



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENG. DE MATERIAIS  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

RAFAEL HEHL PINTO FERRAZ

**PROJETO DE FUNDIÇÃO DE UMA CARÇAÇA DO SISTEMA DE DIREÇÃO PARA  
UM VEÍCULO BAJA, ASSISTIDO POR SIMULAÇÃO**

RAFAEL HEHL PINTO FERRAZ

**PROJETO DE FUNDIÇÃO DE UMA CARCAÇA DO SISTEMA DE DIREÇÃO PARA  
UM VEÍCULO BAJA, ASSISTIDO POR SIMULAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de São Carlos como requisito para a obtenção do título de Engenheira de Materiais.  
Orientador: Prof. Dr. Guilherme Zepon

São Carlos  
2025



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

**NOME:** Rafael Hehl Pinto Ferraz

**RA:** 793109

**TÍTULO:** Projeto de fundição de uma carcaça do sistema de direção para um veículo Baja, assistido por simulação

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

**DATA/HORÁRIO:** 11/07/2025, 11h

### BANCA – NOTAS:

	Monografia	Defesa
Prof. Dr. Guilherme Zepon	8	10
Profa. Dra. Danielle Cristina Camilo Magalhães	7	10
<b>Média</b>	7,5	10

### BANCA – ASSINATURAS:

Prof. Dr. Guilherme Zepon

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** GUILHERME ZEPON  
Data: 11/07/2025 11:36:19-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Danielle Cristina Camilo Magalhães

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** DANIELLE CRISTINA CAMILO MAGALHAES  
Data: 11/07/2025 11:48:11-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dedico esse trabalho aos familiares, amigos e todos aqueles que me apoiaram durante seu desenvolvimento.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer, primeiramente, aos meus pais, Pedro e Tereza, por sempre me apoiarem e incentivarem ao longo de toda a minha vida; ao meu irmão, Lucas, por estar sempre disposto a me ajudar e aconselhar em qualquer tipo de problema; aos meus avós, por sempre demonstrarem compaixão, humildade e pelos ensinamentos que levarei para toda a vida; e a todos os demais familiares, tios, tias e primos por me acolher durante toda minha jornada. Agradeço a todos os amigos que fiz durante minha jornada na equipe Baja UFSCar, por sempre tornarem o peso da graduação mais leve e divertida, além de compartilharem tanto conhecimento e conselhos valiosos. Aos meus amigos da época da escola, agradeço por sempre estarem presentes nos momentos em que precisei, por me ensinarem tantas coisas importantes ao longo da vida e por me permitirem crescermos juntos. Aos colegas que conheci durante meu período de estágio na MAGMA, sou grato por todo o conhecimento, experiências e pela ajuda constante. Vocês tornaram esse período muito mais leve e alegre. Por fim, agradeço à UFSCar e ao Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa) pela oportunidade de estudar e aplicar os conhecimentos adquiridos na prática, nos laboratórios de engenharia de materiais. Também deixo meu agradecimento especial ao professor Zepon, por sua orientação durante toda a minha graduação e no período de estágio.

"Just because everyone tells you something doesn't make it right." — Flik, A Bug's Life (1998) - Andrew Stanton

## RESUMO

Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um projeto de fundição para a fabricação da carcaça da caixa de direção do veículo da equipe Baja SAE UFSCar. Durante o projeto, foram abordadas etapas como a seleção do material, dimensionamento do sistema de alimentação e canais, além da definição das variáveis de processo. Para garantir a qualidade da peça e evitar defeitos como rechupes e juntas frias, foi utilizado o software de simulação MAGMASOFT® 6.1, que possibilitou realizar otimizações antes da fabricação prática. Após as otimizações, o modelo foi produzido por impressão 3D e o molde foi confeccionado com areia e resina fenólica (PEPSET). A fundição foi realizada utilizando liga de alumínio A356. Apesar de algumas falhas superficiais, a peça apresentou boa sanidade interna. Para validação do processo, foram feitas análises metalográficas em diferentes regiões da peça e ensaios de dureza, com resultados satisfatórios quando comparados com valores encontrados na literatura. O trabalho também serviu como base para futuros projetos da equipe Baja UFSCar, fortalecendo o conhecimento no processo de fundição e mostrando a viabilidade dessa tecnologia para fabricação de componentes estruturais do veículo.

**Palavras-chave:** Fundição. Baja SAE. Simulação. MAGMASOFT. Liga A356.

## ABSTRACT

This work aimed to develop a casting project for manufacturing the steering box housing of the Baja SAE UFSCar team vehicle. During the project, steps such as material selection, feeding and gating system design, and process variables definition were addressed. To ensure part quality and avoid defects like shrinkage porosity and cold shuts, the simulation software MAGMASOFT® 6.1 was used, allowing design optimizations before practical manufacturing. After the optimizations, the model was produced using 3D printing, and the mold was made with sand and phenolic resin (PEPSET). The casting was carried out using the A356 aluminum alloy. Despite some surface defects, the part showed good internal soundness. To validate the process, metallographic analyses were performed in different regions of the part, along with hardness tests, showing satisfactory results when compared with values found in the literature. This work also served as a foundation for future projects of the Baja UFSCar team, strengthening knowledge in the casting process and demonstrating the feasibility of this technology for manufacturing structural components of the vehicle.

**Keywords:** Casting. Baja SAE. Simulation. MAGMASOFT. A356 Alloy.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema de direção mecânica. Fonte: (MARIA, 2014). . . . .	1
Figura 2 – Veículo Meraki na etapa nacional de 2025. <i>Fonte: (BAJA..., 2025)</i> . . . . .	2
Figura 3 – Processo de fundição. (BRUCK, 2024) . . . . .	3
Figura 4 – Sistema de Fundição Convencional. (MAGMA, 2024) . . . . .	5
Figura 5 – Alimentação direcionada. (NAZIRUDEEN, 2015) . . . . .	6
Figura 6 – Alimentação através de canais interdendríticos. (CASTRO, 2020) . . . . .	6
Figura 7 – Defeitos convencionais em peças fundidas de alumínio. (MARKEE, 2017) . . . . .	7
Figura 8 – Método de degaseificação do líquido(GUMIENNY, 2022)) . . . . .	8
Figura 9 – Fluxograma comparativo gestão de projetos(MAGMA, 2024) . . . . .	9
Figura 10 – Desenho 3D carcaça sistema de direção. <i>Fonte: Autoria Própria</i> . . . . .	10
Figura 11 – Modo de alimentação. (MATERIAISECORROSAO, 2025) . . . . .	11
Figura 12 – Concepção inicial do projeto. <i>Fonte: Autoria Própria</i> . . . . .	12
Figura 13 – Valores típicos de rendimentos de massalotes (CAMPBELL, 2004) . . . . .	13
Figura 14 – Esquema para dimensionamento dos canais.(CAMPBELL, 2004) . . . . .	14
Figura 15 – Primeira versão do projeto. <i>Fonte: Autoria Própria</i> . . . . .	15
Figura 16 – Temperatura de Enchimento da primeira versão <i>Fonte: Autoria Própria</i> . . . . .	16
Figura 17 – Velocidade de Enchimento da primeira versão <i>Fonte: Autoria Própria</i> . . . . .	17
Figura 18 – Resultado de Aprisionamento de ar da primeira versão <i>Fonte: Autoria Própria</i> . . . . .	18
Figura 19 – Resultado de Ponto quente FSTime <i>Fonte: Autoria Própria</i> . . . . .	18
Figura 20 – Resultado de Rechupes <i>Fonte: Autoria Própria</i> . . . . .	19
Figura 21 – Sistema otimizado, sendo os destaques em verde a adição de resfriadores, em rosa o aumento da espessura da região e em laranja o redimensionamento dos massalotes <i>Fonte: Autoria Própria</i> . . . . .	20
Figura 22 – Resultado comparativo da versão original e otimizada <i>Fonte: Autoria Própria</i> . . . . .	21
Figura 23 – Resultado comparativo da versão original e otimizada <i>Fonte: Autoria Própria</i> . . . . .	21
Figura 24 – Resultado comparativo da versão original e otimizada <i>Fonte: Autoria Própria</i> . . . . .	22
Figura 25 – Creality Ender 3 V1 <i>Fonte: Autoria Própria</i> . . . . .	22
Figura 26 – Etapa de moldagem <i>Fonte: Autoria Própria</i> . . . . .	23
Figura 27 – Sistema bruto da fusão e peça após extração do sistema <i>Fonte: Autoria Própria</i> . . . . .	23
Figura 28 – Regiões das quais foram realizadas as metalografias <i>Fonte: Autoria Própria</i> . . . . .	23
Figura 29 – Metalografia região inferior, sem ataque químico <i>Fonte: Autoria Própria</i> . . . . .	24
Figura 30 – Metalografia região inferior, sem ataque químico <i>Fonte: Autoria Própria</i> . . . . .	24
Figura 31 – Metalografia região superior, sem ataque químico <i>Fonte: Autoria Própria</i> . . . . .	24
Figura 32 – Metalografia região superior, sem ataque químico <i>Fonte: Autoria Própria</i> . . . . .	25
Figura 33 – Metalografia região superior, com ataque químico <i>Fonte: Autoria Própria</i> . . . . .	25
Figura 34 – Metalografia região superior, com ataque químico <i>Fonte: Autoria Própria</i> . . . . .	25
Figura 35 – Metalografia alumínio A 356 e sua microestrutura. (HOURIA, 2015) . . . . .	26
Figura 36 – Equipamento usado para realizar ensaio de dureza <i>Fonte: Autoria Própria</i> . . . . .	26
Figura 37 – Perfil de dureza região inferior <i>Fonte: Autoria Própria</i> . . . . .	27
Figura 38 – Perfil de dureza região superior <i>Fonte: Autoria Própria</i> . . . . .	27
Figura 39 – Peça final montada no conjunto do sistema de direção do veículo baja <i>Fonte: Autoria Própria</i> . . . . .	28

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
DEMa	Departamento de Engenharia de Materiais
DEMec	Departamento de Engenharia Mecânica
FSTime	Feeding Safe Time
HB	Hardness Brinell
PEPSET	Phenolic Ester Process Set
PLA	Poli (ácido láctico)
RATBSB	REGULAMENTO ADMINISTRATIVO E TÉCNICO BAJA SAE BRASIL
SAE	Society of Automotive Engineers
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	SISTEMA DE DIREÇÃO VEICULAR	1
1.2	PROJETO BAJA SAE	1
1.3	PROCESSO DE FUNDIÇÃO	2
1.4	MOTIVAÇÃO	3
1.5	OBJETIVOS	3
<b>1.5.1</b>	<b>Objetivo Geral</b>	<b>3</b>
<b>1.5.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>5</b>
2.1	ENCHIMENTO E SOLIDIFICAÇÃO	5
2.2	DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS DE PROCESSO	7
2.3	SIMULAÇÃO	8
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>10</b>
3.1	REQUISITOS TÉCNICOS	10
3.2	SELEÇÃO DE MATERIAL	10
3.3	DIMENSIONAMENTO SISTEMA DE FUNDIÇÃO	11
<b>3.3.1</b>	<b>Dimensionamento Massalotes</b>	<b>11</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Dimensionamento Sistema de Canais</b>	<b>13</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>16</b>
4.1	VALIDAÇÃO COM USO DE SIMULAÇÃO	16
<b>4.1.1</b>	<b>Enchimento e Solidificação</b>	<b>16</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Otimizações do Projeto</b>	<b>19</b>
4.2	OTIMIZAÇÃO SISTEMA FUNDIÇÃO	19
4.3	MOLDAGEM	19
4.4	VALIDAÇÃO DO PROJETO	20
<b>4.4.1</b>	<b>Metalografia</b>	<b>21</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Dureza Brinell</b>	<b>23</b>
<b>5</b>	<b>DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b>	<b>28</b>
5.1	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	28
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>29</b>

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 SISTEMA DE DIREÇÃO VEICULAR

O sistema de direção é responsável por permitir ao condutor controlar a trajetória do veículo de forma segura, precisa e confiável. Esse controle é exercido por meio do volante, que transmite o torque aplicado pelo motorista aos componentes responsáveis pelo movimento angular das rodas dianteiras, sendo essencial para a realização de curvas e manobras.

Embora existam diferentes variações desse sistema, como os tipos mecânico, hidráulico e elétrico, todos compartilham elementos fundamentais. O volante atua como o principal instrumento de controle do condutor. A coluna de direção transmite o torque do volante até a caixa de direção, que abriga os mecanismos responsáveis por converter o movimento rotacional em movimento linear, geralmente por meio de um conjunto de pinhão e cremalheira. A força gerada é então transmitida aos links de direção (ou barra de direção), que a aplicam ao conjunto das rodas, gerando o movimento angular necessário para direcionar o veículo conforme o comando do motorista, como mostra o esquema do sistema representado pela figura 1.

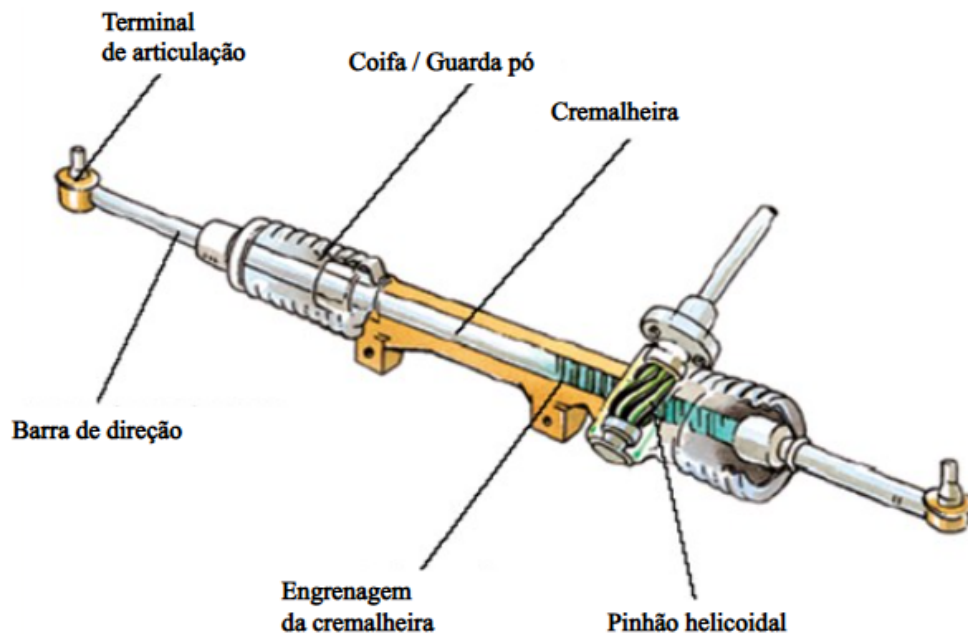


Figura 1 – Sistema de direção mecânica. Fonte: (MARIA, 2014).

### 1.2 PROJETO BAJA SAE

O BAJA SAE é uma competição estudantil organizada pela SAE (Society of Automotive Engineers), que desafia universitários de todo o mundo a projetar e construir um veículo off-road de quatro rodas, capaz de superar terrenos acidentados e condições adversas. No Brasil, o evento ocorre anualmente em duas edições: uma Regional e outra Nacional. As equipes com melhor desempenho na etapa nacional são convidadas a representar o país na competição mundial.

Para participar, os times devem seguir o regulamento RATBSB (REGULAMENTO ADMINISTRATIVO E TÉCNICO BAJA SAE BRASIL), atualizado anualmente, além de cumprir uma série de exigências técnicas e administrativas, como a elaboração de relatórios de projeto, apresentações para uma banca avaliadora, desenvolvimento de soluções para desafios técnicos e entrega de relatórios de custo. A

competição também inclui provas dinâmicas, como aceleração, tração, manobrabilidade e resistência, que testam o desempenho do veículo em condições reais.

O objetivo do projeto é simular o ambiente da indústria automotiva, proporcionando aos estudantes uma experiência prática completa, que envolve engenharia, gestão de equipe, planejamento financeiro e tomada de decisões.

Para se ter uma ideia da dimensão do evento, a 30ª edição da competição nacional, realizada em 2025, contou com a participação de 58 equipes de todo o Brasil. Já a etapa regional de 2024 reuniu 18 equipes.

A Equipe Baja UFSCar (Universidade Federal de São Carlos), vinculada ao DEMec (Departamento de Engenharia Mecânica) e reestruturada em 2009, participa ativamente da competição desde 2011. Em sua trajetória, a equipe tem evoluído constantemente, alcançando em 2025 o melhor resultado de sua história: o 14º lugar geral na etapa nacional, com o primeiro veículo 4x4 desenvolvido pela equipe, representado pela figura 2.



Figura 2 – Veículo Meraki na etapa nacional de 2025. Fonte: (BAJA..., 2025)

### 1.3 PROCESSO DE FUNDIÇÃO

A fundição de peças metálicas é um dos processos de fabricação mais antigos e amplamente utilizados no mundo. Esse método consiste em fundir uma matéria-prima metálica e despejar o metal líquido em um molde com o formato desejado, onde ele se solidifica. Após uma etapa de acabamento, obtém-se a peça final, como mostrado na figura 3. Embora possa parecer um processo rudimentar, a fundição exige um elevado nível de conhecimento técnico e o uso de tecnologias avançadas para garantir a qualidade do produto. Isso ocorre porque o processo, por sua própria natureza, tende a gerar imperfeições internas, como porosidades e rechupes, exigindo, por exemplo, o uso de softwares de simulação térmica e de fluxo, além de técnicas como a injeção em moldes sob alta pressão.

Entre os diversos processos de fabricação de peças metálicas, como extrusão, laminação e for-

jamento, a fundição se destaca não apenas por frequentemente anteceder essas etapas, mas também por apresentar vantagens específicas, como a capacidade de produzir peças com geometrias complexas e custo relativamente baixo, especialmente em grandes volumes de produção. No entanto, essa técnica também apresenta limitações, como a tendência à formação de defeitos internos durante o enchimento e a solidificação, o que pode comprometer as propriedades mecânicas das peças, tornando-as inferiores quando comparadas às obtidas por outros processos.

Diante dessas limitações, torna-se essencial o controle rigoroso das inúmeras variáveis envolvidas na fundição — incluindo o tratamento do metal líquido, a moldagem, o enchimento, a solidificação e o acabamento — a fim de garantir a qualidade final da peça. Como destaca (CAMPBELL, 2011), o domínio dessas etapas é fundamental para assegurar que o produto atenda aos requisitos do projeto e minimize a ocorrência de falhas de aplicação.



Figura 3 – Processo de fundição. (BRUCK, 2024)

## 1.4 MOTIVAÇÃO

A motivação para a realização deste trabalho é o aprofundamento do conhecimento da equipe Baja UFSCar no processo de fundição de materiais metálicos, uma área ainda pouco explorada ao longo de sua trajetória. Além disso, busca-se investigar e aplicar ferramentas de simulação, similares às utilizadas atualmente em fundições industriais, com o objetivo de compreender as vantagens práticas que essas tecnologias podem proporcionar ao processo produtivo, tais como a otimização do projeto, a redução de defeitos e o aumento da eficiência na fabricação de componentes.

## 1.5 OBJETIVOS

### 1.5.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é projetar e fabricar a carcaça do sistema de direção do veículo da equipe Baja UFSCar por meio do processo de fundição, utilizando softwares de simulação como ferramenta de apoio para garantir a qualidade final do produto e minimizar a ocorrência de defeitos internos.

Adicionalmente, este projeto visa estabelecer um *benchmark* para futuras iniciativas da equipe que envolvam a aplicação da fundição como processo de fabricação, servindo como base técnica e metodológica para o desenvolvimento de novos componentes fundidos com maior eficiência e confiabilidade.

### 1.5.2 Objetivos Específicos

- Compreender os principais processos de fabricação de materiais metálicos, com ênfase na fundição;
- Entender as etapas envolvidas no desenvolvimento de um projeto voltado para a fabricação de uma peça fundida;
- Analisar como o uso de ferramentas de simulação pode auxiliar na melhoria da qualidade e eficiência do processo de fundição;
- Avaliar a influência das variáveis de projeto e de processo nas características finais do produto fundido;
- Fabricar e fornecer a carcaça do sistema de direção para aplicação no veículo da equipe Baja UFSCar;
- Compreender os métodos de validação de projeto por meio de simulações e ensaios experimentais.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 ENCHIMENTO E SOLIDIFICAÇÃO

A etapa de enchimento no processo de fundição consiste no preenchimento do molde com metal líquido. Essa fase deve ser cuidadosamente controlada, pois influencia diretamente a integridade da peça final. O transporte do metal até a cavidade da peça é realizado por meio do sistema de canais, composto por três elementos principais: a bacia de vazamento, que recebe o metal fundido e facilita o escoamento sem derramamentos; o canal de descida e distribuição, responsável por conduzir o metal até os canais finais; e os canais de ataque, que levam o metal diretamente à cavidade do molde, como representa a figura 4.

Um aspecto crítico no projeto desse sistema é a velocidade do metal nos canais de ataque, que não deve ultrapassar 0,5 m/s, a fim de evitar o fluxo turbulento, conforme diz (CAMPBELL, 2004). A presença de turbulência pode incorporar gases ao metal, formar inclusões não metálicas e causar preenchimento irregular, comprometendo a qualidade da peça fundida.

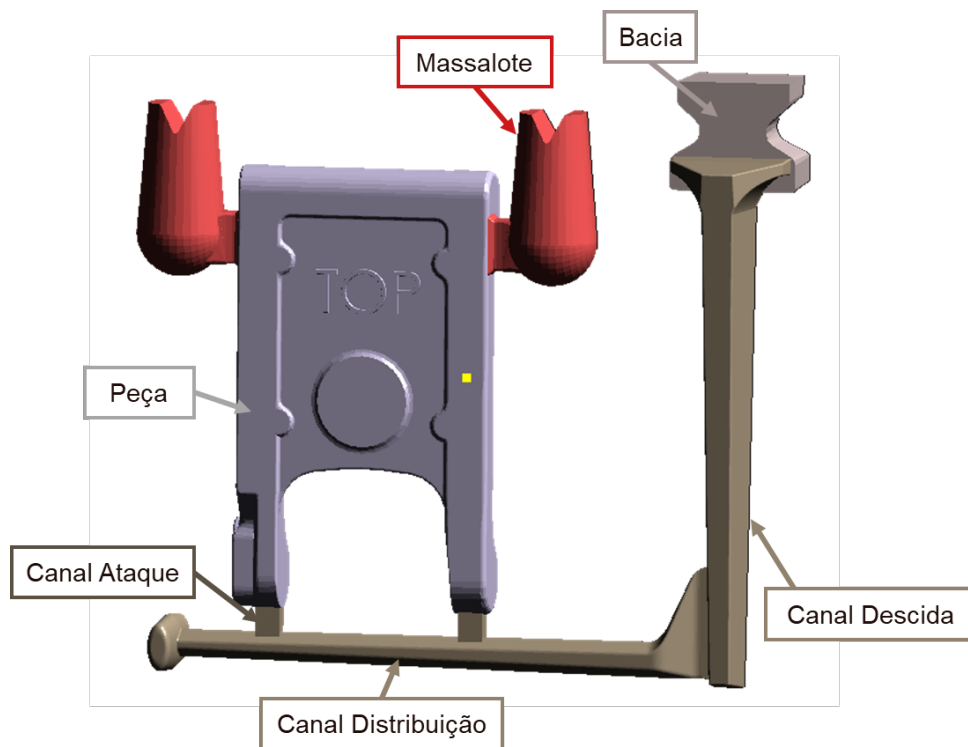


Figura 4 – Sistema de Fundição Convencional. (MAGMA, 2024)

A etapa de solidificação inicia-se no momento em que toda a cavidade está preenchida com metal líquido e finaliza com a peça totalmente solidificada. A principal preocupação nessa fase é a formação de rechupes, que são vazios localizados no interior ou na superfície do produto, resultantes da contração volumétrica ocorrida durante a transição do estado líquido para o sólido.

Para mitigar esse tipo de defeito, é fundamental o uso de reservatórios de metal líquido, denominados massalotes, cuja função é alimentar as regiões críticas da peça durante a solidificação, conforme citado por (CAMPBELL, 2004). O dimensionamento adequado dos massalotes é essencial para garantir sua eficácia na prevenção de rechupes. Esse dimensionamento é realizado de forma a direcionar o caminho de solidificação, como ilustrado na figura 5, em que se observa que a última região a solidificar deve ser justamente o massalote. Todo esse processo deve ser conduzido com o objetivo de utilizar o menor número possível de massalotes, a fim de evitar o aumento dos custos de produção, uma vez que essas estruturas

são removidas na etapa de acabamento.

Além disso, uma estratégia complementar eficaz é a utilização de resfriadores, dispositivos posicionados estrategicamente no molde para impor um gradiente térmico controlado, auxiliando no direcionamento do caminho de solidificação do sistema. Essa técnica direciona o ponto quente para o interior dos massalotes, garantindo que os vazios se formem em regiões posteriormente removidas, preservando a integridade estrutural da peça final.

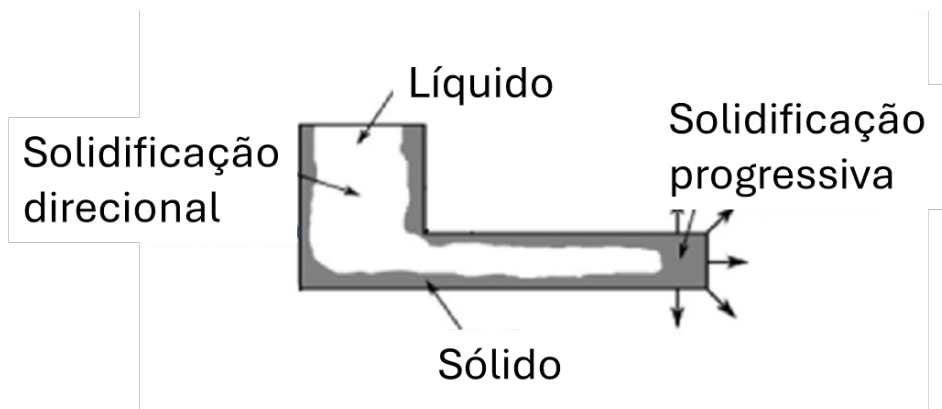


Figura 5 – Alimentação direcionada. (NAZIRUDEEN, 2015)

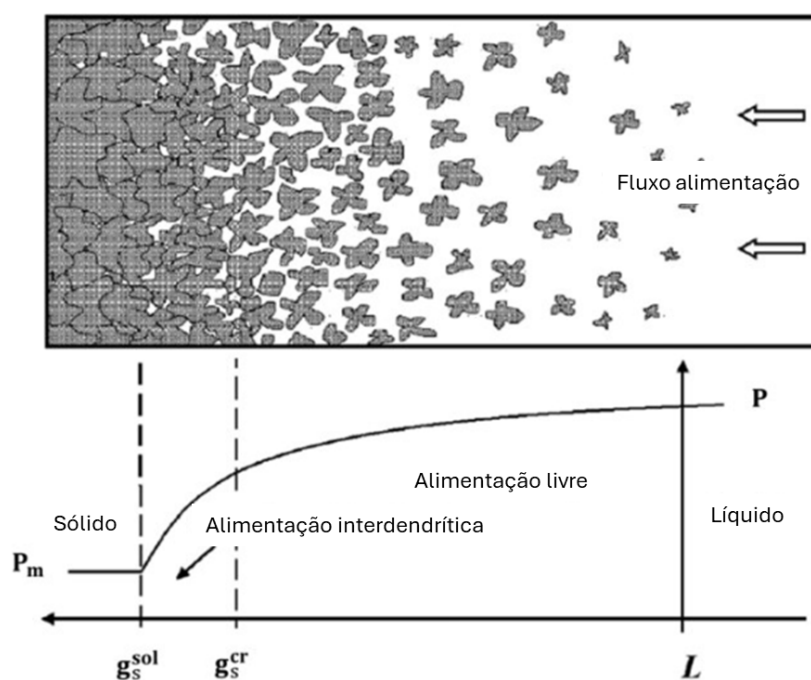


Figura 6 – Alimentação através de canais interdendríticos. (CASTRO, 2020)

Os principais defeitos relacionados ao enchimento do produto são: as bolhas de ar, que se originam a partir do fluxo turbulento, o qual incorpora ar à liga metálica, resultando em perfis bem arredondados; a junta fria, que ocorre no encontro de duas frentes de metal líquido em baixas temperaturas, dificultando a coalescência entre elas e apresentando aparência semelhante à de uma solda fria; e a inclusão de óxidos, resultante da reação do metal líquido com o ar, formando compostos intermetálicos que fragilizam a região afetada da peça.

Durante a solidificação, o principal defeito observado é a formação de rechupes, decorrente da contração volumétrica do metal líquido ao mudar de estado físico, associada à ausência de realimentação.

Esses rechupes podem ser classificados como primários ou secundários, de acordo com a concentração de vazios no interior da peça. O rechupe primário é mais intenso e localizado, resultante da contração durante a transição de fase. Já o rechupe secundário ocorre devido à interrupção da alimentação causada pelo fechamento dos braços interdendríticos à medida que a solidificação avança. Esse tipo é menos intenso, porém mais distribuído ao longo do volume da peça. Conforme ilustrado na figura 6, a pressão do metal líquido para alimentar as regiões ainda não solidificadas é máxima enquanto o material está completamente líquido (P), e à medida que se formam os braços dendríticos secundários, o líquido obtém uma característica mais viscosa ( $G_{cr}$ ), essa pressão diminui gradualmente até uma pressão constante ( $P_m$ ), indicando a interrupção do fluxo de metal na região ( $G_{sol}$ ).

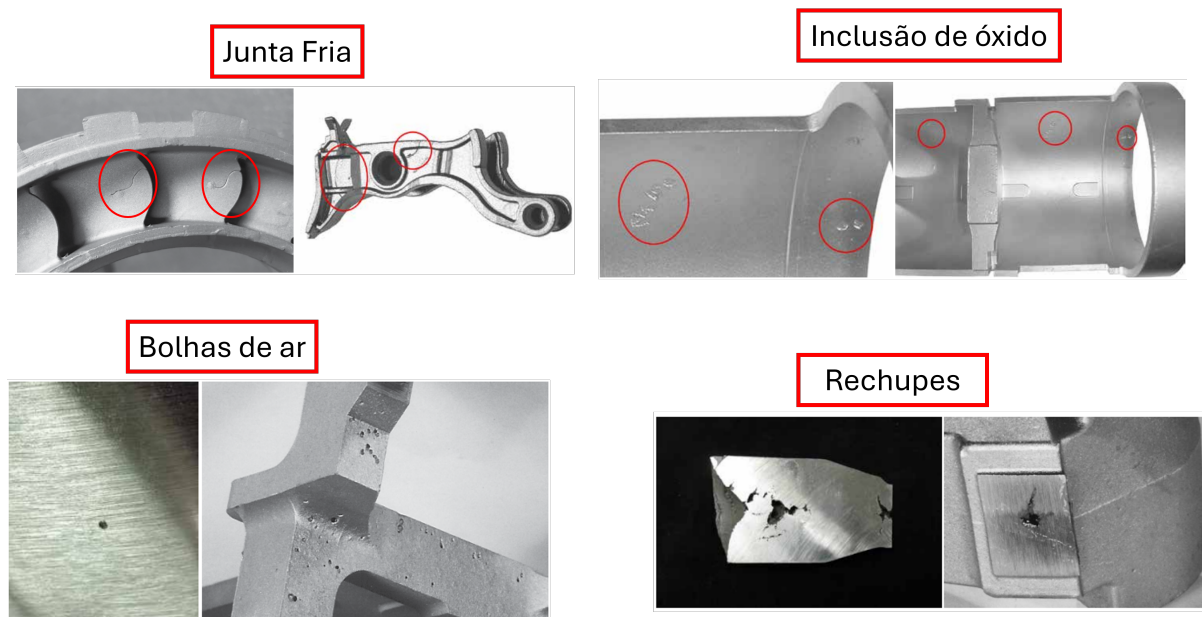


Figura 7 – Defeitos convencionais em peças fundidas de alumínio. (MARKEE, 2017)

Outros defeitos típicos em peças fundidas de alumínio estão representados na Figura 7. A junta fria é caracterizada por uma má fusão entre duas frentes de metal líquido durante o enchimento, geralmente causada pela baixa temperatura dessas frentes. Já as inclusões de óxidos e as bolhas de ar são geradas pelas turbulências do metal líquido no processo de vazamento, que promovem a incorporação de gases no material. Esses gases podem reagir com o metal, formando óxidos indesejáveis, ou se precipitar na forma de bolhas durante a solidificação, comprometendo as propriedades finais da peça.

Uma forma de mitigar esses defeitos é por meio do ajuste das variáveis de processo, como a modificação da temperatura inicial do metal líquido e da velocidade de vazamento. Além disso, é possível realizar tratamentos no metal líquido imediatamente antes do vazamento, como a inoculação, que contribui para a melhoria da qualidade da fundição.

## 2.2 DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS DE PROCESSO

Além da elaboração do projeto do sistema de fundição, é necessário realizar um planejamento do processo, que envolve a definição da temperatura inicial do metal líquido, tradicionalmente determinada pela experiência do projetista em projetos anteriores, e a velocidade de vazamento, que na maioria das vezes depende da capacidade do operador em controlar o fluxo do metal dentro do molde.

Ademais, outro fator fundamental para o sucesso do processo de fundição é o adequado tratamento do metal líquido, especialmente no caso de ligas de alumínio, conforme afirma (CAMPBELL, 2004). Um dos procedimentos mais utilizados é a desgaseificação, que consiste na injeção de um gás inerte — geralmente

argônio ou nitrogênio — no banho metálico, por meio de uma lança confeccionada em aço ou grafite.

Esse gás inerte, ao ser introduzido no metal líquido, cria um ambiente com pressão parcial de hidrogênio praticamente nula, promovendo a difusão do hidrogênio dissolvido no alumínio para o interior das bolhas gasosas. Como ilustrado na Figura 8, o processo gera bolhas que sobem à superfície, arrastando impurezas e gases dissolvidos, como o próprio hidrogênio, que é um dos principais responsáveis por defeitos de porosidade em peças fundidas de alumínio.

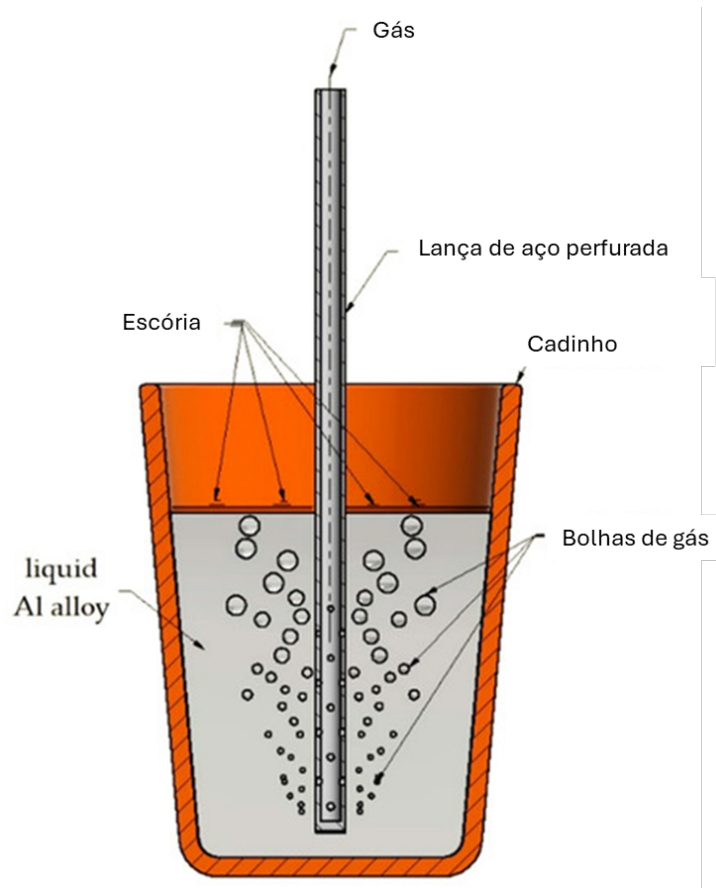


Figura 8 – Método de degaseificação do líquido(GUMIENNY, 2022))

### 2.3 SIMULAÇÃO

Com o uso de ferramentas de simulação aplicada para o processo de fundição, é possível validar o projeto de maneira virtual, evitando a necessidade de múltiplas iterações práticas no processo de fundição do sistema. Isso torna o desenvolvimento mais rápido e econômico, além de proporcionar um embasamento mais sólido para as tomadas de decisão dentro da empresa, conforme mostra a figura 9.

Um software já bem consolidado no mercado, utilizado no desenvolvimento deste trabalho, é o MAGMASOFT® 6.1, de origem alemã. Ele é capaz de simular diversos processos de fundição, como fundição por gravidade em areia, injeção de alta pressão (HPDC), injeção de baixa pressão (LPDC), fundição de precisão, entre outros. Além disso, o software permite a utilização de várias ligas metálicas, incluindo aços, ferros fundidos, ligas à base de cobre, ligas de alumínio, entre outras.

A base dos cálculos de fluxo e troca de calor do software está na definição de volumes finitos, na qual a geometria é discretizada em pequenos volumes com dimensões específicas. Por meio de modelos termodinâmicos e fenômenos de transporte, é possível realizar cálculos numéricos para simular tanto o enchimento quanto a solidificação do produto.

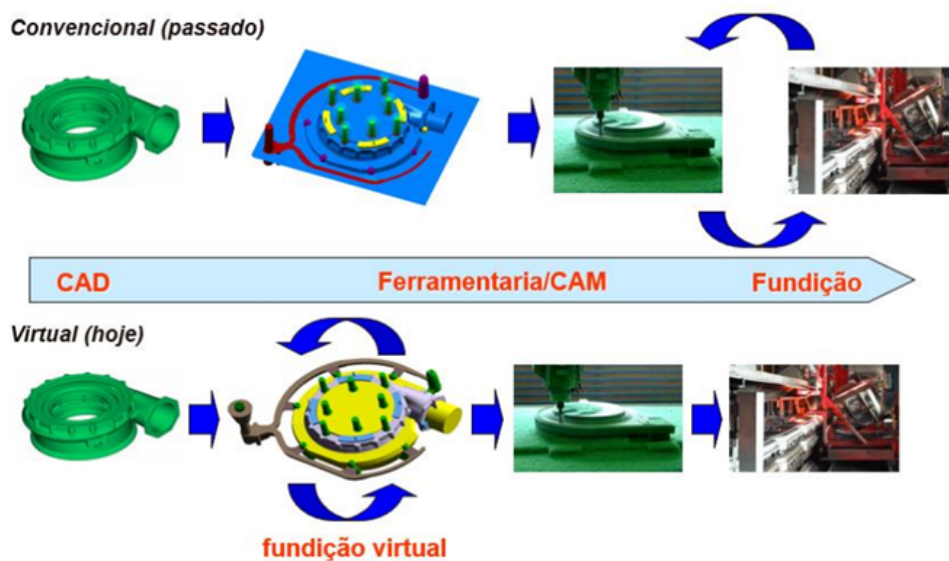


Figura 9 – Fluxograma comparativo gestão de projetos(MAGMA, 2024)

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 REQUISITOS TÉCNICOS

Para a realização deste projeto da carcaça do sistema de direção, foram seguidos alguns requisitos técnicos, dentre eles:

- Proteção dos componentes internos contra possíveis impactos;
- Vedação eficaz para manter a lubrificação adequada;
- Garantia da precisão dimensional do produto final.

Para atender aos requisitos do projeto, o produto final deve apresentar boas propriedades mecânicas aliadas ao baixo peso, contribuindo para a dinâmica veicular do carro. Para alcançar esses objetivos, é fundamental dispor de um projeto eficiente do sistema de fundição, aliado a um planejamento adequado do processo, com o intuito de minimizar a ocorrência de defeitos na peça fundida. A Figura 10 ilustra o produto final, desenvolvido pela equipe do Baja da UFSCar por meio da adaptação de uma peça de um projeto anterior, também elaborada pela equipe, ao novo veículo. A peça possui massa aproximada de 400 g e dimensões em torno de  $75 \times 80 \times 40$  mm.

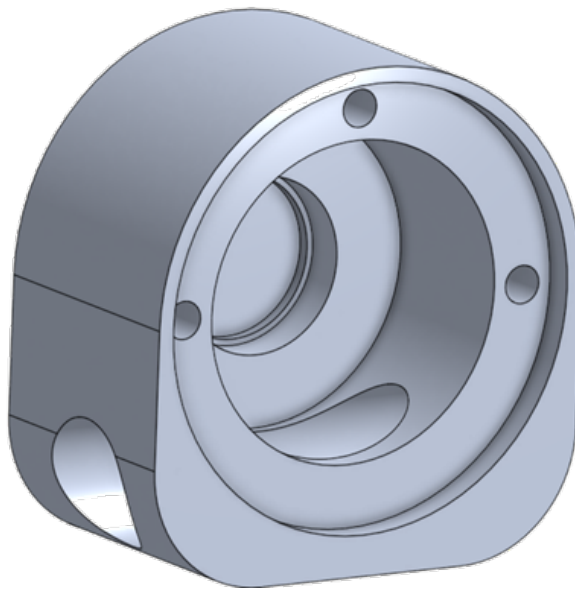


Figura 10 – Desenho 3D carcaça sistema de direção. *Fonte: Autoria Própria*

#### 3.2 SELEÇÃO DE MATERIAL

Para a escolha da liga mais adequada aos objetivos estabelecidos e com base na experiência prévia da equipe, definiu-se a utilização da liga de alumínio-silício hipoeutética A356. Essa liga atende aos requisitos mecânicos do projeto, apresenta boa fundibilidade e usinabilidade, além de possuir baixa densidade, o que contribui diretamente para o atendimento das metas estabelecidas.

A composição química da liga deve estar em conformidade com a norma ASTM, conforme apresentado na Tabela 1, sendo seu respectivo diagrama de fases ilustrado na Figura 11, a fim de garantir a confiabilidade do processo.

Com base na análise do diagrama de fases, espera-se que a microestrutura resultante seja composta por uma matriz de alumínio alfa, com a presença de silício eutético. Essa microestrutura deverá apresentar diferentes graus de refinamento, devido às variações nas taxas de resfriamento ao longo da peça durante o processo, além da possível ocorrência de porosidades dispersas na matriz.

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Outro
A356	6,5	0,2	0,2	0,1	0,25 - 0,45	0,1	0,2	0,15

Tabela 1 – Composição química da liga A356. (ASTM, 2018)

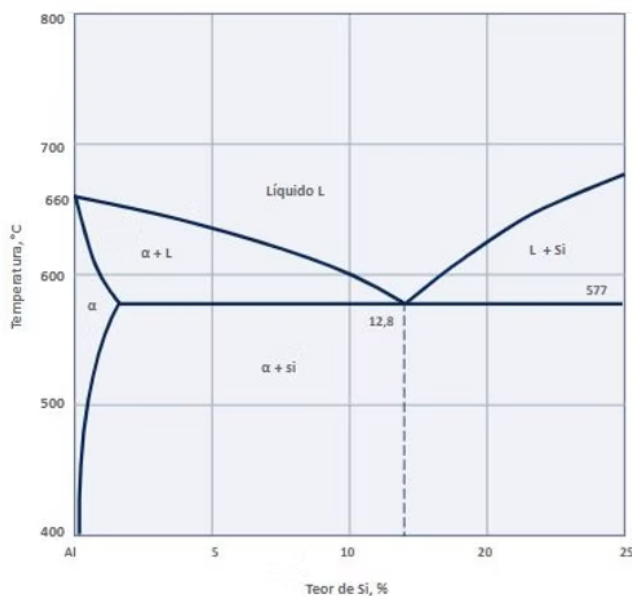


Figura 11 – Modo de alimentação. (MATERIAISECORROSAO, 2025)

### 3.3 DIMENSIONAMENTO SISTEMA DE FUNDIÇÃO

Para dimensionar a primeira versão do projeto, foram considerados aspectos como a facilidade de moldagem e a simplicidade na fabricação do modelo do sistema, conforme as recomendações de (WLODAWER, 1966), além da necessidade de fundir um corpo de prova na mesma corrida para permitir análises futuras. Dessa forma, a concepção inicial do projeto previu a produção de dois componentes em uma única corrida, em molde de areia com resina, eliminando algumas furações que dificultariam a moldagem, conforme ilustrado na figura 12. Um dos produtos ficaria com a equipe Baja UFSCar para uso nas competições, enquanto o outro seria destinado a análises metalográficas e medições de dureza.

#### 3.3.1 Dimensionamento Massalotes

Para o dimensionamento analítico de todo o projeto inicial, foram seguidas as recomendações de (CAMPBELL, 2004). Para dimensionar os massalotes do sistema, é necessário atender a dois requisitos: o térmico e o volumétrico. O requisito térmico consiste em garantir que a última região a solidificar seja o interior do massalote, evitando a formação de rechupes no produto. Já o critério volumétrico visa assegurar que o volume de metal presente no massalote seja suficiente para alimentar o volume que sofrerá contração durante a solidificação do produto.

De acordo com o projeto proposto, a melhor região para posicionar os massalotes é o topo do produto, pois essa é a área com maior concentração de massa e onde se espera que ocorra a última solidificação da peça.

Para atender ao critério térmico, é preciso calcular o módulo da região a ser alimentada pelos massalotes, considerando dois fatores: o volume da cavidade, que contribui para a manutenção da temperatura elevada, e a área superficial, responsável pela dissipação do calor. Quanto maior a área superficial,

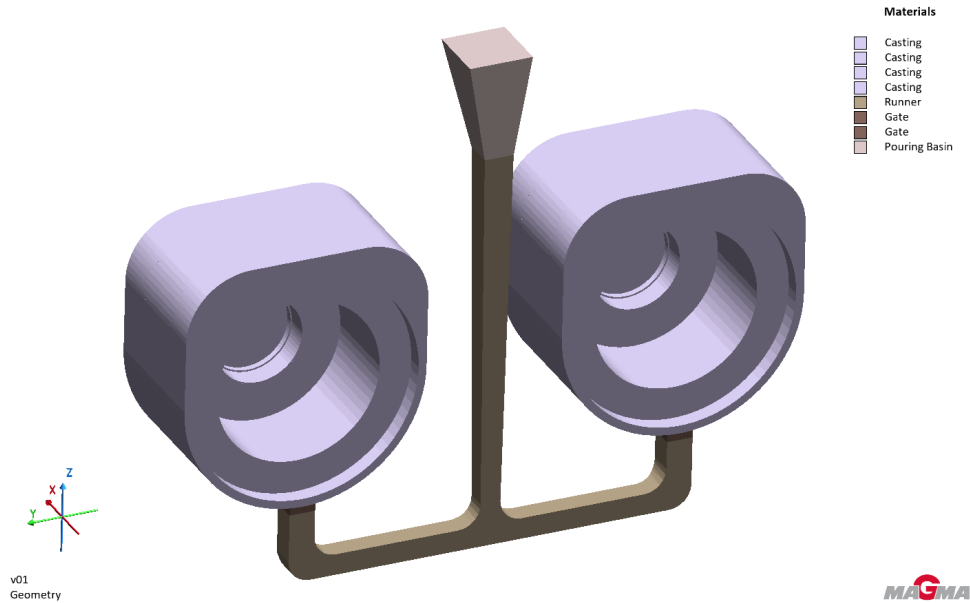


Figura 12 – Concepção inicial do projeto. *Fonte: Autoria Própria*

maior será a taxa de transferência térmica. Assim, o módulo pode ser determinado pela seguinte fórmula:

$$\text{MóduloProduto} = \frac{\text{Volume região [mm}^3\text{]}}{\text{Área superficial [mm}^2\text{]}} = \frac{141.8}{27.8} = 5.1 \text{ mm} \quad (1)$$

Com o valor do módulo necessário para alimentar adequadamente a região do produto e considerando a utilização de um massalote cilíndrico com pescoço também cilíndrico, adotam-se os seguintes critérios dimensionais:

- O módulo do massalote deve ser 1,2 vezes o módulo da peça.
- O módulo do pescoço deve ser 1,1 vezes o módulo da peça.

Por fim, adotou-se a razão entre altura e diâmetro igual a 1,5, conforme recomendação da literatura técnica. Dessa forma, é possível determinar as dimensões de altura e diâmetro desejadas da seguinte maneira:

$$M_{\text{massalote}} = \frac{3}{8} \times R_{\text{massalote}} \Rightarrow R_{\text{massalote}} = \frac{8}{3} \times 5,1 \times 1,2 = 16,3 \text{ mm} \quad (2)$$

$$H_{\text{massalote}} = 1,5 \times 2 \times R_{\text{massalote}} = 1,5 \times 2 \times 16,3 = 48,9 \text{ mm} \quad (3)$$

$$V_{\text{massalote}} = \pi \times (16,3)^2 \times 48,9 = 40.940 \text{ mm}^3 \quad (4)$$

$$M_{\text{pescoço}} = R_{\text{pescoço}} \Rightarrow R_{\text{pescoço}} = 5,1 \times 1,1 = 11,2 \text{ mm} \quad (5)$$

$$H_{\text{pescoço}} = 0,1 \times 2 \times R_{\text{massalote}} = 0,1 \times 2 \times 16,3 = 3,3 \text{ mm} \quad (6)$$

$$V_{\text{pescoço}} = \pi \times (11,2)^2 \times 3,3 = 1.300 \text{ mm}^3 \quad (7)$$

Quanto ao requisito volumétrico, é necessário garantir que o volume perdido devido à contração do metal durante a mudança de fase seja adequadamente compensado pelo massalote. Para isso, considera-se

tanto o rendimento do massalote quanto o índice de contração da liga metálica durante a solidificação. Esses valores podem ser determinados por meio das seguintes equações:

$$V_{\text{rechupe}} = V_{\text{produto}} \times b \quad (8)$$

$$V_{\text{rechupe}} = V_{\text{massalote}} \times (\eta - b) \quad (9)$$

$$V_{\text{massalote}} = \frac{V_{\text{produto}} \times b}{\eta - b} \quad (10)$$

Sendo  $b$  = Coeficiente de contração do metal durante a solidificação (1,3% para a liga escolhida); e  $\eta$  = Rendimento do massalote (figura 13)

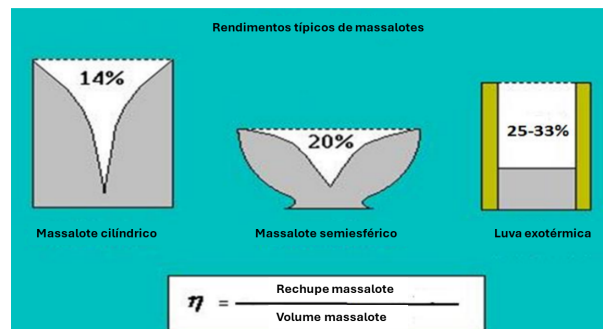


Figura 13 – Valores típicos de rendimentos de massalotes (CAMPBELL, 2004)

$$V_{\text{rechupe}} = 141.800 \times 0,013 = 1.843 \text{ mm}^3 \quad (11)$$

$$V_{\text{massalote}} = \frac{1.843}{0,14 - 0,013} = 14.511 \text{ mm}^3 \quad (12)$$

É importante observar que, ao aplicar os critérios térmico e volumétrico separadamente, os valores obtidos para as dimensões do massalote podem diferir. Nessa situação, deve-se adotar o maior volume entre os dois, ou seja, aquele que satisfaça simultaneamente ambos os requisitos e assegure a eficiência do sistema de alimentação. Neste caso, segue-se o valor calculado pelo critério térmico, que é 40.940 mm<sup>3</sup>.

### 3.3.2 Dimensionamento Sistema de Canais

O objetivo ao dimensionar um sistema de canais eficiente é evitar turbulências durante o enchimento da cavidade, buscando que o processo seja o mais rápido possível (aumentando a produção) e que tenha o maior rendimento metálico viável. Para atingir esse objetivo, e com base em recomendações da literatura, foi definida uma velocidade crítica do metal nos canais de ataque de 0,5 m/s, garantindo um fluxo laminar.

Com o layout do sistema de canais definido e o peso estimado do sistema, o próximo passo é estabelecer o tempo de vazamento. Esse valor depende também de variáveis de processo, como a experiência do operador e o tipo de panela vazadora utilizada. Para este projeto, estimou-se um tempo de vazamento de 8 segundos, com um peso do sistema de 1,2 kg, vazado a 730 °C, valor de temperatura típico de ligas de alumínio em moldes de areia.

Para determinar a vazão média ( $Q_m$ ), não basta dividir o volume do produto pelo tempo de vazamento, pois ocorrem perdas de carga durante o enchimento devido ao atrito. Dessa forma, recomenda-se multiplicar o resultado por um fator de 1,5, a fim de compensar essas perdas;

$$QM = 1.5 \times \text{VolumeTotalTempoVazamento} = 1.5 \times 437.8558 = 82.100 \text{ mm}^3/\text{s} \quad (13)$$

Com o valor da vazão média definido, inicia-se o dimensionamento pelo canal de descida, determinando as áreas transversais superior e inferior, conforme ilustrado na figura 14. A definição das alturas depende do tamanho do produto e da capacidade de moldagem; para este projeto, considerou-se uma altura de 38 mm para a bacia de vazamento e 120 mm para o canal de descida.

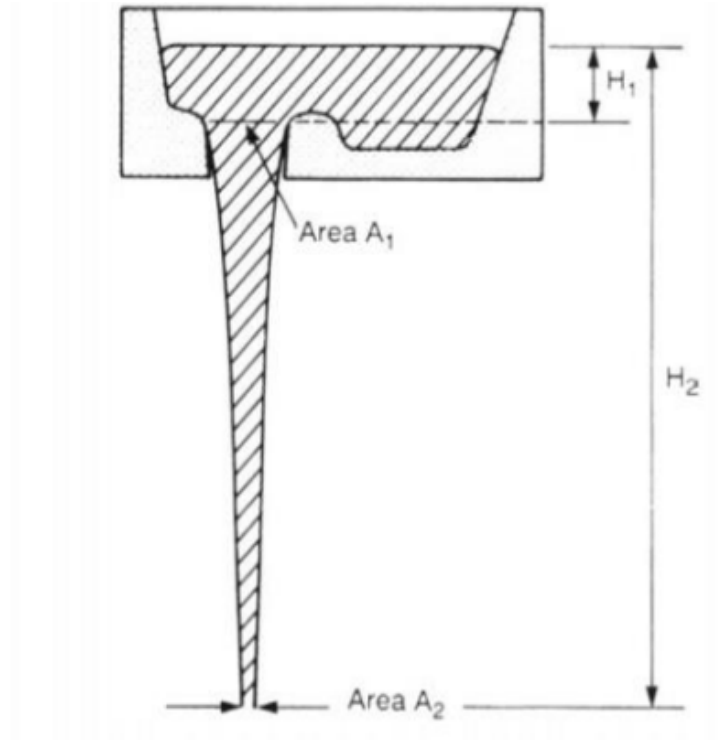


Figura 14 – Esquema para dimensionamento dos canais.(CAMPBELL, 2004)

Para definir as áreas transversais do canal de descida, considerou-se que ao longo de todo o seu comprimento deve ocorrer a mesma vazão de metal, obedecendo à lei da continuidade. Utilizando a equação de Bernoulli para o cálculo da velocidade de um líquido em queda livre, desconsiderando atritos;

$$Q_M = Q_{\text{superior}} = Q_{\text{inferior}} = A_{\text{superior}} \times v_{\text{superior}} = A_{\text{inferior}} \times v_{\text{inferior}} \quad (14)$$

$$v = \sqrt{2gh} \quad (15)$$

Sendo  $g$  = aceleração da gravidade; e  $h$  = altura da bacia mais canal descida

$$Q_M = 82.100 = A_{\text{superior}} \times \sqrt{2gh} = A_{\text{superior}} \times \sqrt{2 \times 9.800 \times 38} \quad (16)$$

$$A_{\text{superior}} = \frac{82.100}{863} = 95 \text{ mm}^2 \quad (17)$$

$$Q_M = 82.100 = A_{\text{inferior}} \times \sqrt{2gh} = A_{\text{inferior}} \times \sqrt{2 \times 9.800 \times 158} \quad (18)$$

$$A_{\text{inferior}} = \frac{82.100}{1.759} = 46,6 \text{ mm}^2 \quad (19)$$

Com as dimensões do canal de descida definidas, deve-se calcular a área transversal do canal de ataque, considerando que o fluxo será dividido ao final do canal de descida para alimentar duas peças

simultaneamente. Assim, conhecendo a vazão de metal que chega aos canais de ataque e adotando a velocidade máxima permitida de 500 mm/s, é possível determinar a área da seção transversal do canal de ataque de maneira semelhante:

$$\frac{Q_M}{2} = A_{\text{ataque}} \times 500 \quad (20)$$

$$A_{\text{ataque}} = \frac{82.100}{2 \times 500} = 82,1 \text{ mm}^2 \quad (21)$$

Finalizadas essas etapas, é possível obter uma primeira versão do sistema de fundição com um sólido embasamento teórico, como mostra a figura 15. No entanto, ainda é necessário encontrar uma forma de validar esse projeto, uma vez que diversas suposições e aproximações foram adotadas ao longo do processo, como por exemplo o tempo e temperatura de vazamento, as quais foram definidas apenas por experiências anteriores.

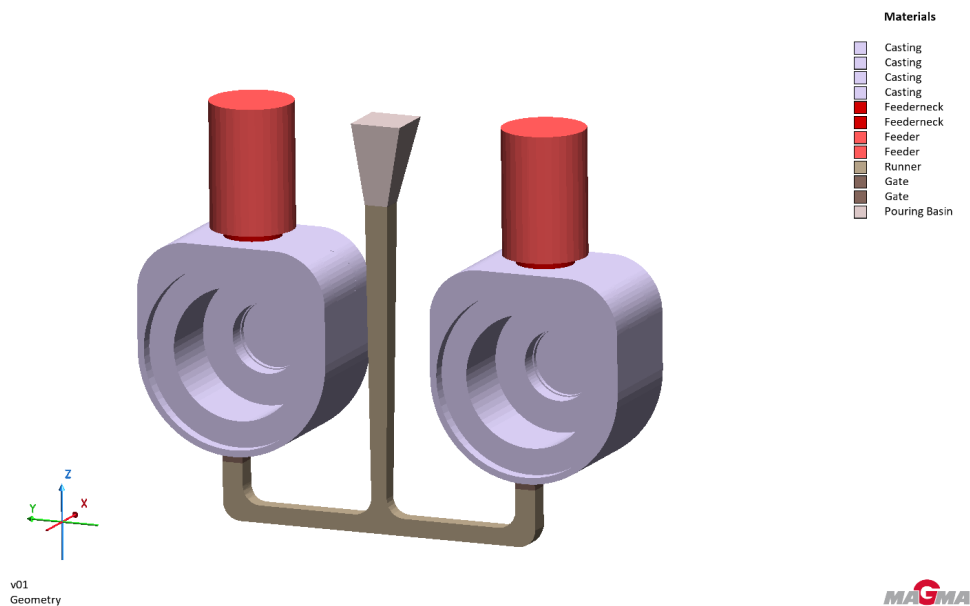


Figura 15 – Primeira versão do projeto. *Fonte: Autoria Própria*

Após o dimensionamento do sistema, avaliou-se a viabilidade de aplicar pó exotérmico no topo dos massalotes, com o objetivo de aumentar a retenção de calor nessa região e, assim, melhorar a eficiência de alimentação. Entretanto, devido a limitações estruturais e de recursos do laboratório, optou-se pela utilização de uma manta térmica isolante de fibra de vidro, com a mesma finalidade: concentrar o calor e garantir que o massalote seja a última região a solidificar.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 VALIDAÇÃO COM USO DE SIMULAÇÃO

Com o objetivo de validar o dimensionamento do projeto e garantir maior confiabilidade quanto à integridade do produto fundido, utilizou-se o software MAGMASOFT® 6.1, uma ferramenta avançada de simulação do processo de fundição. Essa tecnologia possibilita prever a formação de defeitos que possam comprometer a qualidade final da peça, por meio da análise dos resultados de enchimento e solidificação, permitindo, assim, a proposição de melhorias no projeto.

#### 4.1.1 Enchimento e Solidificação

Os resultados da simulação relevantes para este projeto, na etapa de enchimento, incluem temperatura de enchimento, velocidade de enchimento e aprisionamento de ar. Já na etapa de solidificação, destacam-se os resultados referentes ao ponto quente (FSTime (Feeding Safe Time)) e à porosidade.

- Temperatura de enchimento.

O resultado da temperatura de enchimento (figura 16) indica a temperatura instantânea do primeiro metal que chegou na região. A análise da temperatura durante o preenchimento permite avaliar, por exemplo, a perda que o metal sofre durante o enchimento, sendo possível identificar regiões com tendências de formação de juntas frias.

Para esse projeto, observa-se uma tendência de formação de junta fria na região mais fina do produto, de 1 mm de espessura, visto que o metal perde temperatura rapidamente nessa região, como mostra a imagem do resultado, com destaque para a temperatura atingida menor que a temperatura *liquidus* do metal, iniciando a solidificação antes mesmo da cavidade estar 100% preenchida.

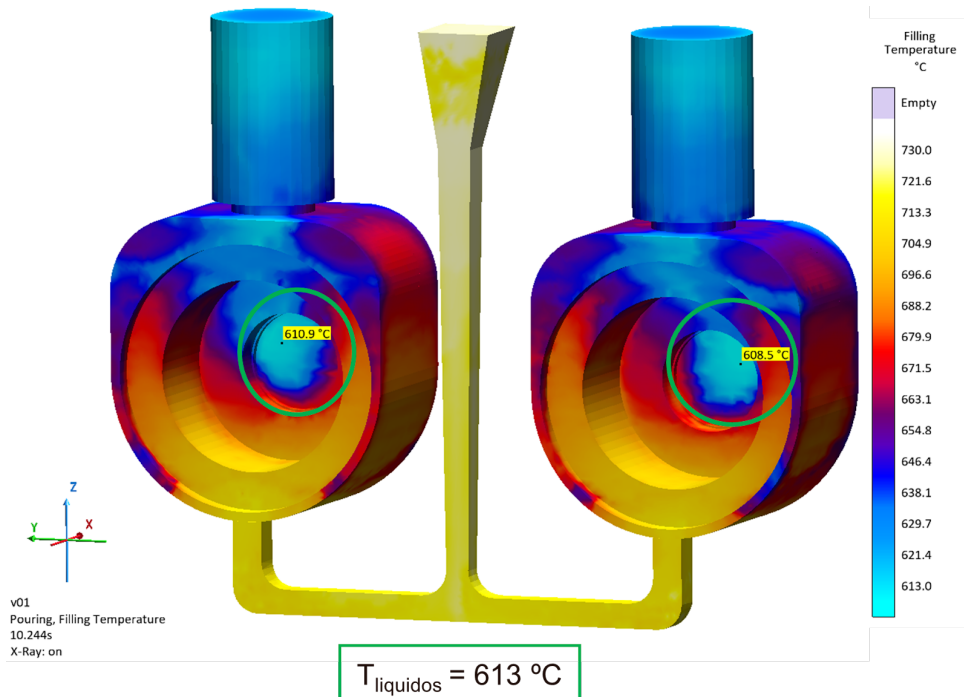


Figura 16 – Temperatura de Enchimento da primeira versão *Fonte: Autoria Própria*

- Velocidade de enchimento.

O resultado da velocidade de enchimento (figura 17) avalia a velocidade instantânea do primeiro metal que chegou na região. A análise da velocidade nos canais e na entrada do produto permite avaliar se o

enchimento é realizado com altas velocidades, o que aumenta a turbulência do metal e eleva as tendências de aprisionamento de ar.

O resultado da simulação mostrou que os canais estão atuando conforme o esperado, de forma a manter a velocidade no ataque igual ou inferior a 0,5 m/s, evitando um enchimento turbulento e mitigando a incorporação de gases no metal nesta etapa.

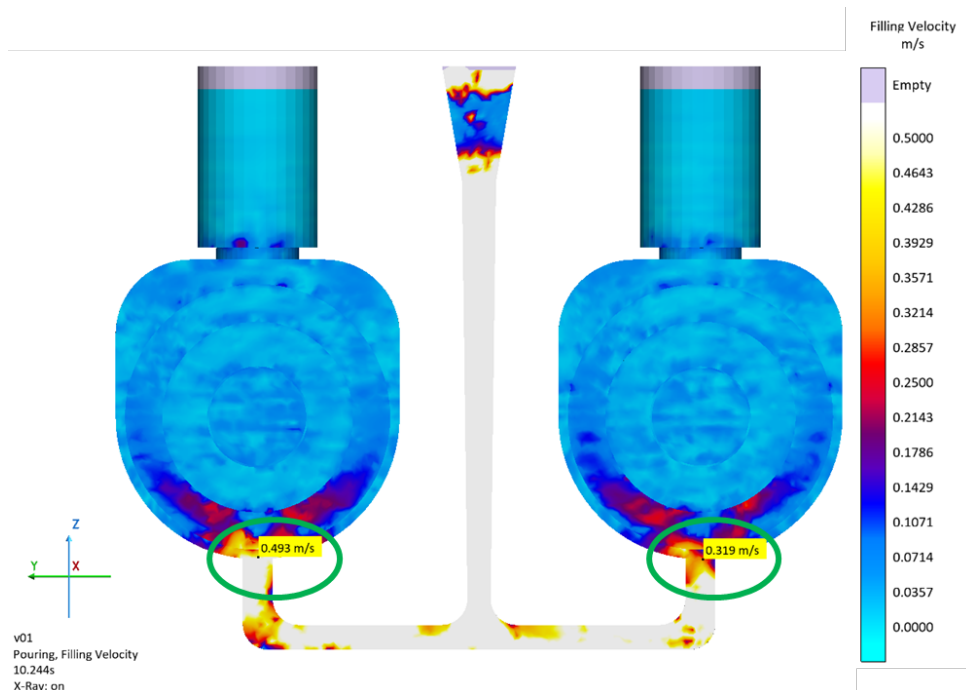


Figura 17 – Velocidade de Enchimento da primeira versão *Fonte: Autoria Própria*

- Aprisionamento de ar.

O resultado do aprisionamento de ar (figura 18) indica as regiões do produto com maior tendência à formação de defeitos por bolhas de ar. Esse resultado é expresso como uma porcentagem de gás dissolvido no metal, sendo que, para essa liga de alumínio, um valor de 6% de aprisionamento de ar é considerado consideravelmente elevado. O metal com aprisionamento de ar pode ser transportado para outras regiões do produto. No final do enchimento, as regiões com grande concentração de ar podem apresentar bolhas.

Neste resultado, conforme o esperado pela análise da velocidade, não há um aprisionamento de ar considerável no interior do produto durante o processo.

- Ponto Quente FSTime;

O resultado de pontos quentes FSTime (Feeding Safe Time) (figura 19) indica regiões da peça onde o metal líquido está cercado por metal mais frio durante a solidificação, considerando a solidificação pastosa da liga. Esse resultado é mais criterioso que o dos pontos quentes convencionais para a avaliação de regiões suscetíveis à formação de rechupes.

Observa-se a presença de duas grandes regiões dentro do produto com esses pontos quentes, que são altamente suscetíveis à formação de rechupes devido à ausência de alimentação adequada nessas áreas.

- Porosidade;

O resultado de porosidade (figura 20) indica as áreas da peça que são propensas à formação de rechupe. A avaliação desse resultado deve considerar duas variáveis: volume e intensidade. O volume da rejeição indica a porção da peça fundida suscetível à rejeição e pode ser avaliado visualmente. A intensidade da contração é representada na escala do resultado e expressa a porcentagem de regiões vazias em relação às regiões preenchidas. Assim, uma intensidade de 100% no agrupamento indica um vazio completo.

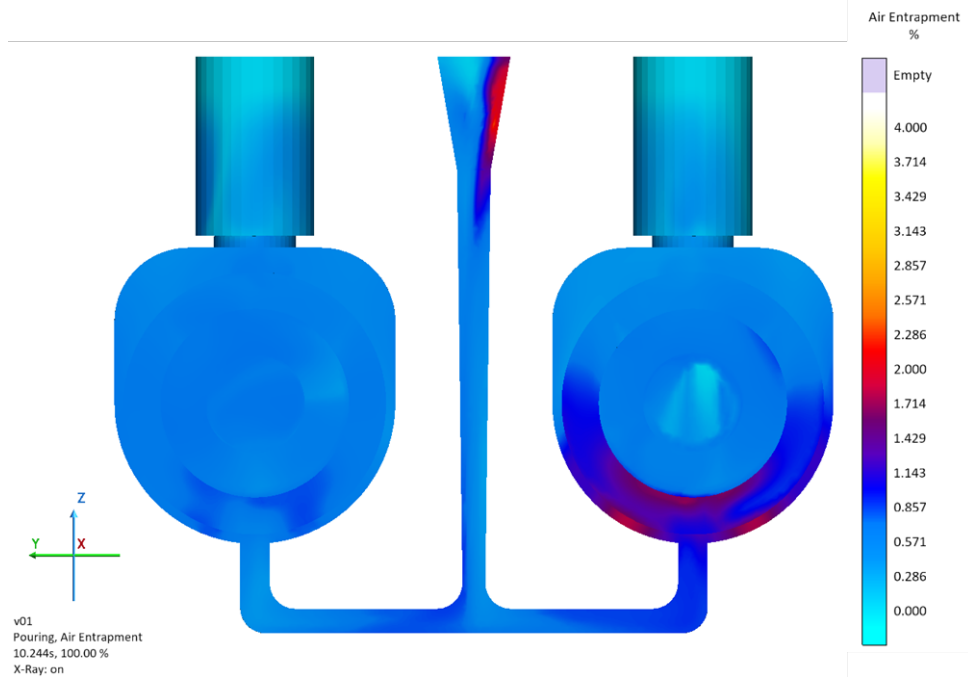


Figura 18 – Resultado de Aprisionamento de ar da primeira versão *Fonte: Autoria Própria*

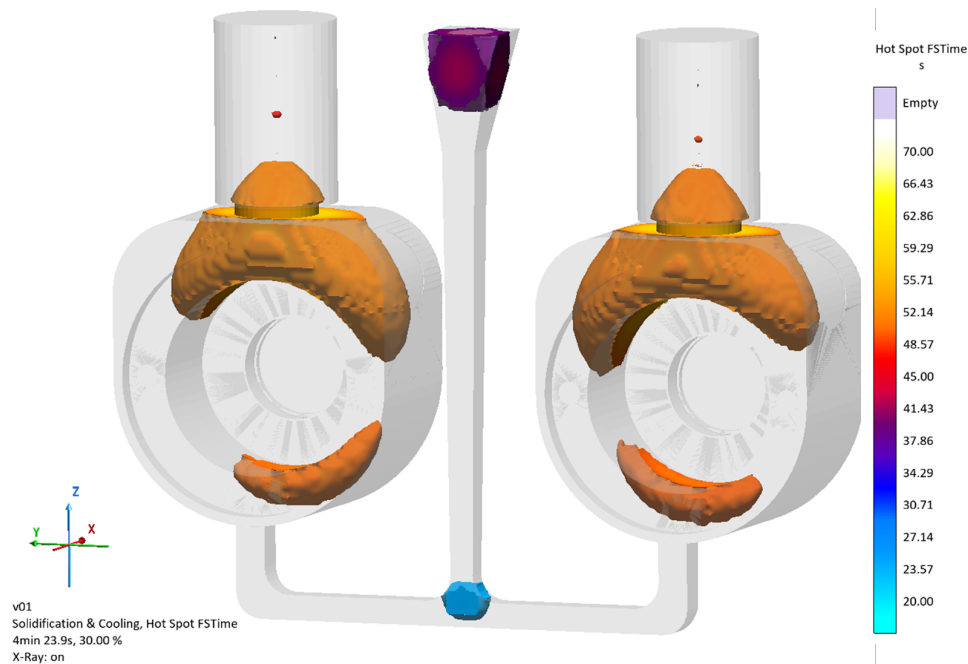


Figura 19 – Resultado de Ponto quente FSTime *Fonte: Autoria Própria*

Observa-se que, no MAGMASOFT, a intensidade das saliências aumenta progressivamente em direção ao seu centro.

Conforme a análise do ponto quente FSTime, esse resultado confirma a formação de rechupe tanto na região superior quanto na região inferior do produto, o que pode comprometer a sanidade da peça, tornando-a incapaz de cumprir sua função.

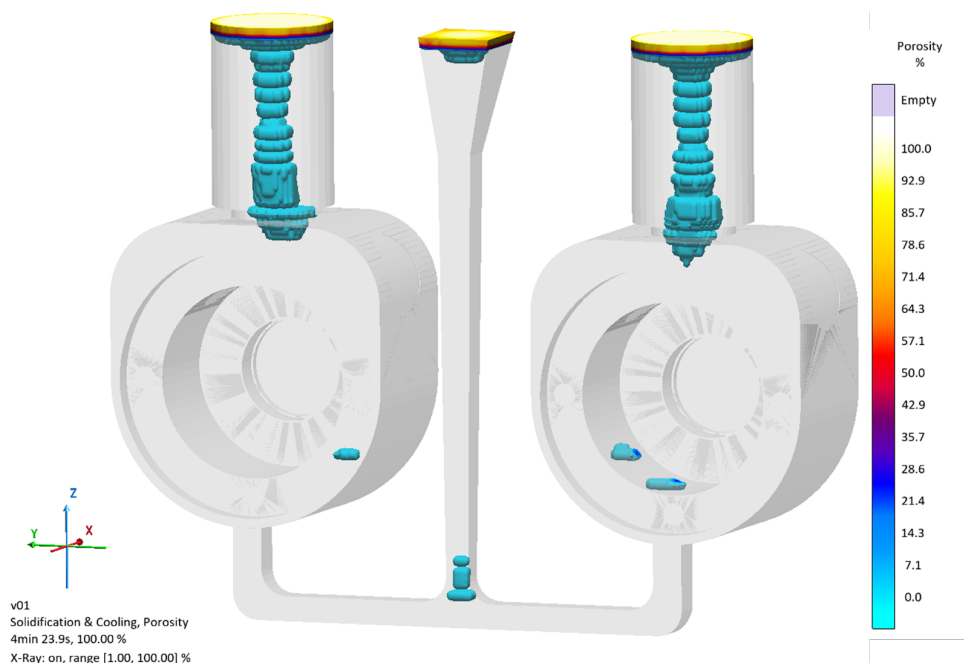


Figura 20 – Resultado de Rechupes *Fonte: Autoria Própria*

#### 4.1.2 Otimizações do Projeto

Com a análise desses resultados, foram definidos dois pontos críticos de melhoria neste projeto: a alta tendência de formação de junta fria, devido a uma região extremamente fina do produto, e a alta tendência de formação de rechupes na peça, podendo comprometer sua integridade.

Dessa forma, para mitigar a formação de junta fria, foi proposto o redimensionamento do produto, com o aumento da espessura do furo central para 5 mm, sendo necessária uma operação de usinagem posterior nessa região para se atingir a cota original. Além disso, visando reduzir a tendência de formação de rechupes, planejou-se a otimização das dimensões dos massalotes e de seus respectivos pescoços, com o objetivo de eliminar os rechupes superiores. Também foi prevista a adição de resfriadores de aço convencional 1020 em contato com a peça, com a finalidade de impor um gradiente térmico que direcione a solidificação para o interior do massalote, conforme ilustrado na Figura 21.

Vale ressaltar que, apesar da redução no rendimento metálico, o foco deste trabalho é a produção de uma única peça, de modo que o aumento do sistema de alimentação não representa um fator crítico para o projeto.

### 4.2 OTIMIZAÇÃO SISTEMA FUNDIÇÃO

Com as alterações propostas, foi possível observar uma melhora significativa nos resultados da simulação, relacionados à perda de temperatura durante o enchimento, à redução da formação de pontos quentes e, conseqüentemente, à diminuição da formação de rechupes, conforme as figuras 22 a 24.

Com esses resultados alcançados, torna-se possível obter maior confiança e robustez no projeto, melhorando tanto o embasamento teórico para a tomada de decisão da equipe quanto a segurança de que a peça apresenta boa sanidade interna, cumprindo os objetivos previamente definidos.

### 4.3 MOLDAGEM

Para a construção do molde, primeiramente foi pensada a fabricação de um modelo do sistema de fundição, a fim de atingir as dimensões desejadas. Para isso, foi utilizada uma máquina de impressão 3D

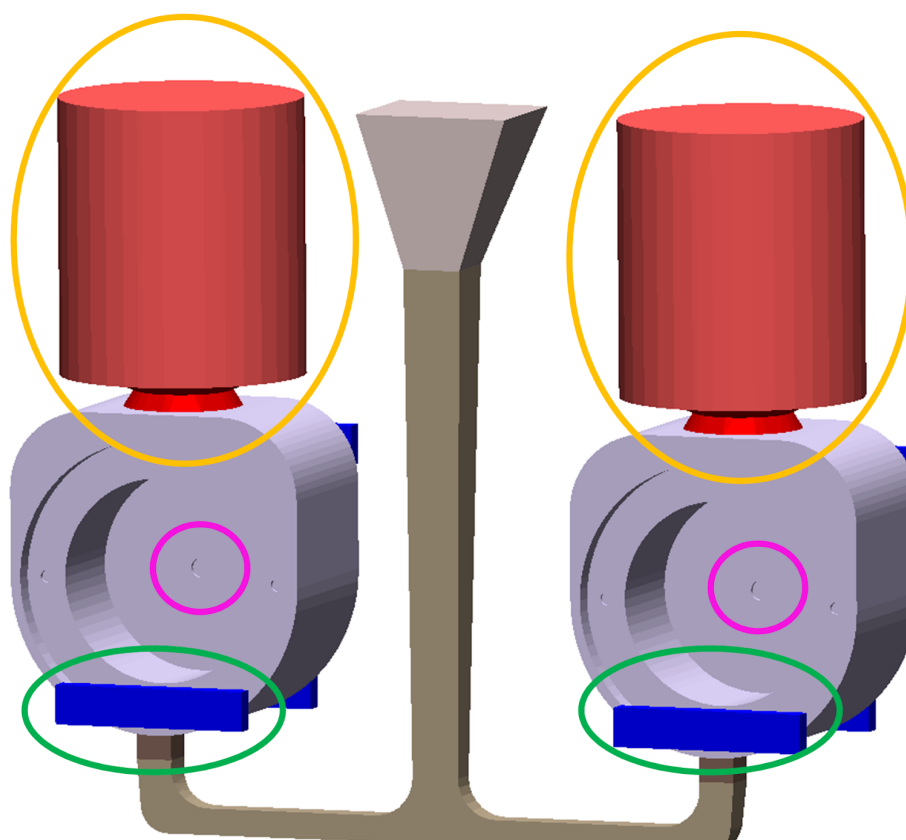


Figura 21 – Sistema otimizado, sendo os destaques em verde a adição de resfriadores, em rosa o aumento da espessura da região e em laranja o redimensionamento dos massalotes *Fonte: Aatoria Própria*

em PLA (Poli (ácido láctico)) — “Crealty Ender 3 V1” (figura 25) — para a fabricação desses modelos.

Para a fabricação do molde, foi utilizada uma mistura de areia com resina fenólica PEPSET (Phenolic Ester Process Set) para a moldagem e endurecimento do molde, visando facilitar a moldagem e garantir resistência suficiente para suportar o processo. Após a obtenção do molde e remoção do modelo, aplicou-se uma tinta refratária à base de nitreto de boro para melhorar o acabamento superficial da peça, obtendo um molde representado na figura 26.

#### 4.4 VALIDAÇÃO DO PROJETO

Com a obtenção do molde, e utilizando como matéria-prima o lingote de alumínio A356, foi realizada a fusão do projeto no laboratório do DEMa (Departamento de Engenharia de Materiais), obtendo-se a peça bruta da fusão, que necessitou da etapa de usinagem e acabamento. Foi possível observar uma grande quantidade de rebarbas no canal, devido ao mau fechamento do molde durante o enchimento, além de um acabamento superficial insatisfatório da peça, pois a tinta refratária utilizada não estava adequada para essa aplicação, conforme mostra a figura 27. Entretanto, a sanidade interna do produto é o principal critério para aprovação da peça.

Para a validação da região interna do produto, foram realizadas análises metalográficas nas regiões superior e inferior da peça, além de medições de dureza. O objetivo foi comparar os resultados obtidos com dados da literatura, visando validar a qualidade final da peça.

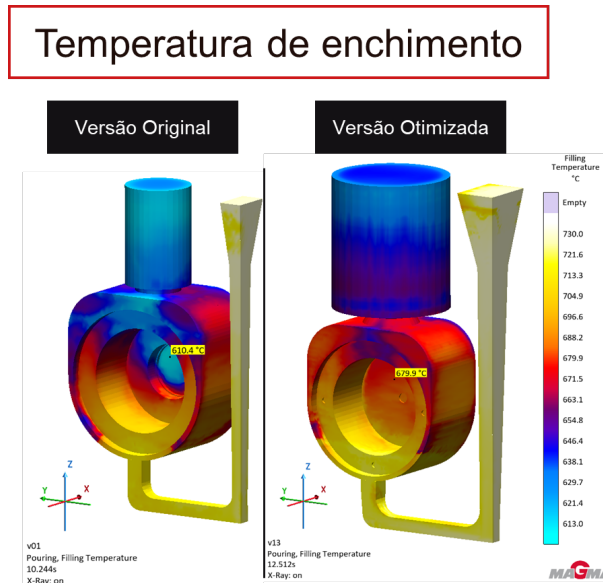


Figura 22 – Resultado comparativo da versão original e otimizada *Fonte: Autoria Própria*

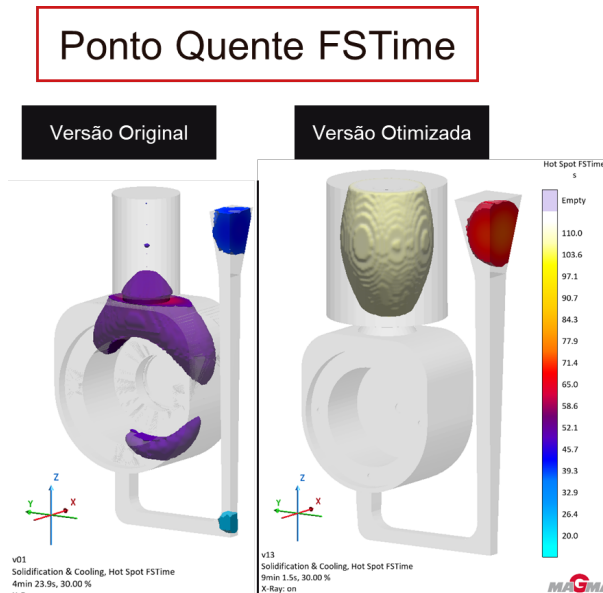


Figura 23 – Resultado comparativo da versão original e otimizada *Fonte: Autoria Própria*

#### 4.4.1 Metalografia

Para a realização das metalografias, as imagens foram obtidas a partir da região logo abaixo dos massalotes (A), paralela à face frontal, e de uma região inferior (B), perpendicular à face frontal, conforme ilustrado na figura 28.

Ao comparar a microestrutura das duas regiões analisadas, observa-se a presença das fases típicas de uma liga de alumínio, figuras 30 a 32. No entanto, a região inferior apresenta um grau de refinamento significativamente maior (mais evidente ao comparar as figuras 29 e 31), o que era esperado, considerando que se trata de uma zona mais fina e mais distante do massalote, resultando em uma taxa de resfriamento mais elevada e, conseqüentemente, uma microestrutura mais refinada.

Em relação às cavidades observadas nas micrografias, suas morfologias indicam que se tratam de microrrechupes formados devido ao corte prematuro da alimentação e ao fechamento dos espaços interdendríticos durante a solidificação. Essa conclusão é sustentada pela distribuição aleatória dessas cavidades

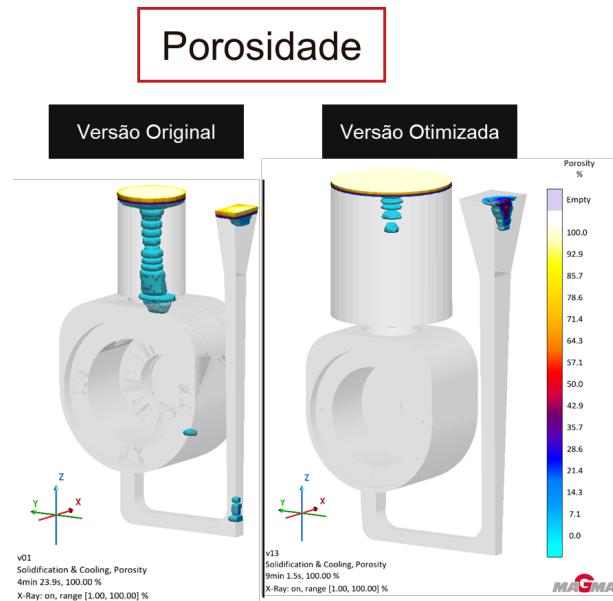


Figura 24 – Resultado comparativo da versão original e otimizada *Fonte: Autoria Própria*



Figura 25 – Creality Ender 3 V1 *Fonte: Autoria Própria*

na matriz, pelo tamanho considerado aceitável para a aplicação e pela morfologia irregular apresentada, diferenciando-se de defeitos como bolhas de gás, que possuem formas mais esféricas e regulares.

A aplicação do reagente de ataque químico Keller não revelou novas fases ou discontinuidades relevantes na microestrutura, apenas proporcionou um aumento no contraste entre a matriz de alumínio e a fase eutética, facilitando a distinção entre os constituintes já observados anteriormente, conforme mostram as figuras 33 e 34.

Por fim, a microestrutura atingiu o esperado, sendo muito próxima de microestruturas de trabalhos



Figura 26 – Etapa de moldagem *Fonte: Autoria Própria*



Figura 27 – Sistema bruto da fusão e peça após extração do sistema *Fonte: Autoria Própria*

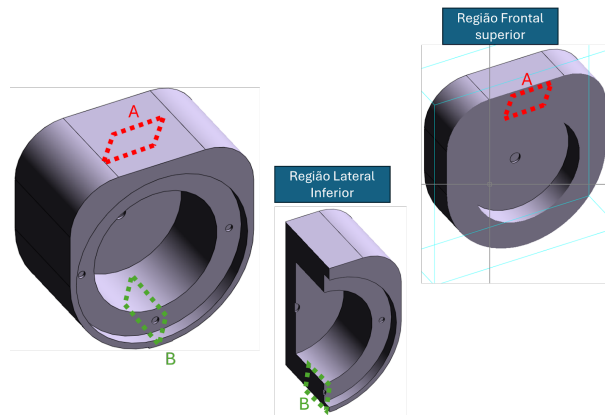


Figura 28 – Regiões das quais foram realizadas as metalografias *Fonte: Autoria Própria*

similares, como na figura 35.

#### 4.4.2 Dureza Brinell

A fim de validar as propriedades mecânicas da peça, foram realizadas diversas medições de dureza em pontos distintos da peça, usando o durômetro mostrado pela figura 36, gerando um perfil de dureza que confere maior confiabilidade nas medidas obtidas, mostradas nas figuras 37 e 38. Os valores médios obtidos se enquadram nos parâmetros da norma ASTM (American Society for Testing and Materials) (ASTM, 2018), com valor médio aproximado de 55 HB (Hardness Brinell) e garantem que as propriedades mecânicas são similares em todo o produto.

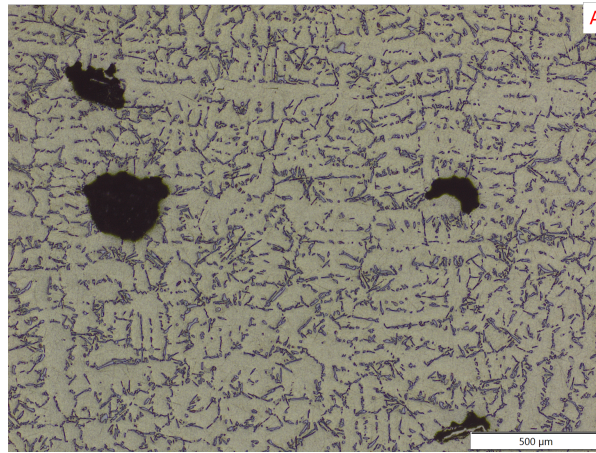


Figura 29 – Metalografia região inferior, sem ataque químico *Fonte: Autoria Própria*

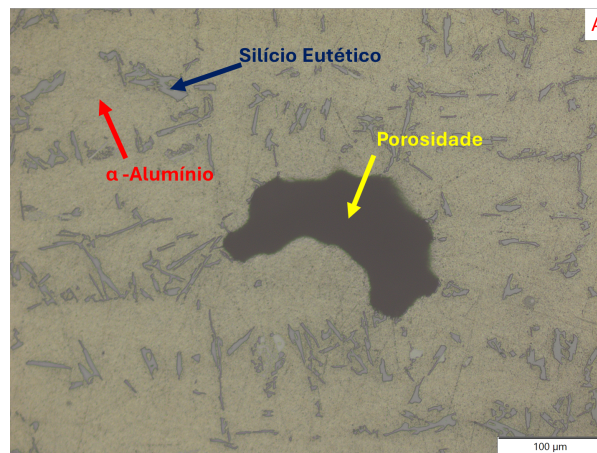


Figura 30 – Metalografia região inferior, sem ataque químico *Fonte: Autoria Própria*

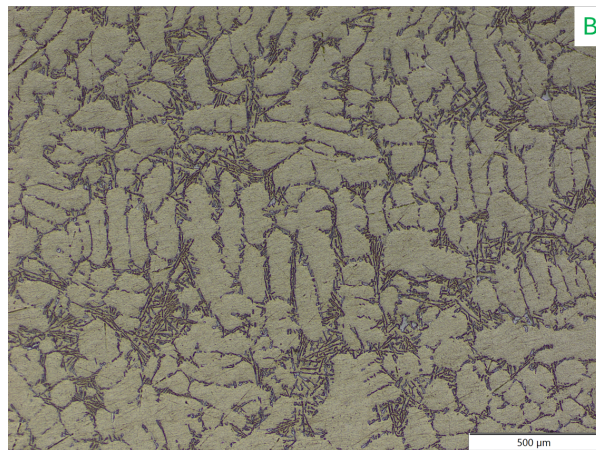


Figura 31 – Metalografia região superior, sem ataque químico *Fonte: Autoria Própria*

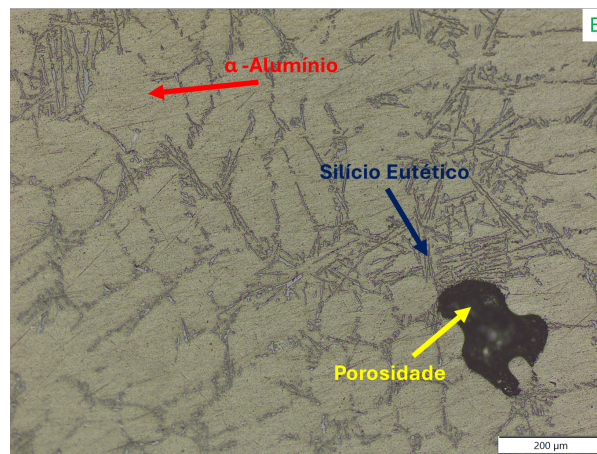


Figura 32 – Metalografia região superior, sem ataque químico *Fonte: Autoria Própria*

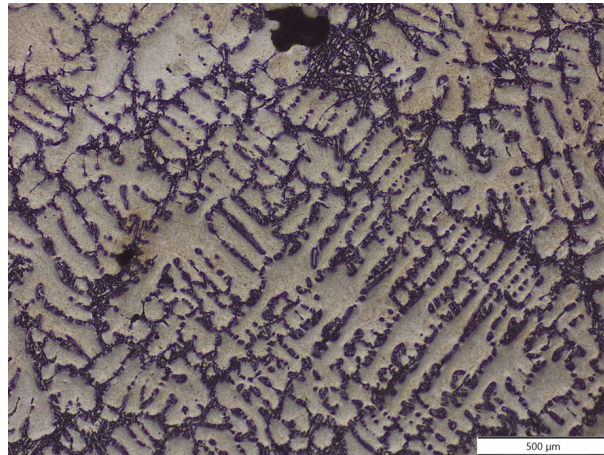


Figura 33 – Metalografia região superior, com ataque químico *Fonte: Autoria Própria*

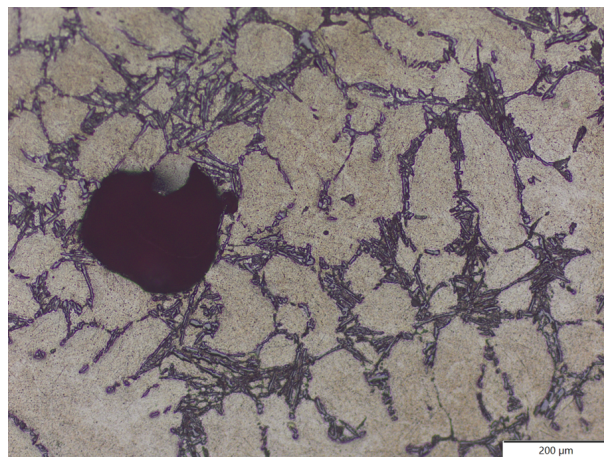


Figura 34 – Metalografia região superior, com ataque químico *Fonte: Autoria Própria*

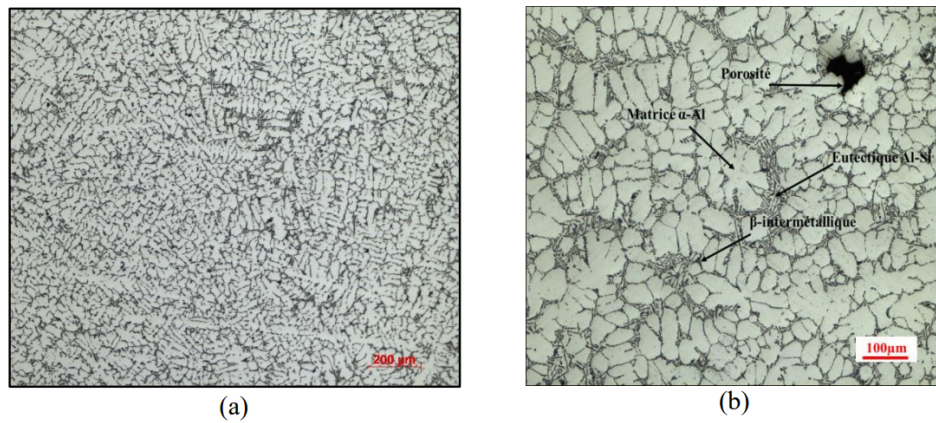


Figura 35 – Metalografia alumínio A 356 e sua microestrutura. (HOURIA, 2015)



Figura 36 – Equipamento usado para realizar ensaio de dureza *Fonte: Autoria Própria*

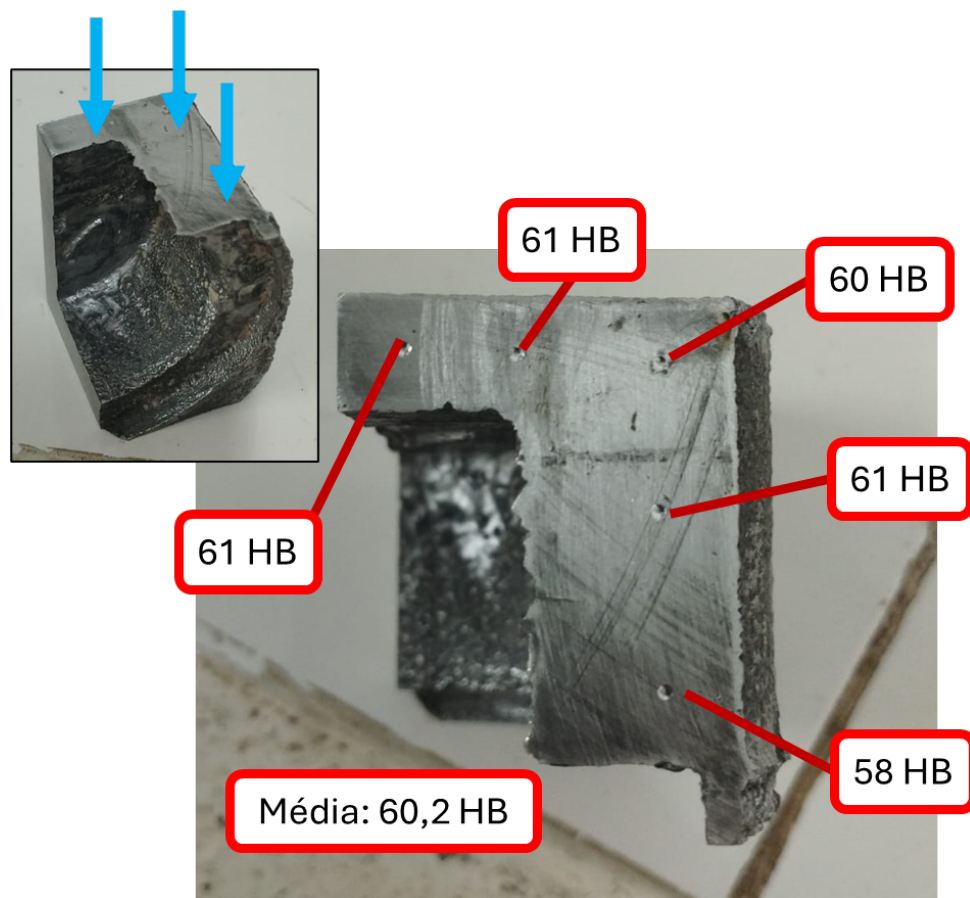


Figura 37 – Perfil de dureza região inferior *Fonte: Autoria Própria*

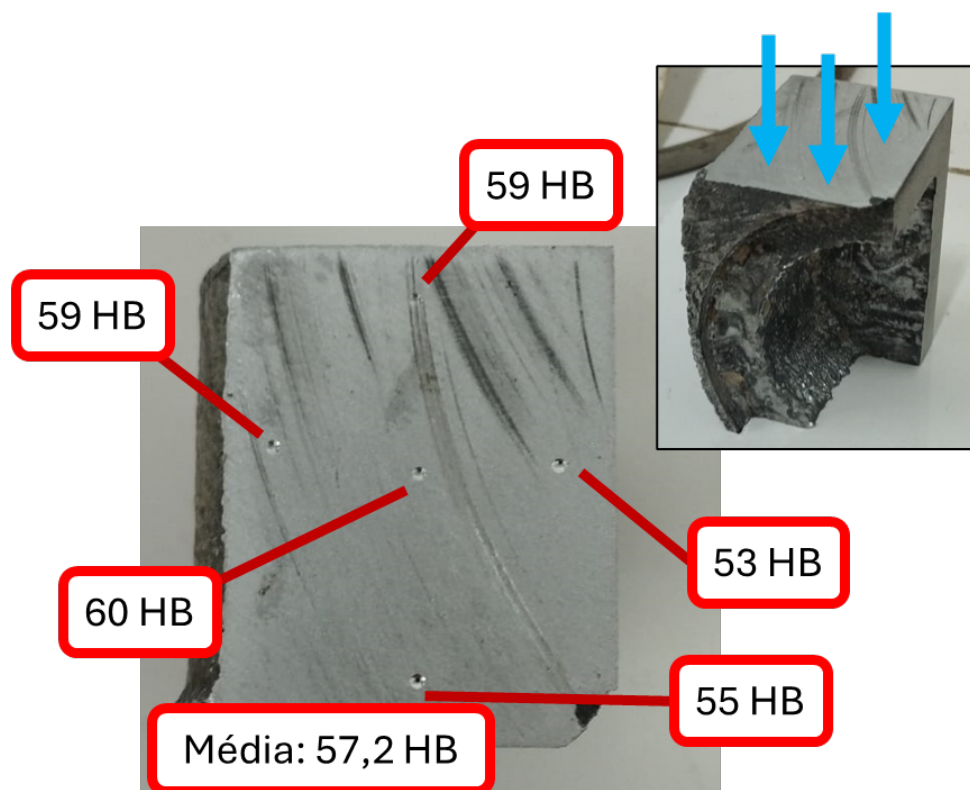


Figura 38 – Perfil de dureza região superior *Fonte: Autoria Própria*

## 5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O desenvolvimento deste projeto de fundição para a produção da carcaça da caixa de direção do veículo Baja SAE da UFSCar constituiu uma excelente oportunidade para aplicar, na prática, os conhecimentos adquiridos ao longo do curso de Engenharia de Materiais. Durante o trabalho, foram empregados conceitos fundamentais, tais como seleção de materiais, projeto de sistemas de fundição, análise térmica, comportamento do fluxo de metal líquido e validação por meio de simulação.

Foi possível dimensionar adequadamente o sistema de alimentação, considerando tanto os requisitos térmicos quanto os volumétricos dos massalotes. O dimensionamento do sistema de canais também foi realizado visando garantir uma velocidade de enchimento controlada, evitando problemas como turbulência, aprisionamento de bolhas de ar e inclusão de óxidos. O uso do software MAGMASOFT® 6.1 foi fundamental para prever possíveis defeitos, tais como juntas frias e rechupes, permitindo a realização de ajustes no projeto antes da fundição.

A fabricação do molde, realizada por meio de impressão 3D para o modelo e moldagem em areia com resina PEPSET (Phenolic Ester Process Set), apresentou bom desempenho, apesar de algumas limitações do laboratório. Na etapa de fusão, surgiram algumas falhas superficiais, como rebarbas e acabamento insatisfatório; contudo, a peça foi fundida com sucesso e apresentou boa qualidade interna. Os ensaios metalográficos e as medições de dureza demonstraram que a peça está dentro dos padrões esperados para a liga A356, conforme a literatura, confirmando que atende aos requisitos mecânicos estabelecidos.

De forma geral, o projeto cumpriu os objetivos propostos. Além de fornecer uma peça funcional para o veículo da equipe Baja UFSCar, mostrado na figura 39, este trabalho também contribuiu para a formação de uma base de conhecimento que poderá ser aproveitada em futuros projetos de fundição da equipe, auxiliando nos desafios vindouros.



Figura 39 – Peça final montada no conjunto do sistema de direção do veículo baja *Fonte: Autoria Própria*

### 5.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, devem-se considerar:

- Realização de tratamentos térmicos pós-fusão, como o T6 neste caso;
- Realização de outros tipos de ensaios mecânicos para validar o projeto;
- Estudo para melhoria do acabamento superficial do produto, por exemplo, a tinta refratária utilizada;
- Investigação do uso de outros tipos de ligas e processos, como baixa pressão e coquilhamento.

## REFERÊNCIAS

- ASTM. Standard Specification for Aluminum-Alloy Sand Castings. en, 2018.
- BAJA UFSCar. pt, 2025.
- BRUCK, Alexandre. Fundição de Metais: o que é e como é feita. pt. **EngMat**, 2024.
- CAMPBELL, John. Casting Practice. Ten Rules of Casting. en. **Butterworth-Heinemann**, 2004.
- CAMPBELL, John. Complete Casting Handbook. en. **University of Birmingham, UK**, 2011.
- CASTRO, Antonio Rodriguez de. A review on the porous medium approaches to model the flow of interdendritic liquid during the solidification of alloys in casting processes: theory and experiments. en, 2020.
- GUMIENNY, Grzegorz. Effect of Degassing Parameters on Mechanical Properties of EN AC-46000 Gravity Die Castings. en. **Materials** **2022**, 2022.
- HOURIA, Mohamed iben. Experimental investigation and modeling the fatigue life of a cast aluminium alloy A356-T6 under multiaxial loading. en. **Butterworth-Heinemann**, 2015.
- MAGMA. Learning World Basic Training. pt. **MAGMASOFT © autonomous engineering**, 2024.
- MARIA, Bárbara. SISTEMA DE DIREÇÃO. pt, 2014.
- MARKEE, Julie. Atlas of Casting Defects. en, 2017.
- MATERIAISECORROSAO. Diagrama Al-Si. pt. **EEWebDesign**, 2025.
- NAZIRUDEEN, S.s. Mohamed. A Study on Relationship between Casting Modulus and Feeding Distance of Ductile iron. en, 2015.
- WLODAWER, R. Directional Solidification of Steel Castings. en. **Pergamon Press**, 1966.