

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS

BRUNO CORRÊA ZUCCO

**ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO DA CARÇA USINADA POR CARÇA
FUNDIDA DA CAIXA DE REDUÇÃO DE UM VEÍCULO BAJA SAE**

BENTO GONÇALVES

2026

BRUNO CORRÊA ZUCCO

**ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO DA CARCAÇA USINADA POR CARCAÇA
FUNDIDA DA CAIXA DE REDUÇÃO DE UM VEÍCULO BAJA SAE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador Prof. Me. Victor Hugo Velazques Acosta

BENTO GONÇALVES

2026

BRUNO CORRÊA ZUCCO

**ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO DA CARCAÇA USINADA POR CARCAÇA
FUNDIDA DA CAIXA DE REDUÇÃO DE UM VEÍCULO BAJA SAE**
CLIQUE OU TOQUE AQUI PARA INSERIR O TEXTO.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador Prof. Me. Victor Hugo Velazques Acosta

Aprovado em 13/07/2026

Banca Examinadora

Prof. Dr. Giovani Dambros Telli

Prof. Me. Fabricio Pertile

Dedico esta conquista aos meus pais, irmãos, parentes e amigos que estiveram comigo durante todo o caminho, me dando força e perseverança para seguir em frente.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por conceder saúde, força, sabedoria e perseverança ao longo desta caminhada, tornando possível a conclusão desta importante etapa da minha vida.

Aos meus pais, Agarzone Zucco e Sirlei Corrêa Zucco, expresso minha profunda gratidão pelo amor, incentivo e apoio incondicional, fundamentais para esta conquista. Aos meus irmãos, Marcio Zucco e Maison Zucco, e aos meus amigos, agradeço pela compreensão, amizade e incentivo durante toda essa jornada.

Agradeço aos professores do curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul pelos conhecimentos compartilhados e pela contribuição para minha formação. Em especial, ao meu orientador, Professor Me. Victor Hugo, pela confiança, orientação e dedicação ao longo deste trabalho. Ao Professor Me. Vagner Grison, pelo auxílio na realização dos ensaios mecânicos, e ao Professor Dr. Giovani Telli e ao Engenheiro Mecânico Mestre Felipe Pertile, por aceitarem compor a banca examinadora e contribuírem com suas valiosas considerações.

À equipe Bajagual Baja SAE, agradeço por inspirar e proporcionar o desenvolvimento deste trabalho, contribuindo significativamente para minha formação acadêmica e profissional. À empresa Farina S/A, agradeço pelo apoio, pela disponibilização de recursos e pela confiança depositada neste projeto.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho. Meu sincero muito obrigado!

*"O sucesso é a soma de pequenos esforços,
repetidos dia após dia." - Robert Collier*

RESUMO

Este trabalho analisou a viabilidade da substituição de uma carcaça de caixa de redução usinada por uma carcaça fundida em liga de alumínio AlSi9, aplicada a um veículo Baja SAE. O estudo contemplou a adequação geométrica da peça ao processo de fundição por gravidade em molde de areia, seguida de simulações de enchimento e solidificação no software Altair Inspire Cast, que permitiram otimizar o sistema de alimentação e reduzir a ocorrência de defeitos de fundição. Posteriormente, foram realizadas simulações estruturais no Altair Inspire para comparar o comportamento mecânico das versões usinada e fundida, avaliando a distribuição de tensões, deformações e fatores de segurança. A fabricação de protótipos possibilitou a realização de análises dimensionais, ensaios mecânicos e caracterizações metalográficas, validando os resultados obtidos por simulação. Os resultados demonstraram que a carcaça fundida apresentou desempenho estrutural compatível com a versão usinada, mantendo a integridade mecânica exigida para a aplicação, além de proporcionar redução dos custos de fabricação e maior potencial para produção seriada. Dessa forma, conclui-se que a fundição em liga AlSi9 representa uma alternativa tecnicamente viável para a fabricação de carcaças de caixas de redução destinadas a veículos Baja SAE, evidenciando a importância da integração entre simulação computacional, projeto mecânico e processos de manufatura no desenvolvimento de componentes de engenharia.

Palavras-chave: Fundição de Alumínio; Simulação; Baja SAE; Carcaça de Redutor.

ABSTRACT

This study analyzed the feasibility of replacing a machined reduction gearbox housing with a cast housing made of AlSi9 aluminum alloy for application in a Baja SAE vehicle. The research included the geometric adaptation of the component for gravity sand casting, followed by mold filling and solidification simulations using Altair Inspire Cast software, which enabled the optimization of the feeding system and the reduction of casting defects. Subsequently, structural simulations were performed in Altair Inspire to compare the mechanical behavior of the machined and cast housings by evaluating stress distribution, deformation, and safety factors. Physical prototypes were manufactured to validate the simulation results through dimensional inspection, mechanical testing, and metallographic analysis. The results demonstrated that the cast housing achieved structural performance comparable to that of the machined housing while maintaining the mechanical integrity required for the application. In addition, the casting process provided lower manufacturing costs and greater potential for serial production. Therefore, it was concluded that casting with AlSi9 aluminum alloy is a technically viable alternative for manufacturing reduction gearbox housings for Baja SAE vehicles, highlighting the importance of integrating computational simulation, mechanical design, and manufacturing processes in the development of engineering components.

Keywords: Aluminum Casting; Simulation; Baja SAE; Gearbox Housing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Redutor de velocidade do veículo Baja SAE - Bajagual.....	22
Figura 2 - Carcaça da caixa de redução do veículo Baja SAE - Bajagual.....	24
Figura 3 - Interface <i>Altair Inspire</i>	26
Figura 4 - Interface <i>Altair inspire Cast</i>	26
Figura 5 - Modelo tridimensional da carcaça atual da caixa de redução.....	29
Figura 6 - Esquema de Fundição por Gravidade em molde de Areia.....	30
Figura 7 - Pontos quentes	32
Figura 8 - Fluxograma de atividades	37
Figura 9 - Adequação ao processo de fundição	40
Figura 10 - Sistema de alimentação da peça.....	41
Figura 11 - Massalotes posicionados na peça.....	43
Figura 12 - Moldes impressos, caixa de moldagem e moldes prontos	47
Figura 13 - Arvore de fundição das peças	51
Figura 14 - Estrutura da matriz morfológica	55

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais tipos de processos de usinagem.....	18
Quadro 2 – Principais tipos de processos de fundição	20

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros dos vazamentos realizados	50
Tabela 2 - Resultados do ensaio de dureza.....	53
Tabela 3 - Comparativo da dureza - literatura x resultados obtidos.....	54
Tabela 4 - Resultados ensaio de tração.....	57
Tabela 5 - Comparativo da tensão máxima - literatura x resultados obtidos	57

LISTA DE SIGLAS

CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
FEM	Método dos Elementos Finitos
TCC	Trabalho de Conclusão do Curso
UCS	Universidade de Caxias do Sul
CAE	Engenharia Auxiliada por Computador
NDT	Ensaaios Não Destrutivos
PPI	Poros por polegada quadrada
CP	Corpo de prova
L	Litros

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	JUSTIFICATIVA	15
1.2	OBJETIVOS	16
1.2.1	Objetivo geral	16
1.2.2	Objetivos específicos	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA OU REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	USINAGEM	17
2.1.1	Principais processos de usinagem.....	18
2.2	FUNDIÇÃO.....	19
2.2.1	Processos de fundição	20
2.3	REDUTORES DE VELOCIDADE.....	21
2.3.1	Carcaça de redutores	23
2.4	SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS APLICADAS À ENGENHARIA MECÂNICA	24
2.4.1	Simulação estrutural com o Altair Inspire	25
2.4.2	Simulação de Fundição com o <i>Altair Inspire Cast</i>.....	26
3	METODOLOGIA	28
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA CARCAÇA ATUAL	28
3.2	SELEÇÃO DO MATERIAL E DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO.....	29
3.3	MODELAGEM E ADEQUAÇÃO DA PEÇA PARA FUNDIÇÃO	31
3.4	SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO.....	32
3.5	SIMULAÇÃO ESTRUTURAL.....	34
3.6	FABRICAÇÃO DE PROTÓTIPOS E ENSAIOS EXPERIMENTAIS	35
3.7	FLUXOGRAMA DE ATIVIDADES.....	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1	PREPARAÇÃO E ADEQUAÇÃO DO MODELO GEOMÉTRICO	39
4.2	DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO	40
4.3	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO TÉRMICA	41
4.4	SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO.....	43
4.5	OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO	44

4.6	FABRICAÇÃO DOS MODELOS E MOLDES	46
4.6.1	Moldagem pelo processo Ecolotec	47
4.6.2	Moldagem pelo processo de cura a frio.....	48
4.7	FABRICAÇÃO DA PEÇA FUNDIDA.....	49
4.8	INSPEÇÃO DAS PEÇAS FUNDIDAS	51
4.9	ENSAIOS E CARACTERIZAÇÃO.....	53
4.9.1	Ensaio de dureza	53
4.9.2	Ensaio metalográfico	54
4.9.3	Ensaio de tração	56
4.10	SIMULAÇÃO ESTRUTURAL.....	58
5	CONCLUSÃO.....	60
	REFERÊNCIAS	62
	APÊNDICE A – FÓRMULAS	66
	APÊNDICE B – IMAGENS DIMENSIONAMENTO DOS COMPONENTES	69
	APÊNDICE C – IMAGENS DE SIMULAÇÕES – <i>ALTAIR INSPIRE CAST</i>	71
	APÊNDICE D – IMAGENS DE SIMULAÇÕES – <i>ALTAIR INSPIRE</i>	75
	APÊNDICE E – IMAGENS DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO.....	77
	APÊNDICE F – USINAGEM DA CARÇA FUNDIDA	86
	APÊNDICE G – ENSAIOS DE TRAÇÃO.....	88
	APÊNDICE H – METALOGRAFIA.....	90

1 INTRODUÇÃO

A produção de componentes metálicos desempenha papel central no desenvolvimento industrial, abrangendo setores como automotivo, aeroespacial, naval, agrícola e de bens de consumo. Ao longo da história, diferentes processos de fabricação foram desenvolvidos com o objetivo de atender às crescentes demandas por eficiência, desempenho mecânico e viabilidade econômica. Entre os métodos mais difundidos estão a usinagem e a fundição, que se destacam pela ampla aplicabilidade e importância no contexto da engenharia mecânica.

A usinagem compreende um conjunto de processos em que ocorre a remoção de material de um bloco sólido, normalmente denominado pré-forma, utilizando ferramentas de corte adequadas. Por meio de operações como torneamento, fresamento, furação e retificação, é possível alcançar elevada precisão dimensional e excelente acabamento superficial, sendo esse método fundamental quando se busca padronização de tolerâncias, intercambiabilidade e confiabilidade em peças críticas (Groover, 2020; Kalpakjian & Schmid, 2021). Conforme Samuel et al. (2021, p. 2), a usinagem de ligas de alumínio apresenta boas condições de acabamento e precisão, mas implica em elevado desperdício de material. De acordo com Groover (2020), em situações de geometrias complexas ou produção em larga escala, a usinagem pode tornar-se economicamente desfavorável devido ao tempo de fabricação e ao custo envolvidos.

A fundição, por outro lado, é um processo caracterizado pela transformação do metal em estado líquido e seu vazamento em moldes que reproduzem a geometria desejada. Após o resfriamento e solidificação, obtém-se a peça metálica, muitas vezes próxima da forma final, reduzindo a necessidade de usinagem posterior. Conforme Jarfors (2020, p. 6), esse processo é amplamente utilizado em indústrias automotiva e de máquinas, justamente pela sua capacidade de gerar formas complexas com menor retrabalho. Já Grilo et al. (2021, p. 3) destacam que a fundição possibilita a integração de diferentes geometrias em uma única peça e a redução do custo unitário em produções seriadas, embora apresente desafios relacionados a defeitos internos e propriedades mecânicas inferiores em comparação a ligas forjadas.

Entre os diversos componentes que podem ser produzidos por esses processos, destaca-se a caixa de redução, elemento essencial em sistemas de transmissão mecânica. Sua principal função é adequar a relação entre torque e rotação transmitida do motor ou fonte de potência para o elemento de saída, garantindo maior eficiência no funcionamento

do sistema. Conforme Shigley et al. (2020, p. 413), as caixas de redução permitem o aumento de torque disponível nas rodas ou mecanismos acionados, ainda que às custas da diminuição da velocidade angular. Além disso, atuam como estrutura de suporte para engrenagens, eixos, rolamentos, vedações e sistemas de lubrificação. De acordo com Budynas e Nisbett (2020, p. 512), a correta seleção de materiais, métodos de fabricação e dimensionamento dos elementos internos é determinante para garantir durabilidade, confiabilidade e desempenho sob diferentes condições de carga.

No contexto acadêmico, o projeto Baja SAE destaca-se como ambiente de aplicação para o estudo desse componente. Trata-se de uma competição internacional organizada pela SAE, que desafia estudantes de engenharia a projetar, fabricar e validar veículos off-road de pequeno porte. Conforme SAE *International* (2025), a competição Baja SAE simula projetos reais de desenvolvimento de produtos na engenharia, desafiando os estudantes a conceber, projetar, fabricar, desenvolver e competir com veículos *off-road*, envolvendo todas as etapas do ciclo de desenvolvimento desde a concepção inicial até os testes de validação e competição. Conforme Quigley (2024), o Baja SAE integra múltiplas disciplinas da engenharia — incluindo estruturas, suspensão, direção, transmissão e *powertrain* — proporcionando aos estudantes experiência prática e estimulando a inovação tecnológica em ambiente acadêmico, mas com desafios operacionais análogos à indústria.

1.1 JUSTIFICATIVA

A escolha do tema fundamenta-se na necessidade de desenvolver soluções técnicas que conciliem desempenho mecânico e viabilidade econômica. O processo de usinagem garante precisão dimensional e acabamento superficial, porém exige elevado tempo de fabricação e alto consumo de material. A fabricação da carcaça da caixa de redução do veículo Baja SAE em alumínio 6061-T6 apresenta elevado custo e baixa eficiência produtiva.

Em contrapartida, a fundição possibilita a obtenção de geometrias complexas em uma única etapa de fabricação, com menor desperdício de material e redução do tempo produtivo. Entretanto, esse processo apresenta desafios relacionados à qualidade do material, como porosidades, retrações e variações microestruturais, que podem comprometer suas propriedades mecânicas.

Nesse contexto, torna-se relevante investigar a viabilidade da substituição da carcaça usinada por uma versão fundida, avaliando se o novo processo atende aos requisitos estruturais e funcionais do componente. Do ponto de vista acadêmico, o estudo contribui para a compreensão comparativa entre usinagem e fundição aplicadas a ligas de alumínio. Do ponto de vista prático, pode proporcionar significativa redução de custos e tempo de fabricação para o veículo Baja SAE, além de servir como referência para aplicações industriais.

Assim, este trabalho justifica-se por sua originalidade, aplicabilidade e potencial para gerar conhecimento científico aliado a soluções práticas.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como finalidade avaliar a substituição da carcaça da caixa de redução usinada por uma carcaça fundida em liga de alumínio, aplicada ao veículo Baja SAE, por meio de simulações computacionais, fabricação de protótipos e validação experimental, buscando verificar sua viabilidade técnica e produtiva.

1.2.1 Objetivo geral

Analisar a viabilidade técnica da substituição da carcaça da caixa de redução do veículo Baja SAE, atualmente usinada em alumínio T6, por uma carcaça fundida em liga de alumínio AlSi9, por meio de simulações de fundição e estruturais, ensaios experimentais e avaliação dos processos de fabricação.

1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar as propriedades mecânicas da liga de alumínio em versões usinada e fundida.
- Comparar o desempenho estrutural das carcaças obtidas pelos processos de usinagem e fundição por meio de simulações computacionais.
- Produzir protótipos das carcaças pelo processo de fundição para avaliação prática de sua viabilidade.
- Comparar custos e tempos de fabricação entre os dois processos, indicando vantagens e limitações da substituição.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA OU REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 USINAGEM

A usinagem é um dos processos de fabricação mais tradicionais e difundidos da engenharia, caracterizando-se pela remoção controlada de material de uma peça bruta por meio de ferramentas de corte. Historicamente, esse método evoluiu de práticas manuais com ferramentas simples para sistemas altamente automatizados, capazes de produzir peças com geometrias complexas e tolerâncias extremamente reduzidas. Conforme Groover (2021, p. 240), a usinagem permanece como uma das principais tecnologias de manufatura, mesmo diante do avanço de processos alternativos como a fundição sob pressão e a manufatura aditiva, devido à sua versatilidade e confiabilidade.

A abrangência do processo é expressiva, pois engloba operações básicas, como torneamento e fresamento, até técnicas especializadas, como retificação de precisão, eletroerosão e usinagem assistida por laser. Essas variações permitem que o método seja aplicado tanto na fabricação de peças unitárias em prototipagem quanto na produção em série em setores como automotivo, aeroespacial, biomédico, agrícola e de bens de consumo. Segundo Weckenborg et al. (2024, p. 2), a flexibilidade na concepção de sistemas de produção é definida como a capacidade de ajustar recursos de produção para lidar com as estatísticas causadas pelo ambiente, consolidando a usinagem como processo indispensável em linhas de produção modernas, especialmente para componentes estruturais críticos.

Outro aspecto relevante da usinagem é sua contribuição para a intercambiabilidade e padronização de componentes, requisitos essenciais na manufatura contemporânea. A obtenção de tolerâncias rigorosas e acabamento superficial de alto nível garante que peças oriundas de diferentes lotes ou fornecedores possam ser montadas sem ajustes adicionais, assegurando confiabilidade no funcionamento dos sistemas mecânicos. Conforme Klocke (2020, p. 17), esse fator é determinante para a competitividade da usinagem em cenários de produção globalizada.

No contexto atual da Indústria 4.0, a usinagem também vem sendo fortemente influenciada por tecnologias digitais, como sistemas de monitoramento em tempo real, sensores embarcados em máquinas-ferramenta e softwares de simulação. Tais inovações ampliam o controle sobre parâmetros de corte, aumentam a produtividade e reduzem o índice de falhas. Conforme Weckenborg et al. (2024), a capacidade de ajuste de

parâmetros de usinagem e máquinas em tempo real confere aos sistemas CNC a flexibilidade necessária para atender a lotes variados e requisitos de alta responsabilidade estrutural.

2.1.1 Principais processos de usinagem

A usinagem ocupa posição de destaque entre os processos de fabricação devido à sua capacidade de produzir componentes com elevada qualidade geométrica e dimensional. Sua ampla aplicação na indústria está relacionada à obtenção de tolerâncias rigorosas, excelente acabamento superficial e elevada repetibilidade, características essenciais para peças submetidas a elevados requisitos de desempenho e confiabilidade. Segundo Ferraresi (2022, p. 48), a usinagem consiste na remoção progressiva de material de uma peça bruta por meio da ação mecânica de uma ferramenta de corte, permitindo a obtenção da geometria e das dimensões especificadas em projeto.

A usinagem pode ser subdividida em diversos tipos, de acordo com o movimento relativo entre peça e ferramenta, a forma de remoção do material e o objetivo do processo. O Quadro 1 apresenta um resumo dos principais tipos de usinagem, suas características e aplicações.

Quadro 1 - Principais tipos de processos de usinagem

Tipo de Usinagem	Descrição	Principais Aplicações	Observações
Torneamento	Remoção de material com ferramenta de uma única aresta cortante, onde a peça gira e a ferramenta se desloca linearmente.	Eixos, pinos, buchas e superfícies cilíndricas.	Alta precisão e repetibilidade.
Fresamento	A ferramenta de múltiplos cortes gira e remove material da superfície da peça.	Superfícies planas, cavidades e engrenagens.	Versátil e produtivo.
Furação	Realizada com brocas helicoidais para criar furos cilíndricos.	Componentes com passagens, mancais e carcaças.	Processo básico e amplamente utilizado.

Retificação	Usa rebolo abrasivo para remover pequenas quantidades de material.	Eixos e componentes de alta precisão.	Excelente acabamento superficial.
Eletroerosão (EDM)	Remoção por descargas elétricas controladas.	Moldes, matrizes e peças endurecidas.	Alta precisão, porém lento.
Usinagem CNC	Automação por controle numérico computadorizado.	Produção seriada e de alta precisão.	Permite repetibilidade e complexidade geométrica.

Fonte: Adaptado de Ferraresi (2022, p. 51) e Kalpakjian e Schmid (2020, p. 72).

2.2 FUNDIÇÃO

A fundição é um dos mais antigos e versáteis processos de fabricação de componentes metálicos, utilizado desde a antiguidade até as indústrias modernas de alta tecnologia. O método consiste em fundir o metal e efetuar o seu vazamento em um molde que reproduz a geometria desejada; após o resfriamento e solidificação, a peça é obtida, muitas vezes próxima a sua forma final, reduzindo a necessidade de usinagem posterior.

Segundo Campbell (2021, p. 18), a fundição apresenta como principais vantagens a capacidade de produzir geometrias complexas em uma única etapa, a flexibilidade em relação aos tipos de ligas metálicas e a viabilidade econômica em produções seriadas. Contudo, também envolve desafios, como a ocorrência de defeitos internos — porosidade, trincas, retrações — e a variabilidade microestrutural, que podem comprometer o desempenho mecânico da peça.

De acordo com Ravi (2020, p. 26), a fundição desempenha papel fundamental em setores como automotivo, ferroviário, naval, aeronáutico e de máquinas industriais, especialmente em componentes que exigem elevada resistência mecânica, boa dissipação térmica e produção em larga escala. A adoção de tecnologias de simulação computacional, como softwares de análise de fundição, tem reduzido significativamente os riscos de falhas e melhorado o controle do processo.

Nos últimos anos, a pesquisa em fundição tem se concentrado no desenvolvimento de novos materiais, no controle microestrutural e na integração de técnicas de manufatura híbridas, que combinam fundição com usinagem ou manufatura aditiva (Bühler; Lopez; Tiedje, 2021, p. 41).

2.2.1 Processos de fundição

A fundição é um dos métodos mais antigos e versáteis para a fabricação de peças metálicas. Segundo Chiaverini (2021, p. 103), o processo consiste em fundir o metal e vertê-lo em um molde que reproduz a forma final da peça, podendo exigir ou não usinagem posterior.

De acordo com Callister e Rethwisch (2020, p. 260), a fundição é amplamente utilizada para a produção de componentes com geometrias complexas e paredes espessas, como carcaças, blocos de motor e cabeçotes. O Quadro 2 resume os principais processos de fundição e suas características.

Quadro 2 – Principais tipos de processos de fundição

Tipo de Fundição	Descrição	Principais Aplicações	Vantagens	Limitações
Fundição em Areia	Metal líquido é vazado em molde de areia.	Blocos de motor, carcaças, peças grandes.	Baixo custo e flexibilidade.	Acabamento e precisão moderados.
Fundição sob Pressão (<i>Die Casting</i>)	Metal injetado sob alta pressão em molde metálico.	Peças automotivas, carcaças leves.	Alta precisão e produção em massa.	Custo elevado dos moldes.
Fundição por Cera Perdida (<i>Investment Casting</i>)	Modelo de cera é revestido por cerâmica e fundido.	Peças complexas e de pequeno porte.	Excelente acabamento e precisão.	Alto custo e tempo de produção.
Fundição Centrífuga	Molde gira durante o vazamento, forçando o metal contra as paredes.	Tubos e buchas.	Boa densidade e qualidade interna.	Limitada a peças simétricas.

Fonte: Adaptado de Chiaverini (2021, p. 106) e Callister e Rethwisch (2020, p. 263).

Embora a fundição permita obter componentes com geometria próxima da forma final, superfícies funcionais que exigem elevada precisão dimensional, rugosidade controlada e tolerâncias restritas normalmente são submetidas a operações posteriores de usinagem. Dessa forma, o processo de fabricação da carcaça proposta combina a obtenção da geometria principal por fundição com a usinagem apenas das regiões críticas para montagem e funcionamento do conjunto.

Durante o processo de fundição, as ligas de alumínio sofrem contração volumétrica durante a solidificação e também contração linear à medida que o material resfria até a temperatura ambiente. Em razão desse comportamento, os modelos utilizados para a fabricação dos moldes devem possuir dimensões ligeiramente superiores às dimensões finais da peça, de modo a compensar a retração térmica e garantir o atendimento às especificações dimensionais após a solidificação e o resfriamento. Essa compensação é conhecida como escala de fundição ou sobredimensão do modelo.

Para ligas de alumínio-silício fundidas em moldes de areia, a literatura técnica recomenda a utilização de escalas de fundição próximas de 1,3%, podendo ocorrer pequenas variações em função da composição da liga, da geometria da peça e das condições do processo. Campbell (2015) destaca que, para ligas Al-Si, a regra de contração normalmente empregada na fabricação de modelos corresponde a aproximadamente 13 mm por metro, equivalente a uma contração linear de cerca de 1,3%, valor amplamente utilizado na prática industrial para compensação dimensional dos fundidos. Esse procedimento assegura que, após o resfriamento e as operações de acabamento, as dimensões finais do componente atendam aos requisitos de projeto.

2.3 REDUTORES DE VELOCIDADE

Os redutores de velocidade são dispositivos mecânicos responsáveis por transmitir potência entre eixos rotativos, modificando a velocidade angular e o torque disponíveis no sistema. Normalmente compostos por engrenagens alojadas em uma carcaça rígida, eles têm a função de garantir o alinhamento dos componentes internos, suportar esforços mecânicos e proteger o conjunto contra contaminações externas e vibrações (Budynas; Nisbett, 2020, p. 145).

Segundo Norton (2021, p. 142), os redutores são essenciais na adequação entre motores de alta rotação e máquinas operando em baixas velocidades, otimizando o torque de saída e contribuindo para a eficiência energética dos sistemas. Essa adaptação é amplamente utilizada em veículos, guindastes, sistemas industriais e equipamentos agrícolas.

O funcionamento de um redutor baseia-se na relação de transmissão entre os diâmetros primitivos das engrenagens. Conforme Juvinall e Marshek (2021, p. 287), essa relação determina o ganho de torque e a redução de velocidade obtidos, sendo definida pela razão entre o número de dentes da engrenagem motora e o da engrenagem movida.

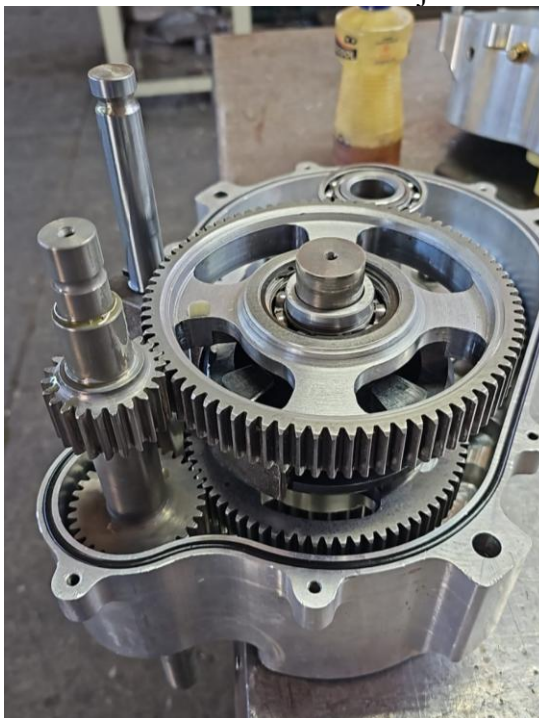
O dimensionamento correto é essencial para evitar falhas por sobrecarga, desgaste prematuro e vibrações indesejadas.

De acordo com Singh et al. (2023, p. 45), os redutores podem ser classificados em função do tipo de engrenagem empregada — cilíndrica, helicoidal, cônica, planetária ou sem-fim. Os redutores de engrenagens cilíndricas se destacam pela alta eficiência (acima de 95%) e simplicidade construtiva. Os de engrenagens helicoidais garantem operação mais silenciosa e suave, enquanto os planetários oferecem elevada densidade de torque em um conjunto compacto. Já os redutores sem-fim, embora permitam grandes reduções em um único estágio, possuem eficiência inferior devido ao atrito deslizante entre os filetes.

Em aplicações como o Baja SAE, o redutor é peça crítica que conecta o motor às rodas, adequando torque à tração. No projeto *Design of Baja SAE Gearbox for Optimal Performance and Minimum Weight*, foi desenvolvido um redutor que diminuiu peso e melhorou desempenho para aplicação real em competição SAE.

Na Figura 1, apresenta-se o redutor de velocidade desenvolvido para o veículo Baja SAE da Universidade de Caxias do Sul. Este componente exemplifica a aplicação prática dos conceitos abordados, conectando o motor ao sistema de transmissão e adequando o torque à tração necessária para as provas off-road.

Figura 1 – Redutor de velocidade do veículo Baja SAE - Bajagual



Fonte: Elaboração própria (2025)

O projeto de redutores também envolve a análise da carcaça, que tem função estrutural e térmica essencial. Segundo Kumar, Srinivasan e Joshi (2022, p. 25), uma carcaça bem projetada mantém o alinhamento dos eixos e facilita a dissipação de calor gerado durante o funcionamento, garantindo confiabilidade e vida útil prolongada ao sistema.

2.3.1 Carcaça de redutores

A carcaça de um redutor é o componente estrutural responsável por abrigar engrenagens, rolamentos, eixos e elementos de vedação, garantindo proteção e estabilidade ao conjunto. Sua principal função é assegurar o correto alinhamento dos componentes internos e dissipar o calor proveniente do atrito entre os elementos móveis (BUDYNAS; NISBETT, 2020, p. 145).

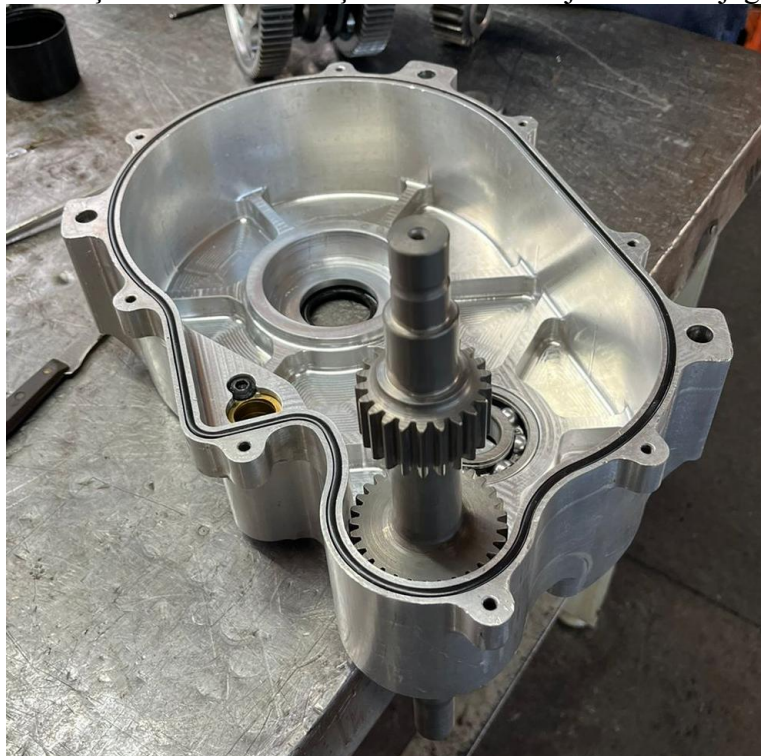
Conforme Kumar e Joshi (2022, p. 47), as carcaças podem ser fabricadas por processos de usinagem ou fundição, sendo esta última vantajosa para geometrias complexas e produção em série. As carcaças usinadas oferecem alta precisão dimensional e são indicadas para aplicações de baixa tolerância a vibrações, enquanto as fundidas reduzem custos e massa, permitindo integração de reforços estruturais e passagens internas.

O material empregado na carcaça influencia diretamente seu desempenho estrutural e térmico. O ferro fundido é amplamente utilizado por sua elevada rigidez e capacidade de amortecimento de vibrações, enquanto o alumínio fundido destaca-se pela baixa densidade, boa condutividade térmica e excelente relação resistência-peso. Conforme RAISE (2024, p. 350), em estudo comparativo entre carcaças de redutores fabricadas em ferro fundido e em liga de alumínio, verificou-se que a versão em alumínio apresentou redução significativa de massa, mantendo deformações e tensões dentro dos limites projetados e frequências naturais adequadas. Esses resultados demonstram que as ligas de alumínio fundido podem ser empregadas em sistemas automotivos e protótipos de veículos de competição, possibilitando a redução de peso sem comprometer a integridade estrutural e funcional do conjunto.

Além da resistência mecânica, a carcaça também atua no gerenciamento térmico e lubrificação. Conforme Childs (2021, p. 145), o formato interno e as aletas externas do

corpo do redutor devem favorecer a circulação do óleo e a dissipação do calor, mantendo a temperatura operacional dentro dos limites seguros e prolongando a vida útil dos componentes internos, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Carcaça da caixa de redução do veículo Baja SAE - Bajagual



Fonte: Elaboração própria (2025)

Conforme estudo de Costa e Denkena (2022, p. 68-75), a substituição de componentes usinados por peças fundidas em alumínio pode resultar em redução significativa nos custos e no tempo de produção em projetos como os da competição Baja SAE. A fundição oferece vantagens como maior complexidade geométrica das peças, menor peso e custos de fabricação mais baixos, desde que acompanhada de análises estruturais e ensaios mecânicos para garantir a integridade e segurança dos componentes.

2.4 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS APLICADAS À ENGENHARIA MECÂNICA

A simulação computacional tem se consolidado como uma ferramenta essencial no desenvolvimento de componentes mecânicos, permitindo prever o comportamento estrutural, térmico e de fluxo de materiais antes mesmo da fabricação do protótipo físico. Conforme Silva et al. (2023, p. 45), o uso de *softwares* de análise numérica reduz

significativamente o custo e o tempo de desenvolvimento, além de possibilitar a otimização de geometrias, escolha de materiais e avaliação de falhas potenciais. Essa abordagem se alinha à engenharia virtual, conceito que busca substituir parte dos ensaios experimentais por análises computacionais com alta precisão preditiva.

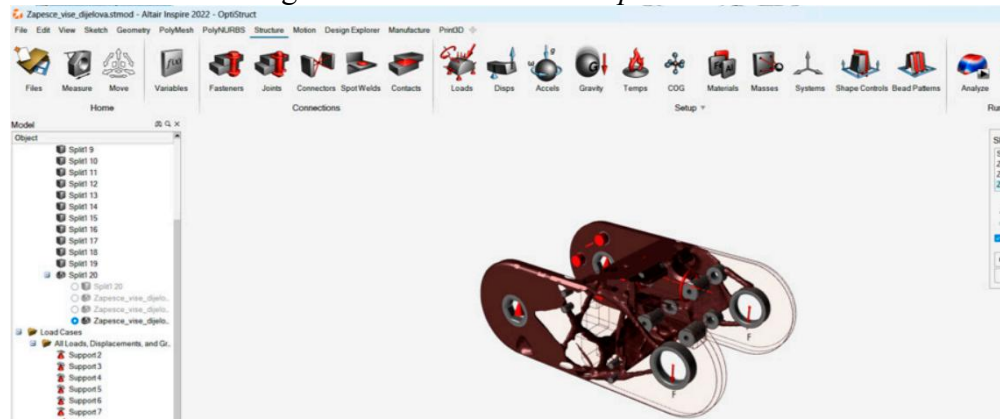
A simulação computacional desempenha papel importante no projeto de carcaças. Ferramentas de análise estrutural baseadas no método dos elementos finitos (MEF) possibilitam prever regiões críticas de tensão, deformações e modos de vibração antes da fabricação (Altair, 2023, p.15). Estas análises permitem otimizar o design, reduzir o consumo de matéria-prima e evitar falhas prematuras por fadiga.

A aplicação de métodos numéricos, como o Método dos Elementos Finitos (MEF), permite avaliar distribuições de tensões, deformações, deslocamentos e modos de vibração em componentes submetidos a esforços variados (Norton; Sundararajan, 2021, p. 482). Esses resultados fornecem subsídios importantes para o dimensionamento mecânico, a seleção de materiais e a validação de projetos, contribuindo diretamente para a confiabilidade e eficiência dos sistemas.

2.4.1 Simulação estrutural com o Altair Inspire

Para a análise estrutural da carcaça do redutor, foi utilizado o software *Altair Inspire*, ferramenta baseada no método dos elementos finitos que permite realizar análises estáticas, modais e de otimização topológica, conforme ilustrado na Figura 3. Segundo *Altair Engineering* (2023, p. 12), o *Altair Inspire* ofereceu recursos de fácil integração entre modelagem, aplicação de cargas e restrições, bem como visualização de tensões, deformações e deslocamentos. O programa possibilitou identificar regiões críticas de concentração de tensões e avaliar a rigidez da estrutura, fornecendo suporte à decisão quanto à geometria ideal e ao material empregado.

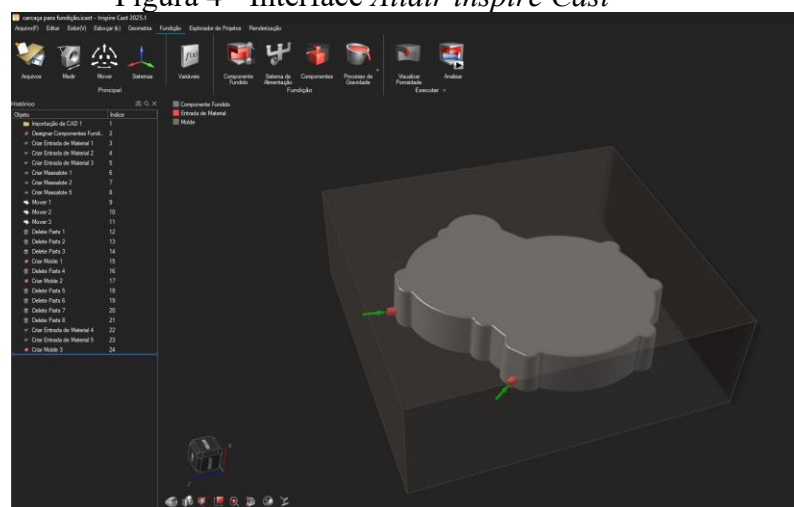
De acordo com Rossi et al. (2022, p. 98), o uso do *Altair Inspire* em projetos acadêmicos e industriais permite a obtenção de resultados confiáveis para componentes complexos, reduzindo o número de protótipos físicos necessários e promovendo a sustentabilidade no processo de desenvolvimento. Além disso, o software ofereceu compatibilidade direta com ferramentas CAD e outros módulos do ecossistema *Altair*, o que facilita a integração entre design, análise e manufatura.

Figura 3 - Interface *Altair Inspire*

Fonte: *Altair Engineering* (2023)

2.4.2 Simulação de Fundição com o *Altair Inspire Cast*

O processo de fundição foi analisado por meio do *Altair Inspire Cast*, ferramenta voltada à simulação do fluxo e solidificação do metal fundido dentro do molde. Conforme *Altair Engineering* (2023, p. 34), o *Altair Inspire Cast* permitiu prever defeitos típicos do processo de fundição, como porosidades, inclusões e retrações, bem como otimizar o projeto do sistema de alimentação, canais de vazamento e posicionamento de massalotes conforme mostra a Figura 4. Dessa forma, foi possível validar o processo de fundição virtualmente, assegurando qualidade e reprodutibilidade antes da etapa experimental.

Figura 4 - Interface *Altair inspire Cast*

Fonte: Elaboração própria (2025)

Conforme Jiang et al. (2021, p. 210), a simulação de fundição por meio de *softwares* especializados possibilita compreender o comportamento térmico e metalúrgico do processo, contribuindo para o controle microestrutural e a redução de rejeitos. No contexto acadêmico, o uso de ferramentas como o *Altair Inspire Cast* favorece o aprendizado prático e a aplicação direta de conceitos de engenharia de materiais e manufatura.

Ainda, conforme Kong et al. (2021, p. 104), as simulações numéricas de escoamento e solidificação do alumínio têm se mostrado eficazes para prever falhas relacionadas a turbulência e aprisionamento de gases, fenômenos que comprometem a integridade da carcaça fundida. Assim, ao combinar as análises térmicas, de fluxo e de tensão, o presente trabalho visa validar a viabilidade de substituir uma carcaça usinada por uma versão fundida, garantindo desempenho estrutural adequado e redução de custo de manufatura.

3 METODOLOGIA

Para a realização deste estudo, foram combinadas técnicas de engenharia assistida por computador (CAE), prototipagem e ensaios experimentais com o objetivo de avaliar a viabilidade técnica da fabricação da carcaça da caixa de redução de veículo Baja SAE em alumínio fundido, em substituição ao modelo atualmente usinado em alumínio 6061-T6.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA CARCAÇA ATUAL

A etapa inicial deste estudo consistiu na caracterização dimensional, geométrica e funcional da carcaça da caixa de redução atualmente utilizada no veículo Baja SAE UCS – Campus Bento Gonçalves. Essa carcaça foi projetada e fabricada internamente pela equipe do projeto, sendo confeccionada em alumínio 6061-T6, material amplamente utilizado em aplicações estruturais devido à sua elevada resistência mecânica específica, boa usinabilidade e resistência à corrosão.

O componente foi obtido pelo processo de usinagem CNC a partir de um bloco maciço (billet), o que proporciona elevada precisão dimensional e excelente acabamento superficial. Entretanto, esse método apresenta elevado custo de fabricação e baixa eficiência no aproveitamento da matéria-prima, uma vez que aproximadamente 80% do volume inicial do billet é removido durante a usinagem, permanecendo apenas cerca de 30% do material na peça final. Além disso, a fabricação individualizada das carcaças limita a produtividade, aumenta o tempo de processamento e dificulta a obtenção de economia de escala quando comparada a processos de conformação próximos da geometria final, como a fundição.

A carcaça desempenha papel estrutural e funcional fundamental no conjunto redutor, pois abriga os eixos e engrenagens responsáveis pela transmissão de torque, além de servir como elemento de fixação ao chassi do veículo. Sua geometria foi projetada de forma a assegurar o alinhamento dos mancais e resistir aos esforços oriundos das cargas de engrenamento, vibrações e reações do terreno durante o uso off-road.

Para a caracterização, o modelo tridimensional existente foi analisado no software SolidWorks, com o objetivo de identificar:

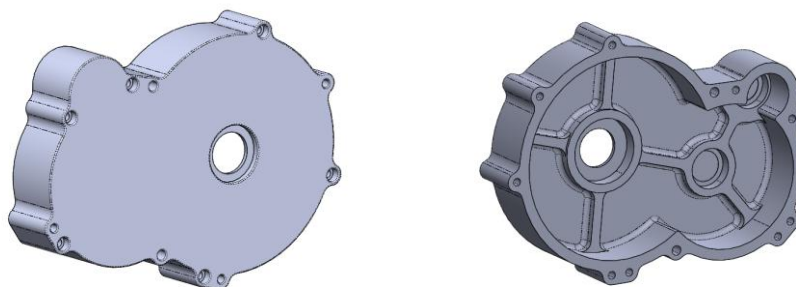
- Espessuras médias de parede e distribuição de massa;
- Localização dos pontos de fixação e apoios dos eixos;

- Volume total e massa do componente;
- Regiões críticas de concentração de tensões (obtidas em análises preliminares);
- Detalhes geométricos não otimizados para fundição, como cantos vivos e furos transversais.

As medições permitiram estabelecer uma base comparativa para as simulações estruturais e de fundição posteriores. Dessa forma, foi possível definir parâmetros de referência para avaliar as vantagens e limitações de uma eventual substituição do processo de usinagem por fundição.

A Figura 5 apresenta o modelo tridimensional da carcaça atualmente utilizada no veículo, destacando suas principais características construtivas e pontos de fixação ao chassi.

Figura 5 - Modelo tridimensional da carcaça atual da caixa de redução



Fonte: Elaboração própria (2025)

3.2 SELEÇÃO DO MATERIAL E DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO

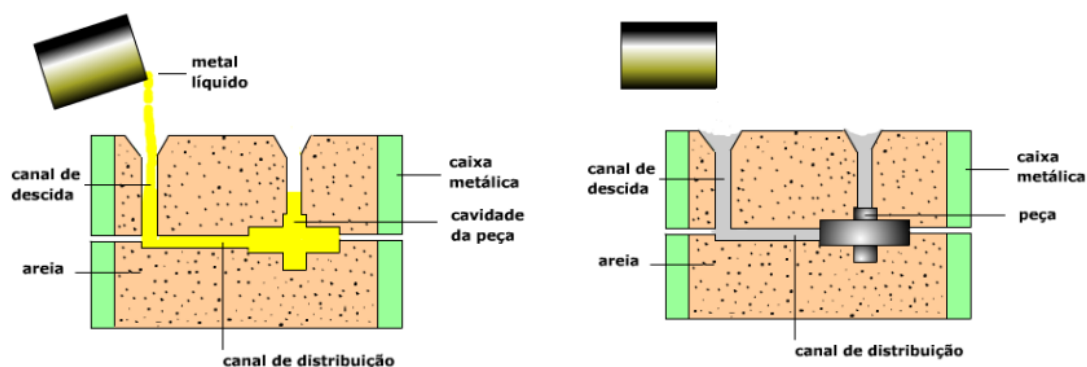
A liga selecionada para este trabalho foi a AlSi9 (Al-9%Si), adotada devido à sua excelente fluidez, baixa tendência à retração e boa relação resistência-peso, características essenciais para componentes fundidos de geometria relativamente complexa. Tal liga é largamente utilizada na indústria automotiva para carcaças, suportes e peças de transmissão, pois o elevado teor de silício melhora o preenchimento do molde e a estabilidade dimensional durante a solidificação.

A qualidade final de peças fundidas em AlSi9Mg depende fortemente do controle de impurezas e de elementos indesejados. Em particular, o teor de ferro influencia a formação de fases intermetálicas (β -Al₅FeSi) que aumentam a ocorrência de porosidade

e fragilizam a microestrutura; portanto, o controle químico da liga é aspecto crítico para reduzir defeitos de retração e porosidade em peças estruturais.

O processo de fundição escolhido foi o molde de areia com cura a frio (Cold-Box), indicado para prototipagem e produção em pequena escala, oferecendo baixo custo de ferramental e grande flexibilidade geométrica. Este método permite a fabricação de cavidades internas complexas por meio de núcleos de areia curados quimicamente, dispensando o uso de moldes metálicos conforme ilustrado na Figura 6. O controle do processo de cura é determinante para a resistência mecânica do núcleo e para evitar defeitos como erosão e inclusões de areia durante o vazamento.

Figura 6 - Esquema de Fundição por Gravidade em molde de Areia



Fonte: Ferraz(2011)

A fundição por gravidade em areia fria apresenta como principais vantagens o custo reduzido, a possibilidade de ajustes rápidos de geometria e a boa compatibilidade com simulações computacionais de enchimento e solidificação. A aplicação de ferramentas de simulação, como o *Altair Inspire Cast*, permitiu prever zonas de turbulência, porosidade e tempos de solidificação, auxiliando no desenvolvimento de protótipos otimizados.

As propriedades térmicas e mecânicas da liga AlSi9 e da areia foram obtidas a partir da biblioteca de materiais do *Altair Inspire Cast*, complementadas por dados experimentais de literatura. Esses parâmetros garantem que as simulações de fundição representem adequadamente o comportamento térmico e o fluxo do metal líquido no interior do molde.

Assim, a combinação do processo de fundição por gravidade com a liga AlSi9 e o uso de simulações computacionais forneceu uma base sólida para o estudo de viabilidade

da fabricação da carcaça da caixa de redução, permitindo avaliar sua integridade estrutural e o potencial de substituição do processo atual por uma rota fundida.

3.3 MODELAGEM E ADEQUAÇÃO DA PEÇA PARA FUNDIÇÃO

Para a realização das simulações, a carcaça do redutor foi inicialmente modelada em ambiente CAD tridimensional, com base nas dimensões originais da peça usinada. Essa etapa teve como objetivo adaptar a geometria existente às condições necessárias para a fundição por gravidade, considerando parâmetros como espessura mínima de parede, ângulos de saída, uniformidade de seção e posicionamento de canais de alimentação e massalotes.

A adequação geométrica é uma das fases mais críticas no projeto de peças fundidas, uma vez que falhas de projeto — como variações abruptas de espessura ou ausência de alívios — podem causar porosidades, tensões residuais e trincas durante o resfriamento. Assim, o modelo CAD foi ajustado para eliminar descontinuidades e facilitar o escoamento do metal líquido no interior do molde.

O controle das espessuras e o balanceamento térmico foram essenciais para evitar zonas de solidificação prematura e garantir um preenchimento uniforme da cavidade. Por isso, o modelo foi revisado com auxílio das ferramentas de análise de espessura e gradiente térmico do *software Altair Inspire Cast*, permitindo prever regiões de risco e otimizar a geometria antes da simulação completa de vazamento e solidificação.

Além disso, foi considerada a orientação de fundição mais adequada para minimizar a formação de bolhas de ar e facilitar a extração da peça após a solidificação. A escolha correta da orientação e dos pontos de ataque do metal é determinante para a qualidade superficial e dimensional do fundido, influenciando diretamente a taxa de rejeição e o custo de produção.

Com base nas análises obtidas, foi definido a posição do sistema de alimentação (canais e massalotes) e as condições térmicas do molde, de modo a equilibrar o fluxo metálico e garantir a completa solidificação do alumínio sem defeitos de contração ou inclusões. Essa fase foi conduzida no *Altair Inspire Cast*, que permite visualizar o comportamento do metal fundido em tempo real e realizar ajustes iterativos até a obtenção de um modelo fundível e termicamente estável.

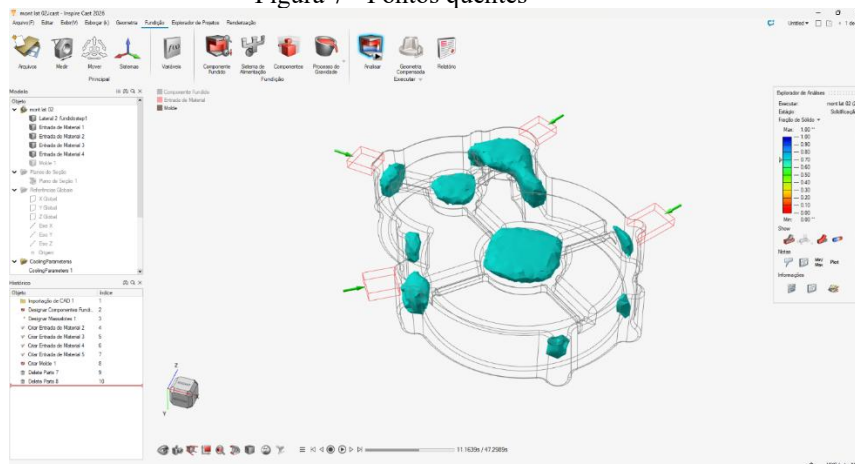
3.4 SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO

A simulação do processo de fundição foi empregada como ferramenta principal para prever o comportamento do metal líquido durante o enchimento do molde, a evolução térmica durante a solidificação e a localização provável de defeitos (porosidade, retração e inclusões), permitindo, assim, otimizar o sistema de alimentação e a geometria da peça antes da fabricação física dos protótipos. Essa etapa dará continuidade ao referencial teórico apresentado no Capítulo 2, em particular aos tópicos sobre fundição, materiais e carcaças de redutores, estabelecendo a ligação entre o conhecimento teórico e a prática computacional.

Inicialmente, o modelo geométrico da carcaça adaptada para fundição foi importado para o *Altair Inspire Cast* e verificada quanto à integridade geométrica (face não-manifold, espessuras mínimas, pequenas arestas e furos passantes). Em seguida, definiu-se a malha fluida/termo automática do software, com refinamento local nas regiões de transição de espessura e nas zonas próximas aos alojamentos de rolamentos, de modo a captar adequadamente gradientes térmicos e eventuais zonas de aprisionamento de gás — procedimento recomendado para análises de enchimento por gravidade.

Os resultados indicaram que os alojamentos dos rolamentos constituíam as regiões mais críticas da carcaça, devido ao seu maior módulo térmico. Além disso, foram identificadas concentrações térmicas localizadas nas regiões destinadas às futuras furações de fixação da carcaça à estrutura do veículo e nos pontos de união entre as duas metades da caixa de redução, conforme imagem xx.

Figura 7 - Pontos quentes



Fonte: Elaboração própria (2025)

Com base nesses resultados, foi desenvolvido um sistema de alimentação térmica visando promover a solidificação direcional da peça. Em uma primeira configuração, foram posicionados massalotes sobre todas as massas isoladas identificadas pela simulação, incluindo as regiões de fixação e união da carcaça. Embora essa solução apresentasse resultados satisfatórios quanto à eliminação das porosidades por contração, o volume total do conjunto ultrapassava a capacidade disponível do cadinho utilizado para a fusão da liga, cujo volume útil é de aproximadamente 5 litros (13,5 kg de alumínio).

Diante dessa limitação operacional, foram avaliadas alternativas para aumentar o módulo térmico da peça sem a necessidade de utilizar múltiplos massalotes. Como solução, foi adotado um acréscimo de 10 mm na face externa da carcaça, aumentando localmente sua massa e favorecendo a redistribuição do fluxo térmico durante a solidificação. Essa modificação permitiu reduzir significativamente a necessidade de alimentação auxiliar nas regiões laterais, mantendo apenas dois massalotes posicionados sobre os alojamentos dos rolamentos, que permaneceram como os pontos de maior concentração de massa da peça.

Durante as simulações, foram gerados mapas temporais de preenchimento, campo de temperaturas e fronteira de solidificação, além de indicadores específicos fornecidos pelo software — como índices de previsibilidade de porosidade e regiões candidata a massa fria (*cold shuts*). Esses resultados foram usados para identificar locais críticos de alimentação e para projetar massalotes que garantam alimentação por solidificação (*feed*) sem comprometer a geometria funcional da carcaça. Estudos prévios demonstraram que a combinação de análise de preenchimento com critérios de alimentação reduz significativamente defeitos em carcaças automotivas.

Foram aplicadas também uma etapa de otimização iterativa: após a simulação inicial, ajustes geométricos nos canais de alimentação e posicionamento de massalotes foram realizados no CAD e retornados ao *Altair Inspire Cast* para nova rodada de simulação, até que os indicadores de qualidade (percentual de volume com risco de porosidade, tempo de solidificação e uniformidade de resfriamento) atingiram critérios pré-estabelecidos. Essa iteração permitiu diminuir a necessidade de protótipos físicos e orientar a etapa experimental com maior probabilidade de sucesso, conforme práticas documentadas no uso de ferramentas comerciais de fundição.

Adicionalmente, foram realizadas simulações de transferência térmica entre a peça e o molde para identificar regiões com maior concentração de calor, possíveis

gradientes térmicos e áreas potencialmente suscetíveis à formação de tensões residuais e defeitos durante a solidificação. Embora os resultados térmicos obtidos no Altair Inspire Cast não tenham sido acoplados diretamente às simulações estruturais desenvolvidas neste trabalho, estudos recentes demonstram que a integração entre simulações de processo e análises estruturais permite incorporar os efeitos da história térmica, das tensões residuais e dos defeitos de fabricação na avaliação do desempenho mecânico dos componentes, aumentando a confiabilidade das previsões numéricas e auxiliando no desenvolvimento de projetos mais robustos (ZHANG et al., 2023; SHINDE; MANNARU, 2023).

Por fim, os resultados das simulações foram validados por meio de comparação com protótipos físicos (Seção 3.6): foram fabricadas amostras-piloto por gravidade em molde de areia e submetidas a ensaios metalográficos em secções críticas. A comparação entre as localizações e severidade de defeitos observados experimentalmente e os mapas preditos pelo *Altair Inspire Cast* serviu para calibrar o modelo numérico (ajuste de condições de contorno e propriedades), aumentando a confiança nas previsões e fechando o ciclo simulação-experimento, conforme práticas relatadas em artigos de validação de *software*.

3.5 SIMULAÇÃO ESTRUTURAL

Na sequência das análises de processo de fundição, foi realizada a simulação estrutural da carcaça proposta para garantir que o desempenho mecânico atenda aos requisitos funcionais e de durabilidade pré-definidas, especialmente no que tange à rigidez, resistência e integridade da peça fundida.

O modelo adaptado da carcaça, resultante das adequações geométricas para fundição, foi importado para o *software Altair Inspire* onde se definiu a malha de elementos finitos com refinamento adequado em regiões críticas (apoios de rolamentos, paredes finas, reforços estruturais). Conforme o estudo *Advanced method of including housing stiffness into calculation of gear systems*, enfatiza-se que a deformação elástica da carcaça pode afetar significativamente a distribuição da carga de engrenagens, sendo crucial considerar essa rigidez na simulação estrutural.

Foram aplicadas as condições de contorno que reproduzem o funcionamento real da caixa de redução no veículo: torque do motor, reação nos mancais, fixação no chassi e outras cargas externas típicas de operação *off-road*. O *software* permitiu obter os mapas

de tensões de von Mises, deformações máximas e fatores de segurança, bem como avaliaremos os modos próprios de vibração da carcaça para verificar possíveis ressonâncias não contempladas no Capítulo 2. O artigo *A Novel Gearbox Strength Check Method by Finite Element Analysis* mostra que a verificação estática da carcaça reduziu tensões máximas de 234 MPa para 133,9 MPa por meio de *redesign* baseado em FEA.

foram ainda efetuada uma análise comparativa entre a versão usinada (alumínio 6061-T6) e a versão fundida (liga AlSi9Mg) da carcaça, considerando os resultados estruturais obtidos. Essa comparação permitiu verificar se a carcaça fundida atende aos mesmos níveis de desempenho ou se seriam necessárias modificações adicionais de geometria ou reforços. De acordo com o Capítulo 2, ao utilizar ligas de alumínio fundido, há vantagens em peso e produção, porém é necessário garantir rigidez e integridade estrutural equivalentes.

Por fim, os resultados das simulações estruturais foram confrontados com os mapas térmicos e de defeitos obtidos na simulação de fundição para avaliar o impacto de possíveis imperfeições no comportamento mecânico final da peça, configurando uma abordagem integrada processo-estrutura que fortalece a confiabilidade da proposta de substituição.

3.6 FABRICAÇÃO DE PROTÓTIPOS E ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Para validar os resultados oriundos das simulações de fundição e das análises estruturais, foram fabricados protótipos da carcaça em liga AlSi9 por meio de fundição por gravidade em molde de areia com cura a frio. A produção desses protótipos permitiu transpor o cenário virtual para o mundo físico, conforme os fundamentos teóricos abordados no Capítulo 2 em relação à manufatura, propriedades dos materiais e integridade estrutural.

Os protótipos foram submetidos aos seguintes ensaios experimentais:

- Ensaios metalográficos - cortes transversais nas regiões críticas (alojamentos de rolamentos, canais de alimentação, paredes finas) para avaliar a microestrutura, presença de porosidade, inclusões e segregações, relacionando-se diretamente com os conceitos de defeitos de fundição

- Ensaios de dureza: medidas de dureza Vickers ou Brinell em várias regiões da peça para caracterizar a resistência da liga fundida e comparar com valores simulados ou bibliográficos.
- Ensaios dimensionais e de tolerância geométrica - verificação das dimensões críticas da carcaça e comparação com o modelo CAD original, avaliando retração real do processo de fundição e adequação das tolerâncias para montagem no veículo.
- Ensaios funcionais ou de montagem - montagem da carcaça no conjunto redutor (ou condição simulada) para verificar alinhamento dos eixos, funcionamento das engrenagens, presença de folgas e perturbações de vibração.

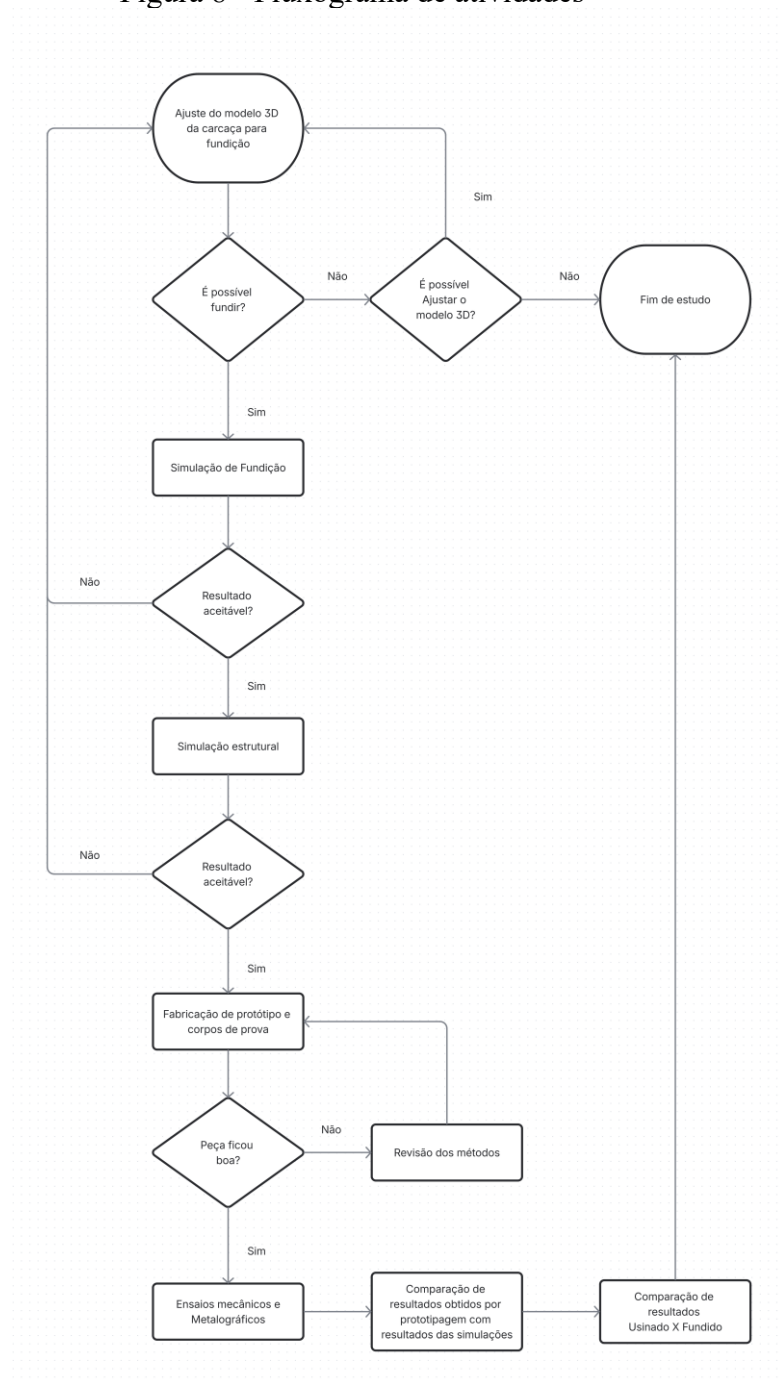
Após a realização dos ensaios, os resultados experimentais foram confrontados com os dados obtidos nas simulações e com a literatura especializada para avaliar a fidelidade dos modelos virtuais e calibrar eventuais desvios. A combinação entre simulação, prototipagem e ensaios permitiu estabelecer um ciclo de validação robusto em componentes metálicos fundidos. Além disso, a transição de protótipo para peça funcional exigiu ensaios experimentais cuidadosos para garantir a confiabilidade do componente em operação.

Com base nas comparações entre simulação e ensaio físico, foi possível elaborar recomendações para ajustes de projeto ou processo, definir tolerâncias aceitáveis de defeito, e decidir pela viabilidade final da substituição da carcaça usinada pela versão fundida, atendendo aos requisitos de desempenho, rigidez, custo e produção.

3.7 FLUXOGRAMA DE ATIVIDADES

A Figura 8 descreve o fluxograma das atividades a serem efetuadas para o presente estudo.

Figura 8 - Fluxograma de atividades



Fonte: Elaboração própria (2025)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O desenvolvimento da proposta deste trabalho foi conduzido com o objetivo de avaliar a viabilidade da substituição da carcaça usinada por uma peça fundida em liga de alumínio, considerando aspectos geométricos, térmicos e estruturais. Para isso, foram integradas etapas de modelagem, simulação computacional, fabricação de protótipos e validação experimental, permitindo uma análise comparativa entre o modelo atual e a solução proposta.

A metodologia adotada foi desenvolvida com o objetivo de avaliar, de forma sistemática, a viabilidade técnica da substituição da carcaça usinada por uma carcaça fundida em liga de alumínio AlSi9. Para isso, foram integradas diferentes abordagens de análise, combinando modelagem tridimensional, simulações computacionais, dimensionamento analítico do sistema de alimentação (Apêndice A), fabricação de protótipos e validação experimental. Essa estratégia permitiu avaliar não apenas a manufatura da peça, mas também seu desempenho mecânico e a qualidade metalúrgica do componente obtido.

Inicialmente, foi realizado o estudo geométrico da carcaça original, identificando regiões críticas para o processo de fundição e promovendo as adequações necessárias ao modelo CAD. Em seguida, foi desenvolvido e dimensionado o sistema de canais de alimentação e massalotes, considerando critérios de enchimento, solidificação direcionada e alimentação da peça. As simulações de fundição foram utilizadas para prever o comportamento do metal líquido durante o enchimento e a solidificação, possibilitando a identificação e a correção de potenciais defeitos antes da fabricação dos protótipos.

Após a otimização do processo de fundição, foram realizadas simulações estruturais comparativas entre as geometrias usinada e fundida, avaliando a distribuição de tensões, deformações e fatores de segurança sob as condições de carregamento estabelecidas para a caixa de redução do veículo Baja SAE. Por fim, a metodologia foi complementada pela fabricação dos protótipos e pela realização de ensaios dimensionais, metalográficos, de dureza e de tração, permitindo comparar os resultados experimentais com as previsões obtidas nas simulações e validar a viabilidade da solução proposta.

4.1 PREPARAÇÃO E ADEQUAÇÃO DO MODELO GEOMÉTRICO

Inicialmente, foi utilizada como base para o estudo a geometria da carcaça da caixa de redução atualmente empregada no veículo Baja. O modelo tridimensional original, desenvolvido para fabricação por usinagem, foi submetido a um processo de adequação visando sua manufatura por fundição em molde de areia com cura a frio.

Como parte dessa adaptação, foram aplicados ângulos de desmoldagem de 3° em todas as superfícies verticais compatíveis com a direção de extração do molde, facilitando a retirada do modelo e reduzindo a possibilidade de danos às cavidades durante a moldagem. Adicionalmente, foram eliminadas descontinuidades geométricas e realizadas correções em regiões com variações bruscas de espessura, buscando favorecer o escoamento do metal líquido e a solidificação uniforme da peça.

Também foram incorporados raios de concordância em regiões críticas da geometria, com o objetivo de reduzir concentrações de tensão, melhorar o fluxo do metal durante o enchimento do molde e minimizar a ocorrência de defeitos associados à solidificação, como rechupes e porosidades localizadas.

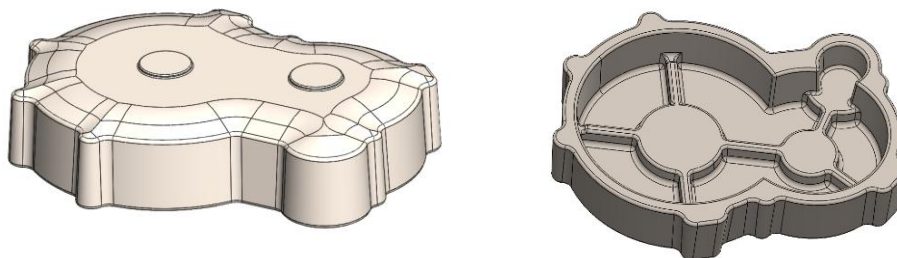
Considerando que a peça fundida passará por operações posteriores de usinagem, foram adicionados sobremetais de fabricação nas superfícies funcionais. Nos alojamentos dos rolamentos e na superfície de contato entre as metades da carcaça foi adotado um sobremetal de 3 mm, enquanto na face externa da carcaça foi acrescentado um sobremetal de 10 mm, possibilitando futuras operações de acabamento e eventuais ajustes dimensionais.

Para compensar a contração dimensional da liga de alumínio durante o resfriamento após a solidificação, foi aplicada ao modelo uma escala de fundição correspondente a 1,3%, valor compatível com ligas alumínio-silício fundidas em moldes de areia. Dessa forma, buscou-se garantir que as dimensões finais da peça, após fundição e usinagem, atendam aos requisitos geométricos e funcionais estabelecidos no projeto original.

As medições dimensionais realizadas nas carcaças fundidas indicaram contração média próxima de 1,0%, valor compatível com a contração linear de 1,3% adotada no projeto. Esse resultado demonstra que o fator de correção empregado na modelagem foi adequado para compensar a retração da liga durante o resfriamento, assegurando sobremetal suficiente para as operações posteriores de usinagem e o atendimento às dimensões especificadas em projeto.

A Figura 9 apresenta a geometria da carcaça após a implementação das modificações necessárias para sua adequação ao processo de fundição.

Figura 9 - Adequação ao processo de fundição



Fonte: Elaboração própria (2026)

4.2 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO

O sistema de alimentação foi projetado com base nos princípios da fundição por gravidade em moldes de areia com cura a frio, buscando promover o preenchimento uniforme da cavidade, minimizar a ocorrência de turbulência e reduzir a formação de defeitos associados à oxidação e ao aprisionamento de gases. O dimensionamento foi realizado considerando a massa total vazada de aproximadamente 13 kg, composta pela peça, canais e massalotes.

O sistema foi constituído por uma bacia de vazamento, canal de descida (*sprue*), poço de impacto, canal de distribuição (*runner*), filtro cerâmico e ataques (*ingates*). O canal de descida foi projetado com geometria cônica para evitar aspiração de ar durante o enchimento, adotando-se altura aproximada de 150 mm, diâmetro superior de 40 mm e diâmetro inferior de 25 mm.

Na base do canal de descida foi incorporado um poço de impacto com a finalidade de reduzir a energia cinética do metal líquido e minimizar a erosão do molde. A partir desse ponto, o metal foi direcionado para o canal de distribuição principal, projetado com seção retangular de 30 mm de largura por 15 mm de altura, resultando em uma área transversal de cerca de 1200 mm², que percorre todo o perímetro da peça.

Para promover um enchimento homogêneo da cavidade, foram adotados quatro ataques distribuídos ao longo da base da peça. Cada ataque foi dimensionado com seção retangular de 30 mm de largura por 10 mm de altura, resultando em área individual de

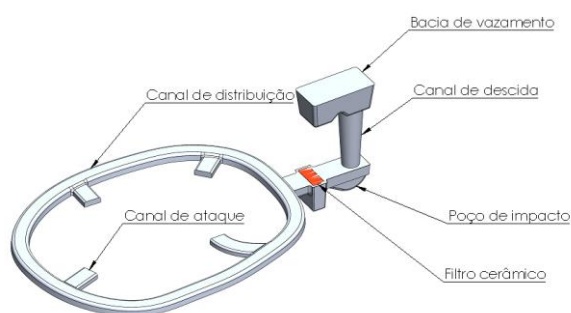
300 mm² e área total de alimentação de 1200 mm². Essa configuração foi definida com o objetivo de favorecer o preenchimento progressivo em todas as regiões da carcaça, reduzindo a distância percorrida pelo metal líquido e minimizando a formação de juntas frias.

O tempo de enchimento foi estimado a partir da massa total vazada e das características da liga utilizada, sendo adotado valor aproximado de 15 segundos. Esse tempo foi considerado adequado para garantir o preenchimento completo da cavidade sem promover velocidades excessivas de escoamento, que poderiam resultar em turbulência e oxidação do metal.

Além disso, foi incorporado ao sistema um filtro cerâmico de espuma com dimensões de 50 × 50 × 22 mm e densidade de 20 PPI, posicionado entre o canal de descida e o canal de distribuição. A utilização do filtro tem como finalidade reter inclusões não metálicas, reduzir a turbulência do fluxo e melhorar a qualidade metalúrgica da peça fundida.

A Figura 10 apresenta o sistema de alimentação desenvolvido para a fundição da carcaça, incluindo os canais, ataques, filtro cerâmico e demais elementos responsáveis pelo direcionamento e controle do fluxo de metal líquido durante o enchimento do molde.

Figura 10 - Sistema de alimentação da peça



Fonte: Elaboração própria (2026)

4.3 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO TÉRMICA

O dimensionamento do sistema de alimentação foi realizado com base no critério do módulo térmico, derivado da regra de Chvorinov, segundo a qual o tempo de solidificação é proporcional ao quadrado da razão entre o volume e a área superficial da região considerada. Dessa forma, foi possível promover a alimentação contínua durante

a contração volumétrica da liga, reduzindo a possibilidade de formação de rechupes e porosidades por contração.

A avaliação da distribuição de espessuras do modelo CAD, verificou-se que as regiões correspondentes aos alojamentos dos rolamentos apresentavam os maiores volumes de material e, conseqüentemente, maior tendência à formação de pontos quentes durante a solidificação. Em função disso, foram posicionados dois massalotes abertos na face superior da peça, diretamente sobre essas regiões, de modo a favorecer a solidificação direcional em direção aos reservatórios de metal líquido.

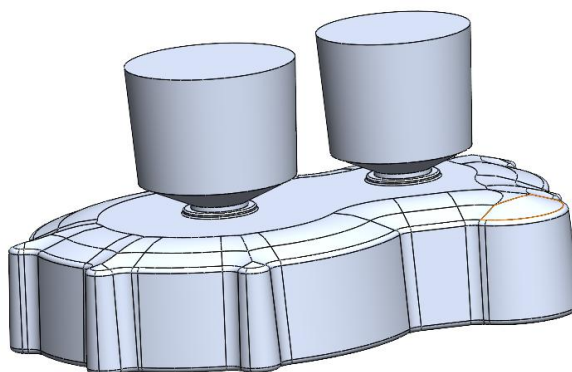
O primeiro massalote foi dimensionado com diâmetro de 95 mm e altura de 90 mm, desconsiderando-se a região do gargalo de alimentação. O segundo massalote foi dimensionado com diâmetro de 85 mm e altura de 90 mm, também sem considerar a altura do gargalo. Ambos os massalotes receberam ângulo de extração de 3°, visando facilitar a retirada do modelo durante a desmoldagem e evitar danos à cavidade do molde.

A ligação entre os massalotes e a peça foi realizada por meio de gargalos cilíndricos (*neck*), dimensionados para garantir a alimentação eficiente das regiões críticas durante a solidificação. Para ambos os massalotes foi adotado um gargalo com diâmetro de 35 mm e altura de 3 mm, seguido de uma transição com inclinação de 25°, promovendo uma passagem gradual do metal líquido entre a peça e o reservatório de alimentação. Essa configuração foi definida com o objetivo de evitar o fechamento prematuro do canal de alimentação e permitir que os massalotes permanecessem ativos durante o maior tempo possível.

Além dos massalotes centrais, foram avaliadas as regiões da peça que apresentavam massas isoladas e possíveis concentrações térmicas. Entretanto, as simulações realizadas indicaram que a alimentação promovida pelos dois massalotes principais foi suficiente para garantir a integridade da peça, não sendo necessária a utilização de massalotes adicionais. Dessa forma, buscou-se reduzir o volume total do sistema de alimentação e aumentar o rendimento do processo de fundição.

A Figura 11 apresenta a configuração final dos massalotes adotados no projeto, destacando sua localização em relação aos alojamentos dos rolamentos e os principais parâmetros geométricos utilizados no dimensionamento.

Figura 11 - Massalotes posicionados na peça



Fonte: Elaboração própria (2026)

4.4 SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO

As primeiras simulações de fundição evidenciaram que a geometria original da carcaça apresentava regiões com elevado módulo térmico, principalmente nos alojamentos dos rolamentos e nas laterais da peça. Essas regiões permaneceram líquidas por um período superior ao restante do componente, favorecendo a formação de pontos quentes e indicando elevada suscetibilidade à ocorrência de porosidades por contração.

A análise dos resultados demonstrou que a eliminação desses defeitos exigiria a utilização de massalotes adicionais nas regiões laterais da carcaça. Entretanto, essa configuração aumentaria significativamente o volume total do conjunto fundido, ultrapassando a capacidade operacional do forno disponível para a fabricação dos protótipos. Dessa forma, tornou-se necessário buscar uma solução que mantivesse a eficiência da alimentação sem aumentar o número de massalotes.

Como alternativa, foi incorporado um acréscimo de 10 mm na face externa da carcaça. Essa modificação promoveu o aumento local do módulo térmico da peça, alterando o comportamento da solidificação e favorecendo a alimentação das regiões críticas pelos dois massalotes posicionados sobre os alojamentos dos rolamentos. A redistribuição do fluxo térmico reduziu significativamente a necessidade de alimentação complementar nas regiões laterais, permitindo simplificar o sistema de alimentação sem comprometer a qualidade prevista para o fundido.

As simulações da configuração final mostraram enchimento uniforme da cavidade, sem evidências relevantes de turbulência ou aprisionamento de ar. Da mesma

forma, os resultados de solidificação indicaram que os massalotes permaneceram ativos até os instantes finais do processo, garantindo alimentação contínua das regiões de maior concentração de massa e reduzindo significativamente a previsão de porosidades por contração.

A configuração definitiva do sistema de fundição, apresentada no Apêndice C, resultou em um volume total aproximado de 4,77 L, valor compatível com a capacidade do equipamento de fusão utilizado na fabricação experimental. Assim, os resultados obtidos demonstraram que as modificações geométricas propostas e o sistema de alimentação desenvolvido atenderam simultaneamente aos requisitos metalúrgicos e às limitações operacionais do processo de fabricação, constituindo uma solução tecnicamente viável para a produção da carcaça fundida.

4.5 OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO

Após a validação inicial do sistema de alimentação por meio das simulações computacionais, foi realizada uma etapa de otimização com o objetivo de reduzir o consumo de metal líquido, aumentar o rendimento metálico do processo e adequar o conjunto às limitações operacionais existentes para a fabricação experimental.

O desenvolvimento dessa etapa foi conduzido de forma iterativa, sendo realizadas aproximadamente 20 simulações computacionais no software Altair Inspire Cast. Ao longo desse processo, foram avaliadas diferentes configurações do sistema de alimentação, variando-se o número de massalotes, suas posições, dimensões e módulos térmicos, bem como a geometria da peça e sua orientação no interior do molde. Também foi estudada a inversão da posição da carcaça na caixa de moldagem, buscando favorecer o sentido de solidificação e melhorar a eficiência da alimentação das regiões críticas.

A configuração inicial do sistema de alimentação foi desenvolvida priorizando a qualidade metalúrgica da peça. Nessa etapa, além dos dois massalotes posicionados sobre os alojamentos dos rolamentos, foram adicionados massalotes nas regiões laterais da carcaça, correspondentes aos pontos onde posteriormente seriam executadas as furações de fixação da caixa de redução ao chassi e de união entre as duas metades da carcaça. Essa configuração garantiu alimentação adequada de todas as massas isoladas identificadas nas simulações, porém resultou em elevado volume de metal no sistema de alimentação.

Como consequência, o rendimento metálico obtido foi de aproximadamente 38,00%, indicando que uma parcela significativa do metal fundido permanecia concentrada nos canais e massalotes após a solidificação. Além disso, o volume total da árvore de fundição ultrapassava a capacidade útil do cadinho disponível para a realização dos vazamentos experimentais, inviabilizando sua fabricação nas condições previstas.

Com base nos resultados obtidos em cada simulação, foi proposta uma modificação na geometria da carcaça mediante a adição de 10 mm de material na face externa da peça. Essa alteração promoveu um aumento do módulo térmico da região, favorecendo uma solidificação mais uniforme e reduzindo a necessidade de alimentação localizada nas massas laterais. Paralelamente, a inversão da posição da peça no molde contribuiu para direcionar a solidificação de forma mais eficiente em direção aos massalotes centrais, reduzindo a formação de regiões isoladas e melhorando o comportamento térmico da peça durante o resfriamento.

A partir dessas modificações, ilustradas no Apêndice B, foi possível eliminar os massalotes laterais, mantendo apenas os dois massalotes centrais responsáveis pela alimentação das regiões dos alojamentos dos rolamentos, que permaneceram sendo os pontos de maior concentração de massa da peça. A nova configuração reduziu significativamente o volume do sistema de alimentação, mantendo a qualidade metalúrgica observada nas simulações, sem ocorrência de rechupes nas regiões críticas.

Como resultado, o volume total da árvore de fundição passou para aproximadamente 4,77 litros, tornando-se compatível com a capacidade do equipamento de fusão disponível. Paralelamente, o rendimento metálico aumentou de 38,00% para 49,25%, representando um ganho aproximado de 29,6% no aproveitamento do metal líquido, sem comprometer a alimentação das regiões críticas da peça.

Os resultados obtidos demonstraram que a utilização de ferramentas de simulação computacional permite avaliar, de forma rápida e eficiente, diferentes alternativas de projeto antes da fabricação dos moldes. A realização de aproximadamente vinte simulações possibilitou identificar a configuração mais adequada para o sistema de alimentação, reduzindo significativamente a necessidade de testes experimentais, o consumo de matéria-prima e o tempo de desenvolvimento. Dessa forma, a otimização realizada evidenciou que pequenas alterações geométricas, associadas ao correto posicionamento da peça e ao dimensionamento dos massalotes, proporcionaram melhorias expressivas na eficiência do processo de fundição, mantendo a qualidade metalúrgica e aumentando o rendimento do processo.

4.6 FABRICAÇÃO DOS MODELOS E MOLDES

Com o objetivo de fabricar os protótipos da carcaça fundida, foram avaliados dois métodos distintos de moldagem em areia: o processo Ecolotec, baseado na utilização de areia sílica aglomerada com resina fenólica e endurecimento por insuflação de dióxido de carbono (CO_2), e o processo de cura a frio, no qual o endurecimento ocorre por reação química entre a resina e o catalisador à temperatura ambiente. A utilização de ambos os processos permitiu comparar sua aplicabilidade na fabricação da carcaça proposta, considerando aspectos como facilidade de moldagem, resistência mecânica do molde, estabilidade dimensional e qualidade superficial da cavidade. Os três primeiros conjuntos de moldes foram produzidos pelo processo Ecolotec e o quarto conjunto pelo processo de cura a frio, sendo este último adotado para a fabricação da peça final em razão do melhor desempenho observado durante a execução experimental.

Os dois processos de moldagem empregados apresentaram desempenho satisfatório para a fabricação da carcaça. Entretanto, o processo de cura a frio apresentou maior facilidade operacional por eliminar a etapa de insuflação de dióxido de carbono, proporcionando maior agilidade na fabricação dos moldes e melhor estabilidade dimensional durante sua preparação.

Para ambos os processos, os modelos utilizados na moldagem foram fabricados por impressão 3D, possibilitando elevada fidelidade dimensional em relação ao modelo CAD desenvolvido e reduzindo significativamente o tempo de fabricação quando comparado à usinagem convencional de modelos. Os modelos foram previamente preparados e inspecionados antes do início da moldagem, garantindo que não apresentassem deformações ou imperfeições superficiais capazes de comprometer a qualidade do molde.

Com o objetivo de acomodar o conjunto de moldagem, foram confeccionadas caixas de madeira desmontáveis, projetadas especificamente para as dimensões da peça e do sistema de alimentação. As caixas apresentaram dimensões internas de aproximadamente 550×750 mm, sendo adotado um dos cantos chanfrado em 45° , reduzindo o volume de areia empregado sem interferir na estabilidade do molde. O molde inferior (*arraste*) foi produzido com altura de aproximadamente 60 mm, enquanto o molde superior (*cope*) apresentou altura de 160 mm, permitindo acomodar adequadamente os massalotes e o sistema de alimentação superior.

Durante a moldagem, foram incorporadas cavidades de posicionamento nos quatro cantos das caixas, garantindo o perfeito alinhamento entre as metades do molde e evitando deslocamentos durante a montagem e o vazamento do metal líquido. Esse sistema assegurou repetibilidade dimensional entre os moldes confeccionados.

A preparação da areia foi realizada utilizando um misturador de mós, equipamento responsável por promover a homogeneização dos componentes do sistema aglomerante. A utilização desse equipamento permitiu uma distribuição uniforme da resina e dos demais aditivos sobre os grãos de areia, proporcionando maior uniformidade nas propriedades mecânicas do molde e reduzindo a ocorrência de regiões com cura insuficiente.

Cada conjunto de moldes consumiu aproximadamente 120 kg de areia, considerando as partes superior e inferior. Após a cura completa, os modelos foram removidos cuidadosamente e os moldes foram inspecionados visualmente, verificando-se a integridade das cavidades, dos canais de alimentação, dos massalotes e dos sistemas de posicionamento antes da etapa de vazamento.

A Figura 12 apresentam, respectivamente, os modelos impressos em 3D, as caixas de moldagem desenvolvidas para o trabalho e os moldes finalizados após a desmoldagem dos modelos.

Figura 12 - Moldes impressos, caixa de moldagem e moldes prontos



Fonte: Elaboração própria (2026)

4.6.1 Moldagem pelo processo Ecolotec

Os três primeiros moldes foram confeccionados pelo processo Ecolotec, utilizando areia sílica aglomerada com resina fenólica e endurecimento por insuflação de

dióxido de carbono (CO_2). Nesse processo foi adotado um teor de aproximadamente 6% de resina, em relação à massa de areia utilizada.

Após a mistura da areia com a resina, o material foi compactado manualmente ao redor dos modelos impressos em 3D, preenchendo completamente as caixas de moldagem. Em seguida, foram confeccionados pequenos canais de passagem distribuídos ao longo do molde, principalmente nas regiões de maior profundidade, permitindo que o gás CO_2 penetrasse uniformemente por toda a massa de areia. A insuflação do gás promoveu a reação de endurecimento da resina, conferindo resistência mecânica suficiente para a retirada dos modelos e posterior montagem do molde.

Para facilitar a extração dos modelos impressos, foi aplicado lycopódio de cálcio sobre suas superfícies antes da moldagem. Esse material atuou como agente desmoldante, reduzindo a aderência entre a areia e o modelo e minimizando danos às paredes da cavidade durante a desmoldagem. Em regiões com maior dificuldade de extração, principalmente em áreas profundas e com elevada complexidade geométrica, foi utilizado grafite em pó como auxiliar de desmoldagem, proporcionando melhor acabamento superficial da cavidade.

4.6.2 Moldagem pelo processo de cura a frio

O quarto conjunto de moldes foi confeccionado utilizando o processo de cura a frio, tecnologia amplamente empregada na fabricação de moldes para fundição de peças de médio e grande porte devido à elevada resistência mecânica obtida sem a necessidade de aquecimento ou insuflação de gases.

Nesse processo foi utilizada uma mistura composta por areia sílica, 5% de resina e 1% de catalisador, proporcionando tempo de trabalho suficiente para a compactação manual da areia e posterior endurecimento do molde à temperatura ambiente. Assim como no processo Ecolotec, a homogeneização dos materiais foi realizada no misturador de mós, assegurando distribuição uniforme dos componentes aglomerantes.

Após a preparação da mistura, a areia foi compactada manualmente nas caixas de moldagem, envolvendo completamente o modelo e o sistema de alimentação. O endurecimento ocorreu naturalmente pela reação química entre a resina e o catalisador, eliminando a necessidade de insuflação de gás e proporcionando elevada estabilidade dimensional ao molde.

4.7 FABRICAÇÃO DA PEÇA FUNDIDA

Após a fabricação e inspeção dos moldes, foi realizada a etapa experimental de fundição da carcaça da caixa de redução. Os vazamentos foram executados em três dias distintos, permitindo acompanhar o comportamento do processo e realizar ajustes operacionais entre cada fabricação.

No primeiro dia foi realizado o vazamento do molde 1, utilizado como etapa inicial de validação do processo. No segundo dia foram fundidos os moldes 2 e 3, enquanto no terceiro dia foi produzido o molde 4, juntamente com os corpos de prova destinados aos ensaios de tração.

A fusão da liga foi realizada em forno elétrico utilizando liga de alumínio-silício preparada a partir da adição de silício metálico ao alumínio base. Para remoção das impurezas superficiais formadas durante a fusão, foi utilizado aproximadamente 200 g de escorificante em cada corrida, promovendo a separação da escória e contribuindo para a obtenção de um metal líquido com menor quantidade de inclusões.

A composição da carga metálica variou ao longo das corridas experimentais. No primeiro vazamento foi utilizado predominantemente alumínio primário, proveniente de chapas e perfis que ainda não haviam sido submetidos a processos anteriores de fusão. Nos segundo e terceiro vazamentos foram empregados lingotes e retornos provenientes de fundições anteriores, enquanto no quarto vazamento a carga foi composta exclusivamente por material reciclado oriundo de peças previamente fundidas. Em todas as corridas foi realizada a adição de silício metálico visando obter composição próxima à liga especificada para o estudo.

Durante a montagem dos moldes, as metades superior e inferior foram unidas utilizando uma cola refratária para machos, aplicada ao longo da superfície de apartação com o objetivo de aumentar a vedação entre as caixas e minimizar a abertura do molde durante o vazamento. Apesar desse procedimento, os moldes 2 e 3 apresentaram abertura parcial da linha de apartação devido à pressão metalostática exercida pelo metal líquido, ocasionando vazamento de metal para o exterior do molde.

Nos dois primeiros vazamentos não foi utilizado filtro cerâmico no sistema de alimentação, devido ao esquecimento do componente durante o primeiro dia de fabricação. A partir do terceiro dia, os moldes passaram a utilizar filtro cerâmico de espuma no canal de alimentação, contribuindo para a retenção de inclusões não metálicas e redução da turbulência durante o enchimento da cavidade.

O tempo de vazamento também apresentou diferenças entre as corridas. No primeiro molde, por se tratar da primeira experiência prática com o sistema desenvolvido, o enchimento foi realizado em aproximadamente 28 s. Após a aquisição de maior familiaridade com o processo, os vazamentos subsequentes foram executados em tempos compreendidos entre 18 e 20 s, proporcionando enchimento mais uniforme e compatível com os parâmetros previamente estabelecidos nas simulações computacionais.

Após o vazamento, todos os moldes permaneceram em repouso até o dia seguinte, permitindo o resfriamento completo da peça no interior da areia antes da desmoldagem. Esse procedimento teve como finalidade minimizar tensões térmicas, reduzir riscos de deformações e evitar danos durante a extração da peça fundida.

A Tabela 1 apresenta os principais parâmetros registrados durante as quatro corridas experimentais.

Tabela 1 - Parâmetros dos vazamentos realizados

Parâmetro	Molde 1	Molde 2	Molde 3	Molde 4
Processo de moldagem	Ecolotec	Ecolotec	Ecolotec	Cura a frio
Temperatura (mV)	25,78	27,92	28,49	27,41
Temperatura aproximada (°C)	625	677	691	664
Massa de metal vazado (g)	13.249	13.137	12.967	11.282
Massa da árvore obtida (g)	10.680	11.200	4.900*	10.780
Silício adicionado (g)	1.002,0	503,0	507,6	305,8
Escorificante (g)	≈200	≈200	≈200	≈200
Utilização de filtro cerâmico	Não	Não	Sim	Sim

Fonte: Elaboração própria (2026)

*O Molde 3 apresentou abertura significativa da linha de apartação, ocasionando grande perda de metal líquido durante o vazamento e impossibilitando a obtenção da peça completa.

Os resultados obtidos durante as corridas experimentais demonstraram a influência das condições operacionais sobre a qualidade da fundição. A utilização do filtro cerâmico, o maior domínio do procedimento de vazamento e os ajustes realizados na montagem dos moldes contribuíram para aumentar a estabilidade do processo ao longo da execução dos experimentos. Por outro lado, as ocorrências de abertura da linha de apartação evidenciaram a necessidade de aprimoramento do sistema de fechamento das caixas de moldagem, principalmente em processos de vazamento manual com elevada coluna metalostática.

A figura 13 apresenta as arvores de fundição após a quebra do molde de areia, da primeira para a última, respectivamente.

Figura 13 - Arvore de fundição das peças



Fonte: Elaboração própria (2026)

4.8 INSPEÇÃO DAS PEÇAS FUNDIDAS

Após o resfriamento completo dos moldes, as peças foram desmoldadas e submetidas a uma inspeção visual inicial, com o objetivo de avaliar a integridade do fundido, o preenchimento da cavidade, a qualidade superficial e a presença de defeitos provenientes do processo de fundição.

As peças obtidas nos moldes 1 e 4 apresentaram preenchimento completo da cavidade e bom acabamento superficial, evidenciando que o sistema de alimentação desenvolvido e os parâmetros adotados durante o vazamento foram capazes de produzir peças compatíveis com as características previstas nas simulações computacionais. Em contrapartida, a peça produzida no molde 2 apresentou acabamento superficial ligeiramente mais rugoso. Esse comportamento pode estar associado às condições de

moldagem, ao vazamento pela linha de apartação ocorrido durante o enchimento ou às características do próprio processo de cura da areia.

Em função da abertura significativa da linha de apartação durante o vazamento do molde 3, grande parte do metal líquido foi perdida para o exterior do molde, impossibilitando a obtenção da peça completa. Dessa forma, essa corrida experimental foi considerada apenas para avaliação do comportamento do processo, não sendo utilizada nas etapas posteriores de caracterização.

Com o objetivo de validar os resultados obtidos nas simulações de solidificação realizadas no *Altair Inspire Cast*, a peça produzida no molde 2 foi seccionada transversalmente na região correspondente aos alojamentos dos rolamentos, considerada a região de maior módulo térmico da carcaça e, conseqüentemente, a mais suscetível à formação de porosidades por contração.

A inspeção da seção revelou ausência de rechupes internos e porosidades significativas na região analisada, indicando que o sistema de alimentação térmica projetado foi eficiente em promover a alimentação durante a solidificação. Esse resultado apresentou excelente concordância com as simulações computacionais, que já indicavam alimentação adequada dessa região pelos dois massalotes centrais.

Além da avaliação qualitativa dos defeitos internos, foram realizadas medições dimensionais na peça fundida com o objetivo de verificar a contração obtida durante o processo de fabricação. Para o desenvolvimento do modelo foi adotado um fator de contração linear de 1,3%, enquanto as medições realizadas na peça indicaram contração média próxima de 1,0%.

Embora tenha sido observada uma pequena diferença entre o valor adotado no projeto e o valor medido experimentalmente, essa variação foi considerada satisfatória, uma vez que permaneceu dentro da margem prevista pelos sobremetais de usinagem incorporados ao modelo. Dessa forma, a diferença observada não compromete a posterior usinagem da peça nem sua montagem no conjunto mecânico, confirmando a adequação do fator de contração utilizado durante o desenvolvimento do modelo de fundição.

Os resultados obtidos nesta etapa demonstraram que o processo desenvolvido foi capaz de produzir peças estruturalmente íntegras e com dimensional compatíveis com os requisitos estabelecidos para a fabricação da carcaça da caixa de redução.

4.9 ENSAIOS E CARACTERIZAÇÃO

Após a inspeção visual das peças fundidas, foram iniciadas as etapas de caracterização experimental da liga produzida, compreendendo ensaios de dureza, metalografia e resistência à tração. Esses ensaios tiveram como finalidade verificar se as propriedades obtidas experimentalmente são compatíveis com aquelas esperadas para a liga Al-9%Si (AlSi9) e avaliar a qualidade metalúrgica das peças produzidas.

Para evitar danos às peças consideradas aptas para utilização, as amostras destinadas aos ensaios de dureza e metalografia foram retiradas dos canais de ataque do sistema de alimentação. A remoção foi realizada sempre na mesma posição em todas as peças, garantindo uniformidade das amostras e possibilitando comparação direta entre os resultados obtidos.

4.9.1 Ensaio de dureza

O ensaio de dureza foi realizado utilizando um durômetro universal da marca Pantek, modelo RASM-RS, empregando-se o método *Brinell* (HB), conforme os parâmetros recomendados para ligas de alumínio. Foi adotada a escala de medição correspondente ao material ensaiado, utilizando esfera de diâmetro e carga compatíveis com a faixa de dureza esperada para a liga fundida. Em cada amostra foram realizadas três indentações em regiões distintas, de forma a avaliar a uniformidade das propriedades mecânicas e minimizar a influência de heterogeneidades microestruturais. Ao final, foi calculada a média aritmética dos valores obtidos, sendo este o resultado representativo da dureza de cada amostra, conforme descrito na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados do ensaio de dureza.

Amostra	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Média
Amostra 1 (HB)	69	71	65	68,33
Amostra 2 (HB)	58	50	67	58,33
Amostra 3 (HB)	56	68	70	68,66
Amostra 4 (HB)	68	68	70	68,66

Fonte: Elaboração própria (2026)

Os resultados obtidos nos ensaios mecânicos foram comparados com os valores de referência encontrados na literatura para ligas de alumínio AlSi9 produzidas por fundição. Foram consideradas, principalmente, as propriedades de resistência à tração, limite de escoamento, alongamento e dureza, por serem os parâmetros mais utilizados na avaliação do desempenho mecânico desse tipo de liga.

A Tabela 3 apresenta uma comparação entre a literatura e os resultados obtidos

Tabela 3 - Comparativo da dureza - literatura x resultados obtidos

Propriedade	Literatura (AlSi9)	Resultado obtido
Dureza (HB)	52-59	58,33 - 68,66

Fonte: Elaboração própria (2026)

4.9.2 Ensaio metalográfico

As amostras destinadas à análise metalográfica foram retiradas dos canais de ataque do sistema de alimentação, sempre na mesma posição em todas as peças fundidas, de modo a preservar a integridade das carcaças aprovadas e garantir a padronização das regiões analisadas. Após a extração, as amostras foram embutidas em resina para facilitar seu manuseio durante a preparação metalográfica e assegurar a estabilidade durante as etapas de lixamento e polimento.

A preparação metalográfica foi realizada por meio de lixamento sequencial utilizando lixas de carvão de silício nas granulometrias 150, 240, 320, 600 e 1200, promovendo a remoção progressiva dos riscos provenientes da etapa anterior e proporcionando uma superfície plana e uniforme. Posteriormente, as amostras foram submetidas ao polimento mecânico em pano apropriado utilizando pasta de diamante, até a obtenção de acabamento superficial espelhado, condição indispensável para a correta observação da microestrutura.

Após o polimento, as superfícies foram submetidas ao ataque químico com o reagente de Keller, composto por água destilada, ácido nítrico, ácido clorídrico e ácido fluorídrico. As amostras permaneceram em contato com o reagente por 15 segundos, tempo suficiente para a adequada revelação da microestrutura da liga. Em seguida, foram

imediatamente lavadas em água corrente, higienizadas com álcool e secas, interrompendo a ação do reagente e preservando a superfície atacada.

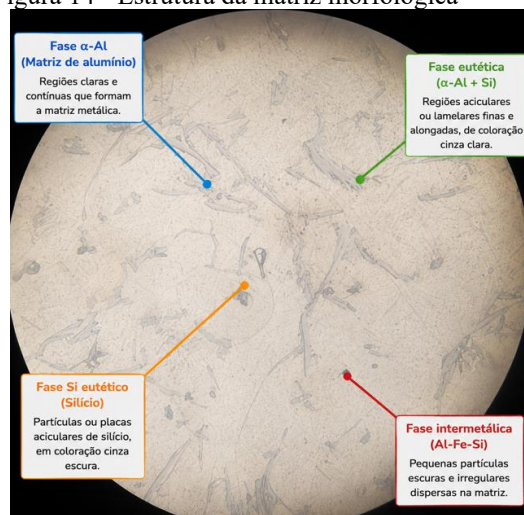
As observações metalográficas foram realizadas em microscópio óptico equipado com objetiva Plan PL 40/0,65 – 160/0, correspondente a uma objetiva de 40x. Considerando a ocular de 10x, as micrografias apresentadas correspondem a uma ampliação total aproximada de 400x.

As análises tiveram como objetivo identificar a morfologia da matriz de alumínio (fase α -Al), a distribuição do eutético alumínio-silício, a presença de partículas intermetálicas, inclusões não metálicas e outras discontinuidades provenientes do processo de fundição.

As micrografias obtidas, apresentadas no Apêndice H evidenciaram uma microestrutura característica de ligas Al-Si fundidas em molde de areia, composta por uma matriz de alumínio envolvendo regiões eutéticas distribuídas de forma relativamente homogênea. Também foram observadas partículas alongadas, atribuídas à presença de compostos intermetálicos ricos em ferro, compatíveis com a utilização de material de retorno na composição da carga metálica.

A Imagem 14 apresenta a distribuição da matriz morfológica visualizada neste ensaio.

Figura 14 - Estrutura da matriz morfológica



Fonte: Elaboração própria (2026)

4.9.3 Ensaio de tração

Para a determinação das propriedades mecânicas da liga AlSi9 produzida neste trabalho, foram confeccionados seis corpos de prova destinados ao ensaio de tração. Devido à capacidade limitada do cadinho utilizado na fusão, todo o metal líquido das corridas experimentais foi empregado na fabricação das carcaças, impossibilitando a retirada de amostras diretamente dos vazamentos. Assim, os corpos de prova foram produzidos em uma corrida de fusão independente, utilizando a mesma composição química da liga e os mesmos parâmetros de fusão, vazamento e moldagem empregados na fabricação das carcaças, buscando garantir representatividade dos resultados.

Após a solidificação, os corpos de prova foram usinados conforme as dimensões estabelecidas pela ABNT NBR 7549. Durante a inspeção dimensional, verificou-se que um dos corpos de prova apresentava não conformidade decorrente da usinagem, sendo descartado. Dessa forma, os ensaios foram realizados em cinco amostras.

O método de ensaio seguiu os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR ISO 6892-1 para ensaios de tração em materiais metálicos à temperatura ambiente. Os corpos de prova foram submetidos a carregamento uniaxial crescente até a ruptura em uma máquina universal de ensaios eletromecânica EMIC, equipada com sistema computadorizado para aquisição contínua dos dados de força e deslocamento. A partir dos valores registrados foram obtidas as curvas tensão $\times$ deformação de engenharia, permitindo determinar o limite de resistência à tração, o limite de escoamento (quando identificado), o módulo de elasticidade e o alongamento na ruptura.

Os valores obtidos para cada corpo de prova foram analisados individualmente e posteriormente comparados entre si, sendo calculados os valores médios das propriedades mecânicas para representar o comportamento da liga produzida. Os resultados também foram confrontados com valores reportados na literatura para ligas AlSi9 fundidas, permitindo avaliar a influência das condições de fabricação adotadas neste trabalho.

Os resultados obtidos para a resistência à tração e o alongamento estão apresentados na Tabela 4. Observou-se que os valores de resistência apresentaram pequena dispersão entre as amostras, comportamento esperado para ligas fundidas em molde de areia, em função das variações microestruturais inerentes ao processo de solidificação.

Com relação ao alongamento, apenas dois corpos de prova apresentaram ruptura dentro da região útil de medição (comprimento calibrado), possibilitando a determinação

desse parâmetro. Nos demais ensaios, a fratura ocorreu fora da região útil de medição especificada pela norma, impossibilitando a obtenção de valores representativos de alongamento. Dessa forma, esses resultados não foram considerados para a avaliação dessa propriedade mecânica.

Tabela 4 - Resultados ensaio de tração

Modelo	Diâmetro (mm)	L0 (mm)	LF (mm)	Seção Transv. (mm²)	Tensão Máxima (MPa)	Along. Ruptura (%)	Força Máxima (kgf)
CP 1	12,43	50	50	121,35	158,61	0	1962,7
CP 2	12,47	50	50	122,13	169,5	0	2110,94
CP 3	12,47	50	50	122,13	166,49	0	2073,39
CP 4	12,47	50	50,6	122,13	196,8	1,2	2450,9
CP 5	12,44	50	51	121,54	187,6	2	2325,06

Fonte: Elaboração própria (2026)

Os resultados experimentais foram comparados com os valores encontrados na literatura para ligas de alumínio-silício de composição equivalente à AlSi9, permitindo avaliar a qualidade metalúrgica do material produzido e verificar sua adequação para aplicação na carcaça da caixa de redução. Além disso, os resultados foram correlacionados com as análises metalográficas, os ensaios de dureza e as simulações computacionais, proporcionando uma avaliação integrada da influência do processo de fundição sobre o comportamento mecânico da liga.

A Tabela 5 apresenta a comparação entre literatura e resultados obtidos na prática

Tabela 5 - Comparativo da tensão máxima - literatura x resultados obtidos

Propriedade	Literatura (AlSi9)	Resultado obtido
Tensão Máxima (MPa)	145–212	158,61 - 196,8

Fonte: Elaboração própria (2026)

4.10 SIMULAÇÃO ESTRUTURAL

Com o objetivo de avaliar o comportamento mecânico da carcaça desenvolvida para fundição e compará-la com a geometria originalmente fabricada por usinagem, foi realizada uma análise estrutural utilizando o software *Altair Inspire*, que emprega o Método dos Elementos Finitos (FEM) para a determinação das tensões, deformações e deslocamentos em componentes mecânicos submetidos a carregamentos.

Inicialmente, foram importados para o ambiente de simulação os modelos tridimensionais da carcaça usinada e da carcaça desenvolvida para fundição, ambos elaborados em *software* CAD. Antes da realização das análises, foi efetuada a conferência das geometrias, eliminando pequenas descontinuidades e verificando a integridade dos sólidos, garantindo que os modelos estivessem aptos para a geração da malha de elementos finitos.

Em seguida, foram atribuídas as propriedades mecânicas do material correspondente a cada configuração. Para a carcaça fundida foram consideradas as propriedades da liga de alumínio Al-9%Si, enquanto para a carcaça usinada foram adotadas as propriedades do material originalmente empregado na fabricação do componente (6061 T6). Essas propriedades incluíram o módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, densidade e limite de escoamento, parâmetros necessários para a execução da análise estrutural linear.

As condições de contorno foram definidas de forma a representar as condições reais de funcionamento da caixa de redução do veículo Baja SAE. Foram restringidos os graus de liberdade nas regiões correspondentes aos pontos de fixação da carcaça ao conjunto estrutural do veículo e aplicados os carregamentos provenientes do funcionamento da transmissão, simulando os esforços transmitidos pelos eixos e rolamentos durante a operação.

Após a definição dos materiais e das condições de contorno, foi realizada a discretização das geometrias por meio da geração automática da malha de elementos finitos disponibilizada pelo *Altair Inspire*. O refinamento da malha concentrou-se principalmente nas regiões com mudanças bruscas de geometria, alojamentos dos rolamentos, furos de fixação e regiões de concordância, locais onde normalmente ocorrem maiores concentrações de tensões.

As análises estruturais, ilustradas no Apêndice D foram conduzidas considerando comportamento elástico linear dos materiais, sendo avaliados os campos de tensão

equivalente de von Mises, deslocamentos totais, deformações e fator de segurança. Esses parâmetros permitiram comparar o desempenho estrutural das duas configurações de carcaça e verificar a influência das modificações geométricas introduzidas para adequação ao processo de fundição.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho atingiu o objetivo proposto de analisar a viabilidade da substituição da carcaça usinada da caixa de redução do veículo Baja SAE por uma carcaça fundida em liga de alumínio AlSi9. A integração entre modelagem CAD, simulações computacionais de fundição e análise estrutural, aliada à fabricação de protótipos e à validação experimental, permitiu avaliar de forma abrangente os aspectos metalúrgicos, mecânicos e produtivos envolvidos na substituição do processo de fabricação.

Os resultados obtidos demonstraram que as adaptações geométricas realizadas na carcaça atenderam às exigências do processo de fundição sem comprometer sua funcionalidade. As simulações computacionais mostraram-se fundamentais para o desenvolvimento do sistema de alimentação, permitindo prever regiões críticas de solidificação, orientar as modificações geométricas e reduzir a necessidade de retrabalho durante a fabricação dos protótipos. A boa concordância entre os resultados previstos nas simulações e aqueles observados experimentalmente confirmou a confiabilidade da metodologia empregada.

Os ensaios metalográficos, de dureza e de tração evidenciaram que a liga produzida apresentou características compatíveis com aquelas reportadas na literatura para ligas AlSi9 fundidas, indicando que o processo de fabricação adotado foi capaz de produzir componentes com qualidade metalúrgica e propriedades mecânicas adequadas para a aplicação proposta. Da mesma forma, a análise estrutural demonstrou que a carcaça fundida apresenta desempenho mecânico compatível com os requisitos da caixa de redução do veículo Baja SAE, validando sua utilização sob o ponto de vista estrutural.

Sob o aspecto produtivo, o estudo demonstrou que a fundição representa uma alternativa tecnicamente mais eficiente do que a fabricação integral por usinagem, reduzindo significativamente o desperdício de matéria-prima, o tempo de usinagem e os custos associados ao processo produtivo. Além disso, a utilização de ferramentas de engenharia assistida por computador mostrou-se essencial para otimizar o desenvolvimento do componente, reduzindo a necessidade de correções durante a fabricação e aumentando a confiabilidade do projeto.

Conclui-se, portanto, que a substituição da carcaça usinada por uma carcaça fundida em liga AlSi9 constitui uma solução tecnicamente viável para aplicação em veículos Baja SAE, apresentando potencial para utilização em projetos futuros que

busquem maior eficiência produtiva, redução de custos e racionalização do uso de matéria-prima.

Como continuidade deste trabalho, recomenda-se a realização de ensaios de fadiga, testes em serviço no veículo Baja SAE, avaliação do comportamento sob carregamentos dinâmicos e estudos envolvendo tratamentos térmicos e otimização da composição química da liga, ampliando a validação experimental da solução desenvolvida.

REFERÊNCIAS

A NOVEL GEARBOX STRENGTH CHECK METHOD BY FINITE ELEMENT ANALYSIS. Tehnički Vjesnik, 2023.

ADVANCED METHOD OF INCLUDING HOUSING STIFFNESS INTO CALCULATION OF GEAR SYSTEMS. Forschung im Ingenieurwesen, v. 86, p. 241-248, 2022.

ALTAIR. **Altair Inspire Cast – User Guide.** Altair Engineering Inc., 2023.
Disponível em: <https://altair.com/inspire-cast>. Acesso em: 04 out. 2025.

ALTAIR ENGINEERING. **Altair Inspire User Guide – Structural and Casting Analysis Modules.** Troy: Altair, 2023. p. 12–34.

BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Shigley’s Mechanical Engineering Design.** 12th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2020.

BÜHLER, Martin; LOPEZ, Juan; TIEDJE, Niels. **Recent advances in casting process optimization.** Journal of Manufacturing Processes, v. 68, p. 41-52, 2021.

CALLISTER, WD; RETHWISCH, DG **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução.** 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020.

CAMPBELL, John. **Complete Casting Handbook.** 3. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2021. p. 18; p. 83.

CAMPBELL, John. **Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Metallurgy, Techniques and Design.** 2. ed. Oxford: Elsevier, 2015.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica: Processos de Fabricação e Tratamento.** 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2021.

CHILDS, Trevor H. C. **Metal Machining: Theory and Applications.** 2. ed. Cambridge: CRC Press, 2021. p. 72.

COSTA, D. F.; DENKENA, B. **Comparative analysis of manufacturing processes for mechanical components: replacing machining with aluminum additive manufacturing for automotive applications.** Brazilian Journal of Mechanical and Materials Engineering, vol. 2, p. 68–75, 2022.

DONG, S.; LI, S.; FU, S.; WANG, K. **Finite Element Analysis and Optimization of Tractor Gearbox Body under Various Kinds of Working Conditions.** Scientific Reports, v. 12, art. 17386, 2022.

EDOZIUNO, F. O. et al. **Experimental analysis and response surface optimization of ZA alloy components under elevated temperature service.** Materials Today: Proceedings, v. 61, p. 1644-1651, 2023.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais.** 2. ed. São Paulo: Blucher, 2022.

- GRILO, J.; CARNEIRO, V. H.; TEIXEIRA, J. C.; PUGA, H. **Manufacturing Methodology on Casting-Based Aluminium Matrix Composites: Systematic Review.** *Metals*, v. 11, n. 3, 436, 2021.
- GROOVER, Mikell P. **Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems.** 7. ed. Hoboken: Wiley, 2021. p. 240.
- INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY. **Review of improvement of machinability and surface integrity in machining on aluminum alloys.** 2023.
- JARFORS, A. E. W. **A Comparison Between Semisolid Casting Methods for Aluminium Alloys.** *Metals*, v. 10, n. 10, 1368, 2020.
- JIANG, Y.; WANG, H.; ZHOU, F. **Numerical Simulation of Aluminum Alloy Casting Process and Defect Prediction.** *Journal of Manufacturing Processes*, v. 68, p. 208–215, 2021.
- JIANG, J.; et al. **Numerical Simulation and Experimental Validation of Squeeze Casting Process for AlSi9Mg Aluminum Alloy Flywheel Housing Component.** *Metals*, v. 12, n. 7, 2022.
- JUVINALL, R. C.; MARSHEK, K. M. **Fundamentals of Machine Component Design.** 7. ed. Hoboken: Wiley, 2021.
- KALPAKJIAN, S.; SCHMID, SR. **Engenharia e Tecnologia de Manufatura.** 8^a ed. Boston: Pearson, 2020.
- KIM, B.-S.; HAN, H.-W.; CHUNG, W.-J.; PARK, Y.-J. **Optimization of Gearbox Housing Shape for Agricultural UTV using Structural-Acoustic Coupled Analysis.** *Scientific Reports*, 2024
- KLOCKE, Fritz. **Manufacturing Processes 1: Cutting.** 2. ed. Cham: Springer, 2020. p. 17.
- KHAN, M. S. et al. **Investigations of the Cold Box Core Curing Stage Using an Advanced Gas Flow Analysis.** *International Journal of Metalcasting (Springer)*, 2024.
- KONG, L.; et al. **Numerical simulation of liquid aluminum leakage in casting.** *Journal of Materials Processing Technology*, v. 296, p. 104–112, 2021.
- KUMAR, A.; SRINIVASAN, R.; JOSHI, P. **Design and Analysis of Gear Reduction Systems for Automotive Applications.** *International Journal of Mechanical Engineering*, v. 15, n. 3, p. 20–30, 2022.
- KUMAR, R.; JOSHI, P. **Lightweight Design of Aluminum Gearbox Housings Using Finite Element Analysis.** *Materials Today: Proceedings*, v. 62, p. 1871–1878, 2022.
- LEHMHUS, D. et al. **Advances in Metal Casting Technology: A Review of State-of-the-Art and Recent Trends.** *Metals*, v. 14, n. 3, p. 334, 2024.

- NORTON, R. L. **Machine Design: An Integrated Approach**. 7. ed. Boston: Pearson, 2021.
- NORTON, R. L.; SUNDARARAJAN, V. **Machine Design: An Integrated Approach with Computational Methods**. 6th ed. Boston: Pearson, 2021.
- PIĄTKOWSKI, J. et al. **The Influence of Iron Content on the Porosity of AlSi9 Alloy Castings**. *Materials (MDPI)*, v. 17, n. 21, p. 5181, 2024.
- QUIGLEY, Jon. **Off-Road Competition Forges Next Generation of Automotive Engineers**. Assembly, 2024.
- RAISE. **Modelling and Analysis of Parallel Gearbox Shaft Housing**. In: **Recent Advances in Industrial and Systems Engineering (RAISE 2023)**. Singapore: Springer, 2024. p. 347–358.
- RAVI. B. **Metal Casting: Principles and Practice**. 2. ed. New Delhi: PHI Learning, 2020. p. 26.
- ROSSI, G.; FERREIRA, L.; CAMPOS, D. **Application of Finite Element Simulation in Lightweight Automotive Structures**. *International Journal of Mechanical Design and Engineering*, v. 14, n. 2, p. 95–104, 2022.
- SAE INTERNATIONAL. **About SAE Baja Events**. In: *Baja SAE Series*, 2025.
- SAMUEL, A. U, et al. **Effect of Machining of Aluminium Alloys with Emphasis on Aluminium 6061 Alloy – A Review**. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 1107, p. 012157, 2021.
- SADEGHIAN, H. **From prototyping to functional parts: A review of process progression in manufacturing**. *Rapid Prototyping Journal*, 2024.
- SHINDE, S.; MANNARU, V. K.
SHINDE, Swapnil; MANNARU, Vinod Kumar. **As-Manufactured Part Performance: Impact of Residual Stresses**. *SAE Technical Paper* 2023-28-1349, 2023. DOI: 10.4271/2023-28-1349
- SHIGLEY, JE; MISCHKE, CR; BUDYNAS, RG **Projeto de Engenharia Mecânica**. 10. ed. Porto Alegre: AMGH, 2020.
- SILVA, M.; LIMA, P.; FONSECA, T. **Computational Simulation in Mechanical Design: Trends and Applications**. *Revista Brasileira de Engenharia Mecânica e Materiais*, v. 9, n. 1, p. 40–52, 2023.
- SINGH, A.; WADHWA, M.; KAPOOR, R.; YADAV, R. **Design and Optimization of a Lightweight Gear Reduction System for Off-Road Vehicles (Baja SAE)**. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, v. 20, n. 2, p. 987–998, 2023.
- YU, S. J.; et al. **Heterogeneous microstructure and mechanical behaviour of as-cast Al–Si alloy components: Effects of processing parameters**. *Materials & Design*, v. 230, art. 113150, 2023.

WECKENBORG, C.; KIECKHÄFER, K.; VOLLING, T.; SPENGLER, T. S.
Flexibilidade no projeto de sistemas de manufatura: uma revisão de abordagens recentes sob a perspectiva da Pesquisa Operacional. *European Journal of Operational Research*, v. 315, n. 2, p. 415-439, 2024.

ZHANG, Z. et al.

ZHANG, Zonghao et al. **Optimization of residual stress in low-pressure casting of ZL205A alloys.** *Journal of Manufacturing Processes*, v. 99, p. 338–350, 2023.

APÊNDICE A – FÓRMULAS

1 - Cálculo da contração da liga.

$$Lm = Lp(1 + C)$$

Onde:

Lm = dimensão do modelo (mm)

Lp = dimensão da peça acabada (mm)

C = contração linear

2 - Tempo de enchimento.

$$t = \frac{m}{Q}$$

Onde:

t = tempo de enchimento (s)

m = massa de metal (kg)

Q = vazão metálica (kg/s)

3 - Área do estrangulamento (choke)

$$A = \frac{Q}{v}$$

Onde:

A = área (mm²)

Q = vazão volumétrica

v = velocidade do metal

4 - Sistema de canais

Relação (sistema não pressurizado)

$$1:2:2$$

Área do canal distribuidor

$$Ar = 2A_d$$

Onde:

A_d = Área do canal de descida

Área total dos ataques

$$A_g = 2A_d$$

Área de cada ataque

$$A_{ataque} = 2A_g$$

5 - Canal circular

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

Onde:

D = diâmetro do canal

6 - Velocidade de vazamento

$$v = 2gh$$

Onde:

g = aceleração da gravidade (m/s²)

h = Altura metalostática (m)

7 - Módulo térmico

$$M = \frac{V}{A}$$

Onde:

M = módulo térmico

V = volume

A = área superficial

8 - Dimensionamento dos massalotes

Módulo do Massalote

$$M_r = 1,3M_p$$

Onde:

M_p = Módulo da região da peça alimentada pelo massalote

9 - Rendimento metálico

$$R = \frac{m_p}{m_t} * 100$$

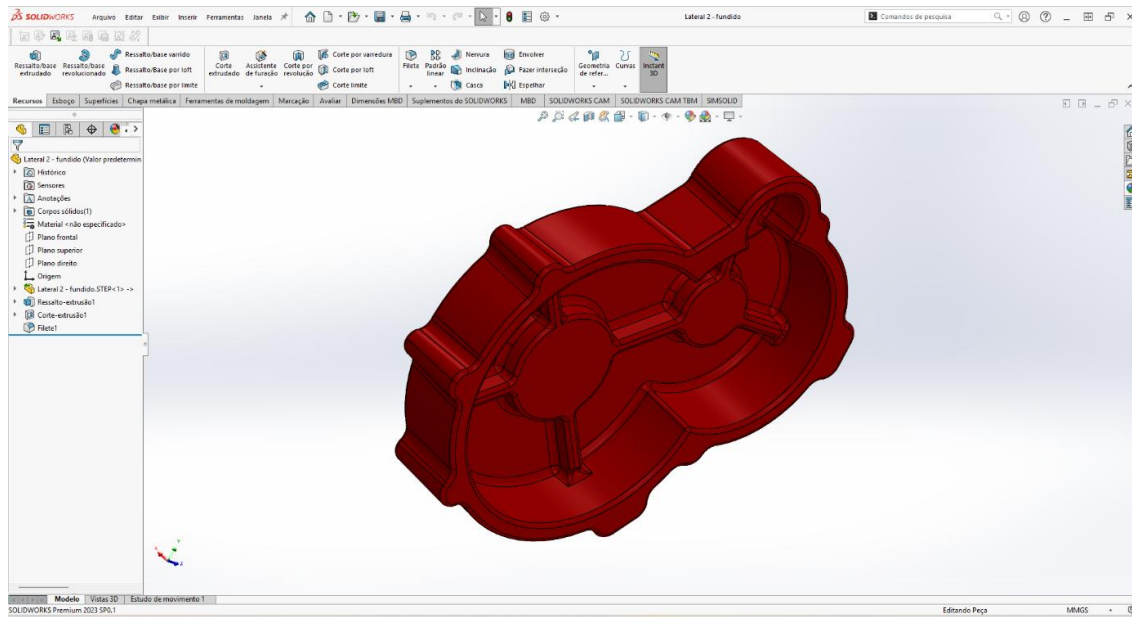
Onde:

m_p = Massa da peça

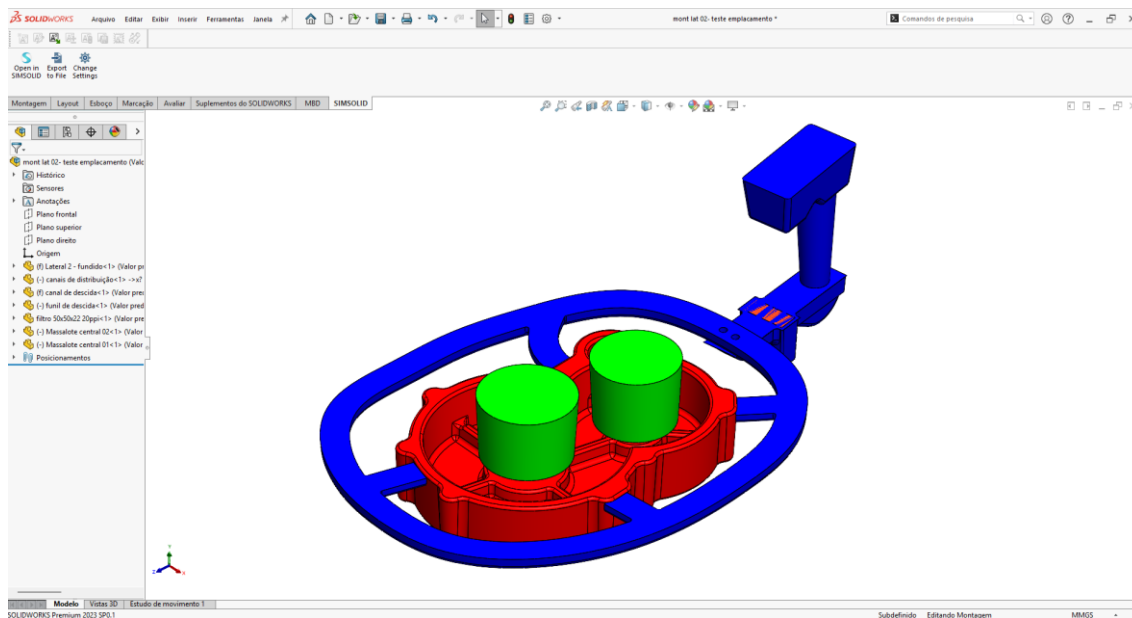
m_t = massa total vazada

APÊNDICE B – IMAGENS DIMENSIONAMENTO DOS COMPONENTES

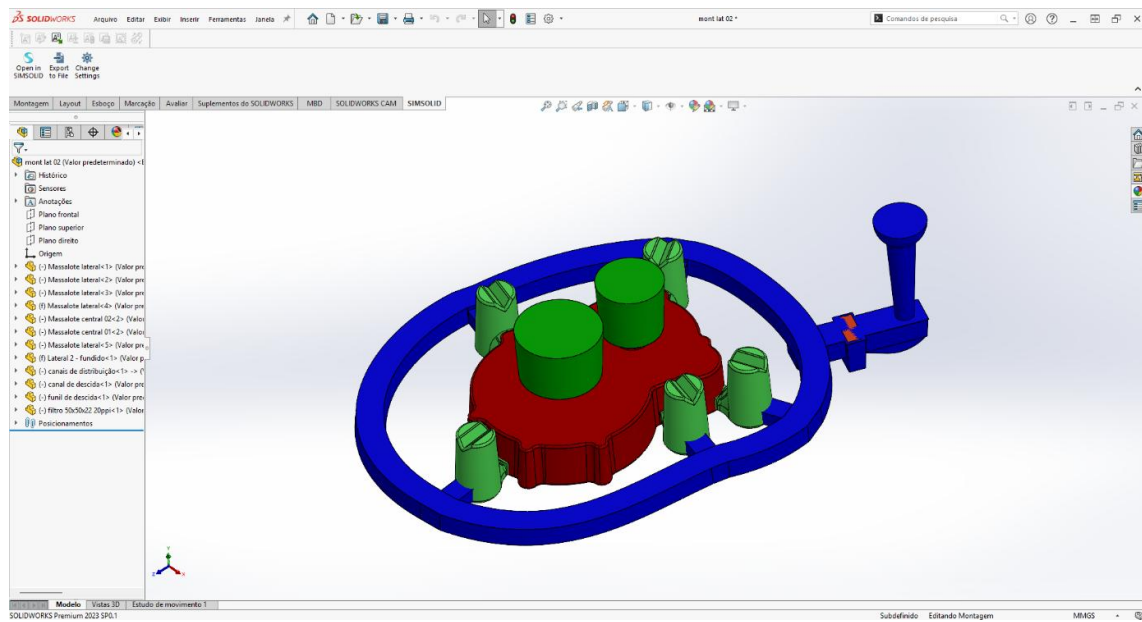
|Otimização da peça para o processo de fundição



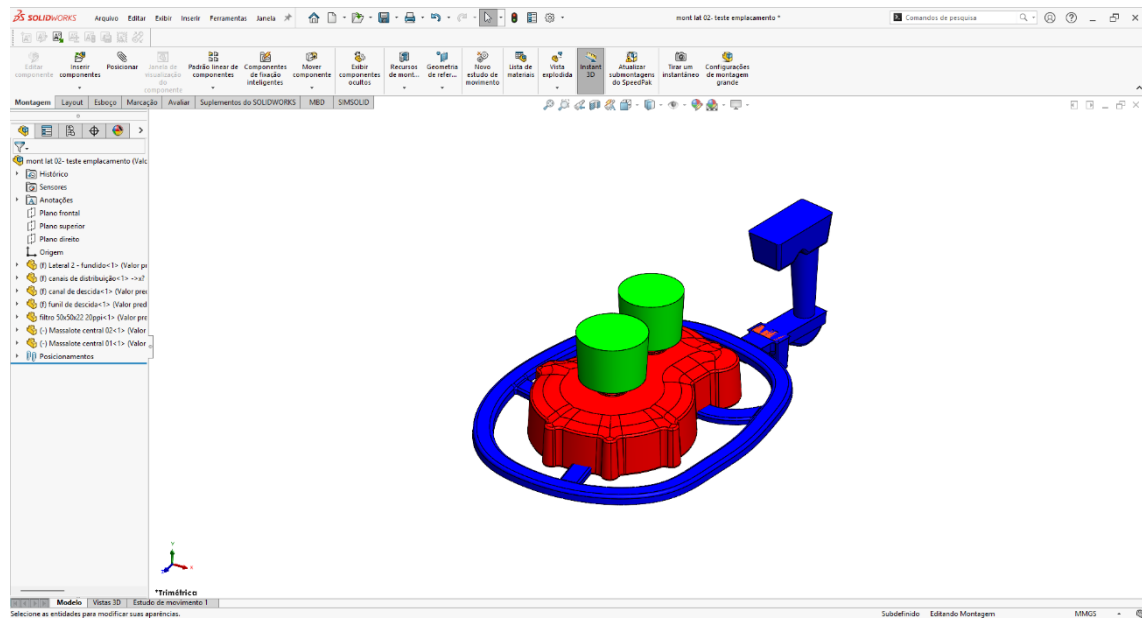
Primeira configuração de árvore de fundição



Primeira configuração de árvore de fundição



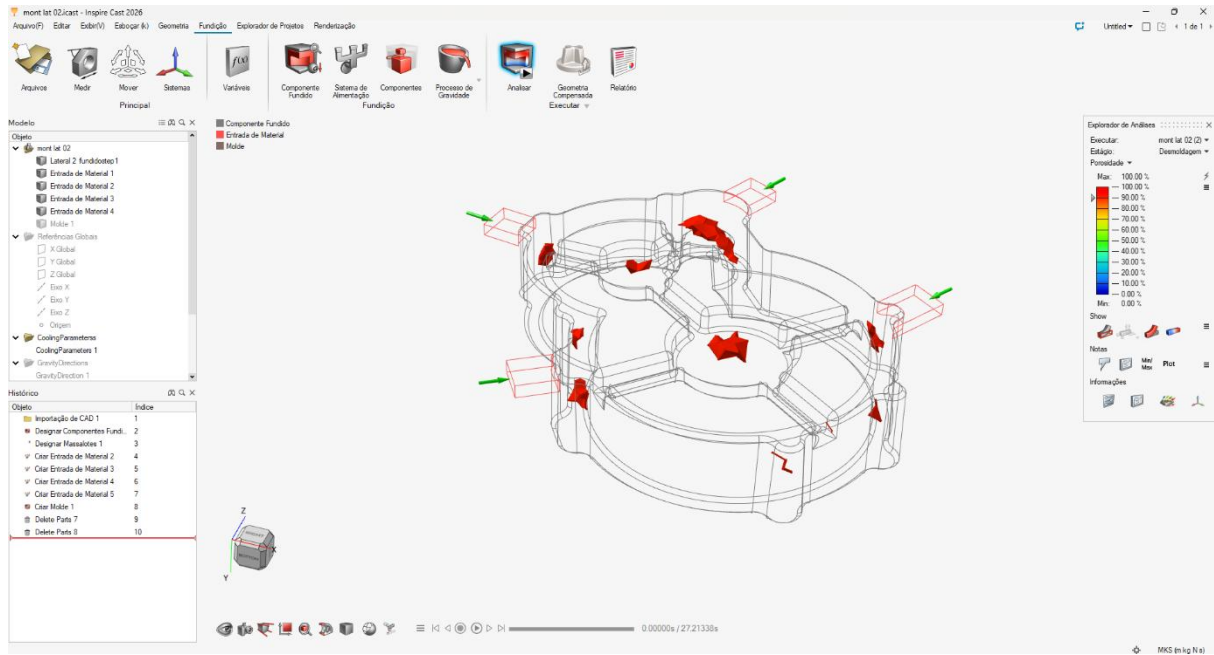
Configuração final da árvore de fundição



APÊNDICE C – IMAGENS DE SIMULAÇÕES – *ALTAIR INSPIRE CAST*

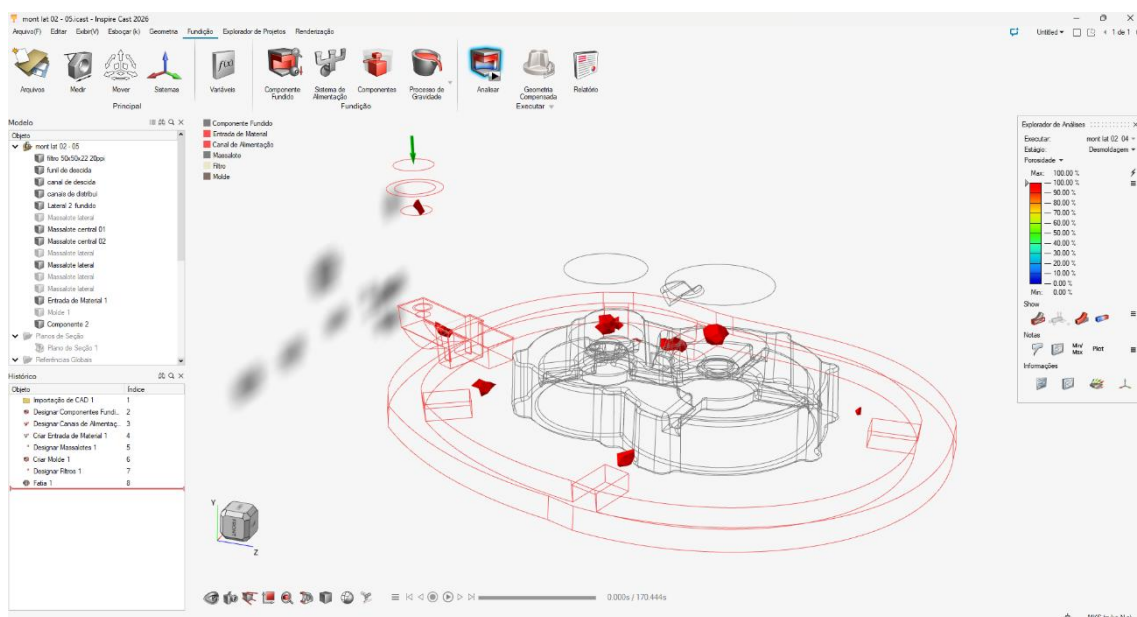
Simulação da peça isolada:

Porosidades

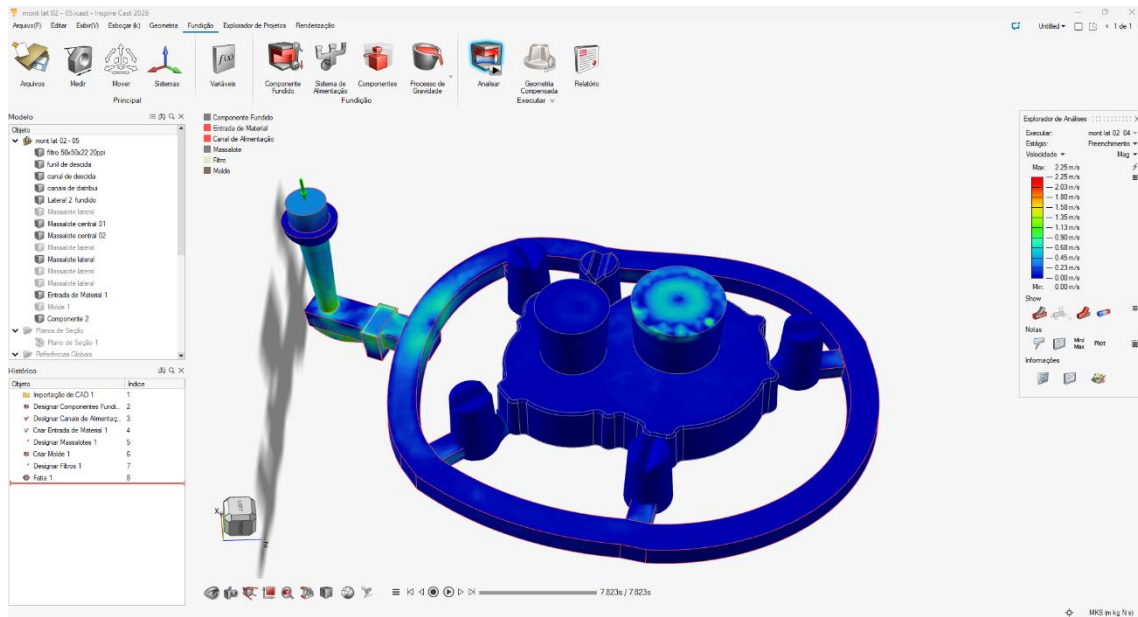


Simulação da árvore de fundição: Primeira configuração

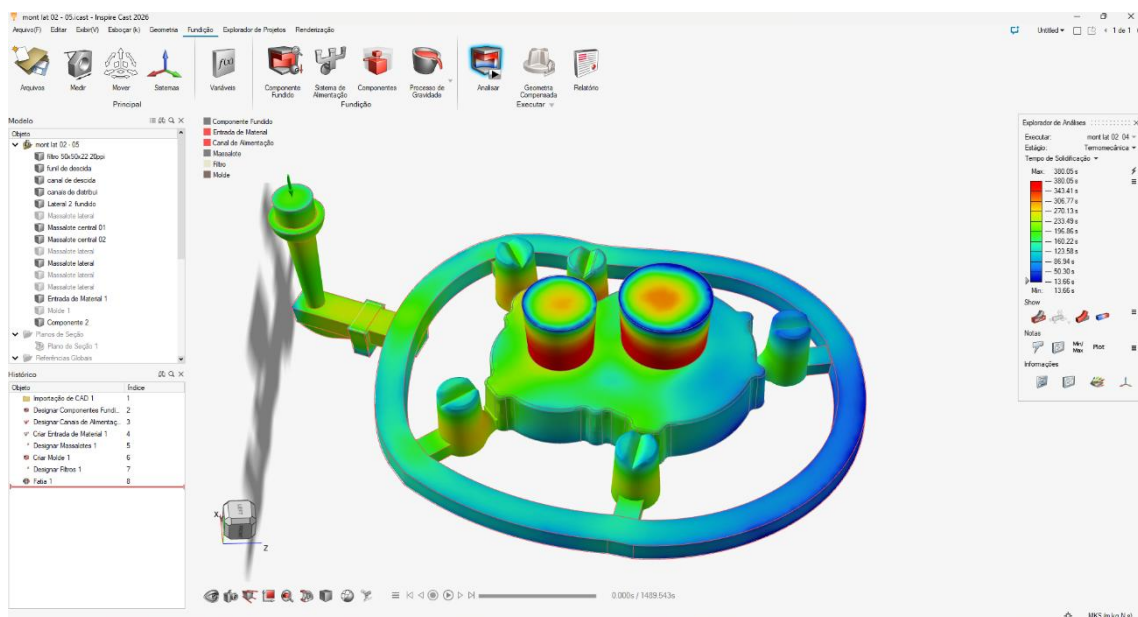
Porosidade



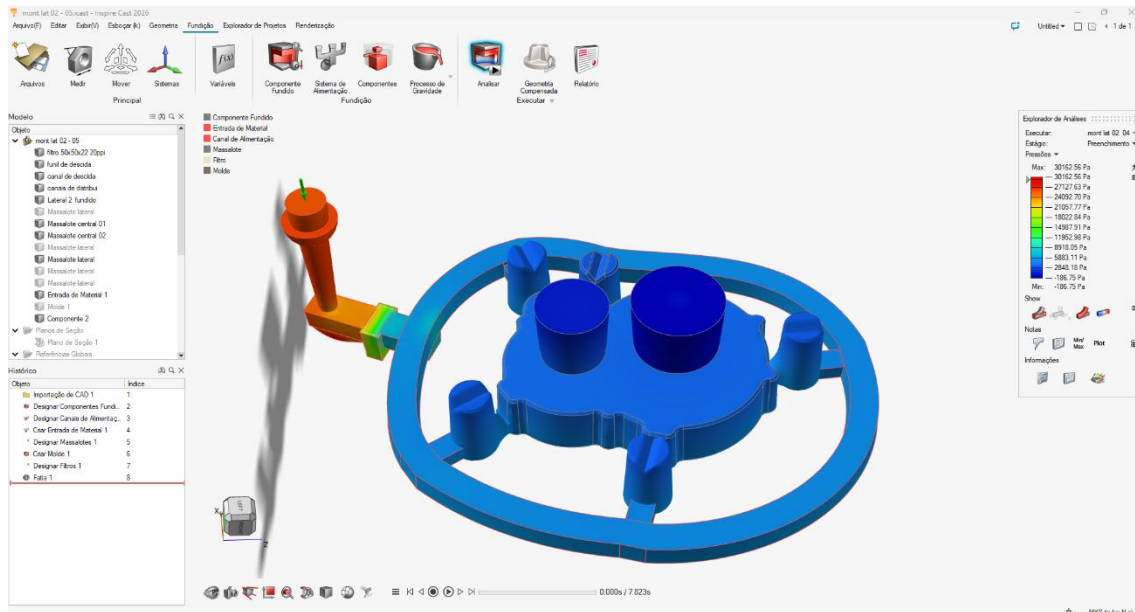
Velocidade do fluido



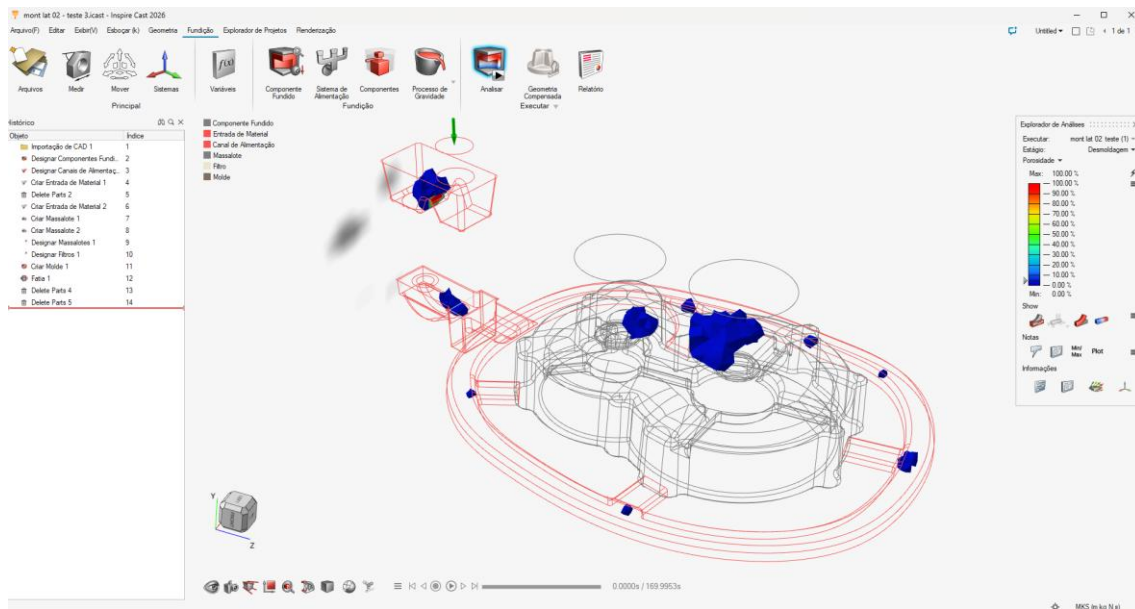
Tempo de solidificação



Pressões internas

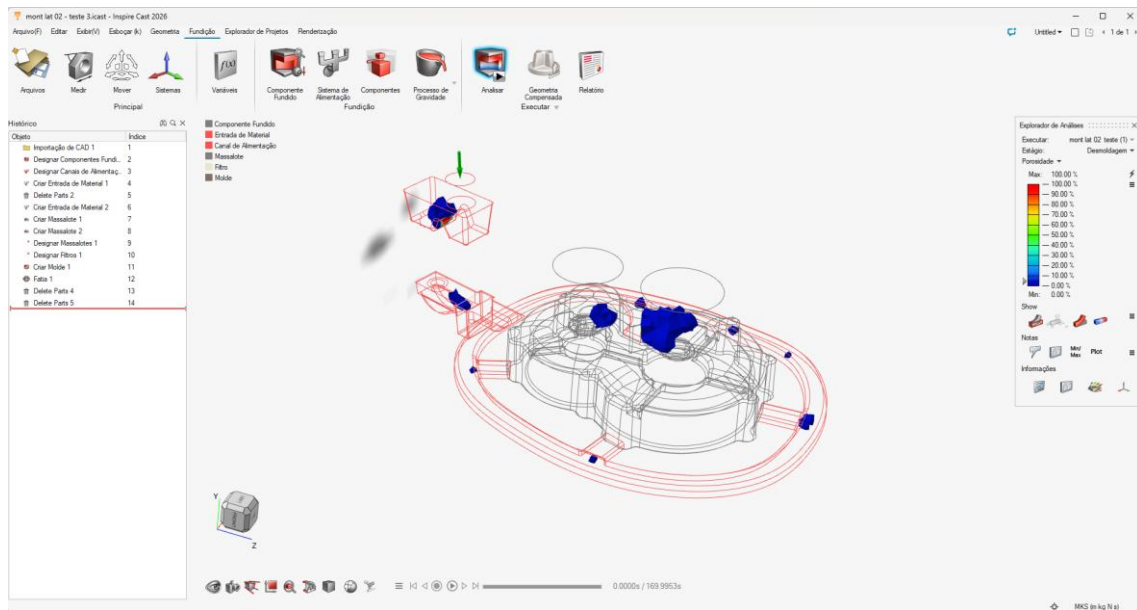


Porosidade – 5%

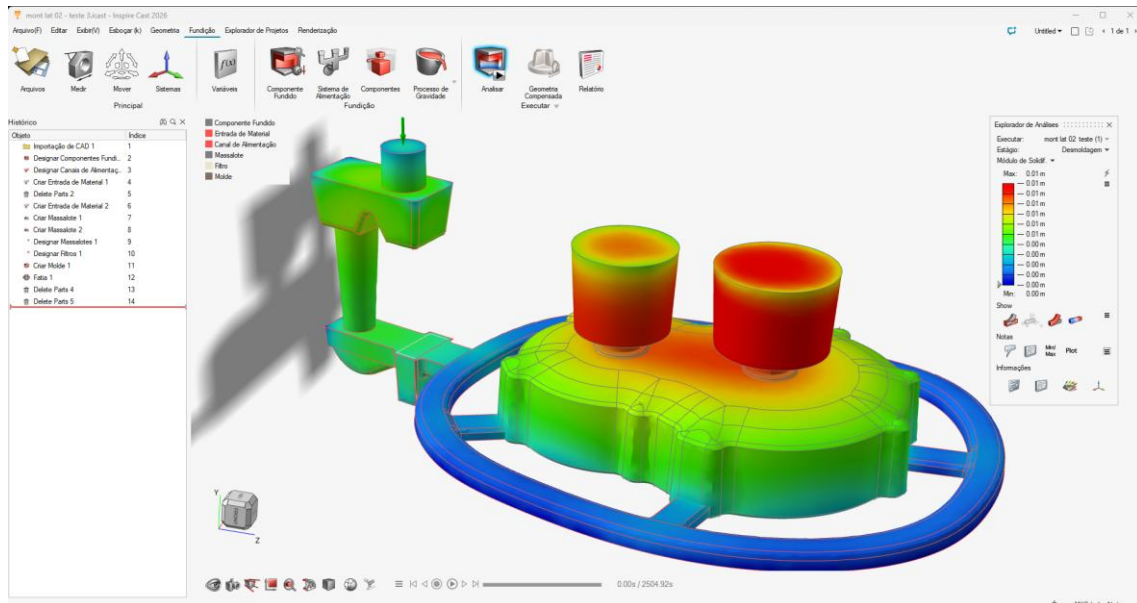


Simulação da árvore de fundição: Configuração final

Porosidade – 5%

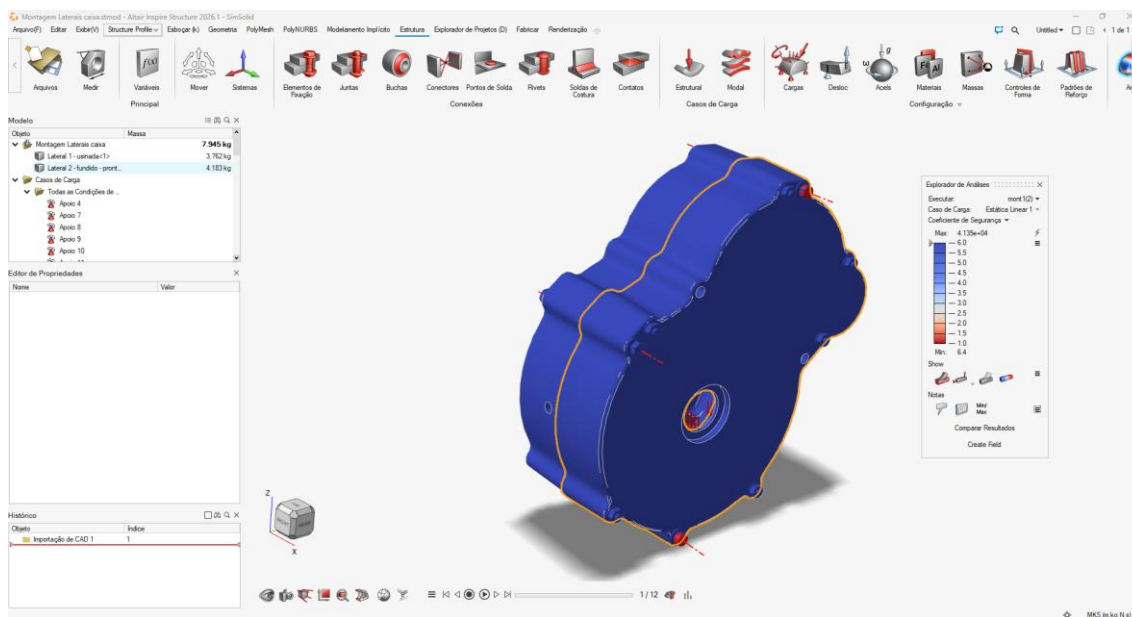


Módulo de solidificação

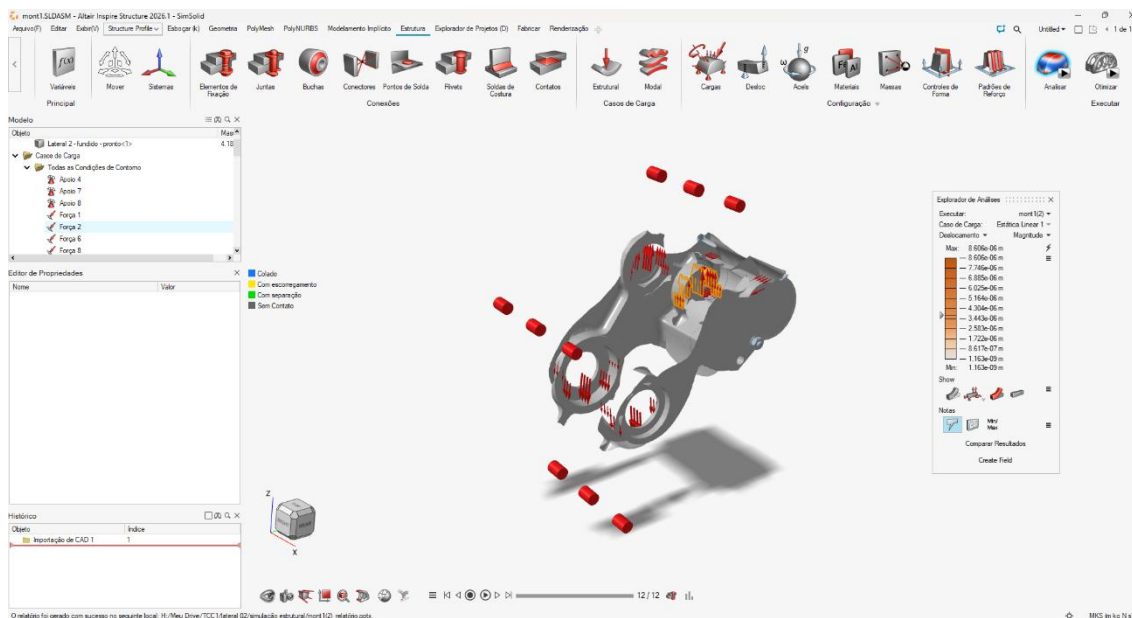


APÊNDICE D – IMAGENS DE SIMULAÇÕES – *ALTAIR INSPIRE*

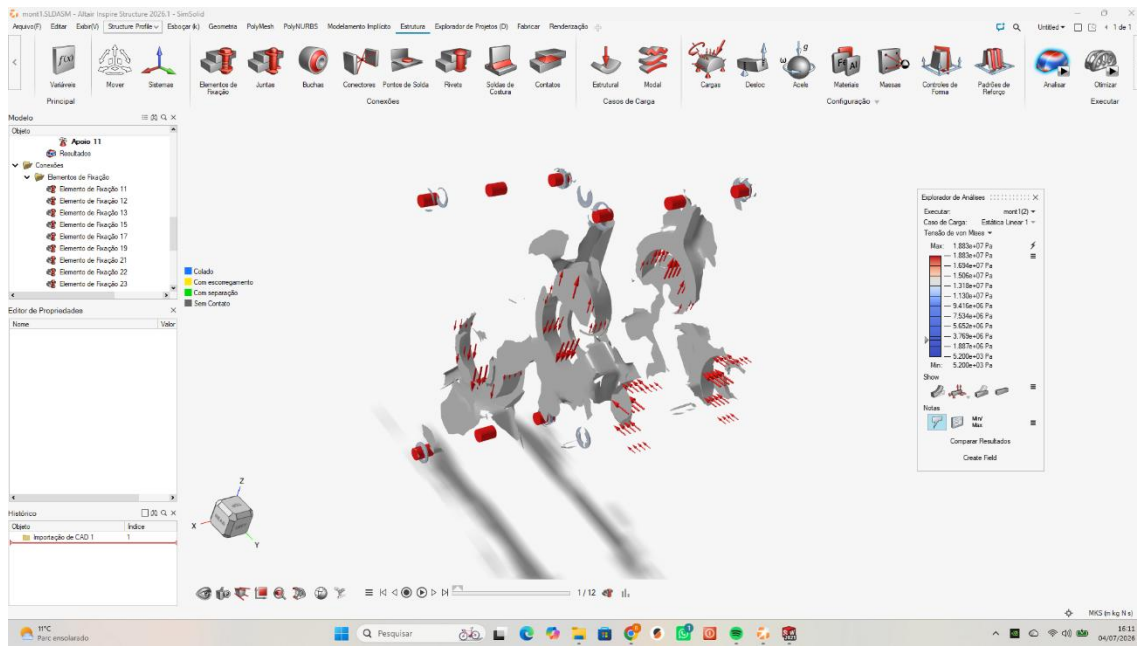
Coeficiente de segurança - fundido a direita e usinado a esquerda



Deslocamentos – fundido a direita e usinado a esquerda



Tensão de Von Misses - fundido a esquerda e usinado a direita



APÊNDICE E – IMAGENS DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO

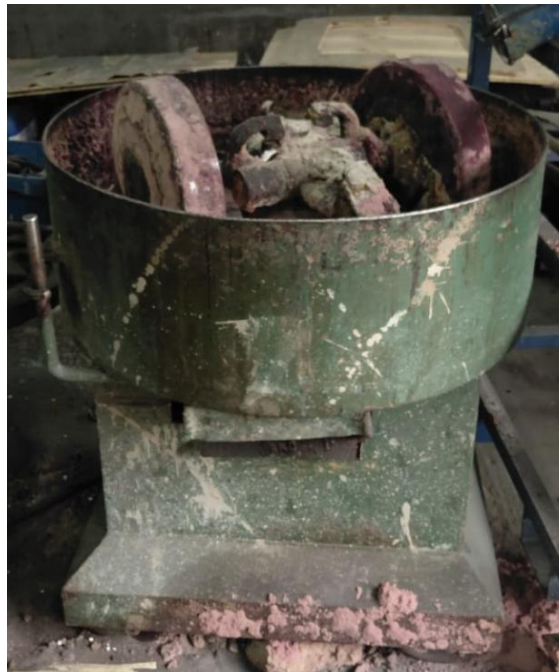
Modelo impresso em 3D e filtros cerâmicos 20 ppi



Preparação do modelo na caixa de moldagem



Misturador de mós



Colocação da areia na caixa



Molde superior curado e ventosa de aplicação do Co₂



Molde pronto



Forno elétrico utilizado para fusão do metal



Cadinho



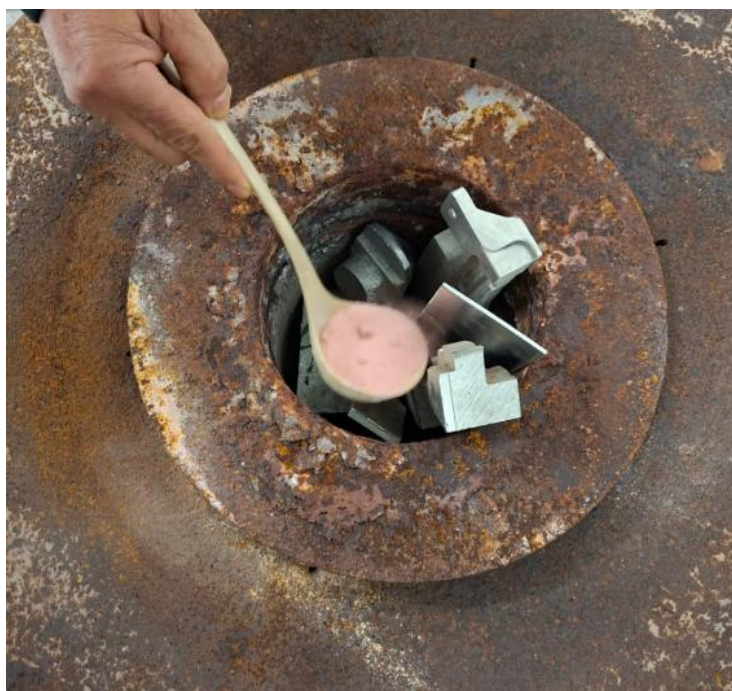
Dispositivos desenvolvidos para o manuseio do cadinho



Carga de Alumínio



Colocação do escorificante para alumínio



Silício metálico puro



Retirada do cadinho do forno



Medição da temperatura do metal



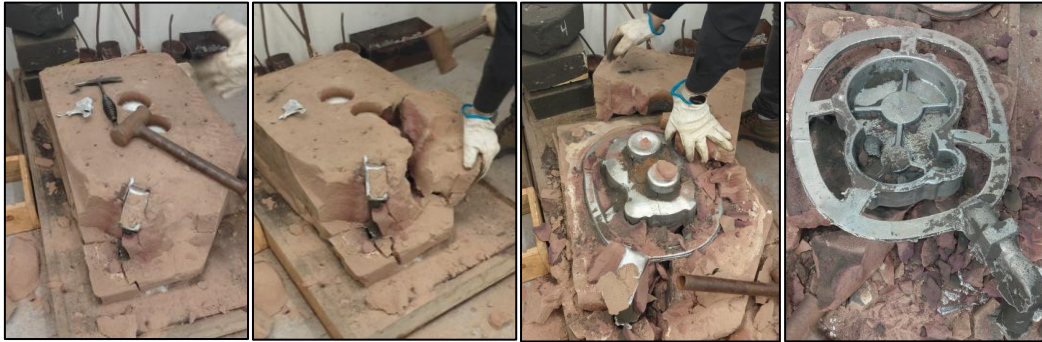
Vazamento do metal no molde de areia



Molde 3 – vazamento linha de separação do molde



Desmoldagem

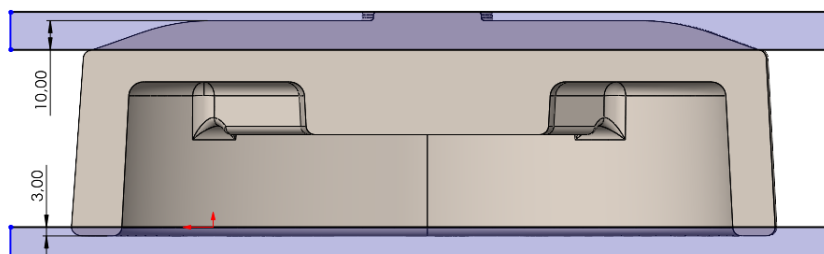


Molde dos corpos de prova

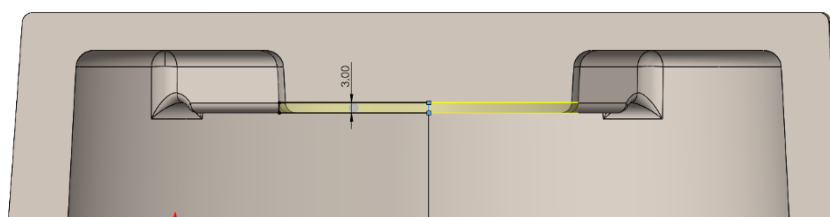


APÊNDICE F – USINAGEM DA CARCAÇA FUNDIDA

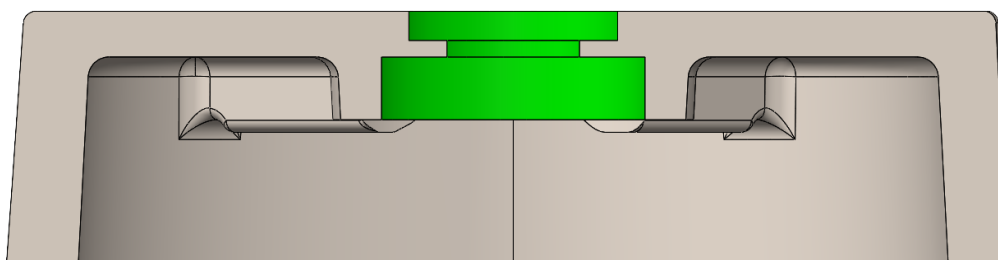
Regiões usinadas – Sobremetal na face externa e na face de contato entre carcaças



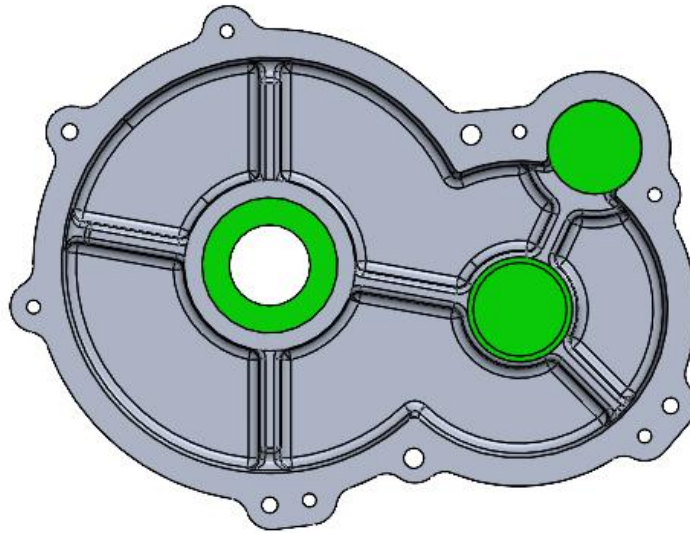
Regiões usinadas – Sobremetal na face do alojamento do rolamento



Regiões usinadas – Usinagem do alojamento de rolamento e retentor



Regiões usinadas – alojamento de rolamentos e de parafusos



APÊNDICE G – ENSAIOS DE TRAÇÃO

Corpos de prova – usinados



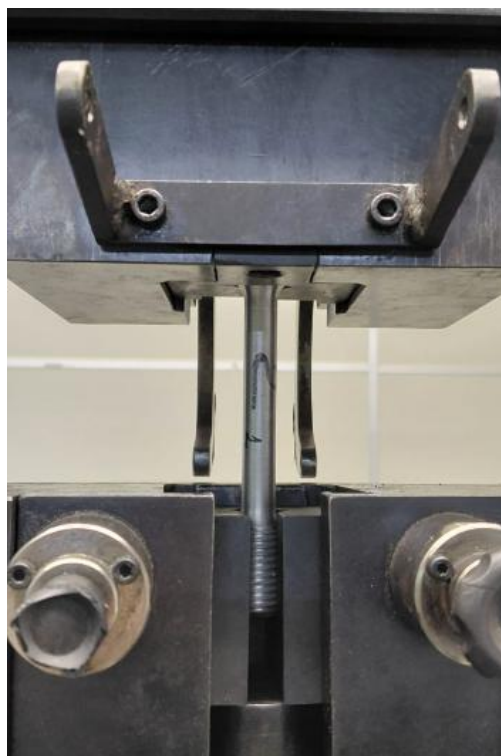
Corpos de prova – após ensaio de tração



Máquina universal de ensaios eletromecânica da marca EMIC

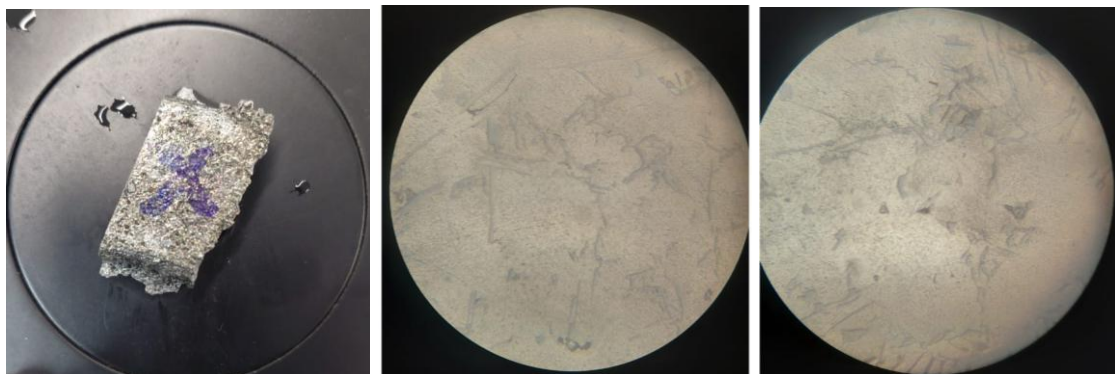


Corpo de prova sendo ensaiado

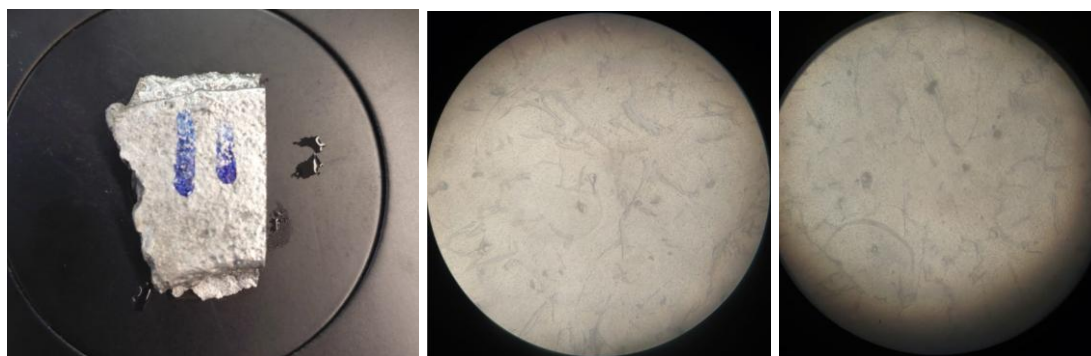


APÊNDICE H – METALOGRAFIA

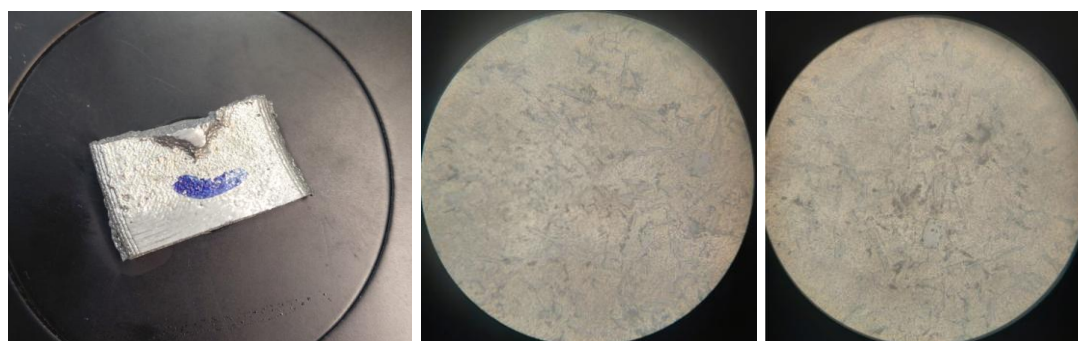
Amostra 01



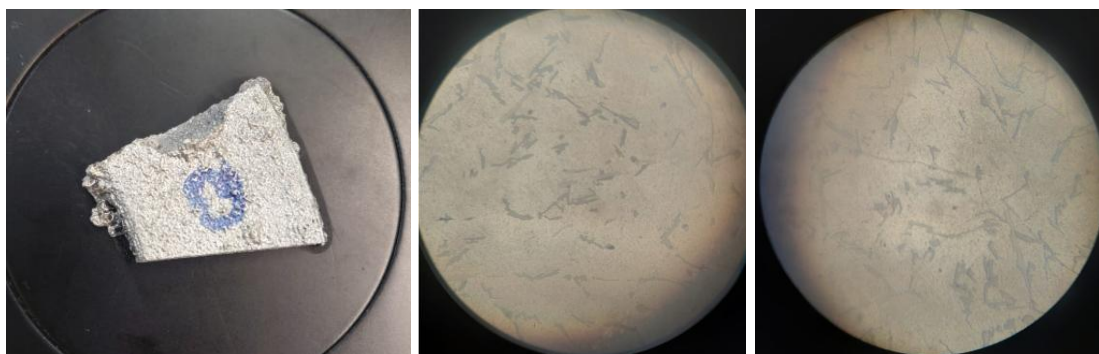
Amostra 02



Amostra 03



Amostra 04



Reagente de Keller

