possíveis candidatos. Inicialmente, a triagem elimina os candidatos que não podem realizar a tarefa definida mesmo que eles sofram alterações, pois uma ou mais de suas propriedades estão fora dos limites estabelecidos como restrições.

Os candidatos sobreviventes passam, então, para a etapa de classificação. Nessa etapa, os candidatos que permanecem são ordenados por meio de critérios de otimização, chamados de Índices de Mérito. Tais indicadores medem o quão bem um candidato que passou pelas etapas anteriores pode executar a tarefa, combinando uma ou mais propriedades para avaliarem o seu desempenho.

Ao final dessas três etapas, tem-se um conjunto de candidatos ordenados que atendem às restrições da função a qual serão aplicados e que maximizam ou minimizam os critérios de otimização. A partir disso, são construídos dados de apoio de maneira descritiva, gráfica ou pictórica com detalhes do comportamento desses materiais em ambientes ou condições específicas, além de informações sobre custo, disponibilidade e impacto ambiental. Essas informações ajudam a restringir a lista de candidatos a uma escolha final definitiva que leva em consideração tanto os requisitos de projeto e atributos do material, quanto os segredos que este pode esconder e que a análise não evidenciou num primeiro momento. [2].

### 3.2. O PROCESSO DE FUNDIÇÃO EM AREIA

O processo de fundição em areia é um dos mais antigos processos de fundição existentes. O primeiro registro do método ocorreu por volta do ano de 1540 no livro *Pirotechnia* escrito por Vannoccio Biringuccio [3].

O processo de fundição em areia pode ser subdividido em algumas categorias, a depender do tipo de ligante utilizado para manter a areia unida. O tipo mais comum de areia utilizada é a de sílica, cuja abundância influi diretamente no seu baixo preço, mas existem outras areias que também podem ser utilizadas no processo de fundição, como a de olivina, zircão e cromita. As características da

areia utilizada irão influenciar diretamente na forma como o molde interage com o metal líquido, sendo, portanto, indiretamente responsáveis por algumas propriedades da peça final que se deseja obter [3].

Na moldagem por areia verde a areia é misturada com argila e água. Esse tipo de molde pode ser facilmente reciclado com pequenas adições de argila nova e água. Já na moldagem com areia quimicamente ligada, ligantes sintéticos são adicionados para manter o molde íntegro. Esse tipo de areia permite que o molde tenha maior resistência à distorção e à erosão. Somado a isso, a superfície desse tipo de molde pode ser revestida com tintas específicas que permitem melhor acabamento superficial [3].

A seleção do tipo de areia a ser utilizada é, portanto, de grande importância para o caso da moldagem de peças complexas, influenciando diretamente no acabamento da peça que se deseja obter. Para o caso da fundição de ligas de alumínio, outros fatores são de crucial entendimento, conforme detalhado a seguir.

### 3.3.1. A formação de filmes óxidos em ligas de alumínio

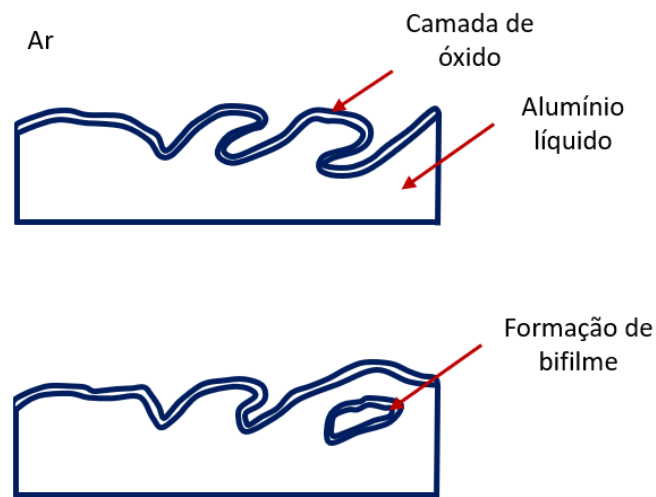
Embora a solubilidade do oxigênio nas ligas de alumínio seja extremamente pequena, sabe-se que as ligas de alumínio podem, com frequência, sofrer com a presença de óxidos, devido à elevada reatividade do alumínio líquido com o oxigênio. A ocorrência da presença de óxidos em peças fundidas de alumínio pode ser explicada em termos de arrastamento mecânico [4].

Para o caso do alumínio puro, quando líquido, a oxidação se inicia com a formação de uma variedade da alumina amorfa que, rapidamente se transforma em  $\gamma$ -alumina. Após um período de incubação, a  $\gamma$ -alumina se transforma em  $\alpha$ -alumina, o que permite que a oxidação ocorra num ritmo mais rápido [4].

A presença de elementos de liga pode alterar significativamente a taxa de oxidação. Embora o Si não fomente mudança significativa, sabe-se que a presença de modificadores do eutético alteram a configuração descrita anteriormente. O estrôncio, quando adicionado ao metal líquido, converte o filme de alumina para um

filme de espinélio, por meio da formação de  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$ , deixando o filme mais espesso e resistente ao rasgo [4,5].

Quando o metal líquido é vazado no molde, existe um grau considerável de turbulência associado a isso, fazendo com que ocorram respingos do metal líquido. Ao redor desses respingos, forma-se, rapidamente, uma camada de óxido que impede a completa associação deste elemento ao metal líquido. Assim, como esses respingos acompanham o fluxo do metal líquido, eles penetram no molde, ocorrendo a formação de um bifilme, como mostrado na Figura 4, que representa a formação de uma fissura no componente final [6].



**Figura 4** - Visão esquemática da formação de bifilme em ligas fundidas. **Adaptado de:** [6].

Alguns autores afirmam que a formação desses bifilmes, podem intensificar ainda mais a formação de porosidade em peças de alumínio fundido, uma vez que quando os bifilmes se formam, são encapsulados com eles os gases atmosféricos, fazendo com que a porção de hidrogênio que pode se difundir no alumínio líquido seja ainda maior [6, 7, 8].

### 3.3.2. Gases em solução

O hidrogênio possui grande solubilidade no alumínio líquido, solubilidade essa aproximadamente duas vezes maior do que quando no metal sólido. Assim, quando o metal é resfriado, a solubilidade do hidrogênio no mesmo cai

gradativamente e ele é, então, liberado através da interface sólido/líquido. Desse modo, o líquido logo adiante da frente de solidificação fica concentrado de hidrogênio e quando o limite de solubilidade é atingido inicia-se a germinação [9].

Na germinação, as bolhas de hidrogênio se concentram no líquido interdendrítico e, caso haja energia o suficiente, elas crescem dando origem a poros. Quando o processo de solidificação é concluído, esses poros irão crescer ainda mais devido a ação da contração do metal líquido, agora solidificado [9].

A formação da porosidade de gás pode ser explicada por meio de algumas etapas. Inicialmente, o líquido é gradualmente enriquecido com o hidrogênio, resultando numa formação mínima de porosidade. A fração sólida avança e, posteriormente, a concentração de hidrogênio na fase líquida chega a um valor máximo, a depender da concentração inicial de hidrogênio no líquido e da taxa de resfriamento. A porosidade passa a se formar entre os braços dendríticos secundários, o que leva a uma rápida redução do hidrogênio disponível no líquido devido a formação dessas bolhas. Devido a diminuição do hidrogênio disponível, a taxa de formação de porosidade também diminui. Por fim, a concentração de hidrogênio atinge um patamar baixo, mas constante; a porosidade continua sendo formada enquanto a peça não estiver completamente solidificada [9].

Além disso, sabe-se que para o caso das ligas Al-Si, o metal líquido fica mais suscetível à absorção de hidrogênio quando na presença de agentes modificadores do eutético como o estrôncio e o sódio. Assim, ainda que o uso desses elementos seja de extrema importância para que as ligas atinjam certas propriedades mecânicas, existe uma ampla preocupação quanto a adição desses elementos e a sua implicação direta no aumento da porosidade [10].

Uma forma muito eficaz de reduzir o hidrogênio presente no metal líquido é a degaseificação. Esse método, para o caso de ligas de alumínio, consiste na injeção de um gás inerte no banho de alumínio através de uma lança de aço ou de grafite. Conforme as bolhas do gás são distribuídas no metal líquido, elas passam a coletar o hidrogênio devido a diferença de pressão parcial. Assim, uma vez que essas bolhas se movam para a superfície e saiam do metal líquido elas levam consigo a porção de hidrogênio que elas foram capazes de coletar, fazendo com que a porção de hidrogênio disponível no metal líquido seja consideravelmente reduzida, o que

implica, diretamente, numa redução de porosidade formada ao longo do processo de solidificação [11].

### 3.3. AS LIGAS DO SISTEMA ALUMÍNIO-SILÍCIO

Das cerca de 238 composições de ligas de alumínio para fundição, 46% delas fazem parte do sistema Al-Si, sendo a grande maioria delas hipoeutética [12]. As ligas de alumínio têm se tornado cada vez mais interessantes frente aos desafios enfrentados pelos projetos de engenharia, que lidam com exigências econômicas e ambientais cada vez mais difíceis de serem atingidas [13].

Dentro da indústria automobilística, a utilização das ligas fundidas Al-Si representa uma redução significativa da massa do sistema. Assim, essas ligas têm sido amplamente utilizadas na manufatura de componentes automotivos estratégicos por serem capazes de conciliar baixo custo de fabricação, excelente fundibilidade, elevada resistência específica e reciclabilidade [13].

Dentre outras vantagens do sistema Al-Si, pode-se citar: sua elevada resistência à corrosão, boa soldabilidade e baixos níveis de contração de solidificação. Neste sistema, o silício possui grande importância, sendo responsável por aumentar o tempo pelo qual o metal líquido pode fluir pelo molde, devido a sua maior entalpia de fusão (1810 kJ/kg para o silício contra 395 kJ/kg para o alumínio) e pela grande quantidade da fase eutética Al-Si formada [14].

Neste sentido, é comum que ligas hipoeutéticas apresentem alguns problemas ao longo do processo de fundição. Isso se deve ao fato de que a menor porção de Si dessas ligas, implica numa menor fluidez e conseqüente necessidade de superaquecimento do fundido para o completo preenchimento de moldes com geometrias mais complexas. Isso pode levar ao surgimento de heterogeneidades microestruturais e aumento da porosidade que podem comprometer o uso do componente projetado [15].

Em geral, quando na condição bruta de fusão, essas ligas possuem uma microestrutura típica constituída de grãos grosseiros, com elevado grau de segregação, silício eutético na forma de placas espessas e compostos intermetálicos que atuam de maneira a fragilizar o material. Essas características

microestruturais limitam o campo de aplicações possíveis, dadas as propriedades inadequadas para aplicações que requerem certo desempenho mecânico [15].

Nota-se, portanto, que as propriedades destas ligas podem ser determinadas a partir do tamanho, morfologia e distribuição desses componentes microestruturais. É possível observar, ainda, que esses elementos estão intrinsecamente relacionados às diferentes porções de elementos de ligas que podem ser adicionados e, também, à forma como o processo de solidificação dessas ligas ocorre. Assim, a compreensão desses efeitos se torna primordial para a compreensão e, até mesmo, aprimoramento dessas ligas [15].

#### 3.4.1. Efeitos dos principais elementos de liga

Como já mencionado, o Si é o principal elemento de liga adicionado às ligas de alumínio fundido. Sua ampla utilização se deve ao grande efeito que ele proporciona na fluidez da liga e, também, no aumento contínuo da resistência mecânica para concentrações de 3 a 15% de Si. A ductilidade do material, também tende a aumentar com o acréscimo de silício, até que seja atingida a composição eutética [14].

Como o silício está presente como uma fase secundária à matriz, o seu comportamento eletroquímico irá diferir em relação ao observado ao seu entorno, fazendo com que essas partículas possam atuar como ânodos ou cátodos em relação a matriz. O Si é catódico e, estando presente em quantidades significativas, pode levar a corrosão galvânica. No entanto, esse efeito é considerado insignificante, devido à baixa densidade de corrente e ao fato das partículas de Si serem altamente polarizadas [14].

Para maiores porções de Si, mas ainda menores do que a observada no eutético, nota-se uma distribuição típica dos poros para ligas em que não houve a adição de modificadores. Isso acontece, pois a ausência de modificadores leva a nucleação eutética preferencial no contorno das dendritas, crescendo das paredes para o centro do molde. Sendo o centro a última parte onde ocorrerá a solidificação das regiões interdendríticas, isso resultará numa concentração da porosidade nesta região [16].

O Mg — assim como o Cu — é responsável pelo endurecimento das ligas de alumínio fundidas durante a etapa de tratamento térmico. Teores mais elevados do elemento podem favorecer o endurecimento por precipitação, mas esse aumento leva a formação da chamada fase  $\pi$ -AlFeMgSi, um intermetálico rico em Fe que pode fragilizar o material. O aumento do teor de magnésio resulta, ainda, no aumento da resistência ao escoamento e da taxa de encruamento [14].

No entanto, ainda que a resistência aumente pela adição de Mg, a ductilidade é severamente comprometida por essa adição, fazendo com que exista uma relação parabólica entre o acréscimo do elemento e as propriedades mecânicas do material final. Essa relação é observada para porções que variam de 0,3 a 0,7% de Mg [14].

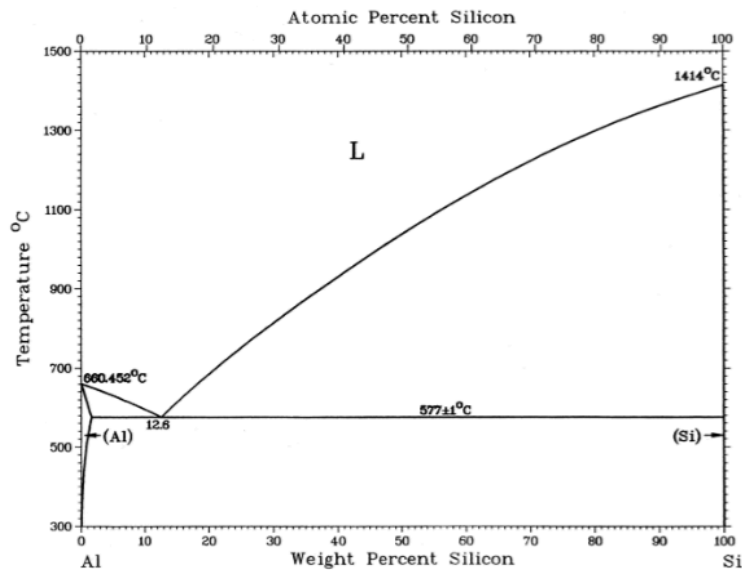
Como mencionado anteriormente, a adição do Cu aumenta a resistência da liga pelo mecanismo de precipitação. Em ligas Al-7Si-Mg, a adição de Cu pode, ainda, refinar a microestrutura e aumentar a resistência à fadiga para temperaturas elevadas. Essas adições chegam, até mesmo, a alterar a via de propagação de trincas por fadiga devido a precipitação de intermetálicos ricos em Cu que atuam como barreiras à propagação dessas trincas dentro da matriz. Contudo, o aumento excessivo no elemento leva a formação de porosidade [14].

Nota-se, portanto, que os elementos de liga têm grande influência no comportamento das ligas Al-Si. No entanto, cabe ressaltar que um único elemento dificilmente apresentará comportamento invariável na microestrutura e propriedade de uma liga, uma vez que vários elementos estarão presentes e estes podem reagir entre si. Além disso, os parâmetros de fundição como a temperatura e tempo de vazamento, por exemplo, vão impactar diretamente no componente final que se deseja obter [14].

#### 3.4.2. Fundamentos de solidificação em ligas de Al-Si fundidas

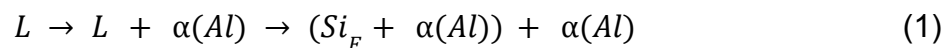
Para uma liga de Al-Si hipoeutética cerca de 50 a 90% do seu volume é eutético. Como o eutético é o estágio final do processo de solidificação, espera-se que ele tenha um impacto muito significativo nas propriedades finais do material, uma vez que ele influenciará diretamente nos defeitos de fundição, como a porosidade, por exemplo [17].

Para entender melhor a solidificação dessas ligas, recorre-se ao diagrama binário do sistema Al-Si, apresentado na Figura 5.

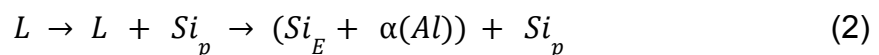


**Figura 5** - Diagrama de fases do sistema Al-Si. Fonte: [18].

A partir do ponto eutético, tem-se a formação simultânea de duas fases sólidas a partir da fase líquida: silício eutético e  $\alpha(\text{Al})$ . Quando estamos tratando de ligas hipoeutéticas (com porção de silício inferior a 12,6%p), a cristalização da fase  $\alpha(\text{Al})$  é sucedida por uma reação eutética. Essa reação pode ser sumarizada pela Equação 1 [19].

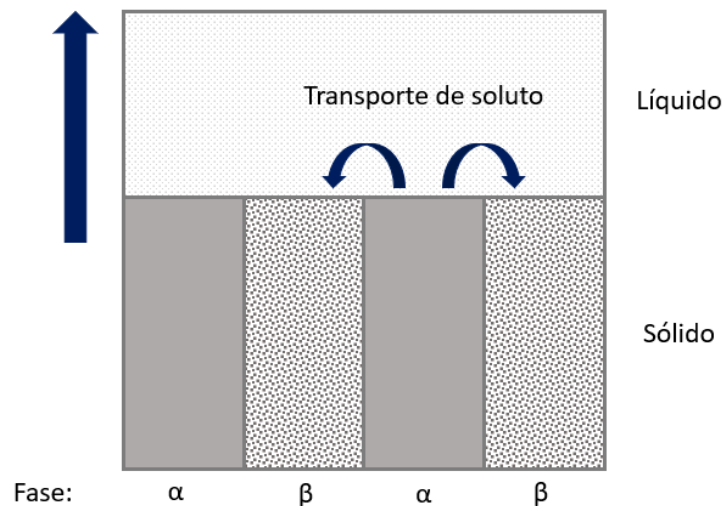


Para o caso de ligas hipereutéticas (cuja porção de silício é superior a 12,6%p), observa-se inicialmente a formação de partículas de silício primário a partir da fase líquida. Posteriormente, tem-se a ocorrência da reação eutética. Genericamente, a reação para ligas hipereutéticas pode ser descrita pela Equação 2 [18].



A solidificação do eutético ocorre por meio da formação de um par de difusão com duas fases sólidas que crescem próximas umas das outras e possibilitam um melhor transporte do soluto como mostrado pela Figura 6. Neste sentido, o arranjo ideal a ser adotado é o de lamelas ou bastonetes cujo espaçamento é uma função

da fração volumétrica das fases presentes, mas variações nas propriedades interfaciais dos seus componentes podem fazer com que o sistema se desvie desse arranjo idealizado [19].



**Figura 6** - Frente de solidificação do eutético. **Adaptado de:** [19].

Estruturas cristalinas que tendem a formar ligações isotrópicas são mais propensas a formar interfaces atômicamente rugosas ou difusas na frente de solidificação. Isso se deve ao fato de não haver uma orientação de superfície cristalográfica fortemente preferencial. Essa superfície rugosa é composta por muitos degraus e saliências que permitem a fácil ligação dos átomos que migram da fase líquida para essa fase sólida em formação [19].

Em contraponto, para estruturas cristalinas com ligações direcionais, a superfície a ser formada tende a ser lisa, com facetas que se orientam seguindo as orientações cristalográficas preferenciais. Essa superfície lisa inviabiliza a ligação dos átomos do líquido nessa frente, pois os átomos individuais que se ligam a ela favorecem o aumento da energia do sistema, uma vez que o número de ligações não satisfeitas aumenta consideravelmente nessa configuração. Neste caso, haverá uma tendência de que os átomos voltem para a fase líquida, o que restringe o crescimento da fase sólida nessa direção [19].

O segundo mecanismo citado é muito mais restritivo do que o crescimento contínuo de uma interface rugosa. Assim, a estrutura do eutético — que é composto

por um componente facetado (interface lisa) e não facetado (interface rugosa) — passa a exibir morfologias e espaçamentos locais amplamente variáveis [19].

Em ligas de Al-Si não modificadas, a natureza anisotrópica do silício impede o crescimento contínuo da frente de solidificação. Contrariamente, o silício se solidifica na forma de flocos com faces largas e paralelas às direções {111} [19].

O crescimento das placas de silício ocorre por meio de um mecanismo denominado *ledge-step*, onde a presença de degraus leva a propagação lateral contínua dos planos atômicos, fazendo com que a placa cresça perpendicularmente ao plano da mesma, ao longo de sucessivas etapas [19,20]. A origem desses degraus de crescimento no plano {111} do silício pode estar relacionada à presença de múltiplas maclas que dão origem a bordas e sulcos que se perpetuam (mecanismo chamado de *Twin Plane Re-entrant Edge* - TPRE). Além disso, o mecanismo de maclagem múltipla também é importante para outros fenômenos, visto que ele permite que um único evento de nucleação dê origem a várias orientações na microestrutura [19].

A morfologia do silício pode ser modificada da forma de flocos para a forma de fibras finas por meio de duas maneiras distintas: a adição de certos elementos químicos ou com uma rápida taxa de resfriamento [14].

Acredita-se que a adição de impurezas (frequentemente Na, Sr e Sb) no metal líquido levam a restrição do crescimento da fase de silício por meio da adsorção seletiva de átomos de impurezas em faces de silício que possuem rápido crescimento. No entanto, o uso desse método possui algumas desvantagens uma vez que os elementos utilizados dificultam a obtenção de estruturas que sejam uniformemente modificadas, além de aumentarem consideravelmente a porosidade do componente final, sendo bastante relevante para ligas de alumínio [19].

Uma outra forma de se obter a modificação do silício eutético é por meio da modificação por têmpera. Ainda que o fenômeno não possa ser satisfatoriamente explicado, sabe-se que o crescimento fibroso do Si eutético é um afastamento do crescimento normal e gradual de flocos facetados em direção ao crescimento contínuo de uma fase não facetada, aproximando-se, portanto, de um eutético regular [19].

### 3.4.2. Redistribuição do soluto e seus efeitos

Um outro fenômeno de grande importância que ocorre durante a solidificação das ligas de Al-Si é a segregação do soluto.

Quando um sólido começa a se formar, a concentração de equilíbrio de soluto no sólido na interface sólido/líquido é diferente da concentração de equilíbrio de soluto no líquido dessa interface. Considerando o diagrama de equilíbrio Al-Si disposto na Figura 5 é possível perceber que o teor de silício na fase sólida é menor do que o teor de silício na fase líquida, gerando, portanto, uma distribuição desse soluto [21].

A razão entre a porção de soluto na fase sólida e na fase líquida resulta em uma grandeza chamada de coeficiente de partição, apresentado na Equação 3, em que  $C_S$  corresponde à concentração de soluto no sólido e  $C_L$  a concentração de soluto no líquido.

$$k = \frac{C_S}{C_L} \quad (3)$$

Menores valores de coeficiente de partição denotam maiores diferenças entre a porção de soluto entre as fases sólida e líquida, o que também resulta em um maior intervalo de solidificação para a liga em questão. Conforme o soluto é particionado, ele passa a se acumular na interface sólido/líquido e isso, somado à taxa de resfriamento, é determinante para a morfologia da frente de solidificação [22, 21].

Nesta configuração, conforme o líquido é resfriado ele experimenta não apenas um gradiente de temperatura (visto que o líquido mais distante da frente de solidificação se encontra numa temperatura superior à do líquido mais próximo), mas também um gradiente de temperatura *liquidus*  $T_l$ , uma vez que existe um gradiente de disposição do soluto. Isso permite que em alguns pontos o líquido esteja na condição de super-resfriado — em um fenômeno conhecido como super-resfriamento constitucional — o que implica na possibilidade de solidificação dendrítica a depender da magnitude do super-resfriamento [22].

À medida que as dendritas vão crescendo e dando origem aos braços secundários, o soluto passa a ser ainda mais rejeitado, se concentrando em regiões entre esses braços dendríticos. É possível, portanto, que essa microsegregação do soluto resulte no surgimento de uma nova fase presa entre os braços secundários da dendrita. Ao se solidificar, poderá haver o surgimento de porosidade por contração [4].

### 3.4. SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO

Pesquisas indicam que as falhas em empresas de fundição podem chegar a até 25% de todos os projetos executados, o que impacta diretamente na lucratividade das organizações. Essas perdas ocorrem, majoritariamente, devido a três fatores: temperatura, contaminação e design do molde [23].

Indiscutivelmente, o projeto do molde é o fator de maior criticidade para a indústria de fundição de metais, uma vez que o problema apenas se agrava com o avanço de cada etapa [23].

Neste cenário, ferramentas de simulação numérica tornam-se de grande importância para descrever e prever os fenômenos associados ao enchimento das cavidades do molde, bem como a solidificação do metal líquido. Esses recursos tornam possível avaliar o desempenho de um dado projeto, bem como corrigir os possíveis erros que poderiam ser catastróficos.

Dentre as tecnologias de simulação numérica aplicadas à indústria de fundição, destaca-se o MAGMASOFT®. Desenvolvido pela empresa alemã MAGMA Giessereitechnologie GmbH, fundada em 1988 em Aachen, na Alemanha, o MAGMASOFT® atua como uma ferramenta de otimização que busca melhorar a qualidade do fundido, otimizando as condições de processos e reduzir os custos de produção, fazendo isso por meio da implementação de metodologias de Design Virtual de Experimentos, Otimização Autônoma e Volumes Finitos [24].

O Método dos Volumes Finitos permite discretizar a geometria do problema em regiões menores, chamadas de volumes finitos, tornando possível obter equações algébricas aproximadas para cada um desses volumes, de maneira

similar ao que acontece para análises por meio de elementos finitos. Esse método pode ser entendido como um método de solução de equações diferenciais parciais na forma de equações algébricas [25].

Por meio dessa metodologia, o MAGMASOFT® simula o enchimento do molde, solidificação do metal líquido, formação de tensões residuais e distorções, formação de microestrutura e propriedades locais do material fundido. Desse modo, torna-se possível prever defeitos relacionados a gases aprisionados, presença de porosidade e inclusões e ao gradiente de temperatura do sistema [24].

## **4. METODOLOGIA**

### **4.1. SELEÇÃO DE MATERIAIS**

A seleção de materiais da carcaça da caixa de redução do protótipo mini BAJA SAE foi conduzida com base em critérios técnicos e práticos, levando-se em consideração a viabilidade do processo de fundição e a disponibilidade local de materiais.

Inicialmente, adotou-se a abordagem baseada nos princípios de seleção dispostos por Ashby, priorizando o desempenho do material frente às exigências do projeto proposto. Somado a isso, foram levadas em consideração, restrições orçamentárias e de logística, fazendo com que materiais disponíveis no Departamento de Engenharia de Materiais da UFSCar (DEMa/UFSCar) fossem priorizados frente a outros. Essa decisão se deu em função desses materiais cumprirem com o requisito de menor curso e maior acessibilidade.

Neste sentido, a seleção se deu nas seguintes etapas.

- Definição dos requisitos funcionais: a carcaça deveria ser capaz de suportar esforços mecânicos moderados e, principalmente, ser estanque. Além disso, o material deveria ser capaz de permitir detalhamento geométrico complexo, tornando possível a boa acomodação dos elementos que seriam comportados em seu interior.
- Triagem por processabilidade: dada a complexidade da geometria do componente, foram triados apenas materiais que pudessem ser

fundidos com os recursos disponibilizados em laboratórios da universidade, excluindo opções que exigissem outros processos de manufatura. Assim, a triagem por processabilidade se pautou na escolha, dentre os materiais capazes de cumprir com os pré-requisitos de projeto, dos materiais que pudessem ser processados por meio do processo de fundição em areia.

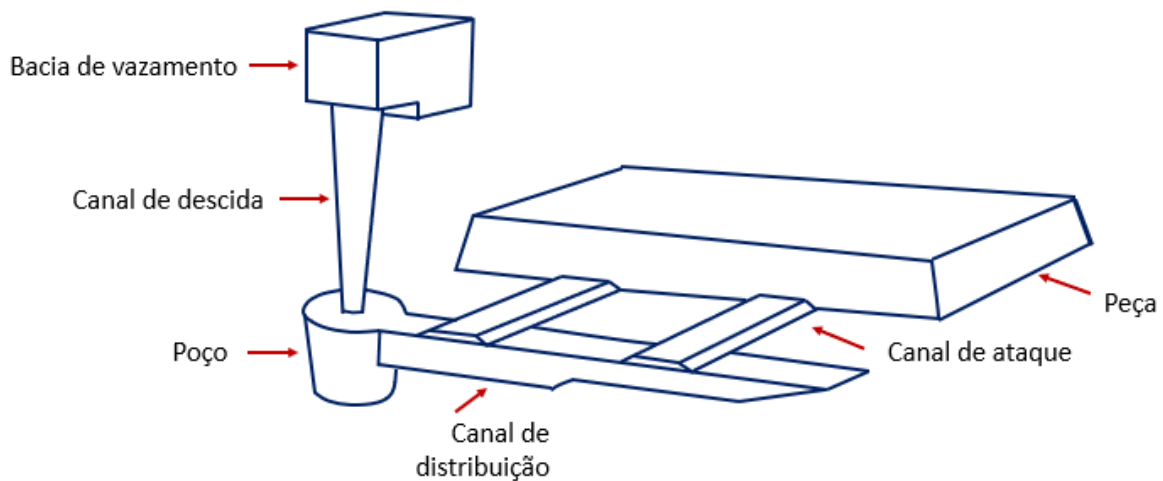
- Verificação da disponibilidade interna: dos materiais triados, foram listados aqueles que estivessem disponíveis no departamento, pois, como citado anteriormente, haviam pré-requisitos financeiros e de logística a serem cumpridos.
- Seleção final: dentre os materiais viáveis, foram escolhidos aqueles que melhor atendiam aos requisitos funcionais, de fabricação e de custo, com base em propriedades conhecidas e experiências anteriores da equipe com processos de fundição similares ao que seria realizado para o caso do projeto proposto.

A abordagem visou alcançar uma escolha racional e realista, que pudesse equilibrar desempenho técnico com viabilidade econômica e operacional, alinhados com os objetivos do projeto.

## 4.2. PROJETO DE FUNDIÇÃO

### 4.2.1. Projeto de canais

O projeto de fundição consiste no dimensionamento do conjunto formado pela bacia de vazamento, canal de descida, canal de distribuição e canal de ataque, conforme mostrado pela Figura 7.



**Figura 7** - Componentes de um molde de fundição. **Adaptado de:** [26].

Dentre todos, o canal de ataque é o último pelo qual o metal líquido passa antes de atingir o molde e preenchê-lo. Neste ponto, o requisito de maior importância a ser cumprido é de que o metal líquido não ultrapasse a velocidade de 0,5 m/s ao penetrar o molde [26].

Essa velocidade é chamada de velocidade crítica, sendo muito relevante para pautar o dimensionamento desse canal, uma vez que velocidades superiores levam a um fluxo turbulento do metal líquido dentro do molde, o que implica em defeitos como os anteriormente discutidos na Seção 3.2 [26]. De maneira concomitante, o projeto deve ser dimensionado de maneira que o metal líquido jamais experimente nenhuma queda dentro do molde, visto que isso também causaria turbulência.

Essas condições implicam no fato de que o canal de ataque deve encontrar o molde de maneira a preenchê-lo por baixo, evitando possíveis quedas e consequente fluxo turbulento do metal.

Outra condição de extrema importância é a de que os canais trabalhem despressurizados. Para tal, a vazão deve ser constante, o que implica numa alteração da velocidade do fluido quando as seções transversais dos canais de distribuição sofrem mudanças. Esse fenômeno pode ser traduzido, matematicamente, pela chamada Lei da Continuidade, mostrada pela Equação 4 [26].

$$Q = v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad (4)$$

Onde Q é a vazão, v é a velocidade do fluido e A é a área da seção transversal do canal.

Tendo em mente as regras básicas de um projeto de fundição, pode-se, enfim, determinar o seu dimensionamento.

A primeira etapa do dimensionamento do sistema de canais começa com a definição do *layout* do molde. Nessa etapa define-se a forma como a peça estará posicionada no sistema e, conseqüentemente, como será realizada a confecção do molde.

A segunda etapa visa estimar o peso e o volume do conjunto todo. Esse valor é estimado considerando os somatórios do volume e massa da peça com os volumes e massas estimados dos canais de alimentação e massalote, obtendo um valor razoável para a quantidade de material que será necessária para a fundição.

Posteriormente, o tempo de vazamento é selecionado. Esse tempo deve ser escolhido levando em conta a primeira regra anteriormente citada: o metal líquido não deve penetrar no molde com velocidades superiores a 0,5 m/s. Uma consideração prática usada para auxiliar essa tomada de decisão é o fato de que o molde deve ser preenchido antes que a seção mais fina da peça se solidifique.

Com essas informações em mãos, a taxa de enchimento é determinada. A taxa de enchimento média é uma função do volume e do tempo de vazamento, no entanto, esse valor é superior à vazão no início do vertimento, que sofrerá perdas ao longo do processo de enchimento das cavidades. Alguns estudos mostram que é razoável utilizar um valor de vazão 1,5 vezes maior do que a vazão média para dimensionar o canal de descida, conforme mostrado pela Equação 5 [26].

$$Q = 1,5Q_m = 1,5 \frac{\text{Volume de vazamento}}{\text{Tempo de vazamento}} \quad (5)$$

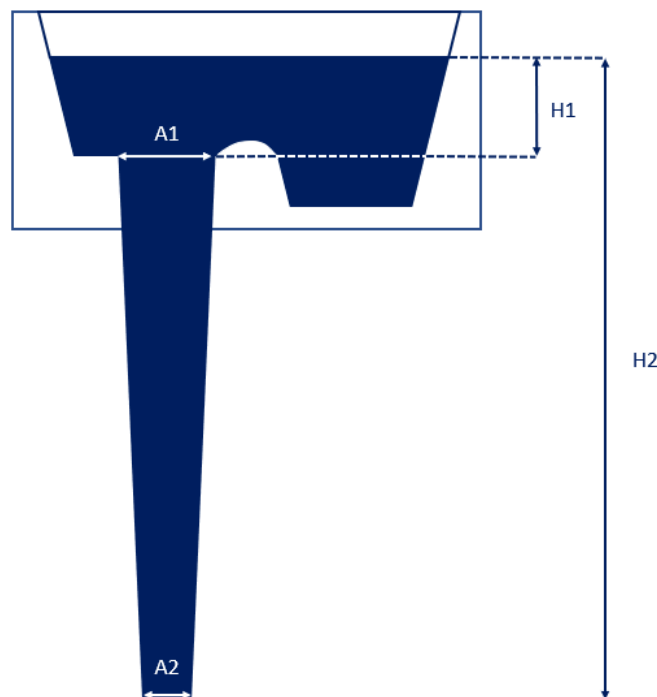
Posteriormente, na etapa cinco, é feito o dimensionamento do canal de descida. Para tanto, leva-se em consideração a Equação de Bernoulli e a lei da continuidade, conforme mostrado pelas Equações 4 e 6 [26].

$$v = \sqrt{2gh} \quad (6)$$

Essas equações nos permitem calcular a área da seção transversal do início ( $A_1$ ) e do final ( $A_2$ ) do canal de descida, conforme mostrado pela Figura 8 e pelas Equações 7 e 8 [26].

$$A_1 = \frac{Q}{v_1} = \frac{Q}{\sqrt{2gh_1}} \quad (7)$$

$$A_2 = \frac{Q}{v_2} = \frac{Q}{\sqrt{2gh_2}} \quad (8)$$



**Figura 8** - A geometria do canal de descida. **Adaptado de:** [26].

Então, sabendo a velocidade de saída no canal de descida, pode-se dimensionar os canais subsequentes da mesma maneira. O canal de ataque deverá ser dimensionado fixando a velocidade crítica de 0,5m/s. A partir disso, determina-se a área da sua seção transversal e suas respectivas dimensões.

#### 4.2.2. Projeto de massalotes

Como se sabe, os materiais apresentam uma contração durante o processo de solidificação e esse processo leva a formação de defeitos internos como porosidade ou vazios. A inclusão de um massalote no projeto atua de maneira a evitar que esses defeitos ocorram, uma vez que o massalote irá fornecer metal líquido para preencher os vazios advindos da solidificação [26].

O projeto de massalotes deve considerar algumas regras, como as descritas abaixo:

1- Massalotes não deverão ser utilizados a não ser que sejam absolutamente necessários;

2- O massalote deverá, obrigatoriamente, solidificar ao mesmo tempo ou após o fundido;

3- O massalote deve conter metal líquido o suficiente para compensar a contração volumétrica do metal que compõe o componente de interesse;

4- Entre o massalote e a peça não deve haver um ponto quente, uma vez que este inviabilizaria o uso do massalote;

5- Deve existir um caminho que permita que o metal líquido do massalote possa alcançar as regiões que necessitam de material;

6- Deve haver diferença de pressão suficiente para promover o movimento do fluxo de metal.

Além dessas regras, existem requisitos que os massalotes devem cumprir. Os requisitos térmicos consideram a taxa de extração de calor da peça em relação a sua geometria e fazem isso tomando como base a regra de Chvorinov, que estabelece que o tempo de solidificação de uma peça é proporcional ao quadrado da razão entre o volume e a área superficial de troca térmica. Essa regra é descrita matematicamente pela Equação 9, onde C é uma constante que depende das condições locais do molde [26].

$$t = C \cdot \left( \frac{V_{res}}{A_{res}} \right)^2 \quad (9)$$

Nela,  $t$  representa o tempo de solidificação da parte da peça de interesse,  $C$  é uma constante que depende das condições locais do molde  $V_{res}$  é o volume resfriado pelo molde da parte da peça que está sendo avaliada e  $A_{res}$  é a área resfriada pelo molde da parte da peça que está sendo avaliada.

Com base nessa equação, nota-se que o massalote só poderá ser eficiente se este se solidificar após a peça que é alimentada por ele. Desse modo, a condição fundamental para seu dimensionamento é que:

$$\left(\frac{V_{res}}{A_{res}}\right)^2_{massalote} > \left(\frac{V_{res}}{A_{res}}\right)^2_{peça}$$

A razão  $\frac{V}{A}$  é conhecida como módulo térmico. O requisito térmico é, portanto, a razão entre o módulo do massalote com o módulo da peça, como mostrado pela Equação 10.

$$RT = \frac{M_{massalote}}{M_{peça}} \quad (10)$$

A literatura recomenda que o requisito térmico do massalote seja 1,2 e o requisito térmico do pescoço 1,1.

Um outro requisito de grande importância é o requisito volumétrico, que considera a quantidade de material líquido necessária para compensar a contração do metal líquido. Neste sentido, o volume do massalote pode ser calculado como descrito pela Equação 11 [26].

$$V_{massalote} = \frac{V_{peça} \cdot b}{\eta - b} \quad (11)$$

Nela,  $b$  representa o coeficiente global de contração volumétrica,  $\eta$  é o rendimento do massalote e  $V_{peça}$  é o volume da peça de interesse [26].

Caso o requisito volumétrico seja maior que o requisito térmico, considera-se o valor obtido pelo requisito térmico para o dimensionamento de massalotes.

#### 4.3. VALIDAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DO PROJETO DE FUNDIÇÃO

Com o projeto analítico em mãos, o sistema pode ser submetido a uma avaliação por simulação numérica utilizando o software MAGMASOFT®.

Logo na primeira etapa de avaliação, notou-se que a peça não era simétrica, o que inviabilizaria a sua produção, já que a falta de simetria levaria a necessidade de simulação de duas peças diferentes, o que estava fora do escopo do projeto. Neste sentido, a peça passou por um redimensionamento, visando alterar o posicionamento dos seus pontos de fixação (olhais) de modo que a mesma tivesse a simetria necessária para a sua produção.

Posteriormente, foi possível visualizar o comportamento do escoamento do metal líquido dentro do sistema projetado e identificar regiões que representavam um risco para a integridade da peça, ou seja, possíveis regiões de defeitos, turbulências do metal líquido ou aprisionamento de ar.

Assim, foi feita a avaliação da progressão da solidificação e da eficiência de alimentação dos massalotes de modo que o projeto foi alterado geometricamente mediante às sugestões que foram levantadas.

Esta etapa do projeto se deu de maneira iterativa, onde o projeto era avaliado, seus erros e incongruências eram corrigidos e ele poderia, então, ser avaliado novamente, até que fosse atingido um projeto de fundição que tornasse possível a obtenção de uma peça sem avarias.

#### 4.4. PRODUÇÃO DO MODELO E DOS MOLDES

A manufatura do modelo, massalotes e canais de alimentação foi feita por meio de impressão 3D, utilizando a impressora CREALITY K1C, disponibilizada pelo Departamento de Engenharia de Materiais da UFSCar (DEMa/UFSCar), conforme mostrado pela Figura 9. Após a impressão dos elementos, a montagem dos mesmos e o corte dos resfriadores necessários, o molde pode ser efetivamente produzido.

Os moldes foram fabricados dentro de uma caixa de madeira, que comportava os elementos que compunham o sistema de vazamento. Com todos os

elementos posicionados, a areia catalisada com resina pep set foi disposta na caixa preenchendo-a.



**Figura 9** - Impressora 3D utilizada para a impressão do modelo, canais de alimentação e massalotes do projeto. **Fonte:** Autoral.

Após o período de cura, o molde estava pronto para ser desacoplado da caixa de areia. Além disso, com a finalização desse processo, o modelo pode ser removido e reutilizado. Assim, todos os passos descritos nessa seção foram repetidos para a confecção de um segundo molde que daria origem à segunda metade da peça.

#### 4.5. MANUFATURA DA PEÇA

O material necessário para o completo preenchimento do molde foi calculado e devidamente cortado em pedaços menores. Esses pedaços foram dispostos dentro do forno, e aquecidos até sua completa fusão.

Uma vez que o material estava completamente fundido, o argônio foi borbulhado por cerca de 5 minutos para garantir a melhor desgaseificação possível

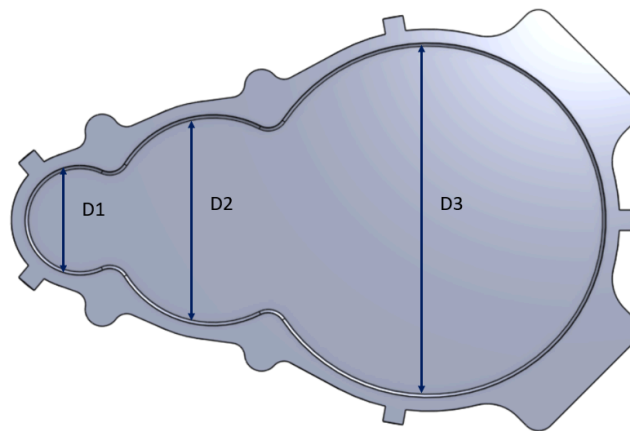
do sistema. Quando a temperatura de vertimento foi atingida, o metal pode ser vazado preenchendo o molde.

Com o molde completamente preenchido, mantas térmicas foram dispostas na parte superior dos massalotes em prol de retardar a perda de calor do mesmo.

Esse mesmo processo foi repetido uma segunda vez para a construção da segunda peça.

#### 4.6. ANÁLISE DIMENSIONAL DO COMPONENTE

A análise dimensional foi feita medindo-se a espessura das paredes em três pontos distintos, nas duas peças. Além disso, foram aferidas medidas dos diâmetros dos dois lados da carcaça ( $D_1$ ,  $D_2$  e  $D_3$ ) em prol de se atestar a eficácia dimensional da metodologia utilizada até então, como mostrado pela Figura 10. A precisão dimensional foi obtida comparando-se as médias dessas medidas com os valores determinados em CAD.



**Figura 10** - Vista esquemática das medidas de diâmetro retiradas para a verificação de da segurança dimensional do componente. **Fonte:** Autoral.

Uma vez que essas medidas foram definidas, o erro percentual associado a cada uma delas pode ser calculado como mostra a Equação 12.

$$\text{Erro percentual} = \frac{|\text{Valor esperado} - \text{Valor obtido}|}{\text{Valor esperado}} \cdot 100\% \quad (12)$$

#### 4.7. ANÁLISE MICROESTRUTURAL DO COMPONENTE

A análise microestrutural do componente obtido foi feita por meio de microscopia óptica da parte final do canal de ataque, ou seja, da seção imediatamente anterior à parede da peça.

O material de interesse foi retirado das duas peças e as duas seções removidas (uma de cada peça) foram, então, embutidas a frio, lixadas e polidas com alumina 1,0  $\mu\text{m}$  diluída.

Com as amostras prontas, a microestrutura pode ser avaliada por meio do uso do microscópio óptico OLYMPUS de modelo BX41M-LED, para a obtenção das imagens em diferentes aumentos, conforme mostrado pela Figura 11.



**Figura 11** - Microscópio óptico utilizado. **Fonte:** Autoral.

De maneira complementar, ensaios de dureza Brinell também foram realizados, utilizando-se uma carga de 31,25 kgf, com a penetração de uma esfera de 2,5 mm de diâmetro. Os ensaios foram realizados seguindo as condições da norma ISO 6506 e com o equipamento disposto na Figura 12.



**Figura 12** - Durômetro Brinell utilizado. **Fonte:** Autoral.

## **5. RESULTADOS**

### **5.1. SELEÇÃO DE MATERIAIS**

A definição dos requisitos funcionais indicou a necessidade de um material capaz de suportar esforços mecânicos moderados, garantir estanqueidade do componente e permitir detalhamento geométrico complexo. Somado a isso, o material deveria ser capaz de cumprir com requisitos de processabilidade, uma vez que ele deveria, obrigatoriamente, poder ser fundido.

Neste sentido, estes pré-requisitos reduziram o grupo de materiais candidatos para as ligas de alumínio. Dentro deste grupo, uma nova restrição técnica foi adicionada: a disponibilidade do material.

Considerando que a disponibilidade da liga de alumínio A356 dentro do departamento de Engenharia de Materiais, ela foi selecionada. Além de apresentar excelente fundibilidade, boa resistência mecânica e acabamento superficial, a liga também já tinha comportamento previamente conhecido pelo técnico de laboratório, o que proporcionou maior segurança quanto ao seu desempenho.

Do ponto de vista químico, a liga possui dois elementos de liga: 7% de silício, sendo este o principal componente depois do alumínio e 0,35% de magnésio [27].

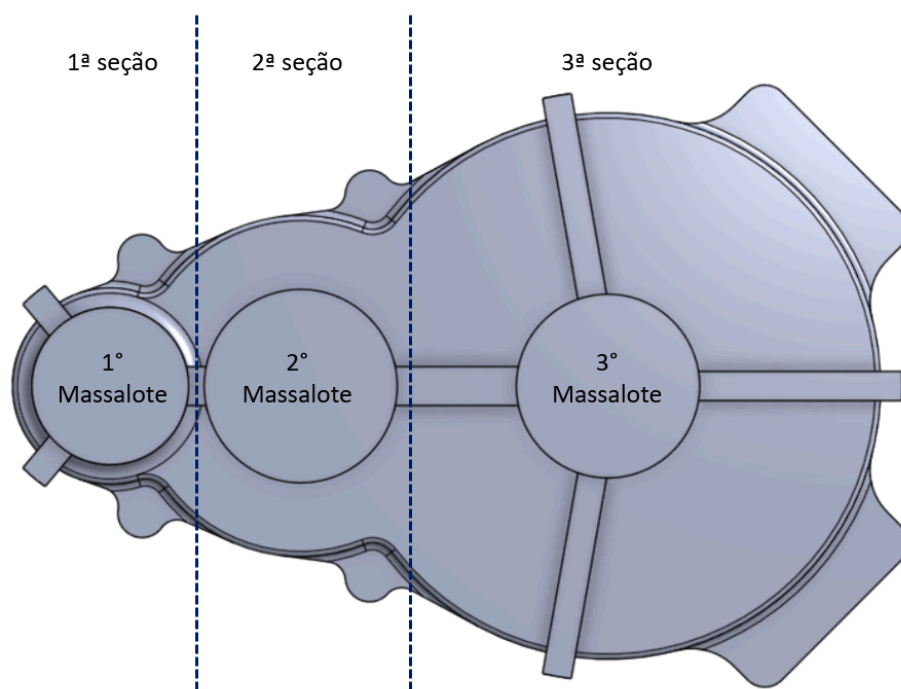
Essa liga, quando não tratada termicamente, apresenta uma dureza típica de 55 HB, tensão de escoamento de 65,5 MPa e alongamento de 2,0 % [27].

Assim, a aplicação das etapas de seleção levou a escolha fundamentada da liga de alumínio A356 como a mais adequada para a fabricação da carcaça da caixa de redução do protótipo Mini Baja SAE.

## 5.2. PROJETO DE FUNDIÇÃO

Considerando a geometria da peça definiu-se que a mesma seria atacada de baixo para cima, com a sua concavidade voltada para baixo. A geometria prévia dos massalotes foi definida de modo a tentar simplificar o máximo possível o sistema, ou seja, o sistema de canais visava ser simples e efetivo sem sobrecarregar o conjunto em complexidade.

Para facilitar o cálculo dos massalotes e pescoços, a peça foi, então, subdividida em três seções, conforme mostrado na Figura 13.



**Figura 13** - Seções nas quais a peça foi subdividida. **Fonte:** Autoral.

Neste sentido, notou-se que seria de grande importância o posicionamento de um massalote no centro de cada seção - referente ao local onde seriam feitos os furos dos eixos. Os valores de área superficial, volume e módulo de cada seção estão dispostos na Tabela 1.

**Tabela 1** - Valores descritivos das subdivisões da peça.

	<b>Seção 1</b>	<b>Seção 2</b>	<b>Seção 3</b>
<b>Área superficial (cm<sup>2</sup>)</b>	256	534	1288
<b>Volume (cm<sup>3</sup>)</b>	114	216	465
<b>Módulo</b>	0,445	0,404	0,361

**Fonte:** Autoral.

Com esses valores em mãos, os módulos dos massalotes bem como dos pescoços puderam ser calculados, tomando como base o fator de multiplicação para cada componente e os módulos das seções da peça. Os resultados são mostrados pela Tabela 2.

**Tabela 2** - Módulo dos massalotes e dos pescoços para cada seção da peça.

	<b>Seção 1</b>	<b>Seção 2</b>	<b>Seção 3</b>
<b>Módulo do massalote</b>	0,53	0,48	0,43
<b>Módulo do pescoço</b>	0,49	0,44	0,39

**Fonte:** Autoral.

Com base nos dados dispostos na Tabela 2, o requisito térmico pode ser calculado. Considerando massalotes cilíndricos de relação altura/diâmetro igual a 1,5 atingiu-se os valores conforme mostrado pela Tabela 3. A altura do massalote foi restringida considerando-se a altura do maior massalote, uma vez que para para moldes com massalote aberto torna-se um requisito que os massalotes possuam a mesma altura.

**Tabela 3** - Dimensionamento dos massalotes pelo requisito térmico.

	<b>Seção 1</b>	<b>Seção 2</b>	<b>Seção 3</b>
--	----------------	----------------	----------------

<b>Raio (cm)</b>	1,42	1,29	1,15
<b>Altura (cm)</b>	4,27	4,27	4,27
<b>Volume (cm<sup>3</sup>)</b>	27,18	20,42	14,52

Fonte: Autoral.

No entanto, sabendo-se que a análise do dimensionamento dos massalotes deve ser feita de maneira complementar considerando-se também os requisitos volumétricos, o volume dos massalotes mediante esse parâmetro também foi calculado, conforme mostrado pela Tabela 4. A mesma razão de altura/diâmetro bem como o requisito de alturas iguais para os massalotes foram mantidos para este caso.

**Tabela 4 - Dimensionamento dos massalotes pelo requisito volumétrico.**

	<b>Seção 1</b>	<b>Seção 2</b>	<b>Seção 3</b>
<b>Raio (cm)</b>	3,38	4,51	5,82
<b>Altura (cm)</b>	17,46	17,46	17,46
<b>Volume (cm<sup>3</sup>)</b>	364	864	1860

Fonte: Autoral.

Nota-se que o requisito volumétrico resulta em valores muito superiores de volumes de massalote, sendo, portanto, este o requisito crítico a ser utilizado também para o dimensionamento dos pescoços, conforme mostrado na Tabela 5.

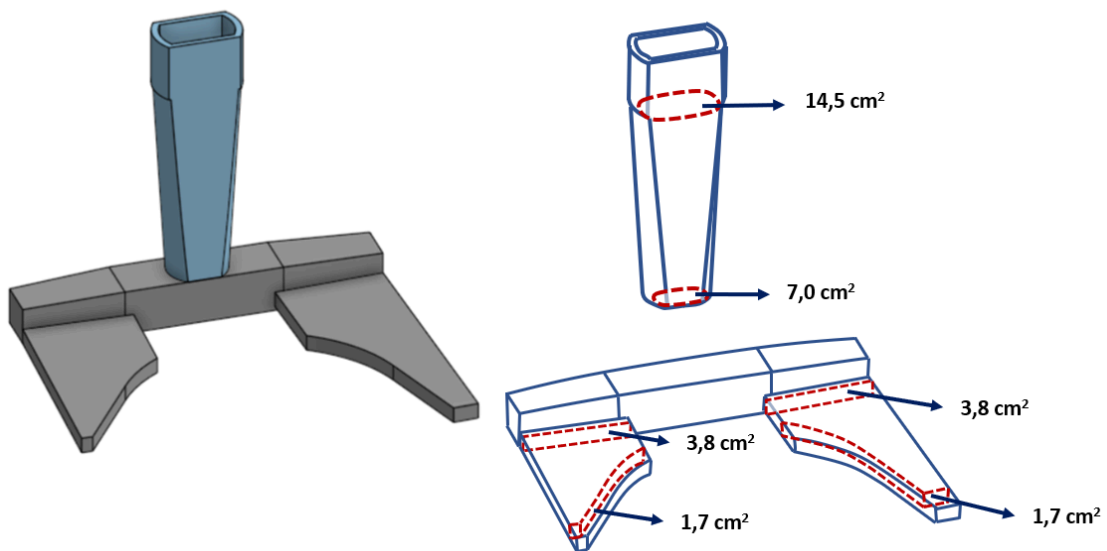
**Tabela 5 - Dimensionamento dos pescoços com base no requisito volumétrico.**

	<b>Seção 1</b>	<b>Seção 2</b>	<b>Seção 3</b>
<b>Raio (cm)</b>	1,30	1,19	1,06
<b>Altura (cm)</b>	3,91	3,56	3,17
<b>Volume (cm<sup>3</sup>)</b>	20,94	15,73	11,18

Fonte: Autoral.

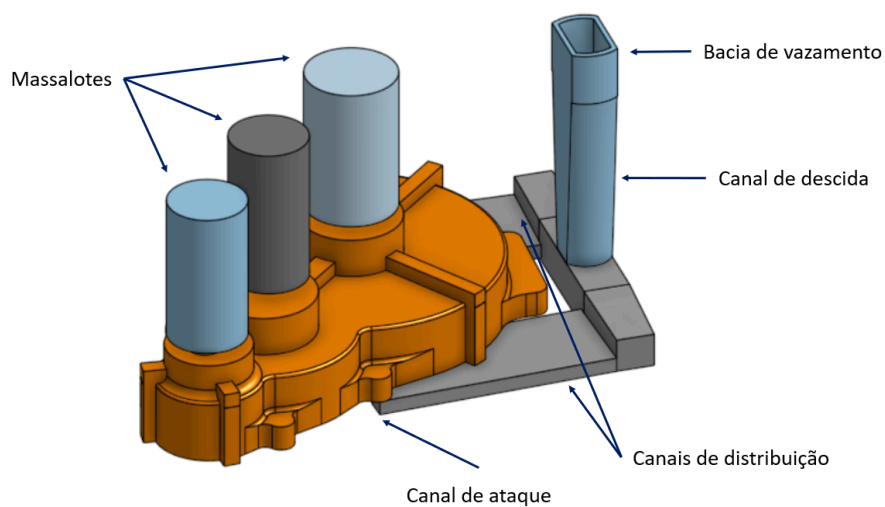
Uma vez que os volumes de massalotes e pescoços foram determinados, pode-se dimensionar o sistema de canais conforme descrito anteriormente.

O cálculo do sistema de canais foi realizado considerando-se um volume total de  $5019 \text{ cm}^3$  e 25 s de tempo de vazamento. Assim, os cálculos realizados deram origem aos valores utilizados para o desenho dos canais de alimentação. Os valores de área determinados para cada canal podem ser observados por meio da Figura 14.



**Figura 14** - Áreas definidas para cada canal. **Fonte:** Autoral.

Esses valores deram origem ao sistema de canais dimensionado de maneira analítica como mostrado pela Figura 15.



**Figura 15** - Sistema de canais dimensionados analiticamente. **Fonte:** Autoral.

### 5.3. VALIDAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DO PROJETO DE FUNDIÇÃO

Uma vez que o sistema de canais foi construído de maneira analítica, ele pode, então, ser avaliado por meio do software MAGMA, permitindo a sua otimização por meio de métodos não analíticos.

Na primeira iteração, notou-se uma pequena aceleração do metal líquido ao longo da seção intermediária da peça, mostrando que seria de grande importância que o canal se mantivesse menos pressurizado.

Somado a isso, foram encontradas incongruências de projeto no canal de ataque, já que o posicionamento feito inicialmente dificultaria a remoção dos canais de alimentação sem que houvesse alguma avaria na peça. Assim, determinou-se que o canal de ataque não deveria se encontrar com as estruturas de fixação, por serem pontos de maior carregamento mecânico.

Por fim, propôs-se, na primeira iteração, que os massalotes fossem redimensionados, considerando uma redução em dimensão de 10% de cada um deles, bem como a adição de resfriadores feitos de aço em pontos estratégicos (estruturas de fixação e nervuras estruturais) para que estes pontos fossem resfriados mais rapidamente, evitando pontos quentes que resultariam em possíveis defeitos.

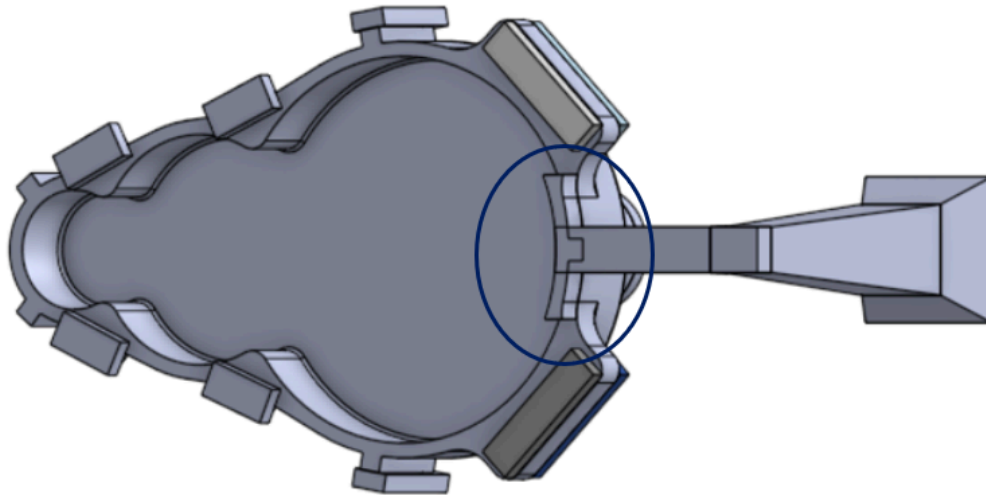
Considerando os primeiros resultados obtidos, os canais de alimentação foram redesenhados e o projeto pôde ser novamente simulado. Os resultados obtidos na segunda simulação mostraram pequenas melhorias a serem feitas.

Propôs-se que o massalote central tivesse seu diâmetro reduzido em mais 5% e que seu pescoço tivesse o diâmetro aumentado. Verificou-se, ainda, que para o projeto ser executado da forma como se propunha, seria importante ter controle sobre a temperatura de vazamento do metal, que deveria ocorrer entre 720 a 740°C.

Novamente, a segunda iteração, mostrou problemas com o canal de ataque, que estava pressurizando o metal líquido e fazendo com que ele entrasse na peça numa velocidade consideravelmente superior à velocidade de 0,5 m/s proposta pela literatura [4].

Neste sentido, novas mudanças foram executadas, principalmente no que diz respeito à localização e formato do canal de ataque.

Para a terceira iteração, o canal de ataque foi posicionado entre as duas aletas de fixação, como mostrado pela Figura 16. Já entre o canal de ataque e o canal de distribuição adicionou-se um filete, o que permitiu que a velocidade do metal líquido, bem como sua turbulência, fossem reduzidos.

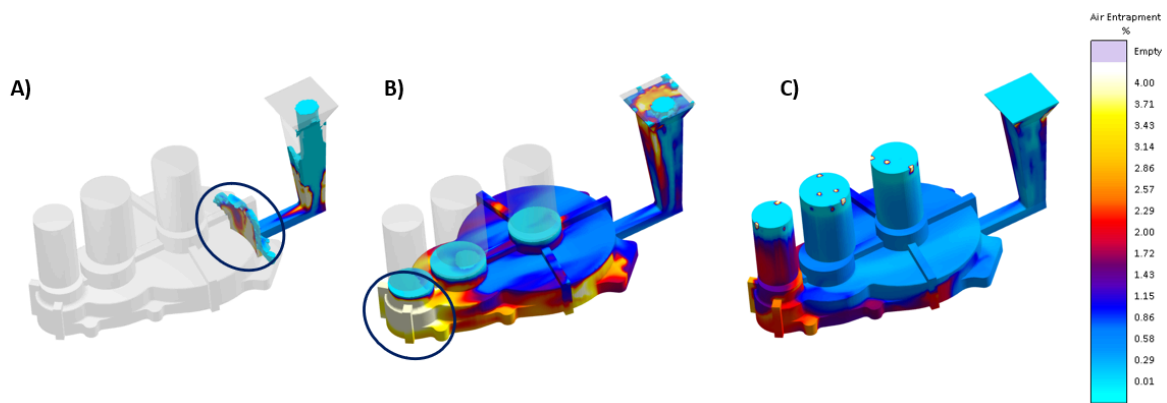


**Figura 16** - Posicionamento do canal de ataque. **Fonte:** Autoral.

Após a execução das mudanças sugeridas, resultados muito importantes puderam ser obtidos, os quais estão detalhados a seguir.

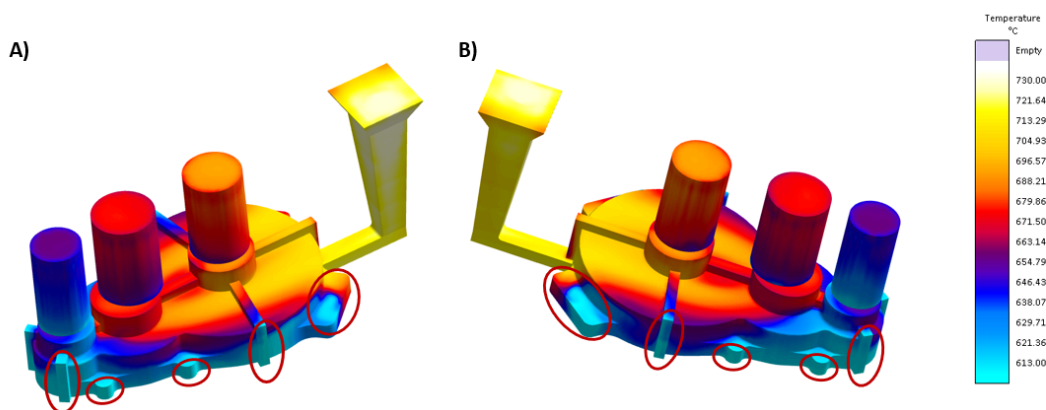
A alteração dos canais de ataque e de distribuição permitiu um melhor fluxo do metal líquido, fazendo com que não houvesse aprisionamento significativo de gases. Por meio da Figura 17-A) pode-se notar que existe considerável aprisionamento de ar no momento de entrada do líquido no molde (seção circular em azul). No entanto, após poucos segundos, o fluxo do metal já permite que esse ponto seja completamente preenchido, fazendo com que apenas a extremidade final do molde apresente algum aprisionamento de ar, como mostrado pela Figura 17-B).

Com o vertimento completo do metal líquido, é possível perceber que os pontos de aprisionamento de gases se deslocam para as extremidades finais dos massalotes, como pode-se observar pela Figura 17-C). Isso evidencia o bom funcionamento do sistema, já que os pontos mais prováveis de conterem defeitos são os massalotes.



**Figura 17** - Aprisionamento de ar em diferentes momentos do vertimento do metal líquido no molde. A) Entrada do metal líquido na cavidade do molde. B) preenchimento da base, com aprisionamento do ar na extremidade final. C) completo preenchimento do molde com aprisionamento de ar nos massalotes. **Fonte:** Cortesia de MAGMA Engenharia do Brasil.

Já por meio da Figura 18, é possível observar o gradiente de temperaturas experimentado pelo sistema após o completo vertimento do metal líquido. Através dela é possível perceber que a temperatura das extremidades finais da peça é de aproximadamente 613°C, enquanto a extremidade oposta está a uma temperatura de cerca de 720°C.

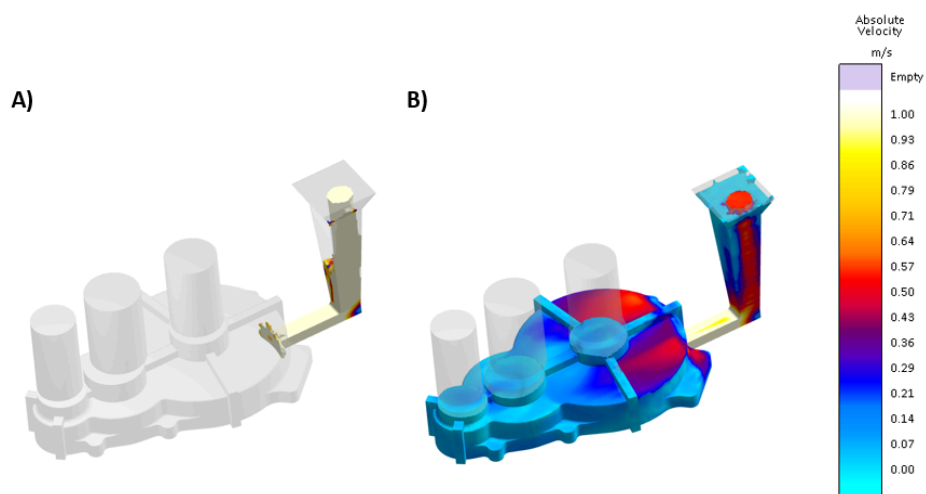


**Figura 18** - Perfil de temperaturas da peça após o completo vertimento do metal líquido. **Fonte:** Cortesia de MAGMA Engenharia do Brasil.

Esse fenômeno está de acordo com o que era esperado, em função da disposição dos resfriados nos pontos evidenciados por círculos e elipses vermelhas, ou seja, os primeiros pontos a serem resfriados e, conseqüentemente, solidificados, são os pontos onde os resfriadores foram posicionados, justamente para evitar a ocorrência de pontos quentes.

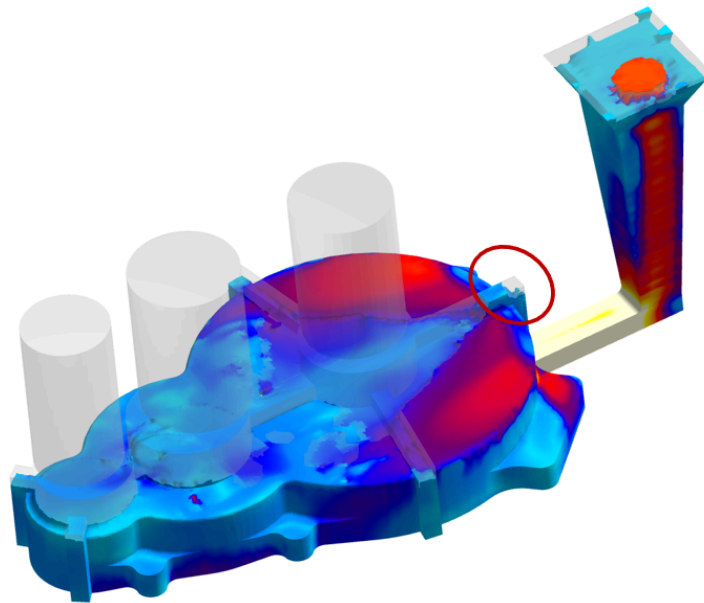
A avaliação do perfil de velocidades do metal líquido dentro do molde, conforme mostrado pela Figura 19, permite observar que o metal líquido continua entrando no molde numa velocidade consideravelmente superior à de 0,5 m/s.

Quando o metal líquido atravessa o canal de ataque e encontra as cavidades do molde ele se encontra numa velocidade entre 0,86 a 1,0 m/s, valor esse bastante superior ao da velocidade crítica. Esse tipo de comportamento pode resultar, inicialmente, num preenchimento turbulento do molde, ainda que esse comportamento seja corrigido num momento posterior, como se observa pela Figura 19-B).



**Figura 19** - Perfil de velocidades do metal líquido. A) Entrada do líquido no molde. B) Preenchimento parcial do molde. **Fonte:** Cortesia de MAGMA Engenharia do Brasil.

Somado a isso, na Figura 20, nota-se, ao longo da seção circulada em vermelho, que uma pequena parte do molde está trabalhando vazia.

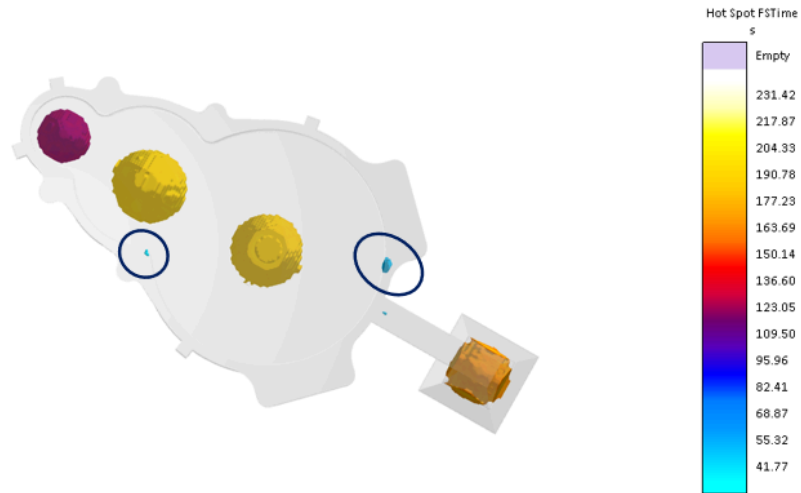


**Figura 20** - Pequena seção do molde trabalhando sem preenchimento do metal líquido. **Fonte:** Cortesia de MAGMA Engenharia do Brasil.

Essa diferença no que diz respeito a altura do metal líquido na região, pode ter sido causada, principalmente, pelo fato do metal líquido não estar preenchendo o molde em um ritmo idêntico em todas as regiões, uma vez que, além de ter penetrado o molde como uma velocidade superior a 0,5 m/s, o metal também apresenta um gradiente de velocidades ao longo das cavidades do molde [28].

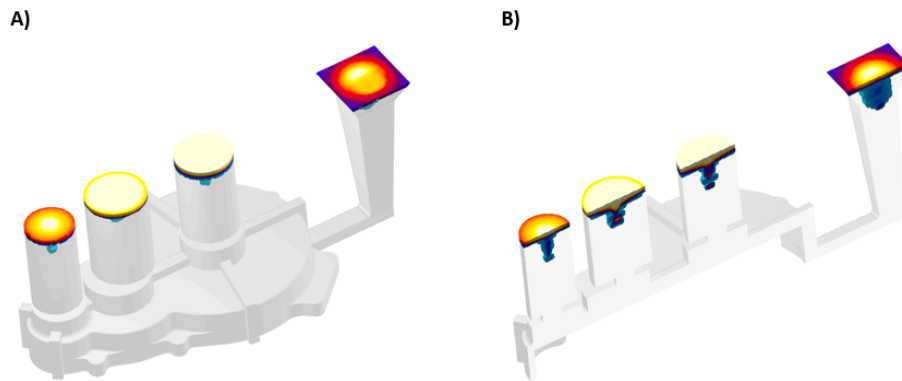
Na Figura 21, pode-se observar a solidificação quase completa do sistema. Nela, observa-se a presença de pequenos pontos quentes nas extremidades circundadas em azul.

A presença desses pontos quentes poderia resultar na formação de pontos frágeis na peça, pois, sendo essa uma porção que se solidificou completamente num momento posterior a todo o líquido ao seu redor e sem ter a presença de massalotes para compensar a contração do metal líquido, seria possível que houvesse a formação de vazios que comprometessem o uso da peça.



**Figura 21** - Presença de pequenos pontos quentes no sistema. **Fonte:** Cortesia de MAGMA Engenharia do Brasil.

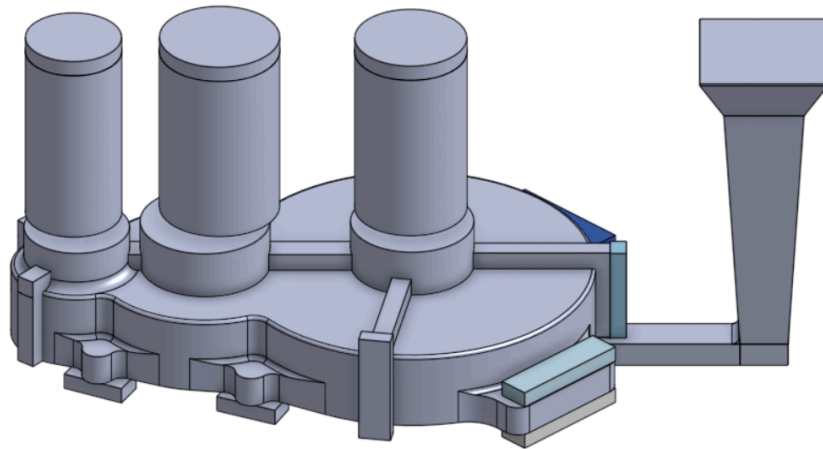
Por fim, a Figura 22 permite visualizar a eficiência dos massalotes, uma vez que os rechupes existentes se alocaram apenas neles, garantindo a completa integridade da peça.



**Figura 22** - Formação de rechupes na extremidade superior dos massalote. A) Corte da peça para facilitar a visualização dos rechupes. **Fonte:** Cortesia de MAGMA Engenharia do Brasil.

Com base em todos os resultados obtidos, os pré-requisitos que a peça deveria ser capaz de satisfazer e as limitações impostas pela complexidade da geometria que se desejava fundir, a otimização atingida foi considerada satisfatória, permitindo que fosse dado seguimento nas próximas etapas do projeto.

Neste sentido, a geometria final do sistema, após todas as iterações, correções e realocações, pode ser vista na Figura 23.



**Figura 23** - Projeto de canais de alimentação após todas as otimizações propostas pelo software MAGMA. **Fonte:** Autoral.

#### 5.4. PRODUÇÃO DO MODELO E DOS MOLDES

Com o projeto de canais validado, pode-se dar seguimento ao andamento do projeto, partindo-se para a etapa de produção do modelo e dos moldes.

Os elementos do sistema de canais foram modificados para que as peças do sistema pudessem ser fabricadas por meio de impressão 3D. Assim, os elementos maiores foram subdivididos, para que pudessem ser impressos em partes e, posteriormente, unidos dando origem à peça completa.

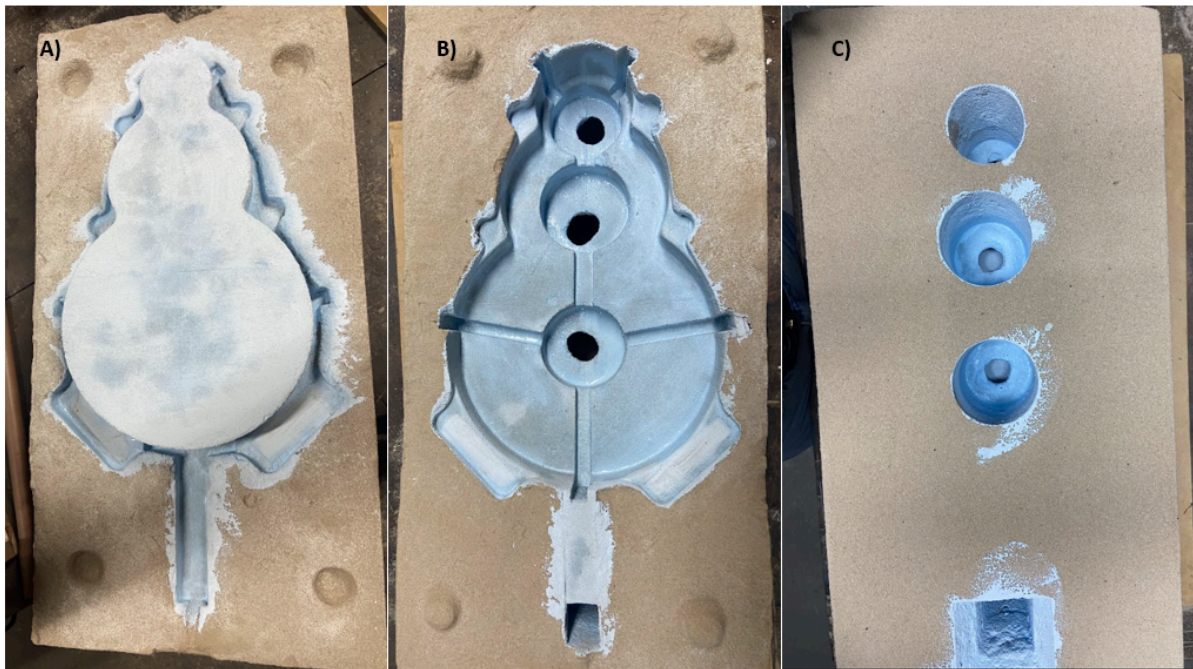
O sistema foi impresso em PLA (poliácido láctico) e, posteriormente, colado, lixado e pintado com primer para garantir bom acabamento superficial ao modelo. O resultado final do modelo pode ser observado pela Figura 24.



**Figura 24** - Montagem final do modelo. **Fonte:** Autoral.

Esse modelo foi, então, utilizado para compor o molde da peça. Ele foi posicionado dentro de uma caixa de madeira e coberto completamente com areia catalisada com pep set, para dar origem ao molde. O molde foi construído em duas partes: uma para dar forma a cavidade da peça e outra para compor a parte superior da mesma. Essas duas partes foram coladas com resina, dando origem ao sistema mostrado na Figura 25.

Depois de 24 horas a areia estava curada e o modelo pode ser retirado. Para poder ser realocado na fabricação de um outro molde, referente a outra metade da carcaça. Os passos foram replicados e com a remoção do modelo ambos os moldes puderam ser pintados com tinta a base de óxido de boro, para garantir um bom acabamento da parede do molde e, conseqüentemente, da parede da peça.



**Figura 25** - Finalização da construção do molde de areia onde: A) é a parte inferior do molde, B) é a parte superior do molde e C) é o molde já fechado. **Fonte:** Autoral.

Com os dois moldes finalizados, foi possível, portanto, realizar a manufatura da peça, efetivamente.

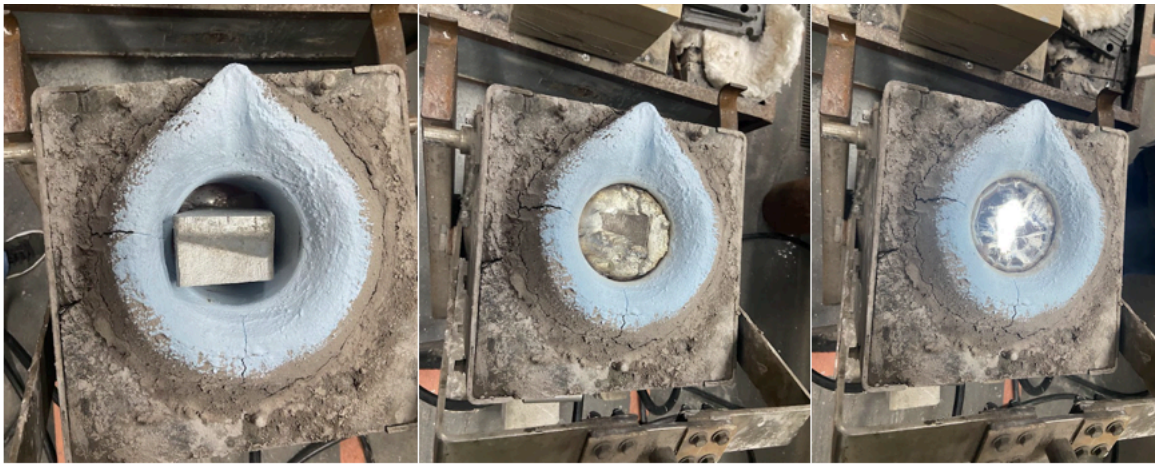
### 5.5. MANUFATURA DA PEÇA

O processo de manufatura da peça em si iniciou-se com a reconstrução do revestimento do forno utilizado para a fusão do metal necessário. Após a reconstrução do revestimento e do tempo necessário para a sua cura, o mesmo foi pintado com tinta a base de nitreto de boro, para evitar a penetração do metal líquido no revestimento cerâmico. O mesmo foi feito com as cavidades dos dois moldes produzidos.

Posteriormente, os lingotes de alumínio A 356 foram cortados em pedaços menores para poderem ser melhor alocados dentro do forno. Para a manufatura de cada peça foram necessários 8,4 kg de alumínio, totalizando 16,8 kg de alumínio para preencher os dois moldes.

Com os pedaços de alumínio já devidamente cortados, o material necessário para a produção da primeira peça foi disposto no forno e aquecido até sua completa

fusão. A visão gradual do processo de fusão do material pode ser observada por meio da Figura 26.



**Figura 26** - Evolução gradual da fusão do alumínio. **Fonte:** Autoral.

Com o material completamente líquido, utilizou-se um pirômetro óptico para verificar a sua temperatura. Ao alcançar-se a temperatura de 700°C, o material passou por uma etapa de desgaseificação, onde uma lança de argônio foi mergulhada no mesmo e lá se manteve, sem agitação, por cerca de cinco minutos. Com a completa desgaseificação, o forno teve sua potência aumentada, para que o material pudesse alcançar a temperatura de vertimento de 740°C.

Uma vez que a temperatura foi alcançada, o material foi vertido no molde até seu completo preenchimento, como pode ser observado na Figura 27. Por fim, as extremidades abertas dos massalotes foram cobertas com mantas térmicas em prol de retardar a sua solidificação o máximo possível, como evidência a Figura 28.

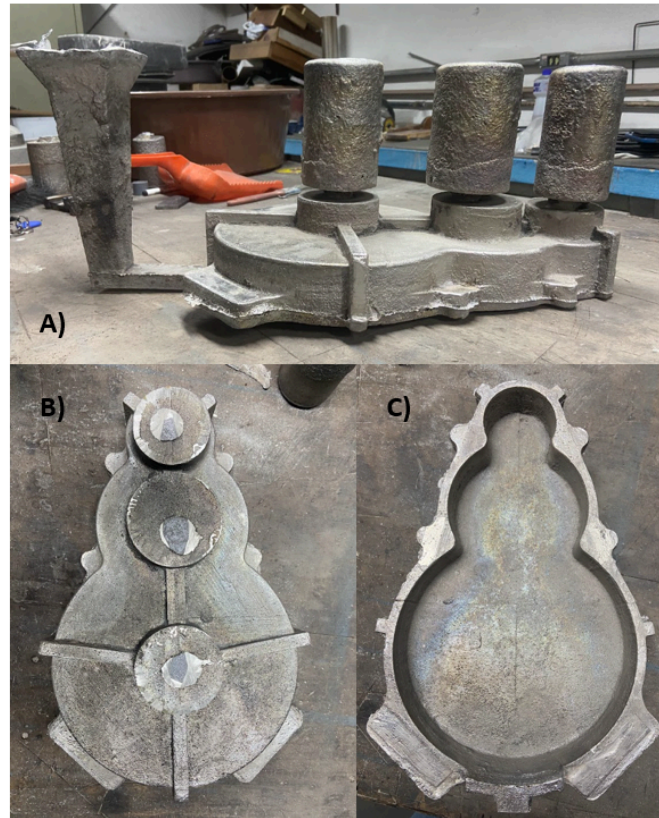


**Figura 27** - Molde preenchido. **Fonte:** Autoral.



**Figura 28** - Posicionamento das mantas térmicas cobrindo o topo dos massalotes. **Fonte:** Autoral.

Todo o sistema foi, então, mantido em repouso por no mínimo 12 horas, para garantir seu completo resfriamento. Após esse período, o molde pôde ser quebrado e a peça removida. Os massalotes e canais de alimentação foram cortados, como mostrado pela Figura 29. Todo esse processo foi repetido no dia seguinte para a produção da segunda peça.



**Figura 29** - Peça final obtida, onde A) é a peça em seu estado bruto, B) é a parte superior da mesma com os massalotes e canais de alimentação removidos e C) a sua parte inferior. **Fonte:** Autoral.

Numa etapa final, ambas as peças passaram por um processo de usinagem para que os furos dos eixos e de fixação fossem realizados. Além disso, os dois lados da carcaça foram faceados, para garantir acabamento superficial, conforme pode ser observado pela Figura 30.



**Figura 30** - Etapa de usinagem pela qual o componente passou. **Fonte:** Autoral.

A peça completa já apresentava bom acabamento superficial, além de se encontrar livre de defeitos visíveis, o que foi considerado um indicativo de sucesso

do projeto. Além disso, com a remoção do canal de ataque na extremidade próxima a parede da peça não foi possível verificar nenhum tipo de defeito, o que, somado à formação de um pequeno rechupe nos massalotes - cumprindo com a função dos mesmos - indica um bom preenchimento dos dois moldes.

Com a peça agora produzida e pronta para ser utilizada, foi possível realizar análises para se atestar a qualidade do componente obtido, bem como a sua proximidade com aquilo que havia sido projetado.

## 5.6. ANÁLISE DIMENSIONAL DO COMPONENTE

Mediante a finalização do componente, o mesmo foi medido em diferentes pontos para verificar a precisão dimensional do projeto. Os valores obtidos bem como os valores esperados estão dispostos na Tabela 6.

**Tabela 6 - Dimensões obtidas para as peças produzidas comparadas com as dimensões esperadas.**

	D <sub>1</sub> (mm)	D <sub>2</sub> (mm)	D <sub>3</sub> (mm)	E (mm)
Valor esperado	65,16	126,05	211,02	9,16
Valor obtido para a peça 1	61,86	122,70	213,00	8,11
Valor obtido para a peça 2	65,57	125,25	210,52	8,85

**Fonte:** Autoral.

Já na Tabela 7, tem-se os erros percentuais associados a cada medida referente a cada peça.

**Tabela 7 - Erros percentuais de cada medida.**

	D <sub>1</sub> (%)	D <sub>2</sub> (%)	D <sub>3</sub> (%)	E (%)
Erro percentual da peça 1	5,06	2,66	0,94	11,46
Erro percentual da peça 2	0,63	0,63	0,24	3,39

**Fonte:** Autoral.

A princípio, nota-se que os erros percentuais associados às medidas referentes à peça 1 são superiores aos valores observados para a peça 2.

Principalmente, quando os erros percentuais associados às espessuras de ambas as peças são observados, nota-se que a peça 1 possui um erro percentual de 11,46%, enquanto a peça 2 possui um erro percentual de apenas 3,39%.

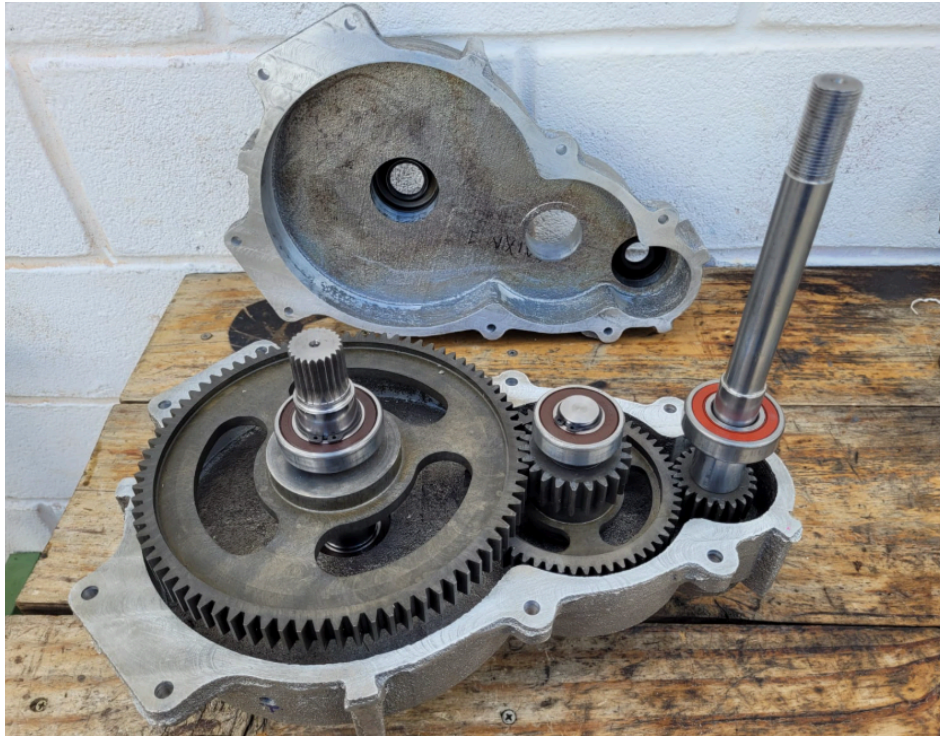
Para a peça 2, é possível dizer que os erros não são significativos, em razão dos baixos valores calculados. Já para o caso da peça 1, os valores são visivelmente maiores. Embora esses erros não inviabilizem a utilização do componente, eles evidenciam que possíveis diferenças podem ter ocorrido entre a montagem do molde ou vazamento das peças 1 e 2, ainda que essas diferenças sejam pequenas.

As reduções observadas nos diâmetros  $D_1$  e  $D_2$  e na espessura  $E$  da peça 1, podem ser atribuídas principalmente à contração de solidificação da liga de alumínio. A taxa de contração pode variar em função de alguns fatores, como a velocidade de resfriamento, onde taxas relativamente baixas de resfriamento - como as observadas em projetos de molde de areia - proporcionam maiores níveis de contração volumétrica [29].

Já o aumento observado no diâmetro  $D_3$  pode ser resultado da deformação térmica. Uma vez que ela é referente à maior medida da peça, pode haver maior susceptibilidade a distorções térmicas durante o resfriamento e a solidificação.

De maneira geral, os resultados dimensionais obtidos foram considerados satisfatórios para o objetivo do projeto, indicando, também, uma boa reprodutibilidade dos processos.

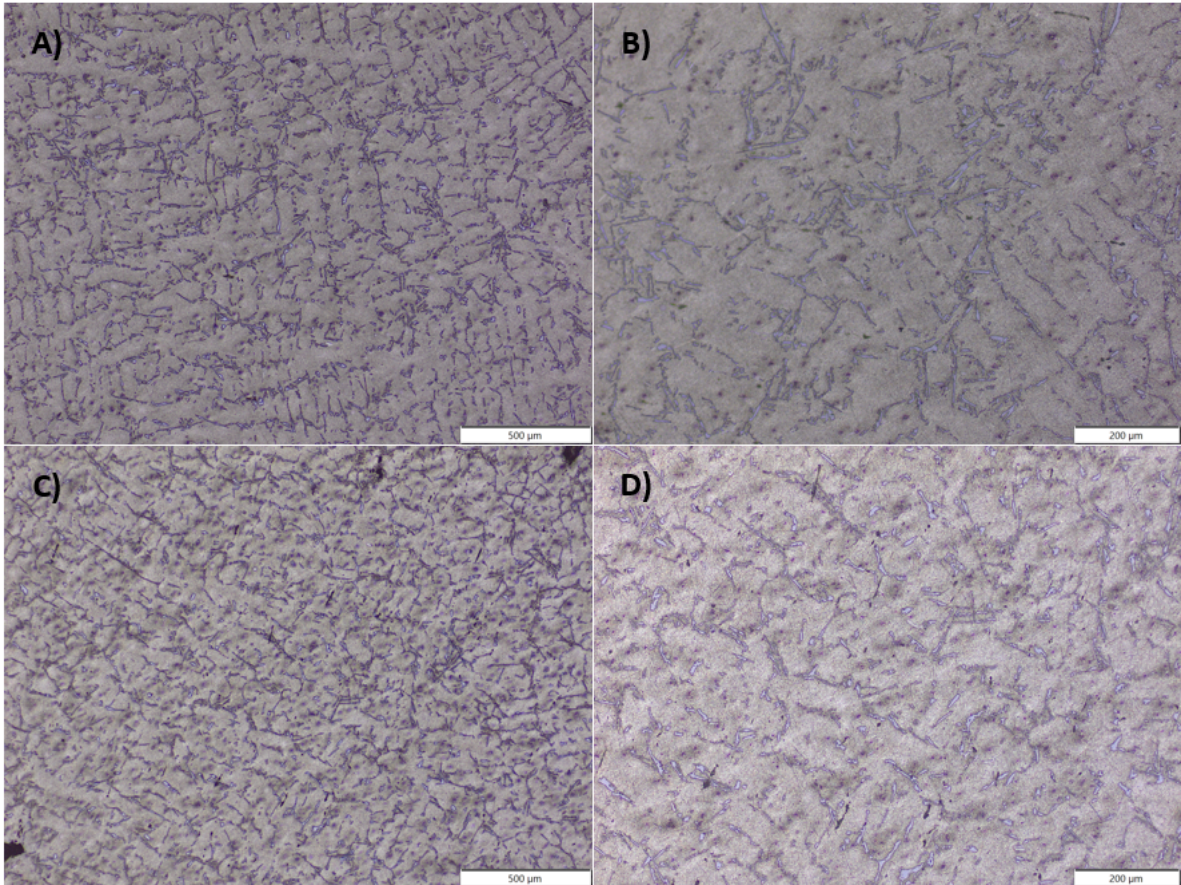
Apesar das pequenas variações observadas em relação às dimensões teóricas, a peça produzida atendeu aos requisitos funcionais, permitindo a correta alocação dos componentes internos, como pode-se observar pela Figura 31. Além disso, o posicionamento interno dos componentes pode ser feito sem apresentar interferência da peça com os mesmos, o que denota que mesmo com as tolerâncias típicas do processo de fundição em areia, o controle dimensional aplicado foi suficiente para garantir viabilidade do uso da peça no sistema automotivo proposto.



**Figura 31** - Posicionamento dos componentes internos da caixa de redução. **Fonte:** Autoral.

### 5.7. ANÁLISE MICROESTRUTURAL DO COMPONENTE

Micrografias da peça no estado bruto de fusão podem ser observadas, para diferentes aumentos, na Figura 32. As micrografias representam a microestrutura das duas peças fundidas - referentes aos dois lados da carcaça. Além disso, elas revelam uma predominância de grãos da fase primária de alumínio ( $\alpha$  - Al), que se apresenta na forma de uma matriz com coloração mais clara.

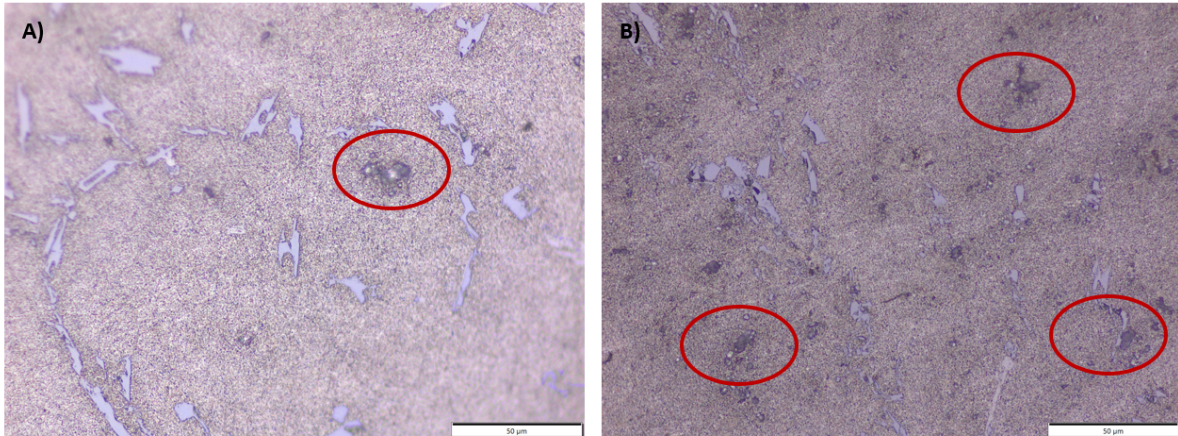


**Figura 32** - A) e B) são micrografias referentes à parte esquerda da peça em diferentes aumentos e C) e D) são as micrografias da parte direita da peça com diferentes aumentos. **Fonte:** Autoral.

Entre os grãos de  $\alpha$  - Al, é possível observar regiões de morfologia acicular e ramificada, associadas ao microconstituente eutético (Al-Si), a qual se solidificou nas etapas finais do processo.

A morfologia típica desses grãos é na forma de agulhas ou finas lamelas distribuídas de maneira contínua nas regiões interdendríticas. Este aspecto morfológico indica a ausência de modificação química da liga, uma vez que não foi feita a adição de modificadores do eutético que alterassem a morfologia para um formato acicular fibroso, como acontece com a adição de sódio, estrôncio ou antimônio.

Já por meio da Figura 33 A) e B) observa-se o padrão de porosidade formado nas duas peças fundidas. Em ambas as imagens nota-se a presença de círculos pretos de diâmetros variados uniformemente distribuídos na matriz, conforme mostrado pelos círculos em vermelho.



**Figura 33** - Micrografias com um aumento de 500x mostrando a porosidade das peças produzidas.

A) Peça 1 e B) Peça 2. **Fonte:** Autoral.

Como discutido anteriormente, a porosidade no alumínio é atribuída a dois principais fatores: a dissolução de hidrogênio no metal líquido e a contração do metal durante o processo de solidificação.

Uma maneira de reconhecer qual foi o fator causador da porosidade é por meio da observação da morfologia do poro. Poros causados devido a presença de hidrogênio acima do limite de solubilidade possuem morfologias tipicamente esféricas, enquanto os poros causados pela solidificação do metal líquido possuem morfologia que acompanha o contorno das dendritas, o que dá a elas um formato lamelar [30]. Os poros presentes na Figura 33 apresentam morfologia irregular, o que leva a crer que são originados pelo processo de solidificação da liga de alumínio.

Ainda que a porosidade esteja presente, cabe notar que ela não comprometeu a utilização do componente, uma vez que, com a respectiva montagem do mesmo, foi possível concluir que ele é capaz de cumprir com o seu requisito básico: o de ser estanque.

Assim, embora a porosidade ainda estivesse presente na microestrutura, ela não é significativa a ponto de afetar o comportamento do elemento ao longo de seu funcionamento.

De maneira complementar, foram aferidas medidas de dureza para as duas peças, conforme mostrado pela Tabela 8.

**Tabela 8 - Medidas de dureza aferidas para as duas peças em estado bruto de solidificação.**

<b>Medida</b>	<b>Dureza da peça 1 (HB)</b>	<b>Dureza da peça 2 (HB)</b>
1	53	51
2	52	49
3	52	53
4	51	53
5	54	49
Média	52	51
Desvio	1	2

**Fonte:** Autoral.

A norma B26/B26M descreve que a dureza Brinell (500 kgf, esfera de 10mm) para a liga A356 na condição bruta de fusão é de 55 HB. Os valores medidos para as duas peças são ligeiramente inferiores.

Isso pode ser resultado da porosidade presente na microestrutura, o que leva a uma redução da área efetiva para a aplicação da carga. Além disso, a peça foi resfriada dentro do molde, o que permitiu que ela esfriasse lentamente. Neste sentido, a menor taxa de resfriamento implica numa microestrutura mais grosseira e com propriedades mecânicas inferiores.

No entanto, como definido anteriormente, os principais requisitos que a peça deveria ser capaz de suprir, são referentes a sua capacidade de ser estanque. Como os requisitos mecânicos não são os mais relevantes para o projeto, pode-se inferir que os resultados de dureza ligeiramente inferiores não impedem o bom funcionamento do componente.

## **6. CONCLUSÕES**

O desenvolvimento do projeto de fundição da carcaça da caixa de redução do protótipo mini BAJA representou um grande avanço técnico e prático para a equipe BAJA UFSCar. Todas as etapas propostas foram conduzidas com sucesso, desde a análise de requisitos e seleção adequada de materiais, até o dimensionamento do

sistema de alimentação e a manufatura da peça. Como resultado, foi possível não apenas projetar a peça com as características geométricas e mecânicas desejadas, como também efetivas a sua manufatura de maneira segura e eficaz.

Um aspecto de destaque durante o desenvolvimento deste projeto foi a aplicação de simulações computacionais por meio do software MAGMA. Essa ferramenta foi fundamental para prever o comportamento do material durante o enchimento e solidificação do molde, permitindo realizar ajustes preventivos no projeto dos canais e massalotes, antes mesmo da sua produção física.

Vale ressaltar, ainda, que em tentativas anteriores realizadas pela equipe, a manufatura dessa mesma peça apresentou sérias dificuldades, resultando em peças com defeitos de enchimento. No entanto, com o apoio do MAGMASOFT foi possível otimizar o projeto de fundição e garantir a produção de uma carcaça isenta de defeitos estruturais, o que assegura a confiabilidade em campo durante as competições em que a equipe participa.

Assim, o trabalho comprova a importância da integração entre conhecimento teórico, ferramentas de simulação e validação prática no desenvolvimento de componentes fundidos complexos.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] BAJA UFSCar. Disponível em: <https://www.linkedin.com/company/baja-ufscar/posts/?feedView=all>. Acesso em: 01 jul. 2025.

[2] ASHBY, Michael F.. **Materials Selection in Mechanical Design**. 3. ed. Oxford: Elsevier, 2005. 622 p.

[3] WEISS, David. Advances in the Sand Casting of Aluminium Alloys. **Fundamentals Of Aluminium Metallurgy**, [S.L.], p. 159-171, 2018. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-08-102063-0.00005-9>.

[4] CAMPBELL, John. **Complete Casting Handbook**: metal casting processes, metallurgy, techniques and design. Oxford: Elsevier, 2011. 1242 p.

[5] DIVANDARI, M.; CAMPBELL, J.. Oxide film characteristics of Al–7Si–Mg alloy in dynamic conditions in casting. **International Journal Of Cast Metals Research**, [S.L.], v. 17, n. 3, p. 182-187, mar. 2004. Maney Publishing. <http://dx.doi.org/10.1179/136404604225017546>.

[6] EL-SAYED, M. A.; HASSANIN, Hany; ESSA, Khamis. Bifilm defects and porosity in Al cast alloys. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [S.L.], v. 86, n. 5-8, p. 1173-1179, 5 jan. 2016. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-015-8240-6>.

[7] DISPINAR, D.; CAMPBELL, J.. Critical assessment of reduced pressure test. Part 1: porosity phenomena. **International Journal Of Cast Metals Research**, [S.L.], v. 17, n. 5, p. 280-286, out. 2004. Maney Publishing. <http://dx.doi.org/10.1179/136404604225020696>.

[8] GERRARD, A.J.; GRIFFITHS, W.D.. The Formation of Hydrogen Related Porosity by Double Oxide Film Defects in Al Alloys. **Shape Casting: 5th International Symposium 2014**, [S.L.], p. 269-276, 10 jan. 2014. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/9781118888100.ch33>.

[9] SAMUEL, Agnes M.; SAMUEL, Ehab; SONGMENE, Victor; SAMUEL, Fawzy H.. A Review on Porosity Formation in Aluminum-Based Alloys. **Materials**, [S.L.], v. 16, n. 5, p. 2047, 1 mar. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma16052047>.

[10] BIAN, Xiu Fang; ZHANG, Zhong Hua; LIU, Xiang Fa. Effect of Strontium Modification on Hydrogen Content and Porosity Shape of Al-Si Alloys. **Materials Science Forum**, [S.L.], v. 331-337, p. 361-366, 9 maio 2000. Trans Tech Publications, Ltd.. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.331-337.361>.

[11] MOSTAFAEI, M.; GHOBADI, M.; B., Ghasem Eisaabadi; ULUDAğ, Muhammet; TIRYAKIOđLU, Murat. Evaluation of the Effects of Rotary Degassing Process Variables on the Quality of A357 Aluminum Alloy Castings. **Metallurgical And Materials Transactions B**, [S.L.], v. 47, n. 6, p. 3469-3475, 18 ago. 2016. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11663-016-0786-7>.

[12] STEFANESCU, Doru Michael. **Science and Engineering os Casting Solidification**. 3. ed. Columbus: Springer, 2015. 559 p.

[13] ZAMANI, Mohammadreza. **Al-Si Cast Alloys- Microstructure and Mechanical Properties at Ambient and Elevated Temperature**. 2015. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais e Manufatura, Departamento de Materiais e Manufatura, Universidade de Jonkoping, Jonkoping, 2015.

[14] CALLEGARI, Bruna; LIMA, Tiago Nunes; COELHO, Rodrigo Santiago. The Influence of Alloying Elements on the Microstructure and Properties of Al-Si-Based Casting Alloys: a review. **Metals**, [S.L.], v. 13, n. 7, p. 1174, 24 jun. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/met13071174>.

[15] FERRARINI, Cleyton Fernandes; SOUZA, Marcos Gonçalves de; PERES, Mauricio Mhirdaui; PEREIRA, Gustavo Signoreti; BOLFARINI, Claudemiro. Microestrutura e Propriedades Mecânicas de uma Liga Al-Si-Cu Conformada por Spray. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 64., 2009, São Carlos. **[S.i.]**. Belo Horizonte: [S.I.], 2009. p. 1-8.

[16] WANG, Bing; ZHANG, Mingshan; WANG, Junsheng. Quantifying the effects of cooling rates and alloying additions on the microporosity formation in Al alloys. **Materials Today Communications**, [S.L.], v. 28, p. 102524, set. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102524>.

[17] NOGITA, K; DAHLE, A.K. Eutectic solidification in hypoeutectic Al–Si alloys: electron backscatter diffraction analysis. **Materials Characterization**, [S.L.], v. 46, n. 4, p. 305-310, abr. 2001. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s1044-5803\(00\)00109-1](http://dx.doi.org/10.1016/s1044-5803(00)00109-1).

[18] HOSCH, Timothy Al. **Solidification, growth mechanisms, and associated properties of Al-Si and magnesium lightweight casting alloys**. 2010. 316 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Materiais, Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Estadual de Iowa, Ames, 2010.

[19] WANG, Shou-Ren; MA, Ru; WANG, Ying-Zi; WANG, Yong; YANG, Li-Ying. Growth mechanism of primary silicon in cast hypoeutectic Al-Si alloys. **Transactions**

**Of Nonferrous Metals Society Of China**, [S.L.], v. 22, n. 6, p. 1264-1269, jun. 2012. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s1003-6326\(11\)61314-9](http://dx.doi.org/10.1016/s1003-6326(11)61314-9).

[20] SHIFLET, G.J.; MANGAN, M.A.; MENG, W.G.. Growth by Ledges. **Interface Science**, [S.L.], v. 6, n. 1-2, p. 133-154, fev. 1998. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1023/a:1008624822480>.

[21] BENDO, Artenis; FELLOWES, Jonathan; SMITH, Matthew; MOSHTAGHI, Masoud; JIN, Zelong; MATSUDA, Kenji; FAN, Zhongyun; ZHOU, Xiaorong. Solute micro-segregation profile and associated precipitation in cast Al-Mg-Si alloy. **Philosophical Magazine**, [S.L.], v. 104, n. 19-20, p. 801-827, 5 maio 2024. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/14786435.2024.2336012>.

[22] [S.I.]. **Dissemination of IT for the Promotion of Materials Science**. 2025. Elaborado por: University of Cambridge. Disponível em: [https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/solidification\\_alloys/dendritic.php](https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/solidification_alloys/dendritic.php). Acesso em: 27 jun. 2025.

[23] TRANSVALOR AMERICAS. **The Volatile Impact of Metal Casting Defects on Profitability**. 2022. Disponível em: <https://blog.transvalorusa.com/articles/metal-casting-defects-affect-profitability#:~:text=The%20Impact%20of%20Metal%20Casting,rate%20of%202%2D3%25..> Acesso em: 26 jun. 2025.

[24] MAGMA (São Paulo). **Sobre o MAGMASOFT**. 2025. Disponível em: <https://www.magmasoft.com.br/pt/empresa/sobre-magma/>. Acesso em: 26 jun. 2025.

[25] SANTOS, Jonas Sousa. **Método dos Volumes Finitos Aplicado à Resolução de Problemas de Difusão de Calor**. 2020. 71 f. TCC (Graduação) - Curso de Matemática, Departamento de Matemática, Universidade Federal de São João Del-Rei, São João Del-Rei, 2020.

[26] CAMPBELL, John. **Castings Practice: the 10 rules of castings**. Jordan Hill: Elsevier, 2004. 219 p.

[27] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM B26/B26M: Standart Solidification for Aluminum-Alloy Sand Casting**. West Conshohocken: Astm International, 2018. 14 p.

[28] LEI, Chao; YANG, Yi; YANG, Gang; HUANG, Yuan. Magma software simulation assisted optimization of the casting system of turbocharger castings. **Procedia Manufacturing**, [S.L.], v. 37, p. 59-65, 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2019.12.013>.

[29] CZERWINSKI, Frank. Thermal Stability of Aluminum Alloys. **Materials**, [S.L.], v. 13, n. 15, p. 3441, 4 ago. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma13153441>.

[30] SAMUEL, Agnes M.; SAMUEL, Ehab; SONGMENE, Victor; SAMUEL, Fawzy H.. A Review on Porosity Formation in Aluminum-Based Alloys. **Materials**, [S.L.], v. 16, n. 5, p. 2047, 1 mar. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma16052047>.