



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CAMPUS CARAÚBAS
CURSO ENGENHARIA MECÂNICA

CARLOS COSTA DE CARVALHO

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE
PARÂMETROS DE FUNDIÇÃO EM LIGAS ALUMÍNIO-SILÍCIO**

**Caraúbas/RN
2021**

CARLOS COSTA DE CARVALHO

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE
PARÂMETROS DE FUNDIÇÃO EM LIGAS ALUMÍNIO-SILÍCIO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Engenharia
Mecânica da Universidade Federal
Rural do Semi-Árido – UFERSA,
como requisito parcial para obtenção
do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Jackson de
Brito Simões - UFERSA

**Caraúbas/RN
2021**

CARLOS COSTA DE CARVALHO

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE
PARÂMETROS DE FUNDIÇÃO EM LIGAS ALUMÍNIO-SILÍCIO**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado à Universidade Federal
Rural do Semi-Árido – UFERSA,
Campus Caraúbas para a obtenção
do título de Engenheiro Mecânico.

APROVADO EM: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jackson de Brito Simões - UFERSA
Presidente

Prof. Dr. Diego David Silva Diniz - UFERSA
Primeiro Membro

Prof. Dr. Wendel Albano – UFERSA
Segundo Membro

RESUMO

A fundição é empregada em diversos setores da indústria, movimentando várias empresas e, conseqüentemente, gera milhares de empregos. Nas últimas décadas, com advento da simulação computacional foi possível aumentar a produtividade e a economia de recursos no processo de fundição, através da eliminação de métodos empíricos (tentativa e erro) principalmente com o projeto de canais, redução do tempo de projeto e predição dos defeitos de fabricação do protótipo. Mesmo com essas ferramentas e técnicas disponíveis, ainda é considerado baixo o número de estudos envolvendo simulação de fundição, bem como a qualificação de material humano para desenvolver projetos relacionados. Isso se deve ao fato de que essa tecnologia ainda é considerada recente e pouco acessível para todos. Assim, este trabalho se propõe apresentar um estudo de modelagem computacional com foco na otimização do processo de fundição, analisando parâmetros de processos, como coeficiente de transferência de calor (HTC), temperatura do molde, temperatura de vazamento e tempo de vazamento. Portanto, nas simulações foram analisadas uma fundição em molde de areia para três ligas alumínio-silício (AlSi6Cu4, AlSi7Mg e AlSi7Mg0,3), utilizando dois *softwares*: Autodesk *Inventor* 2019 e ESI ProCAST 2019. Neste trabalho foram feitas 48 simulações (cada liga com 16 variações de parâmetros) em que foram avaliadas a qualidade da peça fundida através de três métricas: porosidade máxima local, porosidade média e pontos quentes. Os resultados mostraram a possibilidade de prever o comportamento dos fenômenos presentes no processo de fundição, em que o parâmetro HTC e o tempo de vazamento não apresentaram influência significativa na qualidade da peça fundida, quando comparados com as demais variáveis estudadas. Por fim, foi possível otimizar e quantificar as variáveis de estudo em um projeto de canais de um par de polias, em que foi possível verificar que houve baixos níveis de defeitos de fundição sem danos à integridade do componente.

Palavras-Chave: ESI ProCAST; simulação de fundição; otimização de variáveis; ligas alumínio-silício.

ABSTRACT

The casting process is employed in various sectors of industry, it moves several companies, and generates thousands of jobs. In the recent decades, the advent of computer simulation made it possible to increase productivity and resource savings through the elimination of empirical methods (trial and error) in gating and feeding design, predicting defects before the prototype manufacturing process. In the other hand, the number of studies involving casting simulation is still considered low, as well as the qualification necessary to develop related projects; the reason is that this technology is still considered recent and barely accessible to everyone. This work aims to present a computational modeling study focusing on the optimization of casting process through the analysis of the following parameters: heat transfer coefficient (HTC), mould temperature, pouring temperature, and pouring time. The mould was designed in the software Autodesk Inventor 2019, and then exported to the ESI Procast 2019; the simulations were conducted considering the gravity sand casting process for three aluminum-silicon alloys: AlSi6Cu4, AlSi7Mg, and AlSi7Mg0.3. Thus, 48 simulations were carried out (each alloy with 16 parameter variations) in which the casting quality was evaluated through three metrics: maximum local porosity, average porosity and hot spots. The results presented the possibility of predicting the casting process phenomena behavior, in which the HTC parameter and the pouring time had less significant influence on the casting quality. Finally, it was possible to optimize and quantify the study variables in a gating design of a flywheel; it was verified that the low levels of casting defects ensured the component quality.

Keywords: ESI ProCAST; casting simulation; optimization; Al-Si alloys.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
1.1. OBJETIVO GERAL	8
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
1.3. JUSTIFICATIVA	8
2. REFERENCIAL TEÓRICO	10
2.1. PROCESSO DE FUNDIÇÃO	10
2.1.1. Contexto histórico	10
2.1.2. Fundição.....	11
2.1.3. Principais tipos de fundição	13
2.1.4. Vantagens e desvantagens.....	14
2.1.5. Fundição por gravidade em molde de areia.....	14
2.1.6. Ligas Al-Si - propriedades e uso	16
2.2. SIMULAÇÃO DE FUNDIÇÃO	17
2.2.1. Softwares comerciais	19
2.2.2. ESI procast.....	19
2.2.3. Principais variáveis de fundição	20
2.2.4. Projeto de canais	21
3. METODOLOGIA.....	27
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
4.1. OTIMIZAÇÃO.....	33
4.1.1. Liga AlSi6Cu4.....	33
4.1.2. Liga AlSi7Mg	37
4.1.3. Liga AlSi7Mg0.3	40
4.2. APLICAÇÃO DAS VARIÁVEIS OTIMIZADAS.....	42
5. CONCLUSÃO.....	48
6. REFERÊNCIAS	49

1. INTRODUÇÃO

A Fundição de metais é um dos mais antigos e versáteis processos de fabricação; por meio dela é possível obter peças com formatos dos mais diversos, seja geometrias simples ou complexas, muitas das quais de difícil obtenção através de outros processos de fabricação.

Diante do exposto, pode-se perceber que este processo de fabricação se mostra relevante em nosso cotidiano, e isso leva a uma grande quantidade de peças fabricadas diariamente. Tendo em mente o aumento da produtividade e a economia de recursos, foram feitos diversos estudos ao longo dos anos, permitindo o surgimento de novas técnicas de fundição; estes avanços foram somados ao advento da simulação computacional, que permitiu o desenvolvimento de *softwares* capazes de promover uma grande economia na peça final, devido aos seguintes fatores: Eliminação da tentativa e erro no projeto de canais, redução considerável do tempo de projeto e possibilidade da visualização de defeitos de fabricação antes mesmo da produção do protótipo.

Mesmo que todas estas técnicas estejam disponíveis nos dias atuais, ainda é considerado baixo o número de estudos envolvendo simulação de fundição, bem como a qualificação de material humano para desenvolver projetos relacionados; isso se deve ao fato de que essa tecnologia ainda é considerada recente e também porque ainda não está acessível para todos. Assim, este estudo é pioneiro na UFERSA, tornando-se um legado para os próximos pesquisadores da instituição, de forma que terão um *know-how* inicial acerca do uso dessa ferramenta. Por fim, esse trabalho será um *start up* para incremento da ferramenta no Grupo Multidisciplinar em Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico com Materiais Inteligentes da UFERSA Caraúbas.

1.1. OBJETIVO GERAL

- Avaliar e otimizar os resultados de defeitos de porosidade em peças de ligas Al-Si através dos dados obtidos em simulação em *software* comercial.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar influência de 4 variáveis na fundição por gravidade em molde de areia em corpo de prova específico a partir de 3 ligas Al-Si.
- Aplicar os resultados otimizados em corpo de prova e comparar os resultados obtidos com a literatura.
- Avaliar o comportamento dos parâmetros otimizados em um projeto de polias.

1.3. JUSTIFICATIVA

Historicamente, os projetos de molde nos processos de fundição são frequente feitos através de um método empírico, fazendo-se o uso de tentativa e erro. Essas práticas têm causado desperdício de tempo e recursos financeiros na construção de moldes e protótipos, que são feitos buscando a otimização de parâmetros, bem como uma alta sanidade metalúrgica. Dessa forma, entender quais variáveis são importantes no processo de fundição e qual a influência delas na geração de defeitos é de extrema importância.

O problema é o alto tempo de experimentos de tentativa e erro por parte das empresas de fundição, que no Brasil são de pequeno porte e não utilizam tecnologias modernas em seus projetos. Esse alto tempo provoca altos custos de produção, o que implica na diminuição de sua competitividade no mercado.

De acordo com Oliveira (2003), as empresas de fundição sofreram uma alteração impactante na forma como oferecem seus produtos e serviços, deixando de ser uma empresa de subcontratação e passando a ser uma empresa que usa a tecnologia e atua no desenvolvimento de produtos junto ao

cliente. Dessa forma, o uso da simulação computacional passou a fazer parte do cotidiano das empresas que querem se manter competitivas no mercado.

A simulação tem inúmeros benefícios, tais como a predição de defeitos na peça, redução do tempo de projeto e a consequente redução de custos. “Com o uso da simulação, é possível detectar falhas no projeto já nos seus instantes iniciais. Pode-se garantir a fundibilidade de um componente durante a sua criação, definir sistemas de canais de distribuição e sistemas alimentação e definir dados de processo, tudo isto sem vazar uma só gota de metal.” (Oliveira, 2003, p. 9). Portanto, reduzir custos e tempo de fabricação aumenta a competitividade da empresa, e a simulação computacional é parte fundamental nesse processo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

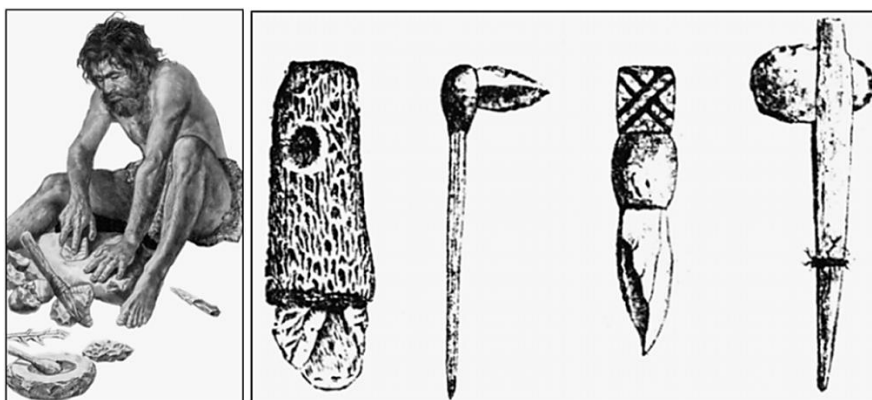
2.1. PROCESSO DE FUNDIÇÃO

2.1.1. Contexto histórico

Há 40 mil anos, os homens viviam em bando, se alimentavam da caça e tinham que se defender dos predadores. Os animais eram bem mais fortes, logo não dava para lutar corpo a corpo; foi a partir daí que surgiu a necessidade de se criar ferramentas, armas e utensílios que pudessem auxiliar o homem (Telecurso 2000). Inicialmente, essas peças eram feitas de pedras, que eram afiadas e possibilitaram cortar a caça e raspar a sua pele.

Na fabricação de uma ferramenta, o homem começou a descobrir as primeiras operações: desbaste, furação e corte nas pedras. Dessa forma, era confeccionado: facas, martelos, machados, lanças, serras, etc. A Figura 1 traz alguns desses utensílios que datam a idade da pedra. Além disso, com o início da agricultura e a domesticação de animais, começaram a ser feitas ferramentas específicas como o arado, foice e enxada, todos de pedra, osso ou madeira.

Figura 1: Técnicas primitivas de fabricação (à esquerda) e primeiras ferramentas (à direita).



Fonte: Adaptado de Telecurso 2000.

O metal só veio a ser utilizado por volta de 4.000 a.c. e se deu através do uso da cerâmica, onde era possível esculpir objetos impossíveis de serem feitos com pedras. Depois da cerâmica, descobriu-se que daria para fazer o mesmo com metais, e começou-se a trabalhar com metais com temperatura de fusão mais baixas, como o cobre. Depois veio o bronze, e finalmente, o ferro. Com o uso dos metais, descobriu-se as técnicas de forjamento, onde o metal aquecido é martelado e moldado na forma desejada e também foram descobertas formas de unir metais: a soldagem.

Com todo esse desenvolvimento, surgiram profissionais que eram dedicados exclusivamente a essas atividades, e não mais se dedicavam à agricultura e subsistência. Tal acontecimento foi importantíssimo, pois os materiais eram encontrados em diferentes locais e precisavam ser transportados para outras regiões, culminando com o desenvolvimento do comércio e dos meios de transporte.

O surgimento da agricultura em diversas partes do mundo e guerras aceleraram seu desenvolvimento. Além disso, o aparecimento das máquinas-ferramenta permitiram um salto na produtividade através do torneamento e fresamento. A partir de todo esse desenvolvimento que surgiram os processos de fabricação que temos hoje em dia: fundição, soldagem, conformação mecânica, usinagem, dentre outros.

2.1.2. Fundição

Fundição é um processo metalúrgico de fabricação que “consiste em vaziar (despejar) metal líquido num molde contendo uma cavidade com formato e medidas correspondentes aos da peça a ser fabricada.” (Moro, 2007). A figura 2 apresenta um processo de fundição em molde de areia de uma liga de alumínio:

Figura 2: Fundição de liga de alumínio em molde de areia.

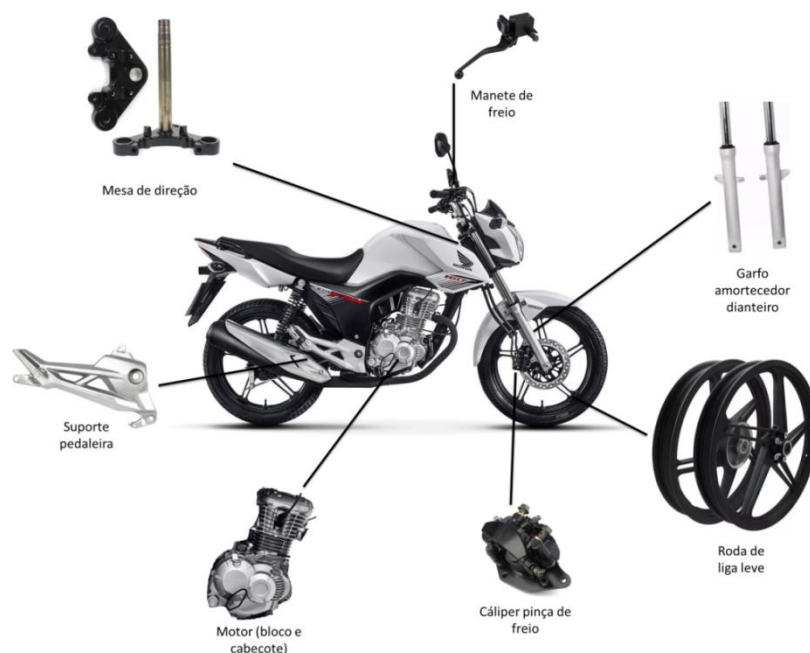


Fonte: essenaluminium.com.

Este processo “permite a fabricação de peças praticamente de qualquer forma, com pequenas limitações em dimensões, forma e complexidade.” (Chiaverini, 1986, p. 9).

A fundição é empregada em diversos setores da indústria, movimentando diversas empresas e, conseqüentemente, gera milhares de empregos. Na Figura 3 é possível visualizar peças fundidas em uma motocicleta Honda modelo CG Fan 160:

Figura 3: Motocicleta e algumas de suas peças fabricadas através da fundição.



Fonte: Adaptado de motomotos.com.br.

2.1.3. Principais tipos de fundição

De acordo com Moro (2007), a fundição pode ser feita usando diferentes métodos, que quanto ao tipo de força utilizado, podem ser classificadas em dois grupos: fundição por gravidade ou por pressão. Além disso, pode-se classificar os processos de fundição quanto ao material do molde, conforme a tabela 1:

Tabela 1: Principais processos de fundição.

Tipo de força	Tipo de molde
Por gravidade	Areia verde (molde descartável)
	Em casca (<i>shell moulding</i>)
	Molde permanente (molde metálico, bipartido)
	Cera perdida (molde e modelo descartáveis)
Por pressão	Injeção (molde metálico)

Fonte: Moro, 2007.

2.1.4. Vantagens e desvantagens

Os processos de fundição oferecem diversas vantagens com relação a outros processos de fabricação. As principais vantagens são:

- Podem apresentar formatos dos mais variados tipos, muitos deles impossíveis de se atingir com outros processos;
- Permite a produção de peças de tamanhos variados, desde peças pesando poucos gramas a várias toneladas;
- Permite a produção de peças em série, através da automatização;
- Economia em operações de usinagem devido o nível de padrões de acabamento e tolerância dimensional que pode ser atingido;
- Permite a produção de peças com paredes finas, o que implica em peças mais leves.

Para peças mais complexas, podem surgir limitações na fundição, e isso pode ser apontado como algumas desvantagens no processo. De acordo com Moro (2007), pode-se citar as principais desvantagens como sendo:

- Inclusão de material no molde da peça, provocando defeitos na peça e dificulta a usinagem;
- Podem aparecer mudanças na composição da liga metálica, o que causa o aparecimento de segregações;
- Projetos de massalote mal feitos causa o aparecimento de rechupes;
- Porosidade, causado por bolhas de gases durante o vazamento e solidificação no molde. Esse tipo de problema provoca o aparecimento de tensões residuais e enfraquece a peça, além de defeitos superficiais.

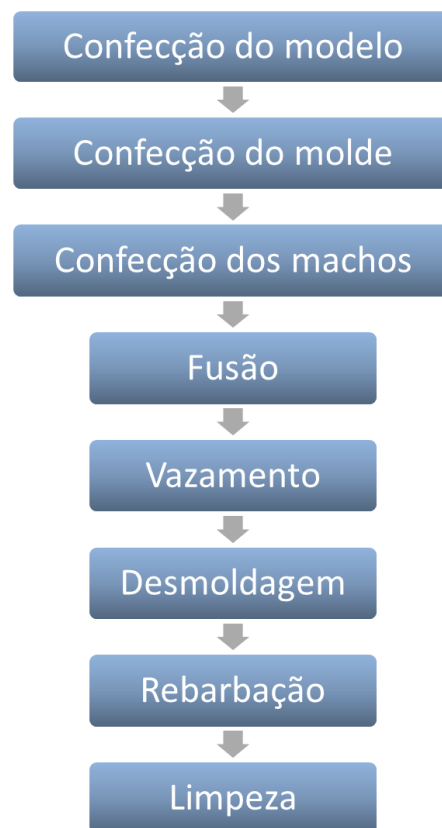
2.1.5. Fundição por gravidade em molde de areia

De acordo com Sultana (2018), um dos métodos de fabricação mais simples e versáteis é a fundição por gravidade em molde de areia. Isso se deve ao fato de que pode ser usado para peças complexas em ambos metais

ferrosos e não-ferrosos. Além disso, o ferramental utilizado é simples e barato, tornando-se ideal para a produção de pequenos lotes.

As peças fundidas podem ser produzidas a partir de ligas metálicas ferrosas (contendo ferro e carbono) e não-ferrosas (compostas de zinco, cobre, alumínio e magnésio). Ainda que existam diferentes métodos de fundição, com alguns passos diferentes, de maneira geral este processo pode ser descrito no fluxograma apresentado na Figura 4:

Figura 4: Fluxograma das etapas do processo de fundição.



Fonte: Adaptado de Moro, 2007.

De acordo com Moro (2007), a primeira etapa do processo é a confecção do modelo, que deve ter o formato da peça e será útil na construção do molde. Nesta etapa, deve-se levar em conta a contração do metal depois de sua solidificação, pois varia de liga para liga. O modelo pode ser feito de vários materiais, como a madeira, aço, alumínio, resina plástica, dentre outros.

Na sequência, são feitos os moldes, que servem como uma espécie de fôrma para que o metal líquido assuma o formato da peça. Eles são feitos de

uma mistura de areia e aglomerante. Em alguns casos, é necessário que o objeto fabricado tenha vazios internos; nessas situações utiliza-se os machos, que também são feitos de areia e são colocados dentro dos moldes de forma a garantir o formato desejado.

Depois que os moldes estão prontos, é o momento da fusão do metal em um forno específico, que varia conforme a necessidade. Na sequência é feito o vazamento do metal líquido na cavidade do molde. A desmoldagem deve ser feita depois da completa solidificação da peça, onde no caso do molde de areia, ele é quebrado para a remoção da peça. Caso deseje um melhor acabamento superficial um jateamento de areia pode ser realizado. Depois disso, os massalotes e canais de vazamento são retirados pelo processo de corte, e por fim é realizado o acabamento final.

No processo de projeto de molde os massalotes e os canais de alimentação apresem papel primordial para o sucesso da fundição. Os Massalotes são estruturas que servem para que o metal se solidifique por último, e assim, concentre grande parte dos defeitos que ficariam na peça. Já os canais de vazamento são cavidades por onde o metal escoar até chegar na peça propriamente dita.

2.1.6. Ligas Al-Si - propriedades e uso

A matéria-prima metálica para a produção de peças fundidas é constituída pelas ligas metálicas ferrosas (ligas de ferro e carbono) e não-ferrosas (ligas de cobre, alumínio, zinco e magnésio). Este trabalho será voltado para as ligas metálicas não ferrosas, em especial as ligas de alumínio.

De acordo com (ABAL, 2007), o alumínio pode combinar-se com grande parte dos metais existentes, formando ligas metálicas; esta característica se torna um diferencial, pois é possível criar ligas para aplicações específicas, com características ajustadas de resistência mecânica, capacidade de resistir à corrosão, condutibilidade, usinabilidade, ductibilidade, dentre outras.

Desta forma, as “ligas do sistema Al-Si são as mais importantes entre as ligas fundidas de alumínio, principalmente por sua alta fluidez, baixa contração nos fundidos, elevada resistência à corrosão, boa soldabilidade, fácil brasagem e seu baixo coeficiente de expansão térmica” (Almeida, 2008).

Neste trabalho serão abordadas ligas do sistema Al-Si, que são: AlSi6Cu4, AlSi7Mg e AlSi7Mg0,3. Todas elas contêm alumínio e silício, que se combinam com cobre ou magnésio para a composição da liga. (Abal, 2007) afirma que o silício é adicionado com o objetivo de aumentar a fluidez do metal líquido e a resistência a trincas de contração. O cobre, por sua vez, proporciona o aumento da dureza e resistência mecânica. Por outro lado, as ligas de alumínio e magnésio são mais problemáticas quanto à fundição, mas possuem boa resistência e ductilidade, além de melhorar a resposta da liga a tratamentos térmicos. Algumas das principais propriedades das ligas estão presentes na tabela 2:

Tabela 2: Propriedades das ligas a serem estudadas, obtidas na base de dados do *software* através do *Scheil Method*.

PROPRIEDADES	AlSi6Cu4	AlSi7Mg	AlSi7Mg0.3
Condutividade (W/m-K)	93,3 - 144,7	91,3 - 138,5	94,9 - 142,4
Densidade (kg/m ³)	2407,4 - 2746,6	2379,1 - 2695,9	2354,7 - 2668,6
Liquidus (°C)	611	612	613
Solidus (°C)	523	519	554
Entalpia (kJ/kg)	0,2 - 1290,8	6,17 - 1320,17	0,07 - 1319,5
Viscosidade Newtoniana (kPa.s)	0,9 - 2,5	0,9 - 2,3	0,9 - 1,8

Fonte: Base de dados ESI ProCAST 2019.

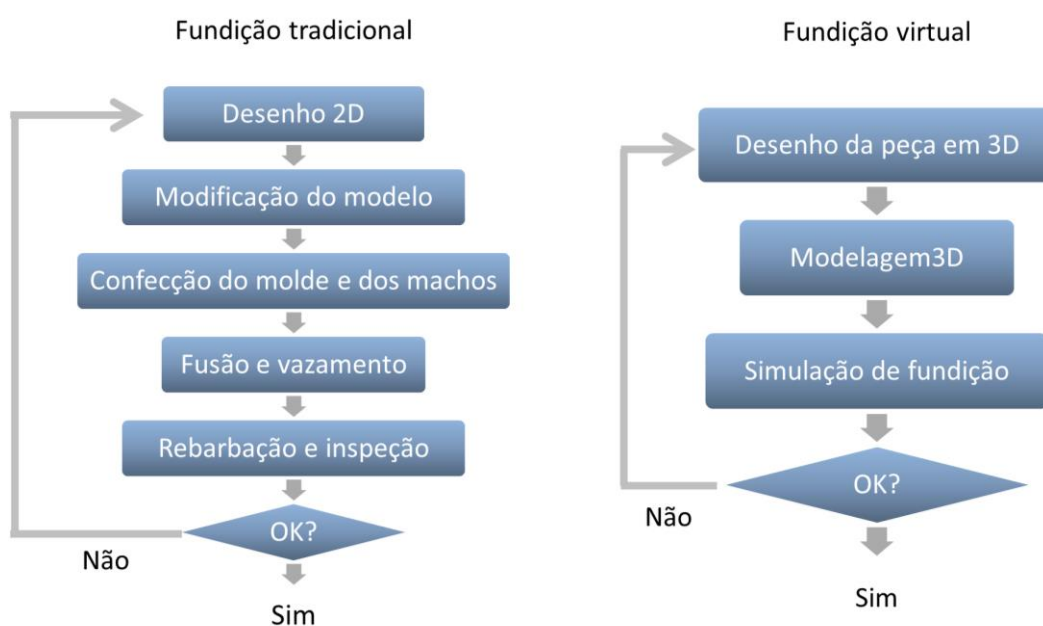
2.2. SIMULAÇÃO DE FUNDIÇÃO

De acordo com Sultana (2018), em grande parte dos processos de fundição por gravidade convencionais, o acabamento e a precisão dimensional adquiridos não são adequados para o consumidor final; dessa forma, torna-se necessário que se faça modificações nos parâmetros de projeto.

Para que tais ajustes sejam realizados, é de fundamental importância o uso da simulação, definida como sendo “o processo de imitar um fenômeno real usando um conjunto de equações matemáticas implementadas em um programa de computador.” (Ravi, 2008, p. 1).

Os programas de computador (*softwares*) são um conjunto de conhecimento adquirido ao longo de décadas de pesquisa, contendo um vasto banco de dados, equações e métodos que podem ser simulados através de um computador. Assim, a utilização de *softwares* de simulação traz vantagens na fundição e a principal delas é no ponto de vista econômico, visto que o método tradicional exige que sejam feitos vários retrabalhos até que se atinja o projeto de molde ideal. Outra característica que pesa contra esse método é um tempo de projeto maior, o que faz a empresa perder competitividade. Quanto ao método de fundição virtual, o ponto negativo é a baixa disponibilidade de profissionais qualificados para tal tipo de trabalho e o custo inicial de um software de simulação. Os processos e suas etapas podem ser vistos na figura 5:

Figura 5: Processos de fundição utilizando dois métodos.



Ravi, 2008.

2.2.1. Softwares comerciais

Atualmente, existem diversos *softwares* comerciais para simulação de fundição; dentre os mais difundidos no mercado, se destacam o MAGMASoft, SOLIDCast e ESI ProCAST. Segue na tabela 3 uma lista dos principais softwares comerciais disponíveis atualmente:

Tabela 3: Principais *softwares* de simulação de fundição comerciais.

Software	Empresa e origem
AutoCAST	<i>Advanced Reasoning Technologies Ltd.</i> , Mumbai, Índia
CAP/WRAFTS	EKK, <i>Inc.</i> , <i>Walled Lake</i> , Michigan, EUA
CastCAE	CT-Castech <i>Inc</i> , Oy, Espoo, Finlândia
Castflow, Casttherm	Walkington <i>Engineering, Inc.</i> , Austrália
JSCast	Komatsu Soft <i>Ltd.</i> , Osaka, Japão
MAGMASoft	MAGMA GmbH, Aachen, Alemanha
MAVIS	Alphacast <i>Software</i> , Swansea, Reino Unido
Nova-Solid/Flow	Novacast AB, Ronneby, Suécia
PAM-CAST/ProCAST	ESI <i>Group</i> , Paris, França
RAPID/CAST	<i>Concurrent Technologies Corp.</i> , EUA
SIMTEC	RWP GmbH, Roetgen, Alemanha
SOLIDCast	<i>Finite Solutions, Inc.</i> , Illinois, EUA

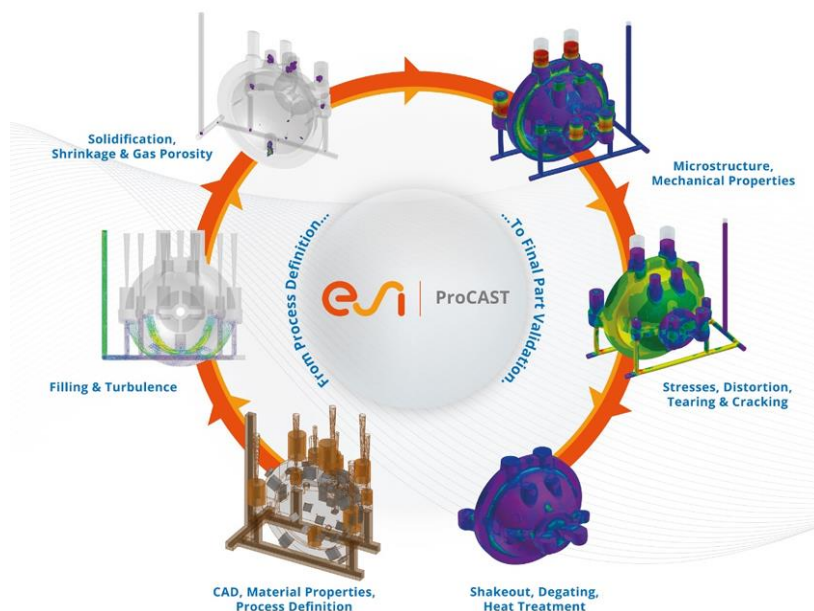
Fonte: Ravi, 2008.

2.2.2. ESI procast

Para este trabalho, o *software* utilizado será o ESI ProCAST 2019, devido ao fato de ser bem difundido, confiável, versátil e utilizado em universidades parceiras da UFERSA. Este *software* foi desenvolvido pela empresa francesa ESI *Group*, líder mundial em prototipagem virtual e simulação avançada desde 1973, que possui clientes como a Volkswagen, Renault e MAN. (ESI *Group*).

De acordo com o manual do usuário do ESI ProCAST 2019, este software utiliza o método de elementos finitos (FEM) para realizar os cálculos necessários na simulação; ele possui diferentes módulos, que permite a modelagem de transferência de calor, fluidodinâmica (preenchimento do molde), radiação e tensões residuais (*stress*). Além disso, é possível fazer simulações de microestrutura, tratamento térmico e porosidade. Quanto aos tipos de fundição, é possível trabalhar com os principais métodos disponíveis atualmente, como por exemplo a fundição por gravidade (GDC), fundição de alta pressão (HPDC) e de baixa pressão (LPDC), fundição contínua, centrífuga, dentre outros. A Figura 6 mostra as principais funcionalidades do *Software*:

Figura 6: Funcionalidades do *software* ESI ProCAST.



Fonte: Filecr.com.

2.2.3. Principais variáveis de fundição

A fundição é um processo de fabricação complexo e que envolve inúmeras variáveis, onde algumas se mostram mais relevantes do que outras. Dentre essas variáveis é possível destacar: HTC, temperatura do molde, temperatura de fundição e tempo de enchimento.

Das variáveis citadas, sem dúvidas a mais complexa é o coeficiente de transferência de calor (*heat transfer coefficient* - HTC) devido à dificuldade de ser determinada experimentalmente e raramente ser encontrada em literaturas. O HTC é relacionado com a capacidade de troca de calor na interface entre o molde e a cavidade onde se encontrará o metal líquido; desta forma, ela pode variar de acordo com o tipo de molde e do metal a ser fundido.

Por outro lado, há outras variáveis que são mais simples de se determinar, mas não deixam de ser importantes, como é o caso do tempo de enchimento e das temperaturas do molde e de vazamento. A temperatura do molde pode ser a ambiente ou pode ser aquecido de acordo com o desejado pelo fabricante, mas a temperatura de fundição deve ser superior à temperatura de fusão do metal. O tempo de enchimento é relacionado com a vazão do metal no molde, e influencia na velocidade em que o metal líquido percorre os canais de enchimento.

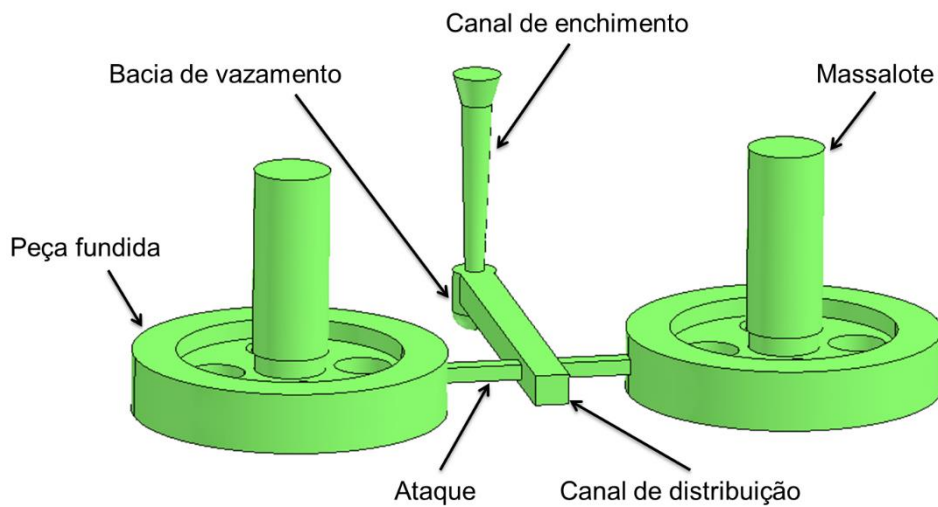
2.2.4. Projeto de canais

Tão importante quanto as variáveis de fundição, um bom projeto de canais é essencial para que se produza peças de qualidade e sem defeitos. Ele é composto pelo sistema de enchimento, que é o conjunto de canais por onde o metal líquido vai passar, desde a parte exterior (cadinho) até a cavidade da peça.

De acordo com Oliveira (2009), o sistema de enchimento deve promover um enchimento com fluxo não turbulento, de tal forma a reter a escória na bacia de vazamento; isso evita que o metal líquido reaja com a atmosfera. Além disso, tem a função de promover uma distribuição de metal em todas as partes do molde e também garantir correta distribuição de temperaturas, o que afeta o arrefecimento e solidificação.

Com relação ao projeto de canais, os principais fatores que influenciam na qualidade da peça final são: fundamentos de mecânica dos fluidos, como o teorema de Bernoulli, lei da continuidade, efeitos de momento, número de Reynolds e velocidade crítica de enchimento. Um sistema de alimentação simples pode ser visto na figura 7:

Figura 7: Sistema de alimentação simples.



Fonte: Autoria própria.

Um dos princípios mais importantes de mecânica dos fluidos aplicado ao projeto de canais é o teorema de Bernoulli.

$$p_1 + \frac{\rho V_1^2}{2} + \rho g h_1 = p_2 + \frac{\rho V_2^2}{2} + \rho g h_2$$

Onde:

p – pressão (Pa);

ρ – massa específica (kg/m³);

V – velocidade (m/s);

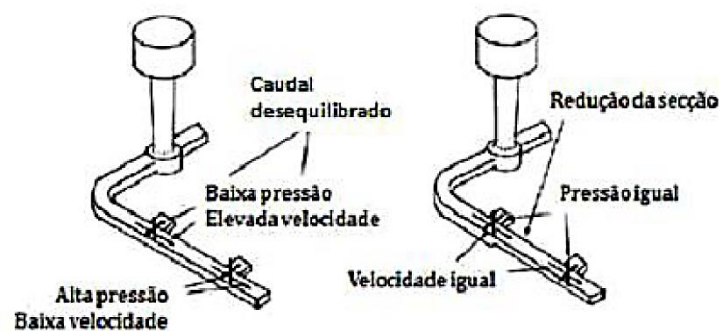
g – aceleração gravitacional (m/s²);

h – altura (m).

De acordo com o teorema, a soma das diferentes formas de energia (cinética, potencial, de fricção e pressão) é igual a uma constante. Dessa forma, quando uma forma de energia aumenta, outra tem que diminuir para que a soma seja uma constante. Um exemplo bastante utilizado é o da relação entre a velocidade e a pressão de um fluido em uma tubulação; quando a velocidade do fluido aumenta, a pressão diminui, e vice-versa.

Analisando a figura 8, é possível perceber que as perdas de energia reduzem a velocidade no segundo ataque, provocando um aumento de pressão. Dessa forma, teremos ataques com vazões diferentes, algo que é indesejável, pois provoca defeitos na peça. Portanto, Oliveira (2009) afirma que uma solução é a redução da seção no segundo ataque, o que iguala as velocidades, as pressões e, consequentemente, as vazões.

Figura 8: Influência da redução da seção nas pressões nos ataques.



Fonte: Oliveira (2009).

Outro princípio muito importante aplicado aos canais de vazamento é a lei da continuidade:

$$Q = A_1 V_1 = A_2 V_2$$

Onde:

Q – vazão (m³/s);

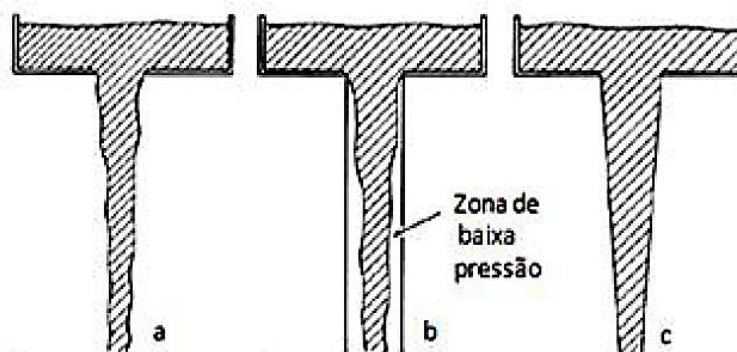
A – área transversal da tubulação (m²);

V – velocidade do fluido (m/s).

A lei da continuidade afirma que “para um sistema fechado de um líquido incompressível e que possua paredes impermeáveis, o caudal deste

mesmo sistema será o mesmo em todos os pontos que o constitui.” (Oliveira, 2009, p. 4). Analisando a figura 9, o fluido na queda livre (a) é acelerado pela aceleração da gravidade e o aumento da velocidade gera uma região de baixa pressão (b). As regiões de baixa pressão formadas promovem sucção de ar para dentro da cavidade do molde, provocando defeitos na peça. Para evitar a sucção de ar, as paredes do canal devem ter formato cônico (c).

Figura 9: Aplicação da lei da continuidade em canal de descida.



Fonte: Oliveira (2009).

Outro efeito que deve ser levado em conta é a primeira lei de Newton, ou lei da inércia. Assim, “um fluido em movimento em linha reta, permanece desta forma à mesma velocidade até que uma força externa o obrigue a mudar essa velocidade ou direção” (Oliveira, 2009, p. 5). Este princípio norteia o projeto de partes do molde, como as mudanças de seção transversal e mudanças de direção do fluido, de forma que estas devem ser o mais suaves possível. Curvas e mudanças bruscas de direção provocam zonas de aspiração de ar e podem arrastar material do molde diretamente para a cavidade do molde. Algumas formas de minimizar tais efeitos é mostrado na figura 10:

Figura 10: Formas de minimizar os efeitos da inércia em moldes.



Fonte: Oliveira (2009).

Outro fator que influencia bastante a qualidade da peça a ser produzida é o fluxo, que pode ser laminar, misto ou turbulento. Este parâmetro pode ser determinado através do número de Reynolds:

$$N_R = \frac{\rho dv}{\mu}$$

Onde:

N_R – número de Reynolds (adimensional);

ρ – massa específica (kg/m^3);

v – velocidade (m/s);

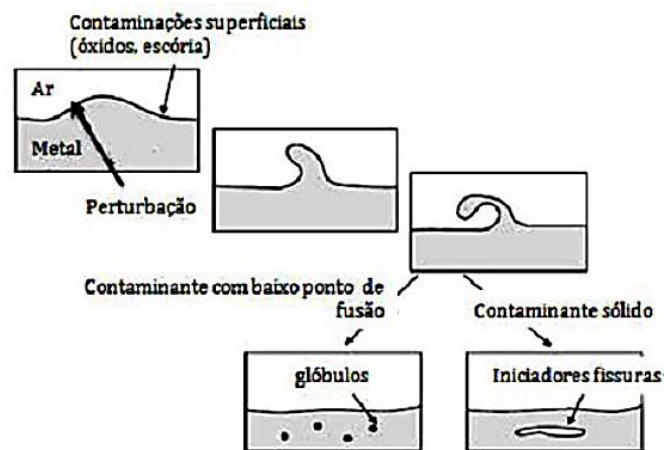
d – diâmetro da tubulação (m^2);

μ - viscosidade dinâmica (Pa.s).

Dessa forma, Oliveira (2009) afirma que deve-se manter um número de Reynolds abaixo de 20.000, ou seja, escoamento laminar ou misto. Acima desse valor, o escoamento é turbulento e não é recomendável devido à contaminação do metal por óxidos.

A velocidade crítica de enchimento é um parâmetro importante, e varia de acordo com a viscosidade do metal. Quando a velocidade de enchimento ultrapassa a velocidade crítica, podem se formar vazios internos que podem comprometer a resistência da peça, pois são potenciais concentradores de tensão. De acordo com Oliveira (2009), acima da velocidade crítica o líquido deixa de ser suportado pela sua própria tensão superficial, fazendo com que ele dobre sobre si mesmo, e isso provoca contaminações pela escória e também a formação de fissuras. Estes efeitos podem ser vistos na figura 11:

Figura 11: Formação de defeitos provocados por velocidades acima da velocidade crítica.



Fonte: Oliveira (2009).

3. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho inicia-se no desenho CAD e, logo após, é utilizado em outro *software* para a otimização de parâmetros. Depois disso, os resultados são analisados e aplicados em um projeto de canais de uma peça. As fases da metodologia desse estudo pode ser vista no fluxograma apresentado na Figura 12:

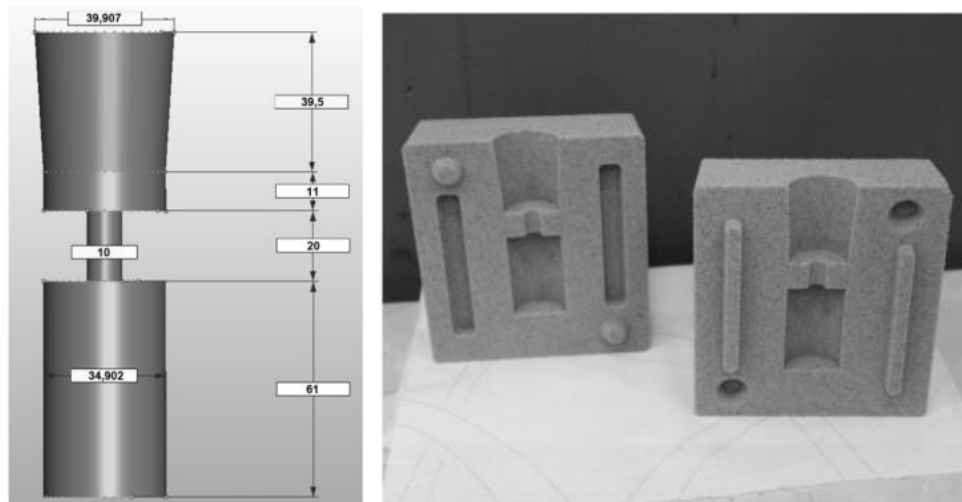
Figura 12: Fluxograma da metodologia de trabalho.



Fonte: Autoria própria.

Neste trabalho serão utilizados dois *softwares*: Autodesk *Inventor* 2019 e ESI ProCAST 2019. O Autodesk *Inventor* é um *software* CAD que será utilizado para o desenho dos moldes para a simulação, em que foi utilizado o mesmo molde exposto por Kucharčík (2014); ele utiliza um tipo de molde experimental nas simulações e validações, o *Sanduhr Probe*, que é empregado pela empresa de fundição Nemak para avaliar porosidade, como mostrado na Figura 13:

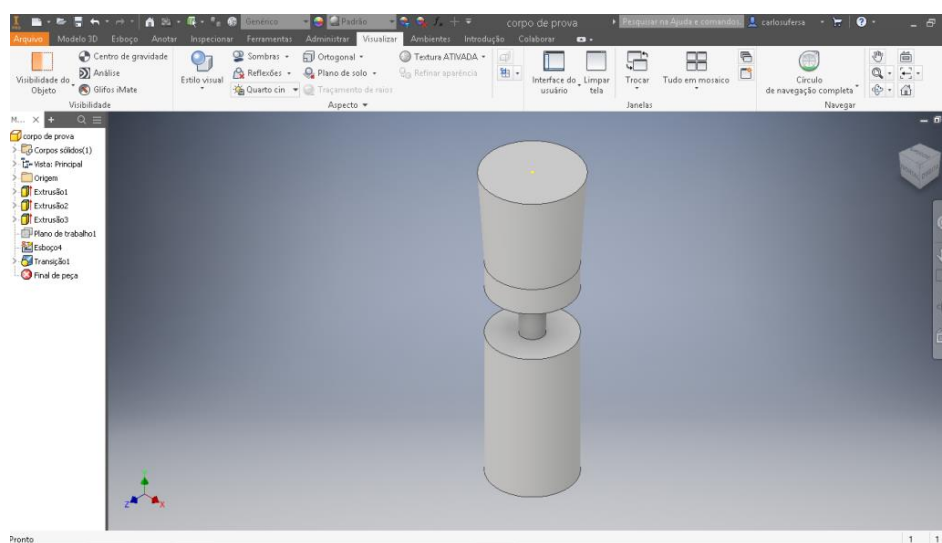
Figura 13: Corpo de prova *Sanduhr Probe* (esquerda) e o molde de areia pronto para a fundição (direita).



Fonte: Kucharčík, 2014.

Dessa forma, o corpo de prova foi desenhado no *software* com as mesmas especificações. A Figura 14 apresenta o corpo de prova modelado no Autodesk *Inventor*:

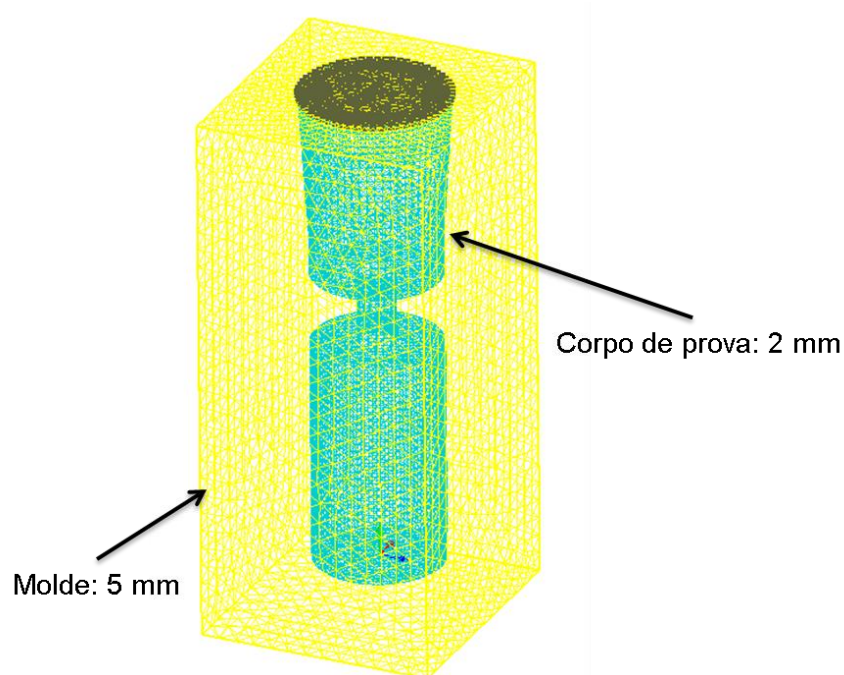
Figura 14: Corpo de prova desenhado no Autodesk *Inventor*.



Fonte: Autoria própria.

Finalizada a modelagem CAD, o desenho do corpo de prova foi salvo com uma extensão apropriada e pôde ser aberto no segundo *software* utilizado, o ESI ProCAST; nele foi feito o molde de areia e foi gerada a malha tetraédrica. Este *software* utiliza elementos de malha triangulares para superfícies em 2D e tetraédricos para peças em 3D. O corpo de prova tem uma malha com cerca de 173 mil elementos, sendo uma parte tetraédrica e outra parte triangular. A escolha dos tamanhos dos elementos desta malha se deu devido à necessidade de reduzir ao máximo o esforço computacional na simulação; assim, as partes com menores dimensões possuem o tamanho da malha menor. Suas dimensões podem ser vistas na Figura 15.

Figura 15: Malha do corpo de prova e suas dimensões.

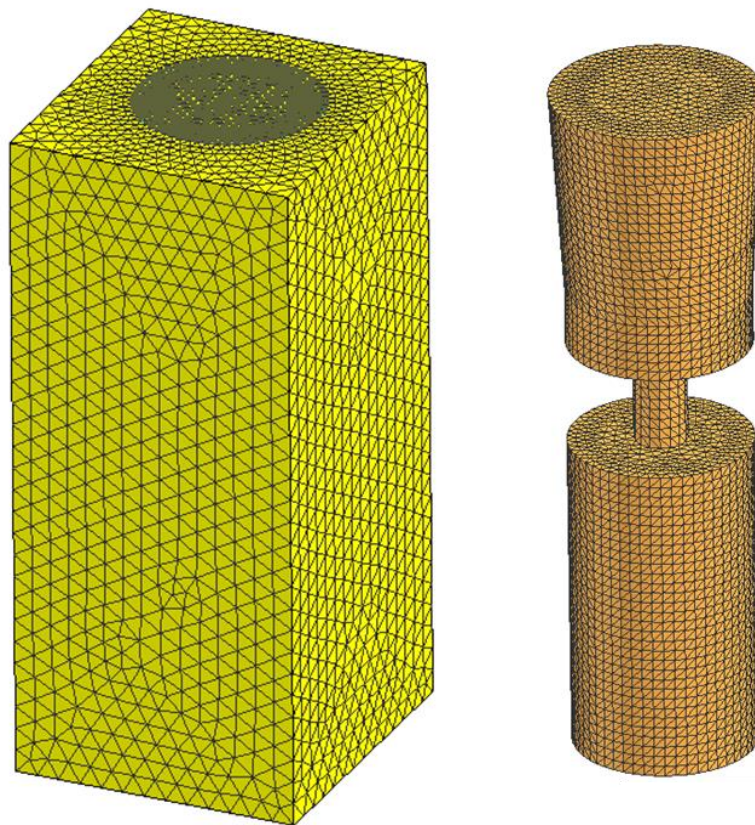


Fonte: Autoria própria.

O próximo passo foi a inserção dos parâmetros desejados de fundição, onde foi possível modificar o tipo de molde, material da peça, temperatura do molde e do metal, tempo de vazamento, coeficiente de transferência de calor, dentre outros. A malha completa do molde e do corpo de prova podem ser

vistos na figura 16. Estas são apenas algumas das inúmeras variáveis de fundição que poderão ser modificadas, onde algumas têm mais influência do que outras. Dessa forma, seria inviável fazer um trabalho de otimização com todas as variáveis possíveis, pois o número é grande e a maioria não tem influência considerável no resultado final.

Figura 16: Vista detalhada da malha do corpo de prova.



Fonte: Autoria própria.

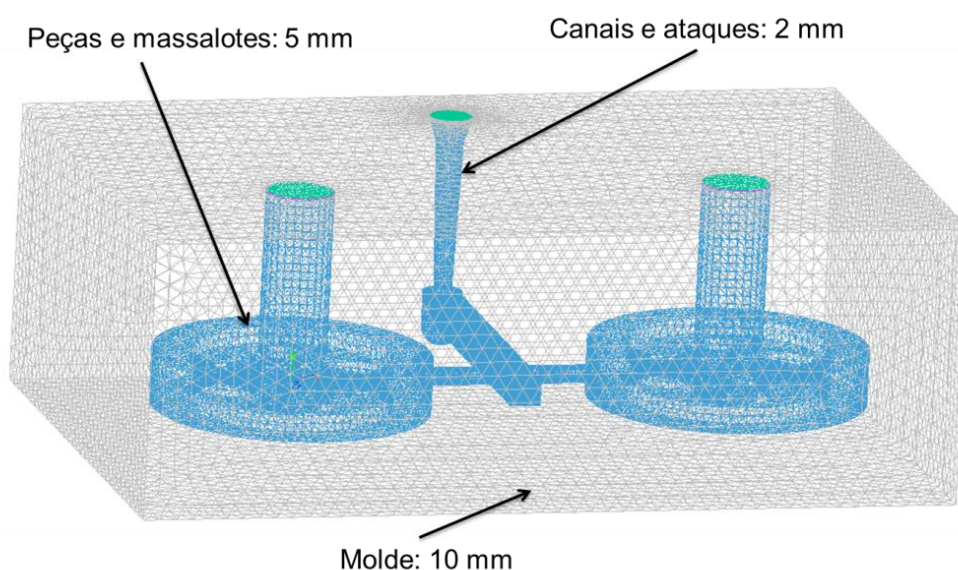
Assim, este trabalho se propõe a fazer simulações usando o *software* ESI ProCAST com mudança nos valores nas seguintes variáveis:

- Coeficiente de transferência de calor – HTC ($\text{W/m}^2.\text{K}$): 250, 500, 750 e 1000;
- Temperatura do molde (em $^{\circ}\text{C}$): 30, 80, 130 e 180;
- Temperatura de vazamento (em $^{\circ}\text{C}$): 700, 800, 900 e 1000;
- Tempo de vazamento (em segundos): 3, 5, 7 e 9.

Esses parâmetros foram utilizados de forma a verificar a influência dessas variáveis na fundição da liga Al-Si. A Tabela 3 apresenta as propriedades das ligas objeto de estudo deste trabalho. Em cada uma destas simulações foram avaliadas três métricas: porosidade máxima local, porosidade média e pontos quentes. Além disso, foram utilizadas três ligas alumínio-silício, a saber: AlSi6Cu4, AlSi7Mg e AlSi7Mg0,3. Ao final desse processo, foram feitas 48 simulações (três ligas, cada uma com 16 variações de parâmetros). O último passo foi a aplicação das variáveis otimizadas em um projeto de canais para a fabricação de duas polias, baseado no trabalho de Sultana (2018).

Nessa ultima etapa, o projeto de canais de vazamento é simulado no *software Click2cast* e foi feito com a liga AlSi7Mg. A fundição foi por gravidade em areia verde, onde utilizou a temperatura de vazamento de 713 °C e a do molde 20 °C. Além disso, a malha utilizada foi de 2 mm. Por questões de capacidade computacional, o presente trabalho utilizou uma malha tetraédrica de 2 mm para os canais de ataque, 5 mm para as peças e massalotes e 10 mm para o molde, conforme apresentado na figura 17:

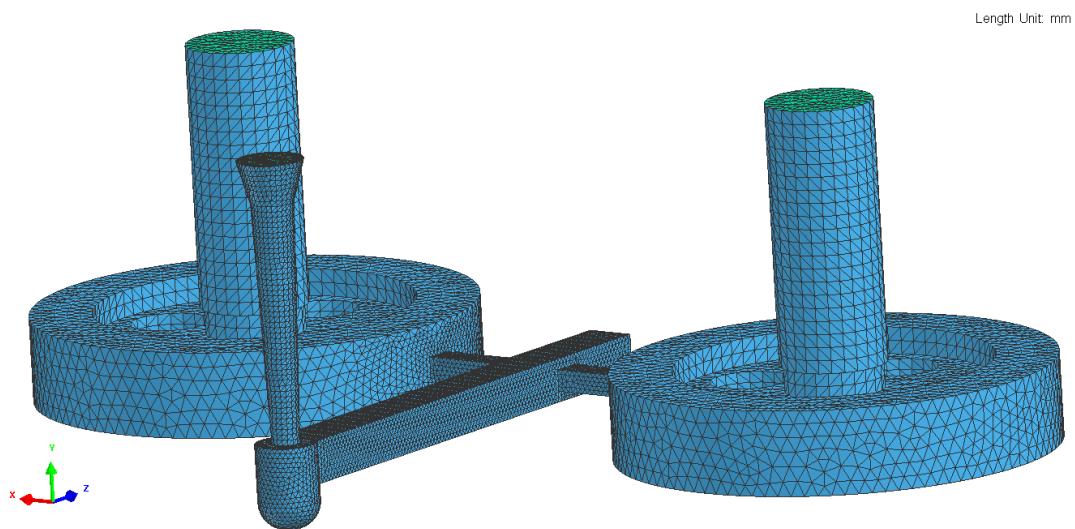
Figura 17: Malha do projeto de polias e suas dimensões.



Fonte: Autoria própria.

Na malha apresentada, foram refinadas as regiões de menores dimensões, como o canal de descida, bacia de vazamento e ataques. Na região da peça e massalotes, a malha tem dimensões intermediárias (5 mm); no molde, a malha possui dimensões de 10 mm. Mesmo com esta adaptação, a malha apresentada possui aproximadamente 900 mil nós, reforçando a necessidade de máquinas robustas para este tipo de simulação. A malha deste projeto pode ser visualizada com mais detalhes na Figura 18:

Figura 18: Malha do projeto de polias.



Fonte: Autoria própria.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. OTIMIZAÇÃO

Nesta primeira seção, serão mostrados os parâmetros obtidos nas simulações para as três ligas Al-Si estudadas, sendo a primeira delas à base de cobre e as outras duas à base de magnésio. Estas características são muito importantes, pois ajudam a explicar seus comportamentos.

4.1.1. Liga AlSi6Cu4

Como já mencionado, para cada liga foram feitas 16 simulações, com aplicação de condições semelhantes. Os resultados são mostrados na Tabela 4, que mostra os valores de porosidade máxima local, porosidade média e pontos quentes.

A primeira propriedade analisada foi o coeficiente de transferência de calor (HTC), onde foram feitas simulações para os valores de 200, 500, 750 e 1000 $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$. Vale salientar que esta é uma variável de difícil obtenção, pois trata da transferência de calor na interface entre o metal na cavidade do molde e o material do molde. Portanto, como se trata de uma variável experimental e não foi possível encontrar tais valores na literatura, foi utilizado o HTC de forma a visualizar sua influência na fundição por gravidade de ligas Al-Si em molde de areia.

Os valores médios de porosidade máxima local são considerados elevados (30,7%), podendo ser inaceitáveis para certos projetos que exijam maiores forças atuando sobre os componentes nesse ponto especificamente. Analisando o valor de desvio padrão na porosidade máxima local (apenas 0,8%), é possível inferir que o HTC tem influência pouco significativa, pois os valores de porosidade praticamente não se alteraram em resposta às mudanças deste parâmetro. Portanto, como não se conhece o real valor do HTC para as condições apresentadas, foi escolhido o HTC de 500 $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ como o valor otimizado para esta peça, pelo fato de este ser um valor

intermediário conforme destacado na cor amarelo na Tabela 4. Os valores de porosidade média não se alteraram ficando em torno de 1% mostrando a insignificância do HTC nessa variável.

Tabela 4: Resultados das simulações da liga AlSi6Cu4.

AlSi6Cu4		Porosidade máxima	Porosidade média	Pontos quentes
HTC (W/m².K)	200	29,6	1,0	268,6
	500	31,2	1,0	197,9
	750	30,3	1,0	180,5
	1000	31,1	1,0	171,5
	Média	30,7	1,0	189,2
	Desvio padrão	0,8	0,0	44,0
Temperatura do Molde (°C)	30	31,1	1,0	171,5
	80	30,4	1,0	198,0
	130	29,5	1,0	232,9
	180	5,9	1,0	277,0
	Média	24,2	1,0	219,9
	Desvio padrão	12,2	0,0	45,6
Temperatura de Vazamento (°C)	700	31,1	1,0	171,5
	800	30,0	1,0	231,6
	900	6,4	1,0	296,1
	1000	1,1	1,0	365,7
	Média	17,2	1,0	266,2
	Desvio padrão	15,6	0,0	83,6
Tempo de Vazamento (s)	3	30,3	1,0	156,0
	5	31,0	1,0	167,2
	7	30,8	1,0	168,5
	9	30,8	1,0	173,5
	Média	30,7	1,0	166,3
	Desvio padrão	0,3	0,0	7,4

Fonte: Autoria própria.

Os valores dos pontos quentes (*hot spots*) se apresentaram de maneira inversamente proporcional à porosidade, ou seja, os valores mais baixos de porosidade resultaram dos maiores pontos quentes, e vice-versa e isso já era esperado devido a característica do processo de solidificação da liga.

Já a temperatura do molde se mostrou bastante significativa, e a média de porosidade máxima local, que era de 30,7% no HTC, caiu para 24,2%. Valores de porosidade média e pontos quentes permaneceram quase inalterados. O desvio padrão passou de 0,8% (HTC) para 12,2%, mostrando

que as variações deste parâmetro produziram mudanças significativas na resposta, tornando-se de grande valor neste estudo. O que mais chama a atenção é a queda brusca nos valores de porosidade máxima local, que até 130 °C apresentava valores praticamente lineares por volta de 30%. Porém, a 180 °C o valor desta propriedade caiu bruscamente para 5,9%. Logo, o valor escolhido na etapa de otimização será 180 °C que é uma temperatura de pré-aquecimento de molde que pode se chegar na prática facilmente.

Assim como a temperatura do molde, a temperatura de vazamento também se mostrou bastante significativa neste processo, apresentando uma média de porosidade máxima local de 17,2%. A média dos valores dos pontos quentes foi a maior de todas (266,2 s), assim como seu desvio padrão (83,6%). O valor do desvio padrão foi de 15,6%, fazendo esta ser a variável mais importante. Portanto, em um primeiro momento, será utilizado 900 °C como um valor otimizado. Este valor foi escolhido ao invés de 1000 °C, pois 100 °C a menos representa economia de energia no processo, e em grandes lotes esta economia representa um lucro significativo. Vale destacar que a temperatura média na prática para fundição de alumínio gira em torno de 700 °C.

O último parâmetro simulado foi o tempo de vazamento, e este apresentou exatamente a mesma média de porosidade máxima local do HTC (30,7%). Entretanto, seus resultados foram ainda piores, pois seu desvio padrão foi de apenas (0,3%), ou seja, este tem aproximadamente 50 vezes menos influência que a temperatura de vazamento. O valor utilizado neste parâmetro será de 3 segundos, mas pode variar de acordo com características do molde e tamanho da peça.

Os resultados das simulações para esta liga se mostraram satisfatórios, com boas respostas às variações de parâmetros, com redução da porosidade. Ao final do processo, foi feita uma simulação com os valores das variáveis otimizadas, destacadas em amarelo na tabela 4:

- $HTC = 500 \text{ W/m}^2.\text{K}$;
- Temperatura do molde = 180 °C;
- Temperatura de vazamento = 900 °C;
- Tempo de vazamento = 3 s.

Os resultados mostram uma redução significativa da porosidade máxima local, onde seu valor foi de 1,1%; a porosidade média foi de 1,0%, e os pontos quentes foram zero. Os resultados podem ser vistos na tabela 5:

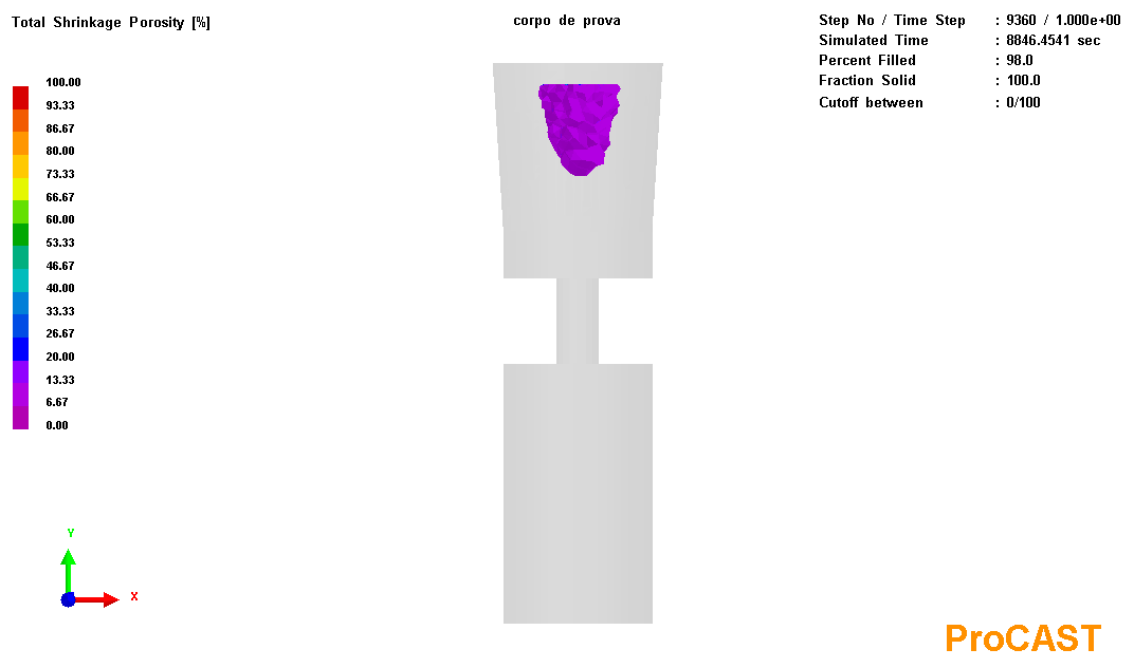
Tabela 5: Resultados da otimização da liga AlSi6Cu4.

AlSi6Cu4	Porosidade máxima	Porosidade média	Pontos quentes
Otimização	1,1	1,0	0,0

Fonte: Autoria própria.

Os resultados desta otimização foram satisfatórios, e pode ser visto na figura 19:

Figura 19: Otimização da liga AlSi6Cu4.



Fonte: Autoria própria.

4.1.2. Liga AlSi7Mg

Nesta seção são mostrados os resultados das simulações para a liga AlSi7Mg, de forma análoga ao que foi feito para a liga anterior. O resumo dos principais parâmetros são mostrados na tabela 6:

Tabela 6: Resultados das simulações da liga AlSi7Mg.

AlSi7Mg		Porosidade Máxima	Porosidade Média	Pontos quentes
HTC (W/m ² .K)	200	36,7	0,6	277,1
	500	37,7	0,6	197,1
	750	38,1	0,6	187,4
	1000	38,6	0,6	178,9
	Média	37,9	0,6	192,3
	Desvio padrão	0,8	0,0	45,3
Temperatura do Molde (°C)	30	38,6	0,6	178,9
	80	37,5	0,5	203,5
	130	36,0	0,5	238,0
	180	33,5	0,4	283,3
	Média	36,4	0,5	225,9
	Desvio padrão	2,2	0,1	45,3
Temperatura de Vazamento (°C)	700	38,6	0,6	178,9
	800	36,3	0,4	252,4
	900	33,6	0,3	333,5
	1000	32,5	0,2	424,6
	Média	35,3	0,4	297,4
	Desvio padrão	2,7	0,2	105,8
Tempo de Vazamento (s)	3	38,5	0,5	160,1
	5	38,0	0,5	173,0
	7	37,9	0,5	177,2
	9	37,8	0,5	177,9
	Média	38,1	0,5	172,1
	Desvio padrão	0,3	0,0	8,3

Fonte: Autoria própria.

O comportamento desta liga é bastante similar ao da liga AlSi6Cu4, analisada anteriormente. Quanto ao HTC, a média da porosidade máxima

subiu para 37,9 %, porém o desvio padrão permaneceu em 0,8%. Entretanto, a média da porosidade média caiu para 0,6%. Assim como no caso anterior, o valor otimizado para o HTC será $500 \text{ W/m}^2.\text{K}$.

Assim como o HTC, o tempo de vazamento continua a ser a variável menos significativa dentre as quatro analisadas. Sua média na porosidade máxima é a maior (38,1%) e seu desvio padrão permanece em 0,3%. Entretanto, a porosidade média caiu para 0,5%. Para este parâmetro, seu valor otimizado será de 3 segundos, assim como no caso anterior.

A temperatura do molde e de vazamento não se mostraram tão significativas como na liga AlSi6Cu4 , pois na porosidade máxima apresentaram desvio padrão de apenas 2,2% e 2,7%, respectivamente. Isso mostra que esta liga responde menos às mudanças dos parâmetros, tornando mais difícil fazer o planejamento experimental. Uma das explicações para este fenômeno é a composição destas ligas, que tem o magnésio em sua composição. Segundo o site Infomet, teores de magnésio elevados podem dificultar a fundição devido à oxidação excessiva do metal líquido, formando escória. Os pontos positivos desta liga é a resistência à corrosão e usinabilidade.

Assim como no primeiro caso, foram feitas simulações com as variáveis destacadas em amarelo na tabela 6. Desta forma, foram feitas duas simulações, denominadas de “otimização 1” e “otimização 2”, contidas na tabela 7. Na primeira, o valor da temperatura de vazamento foi de 900°C e os outros parâmetros são os destacados na tabela.

- $\text{HTC} = 500 \text{ W/m}^2.\text{K}$;
- Temperatura do molde = 180°C ;
- Temperatura de vazamento = 900°C ;
- Tempo de vazamento = 3 s.

Os resultados mostraram uma porosidade média muito baixa (0,1%); porém, a porosidade máxima local foi de 31,2%. Na otimização 2, as variáveis foram praticamente as mesmas, com exceção ao valor de temperatura de vazamento (1.000°C).

- $HTC = 500 \text{ W/m}^2.\text{K}$;
- Temperatura do molde = $180 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
- Temperatura de vazamento = $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
- Tempo de vazamento = 3 s.

Nos resultados (tabela 7), a porosidade máxima local caiu para menos da metade, de 31,2% para 13,3%.

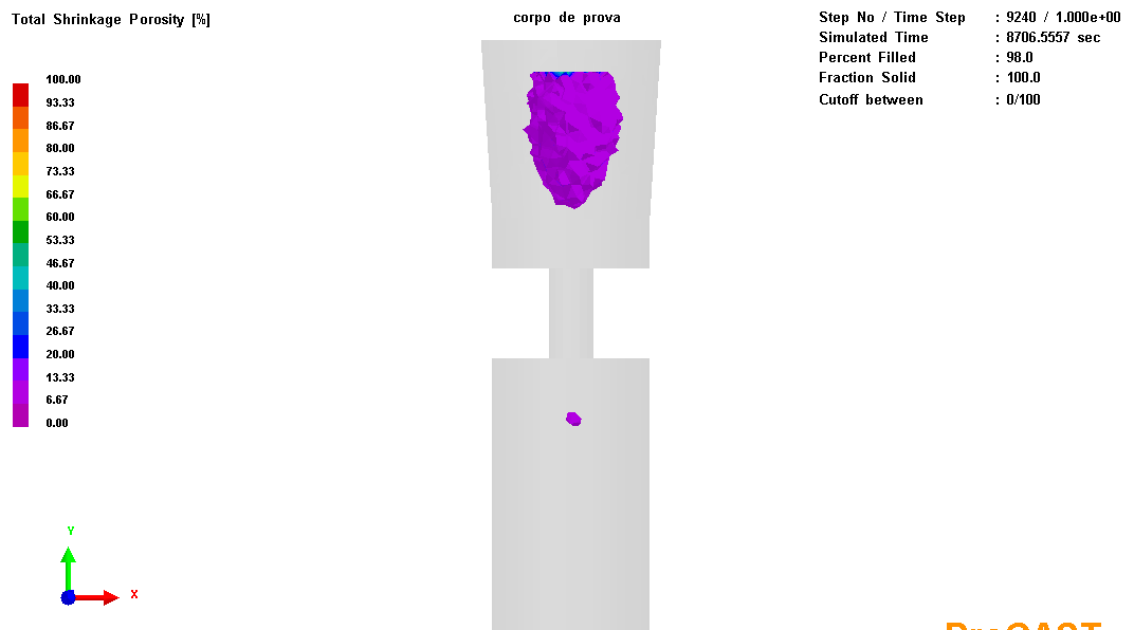
Tabela 7: Resultados da otimização da liga AlSi7Mg.

AlSi7Mg	Porosidade máxima	Porosidade média	Pontos quentes
Otimização 1	31,2	0,1	556,1
Otimização 2	13,3	0,1	698

Fonte: Autoria própria.

Com base nos valores da otimização 2 da tabela 7, a porosidade pode ser vista na figura 20:

Figura 20: Porosidade na otimização da liga AlSi7Mg.



Fonte: Autoria própria.

4.1.3. Liga AlSi7Mg0.3

Os resultados de porosidade máxima desta liga são os maiores dentre as três simuladas, com médias na faixa de 45%. Entretanto, os valores de porosidade média continuam baixos. O fato que se repete é que as variáveis menos representativas são o HTC e o tempo de vazamento, com desvios padrão de 0,6% e 0,3%, respectivamente. Os parâmetros de maior impacto são as temperaturas de vazamento (3,1%) e do molde (2,6%).

Tabela 8: Resultados das simulações da liga AlSi7Mg0.3.

AlSi7Mg0.3		Porosidade Máxima	Porosidade Média	Pontos quentes
HTC (W/m ² .K)	200	46,8	1,0	238,1
	500	47,9	1,0	186,5
	750	48,0	1,0	170,6
	1000	48,3	1,0	163,1
	Média	47,9	1,0	178,6
	Desvio padrão	0,6	0,0	33,8
Temperatura do Molde (°C)	30	48,3	1,0	163,1
	80	47,3	1,0	216,0
	130	45,0	0,9	246,7
	180	42,4	0,8	290,8
	Média	45,8	0,9	229,2
	Desvio padrão	2,6	0,1	53,7
Temperatura de Vazamento (°C)	700	48,3	1,0	163,1
	800	44,9	0,8	212,7
	900	42,9	0,8	305,7
	1000	41,2	0,8	380,6
	Média	44,3	0,8	265,5
	Desvio padrão	3,1	0,1	96,8
Tempo de Vazamento (s)	3	46,8	0,8	146,6
	5	47,1	0,9	160,2
	7	46,9	0,9	164,6
	9	46,5	0,9	163,7
	Média	46,8	0,9	158,8
	Desvio padrão	0,3	0,0	8,3

Fonte: Autoria própria.

De forma análoga ao procedimento feito com as duas ligas já mencionadas, duas simulações foram feitas com os parâmetros ótimos. Estas foram feitas com o intuito de reduzir a porosidade máxima local, visto que seus valores são inaceitáveis para alguns tipos de projetos; os valores de porosidade média são considerados aceitáveis nas três ligas apresentadas. Os parâmetros analisados na otimização 1 são:

- $HTC = 500 \text{ W/m}^2.\text{K}$;
- Temperatura do molde = 180°C ;
- Temperatura de vazamento = 900°C ;
- Tempo de vazamento = 3 s.

Na otimização 1, a porosidade máxima local foi de 37,5%. A redução foi de aproximadamente 25%, se forem considerados os valores aproximados das médias. Mesmo com essa redução, o valor ainda é considerado alto. Os parâmetros da otimização 2 são:

- $HTC = 500 \text{ W/m}^2.\text{K}$;
- Temperatura do molde = 180°C ;
- Temperatura de vazamento = 1000°C ;
- Tempo de vazamento = 3 s.

Na otimização 2, atingiu-se um valor de porosidade máxima local de 35%. Esta foi a liga com piores resultados dentre as três apresentadas. Os resultados das otimizações podem ser vistos na tabela 9:

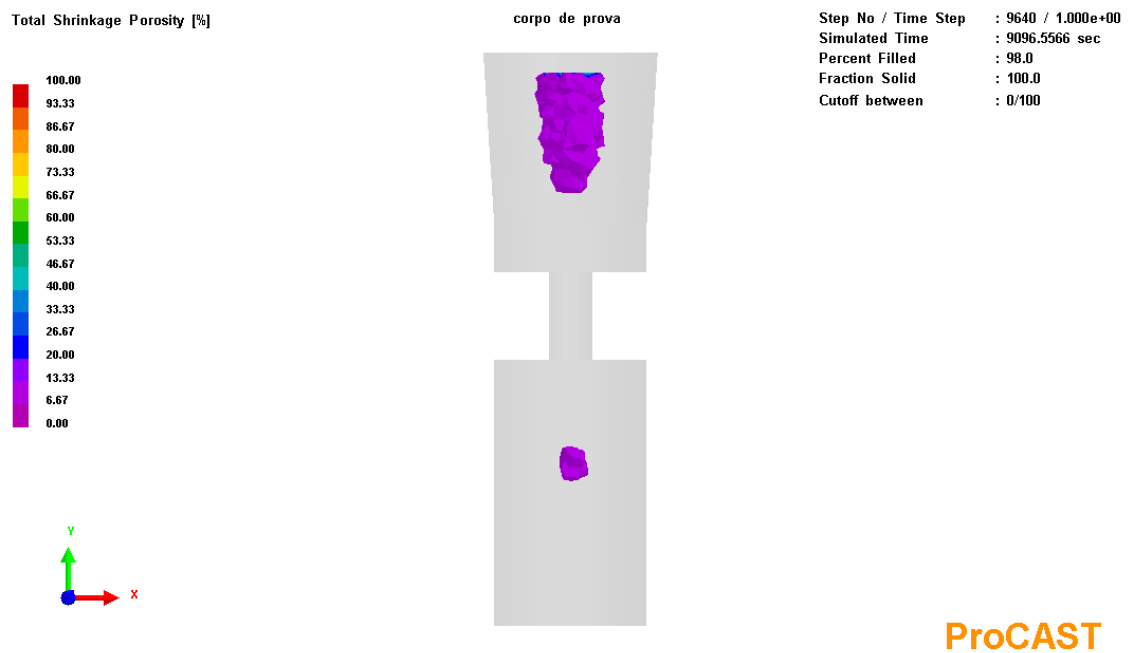
Tabela 9: Resultados da otimização da liga AlSi7Mg0.3 .

AlSi7Mg0.3	Porosidade máxima	Porosidade média	Pontos quentes
Otimização 1	37,5	0,8	538,0
Otimização 2	35	0,8	649,6

Fonte: Autoria própria.

A porosidade na otimização 2 é mostrada na figura 21:

Figura 21: Porosidade na otimização da liga AlSi7Mg0.3.

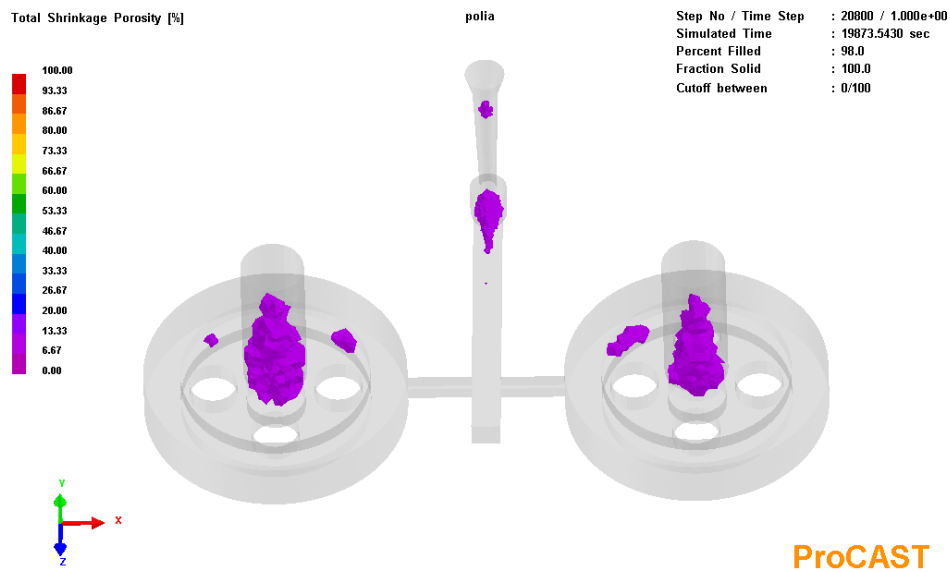


Fonte: Autoria própria.

4.2. APLICAÇÃO DAS VARIÁVEIS OTIMIZADAS

A aplicação dos resultados da otimização se deu em um outro corpo de prova: o projeto de molde de duas polias, desenvolvido por Sultana (2018). A simulação deste modelo durou pouco mais de 7 horas e foram necessários 21 mil ciclos. Os resultados da porosidade podem ser vistos na Figura 22.

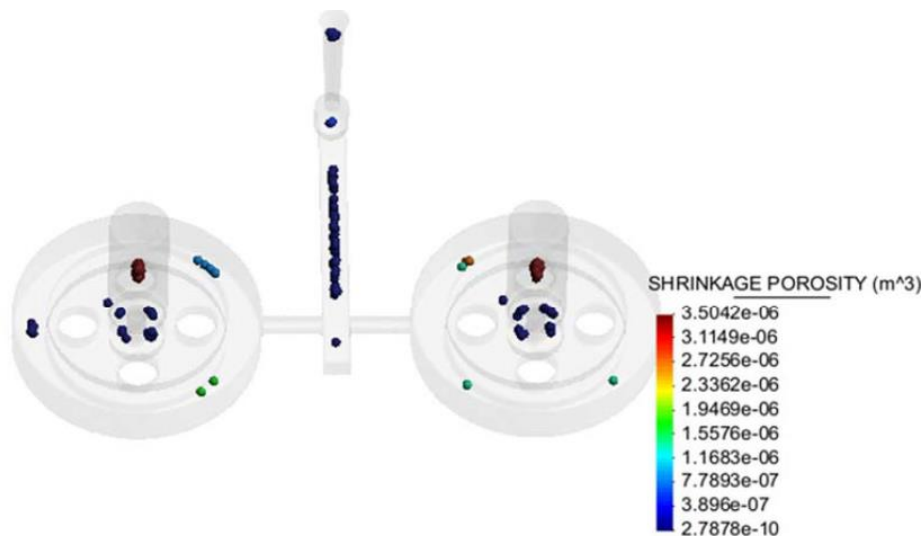
Figura 22: Porosidade encontrada com os parâmetros do artigo estudado.



Fonte: Autoria própria.

Esta fase inicial de replicação do que foi feito na literatura é indispensável, pois é uma forma de validação qualitativa. Neste sentido, os resultados foram satisfatórios, pois há uma semelhança entre o que foi feito no ESI ProCAST e a simulação apresentada por Sultana (2018), que pode ser visto na figura 23.

Figura 23: Porosidade do projeto de polias, simulado no *software Click2cast*.

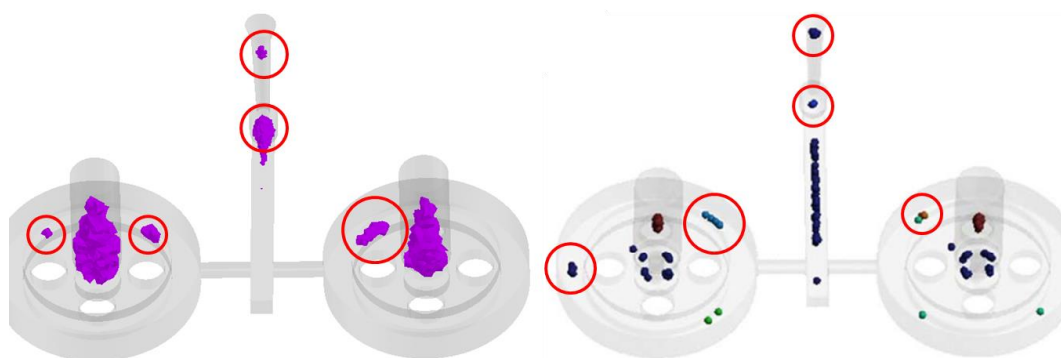


Fonte: Sultana (2018).

Embora tenham sido simulados em *softwares* diferentes, os dois resultados foram semelhantes e apresentam a maioria dos pontos de porosidade nos mesmos lugares. Outro ponto que pode dificultar uma análise quantitativa é o fato de que os dois *softwares* apresentam a porosidade de forma diferente; no ESI ProCAST, este defeito é visto em porcentagem, já o *Click2cast* mostra em metros cúbicos.

Mesmo assim, a figura 24 mostra que estes dois resultados apresentam semelhanças que validam qualitativamente a simulação feita neste trabalho. Por exemplo, os pontos situados no canal de descida e na bacia de vazamento, de dimensões diferentes, mas exatamente nos mesmos lugares. Além disso, três defeitos podem ser notados em ambas as simulações, situados na borda das polias. Uma das porosidades é situada do lado direito e as outras, do lado esquerdo; note que mesmo que as peças sejam exatamente simétricas, o lado esquerdo apresenta mais defeitos que o direito em ambos os casos. Também há porosidade nos massalotes, que concentraram a maior parte da porosidade.

Figura 24: Simulação ESI ProCAST (esquerda) e simulação *Click2cast* (direita).



Fonte: Adaptado de Sultana (2018).

A segunda simulação foi feita com os parâmetros otimizados, utilizando a mesma malha e a mesma liga: AlSi7Mg. O tempo de vazamento foi escolhido como sendo 7 segundos, pois o canal de descida é muito estreito. Assim,

tempos de enchimento muito curtos provocam altas velocidades do metal líquido no interior do molde, podendo gerar defeitos na peça. Sofreram variação apenas os parâmetros de maior influência, como a temperatura do molde e do metal líquido. Um comparativo dos parâmetros pode ser visto na tabela 10:

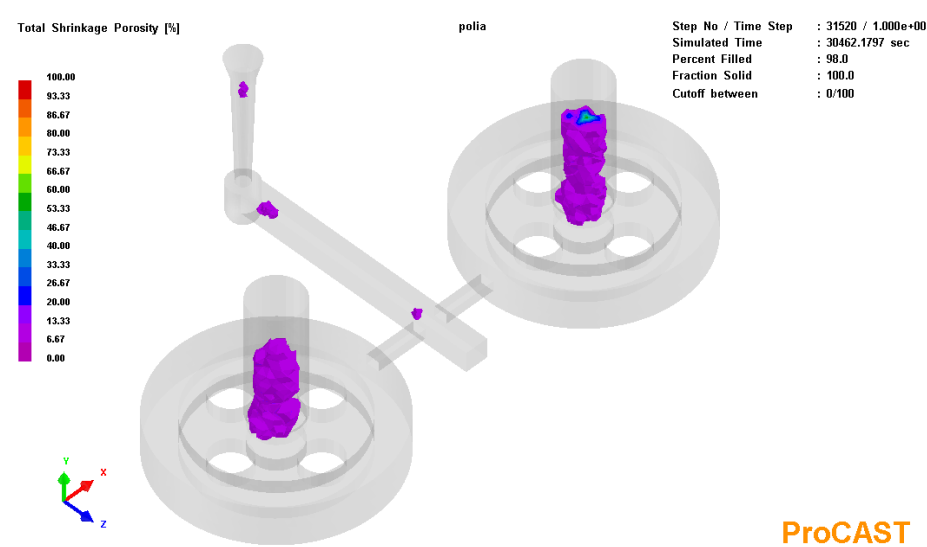
Tabela 10: Parâmetros utilizados nas simulações.

AlSi7Mg	Parâmetros Artigo	Parâmetros Otimizados
HTC (W/m².K)	500	500
Temperatura do molde (°C)	20	180
Temperatura de vazamento (°C)	713	900
Tempo de vazamento (s)	7	7

Fonte: Autoria própria.

Desse modo, utilizando os parâmetros otimizados, foi feita a simulação do projeto de polias, que pode ser visto na figura 25.

Figura 25: Porosidade na peça simulada com parâmetros otimizados.

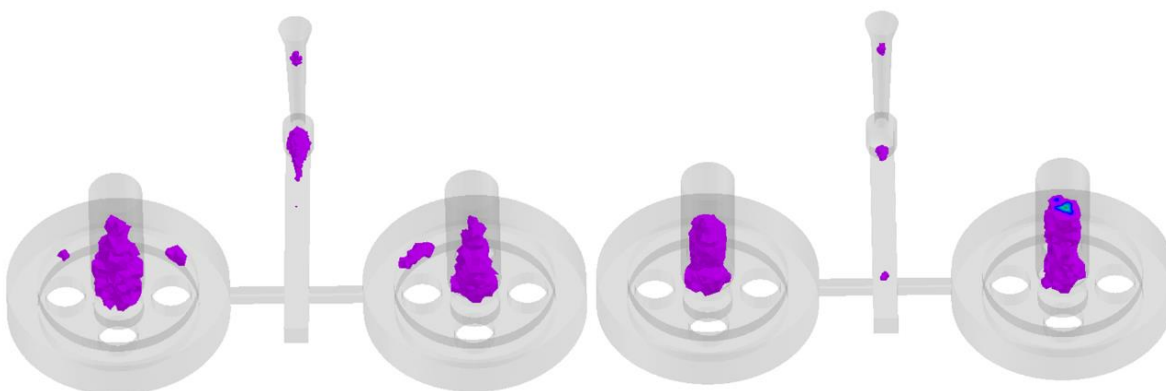


Fonte: Autoria própria.

Como a temperatura foi mais alta do que na primeira parte, esta simulação levou mais tempo para ser feita, cerca de 8 horas. Os resultados foram satisfatórios, pois a peça ficou livre de defeitos, que se concentraram no massalote e nos canais.

Na figura a seguir é possível ver o comparativo entre as duas simulações realizadas no ESI ProCAST. Note que na primeira simulação (esquerda) há defeitos na polia, enquanto na segunda (direita) a peça está livre de porosidade:

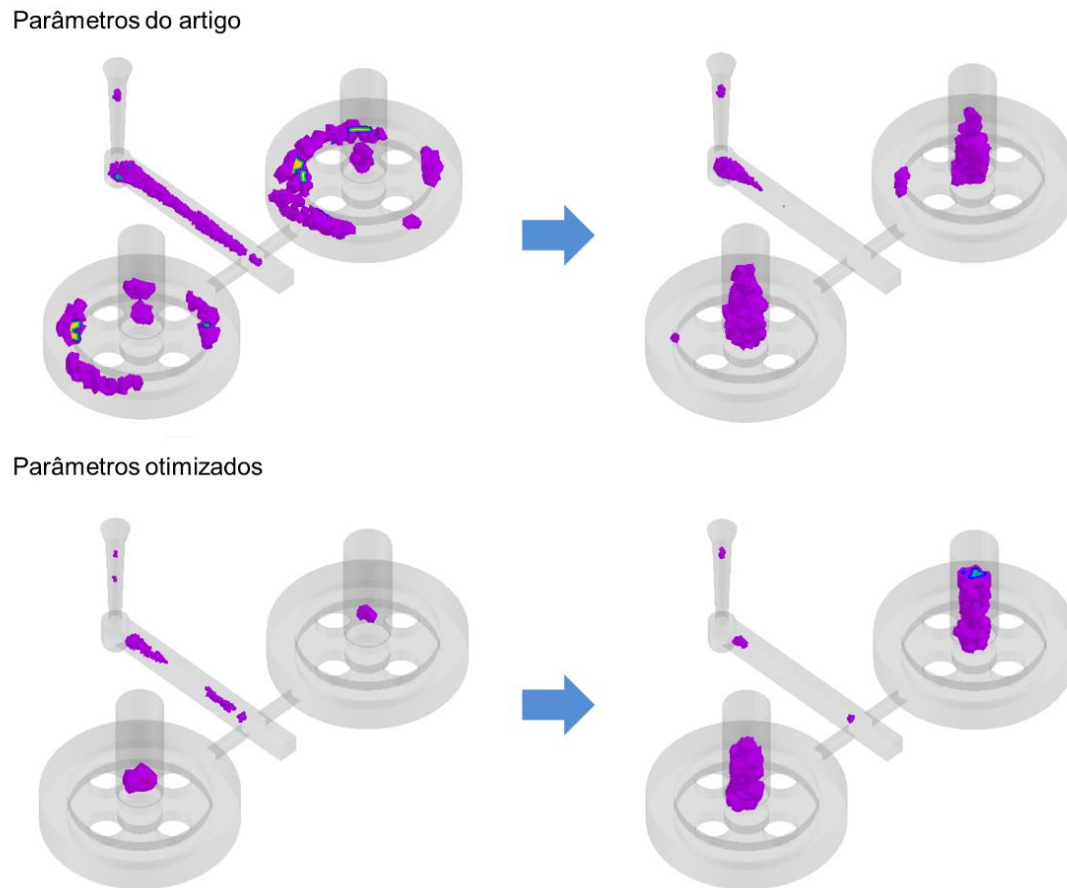
Figura 26: Porosidade nas duas simulações feitas.



Fonte: Autoria própria.

Quanto aos pontos quentes, não há termos de comparação com os resultados do artigo, pois não foram fornecidos. Entretanto, comparando as simulações feitas no presente trabalho, é possível ter uma ideia de como os pontos quentes levam à formação de porosidade. Na figura 27 é possível ver os pontos quentes e as porosidades nos dois casos simulados:

Figura 27: Comparativo entre os pontos quentes (esquerda) e a porosidade (direita) nos dois casos simulados.



Fonte: Autoria própria.

Na simulação dos parâmetros do artigo de Sultana (2018), os pontos quentes se apresentam por toda a peça, além dos massalotes e canais. A implicação disso é a presença de porosidade praticamente nas mesmas regiões, que afetou a qualidade da peça. Para o segundo caso, ainda há a presença de pontos quentes nos canais e nos massalotes, mas não na peça; assim, a peça ficou livre de porosidade.

5. CONCLUSÃO

Os resultados mostram que a simulação de fundição é uma ferramenta de grande valor nos dias atuais, e com ela é possível reduzir os defeitos internos de peças fundidas, aumentando a competitividade das empresas deste ramo. Através do uso de técnicas de planejamento experimental em conjunto com *softwares* de simulação, foi possível fazer a otimização dos principais parâmetros de fundição. O uso destas duas ferramentas em conjunto foram responsáveis pela eliminação de defeitos em uma peça.

Alguns *softwares* comerciais de fundição possuem a ferramenta de planejamento experimental, tais como o ESI ProCAST e o MAGMASoft. Entretanto, os *softwares* que possuem tais ferramentas são de difícil aquisição, dificultando o acesso à informação. Portanto, o presente trabalho se mostra útil para a aplicação destas técnicas de otimização em empresas que utilizam *softwares* mais básicos, reduzindo consideravelmente a hora-máquina em projetos de peças fundidas.

Diante de todos os parâmetros apresentados nas simulações, conclui-se que as ligas Al-Si apresentadas se comportam de acordo com um padrão característico, onde o HTC e o tempo de vazamento mostram-se menos impactantes. Por outro lado, as temperaturas do molde e de vazamento são as que mais variam em resposta à mudança de parâmetros nas simulações.

Além disso, este trabalho é caracterizado como um marco inicial no que diz respeito à simulação de fundição na UFERSA campus Caraúbas, servindo de legado para os próximos trabalhos e podendo ser implantada em projetos de extensão, tais como equipes de Baja SAE e *Aerodesign*.

6. REFERÊNCIAS

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica: Processos de fabricação e tratamento**. Vol. 2. 2ª edição. São Paulo. Makron Books, 1986.

OLIVEIRA, C. G.; GUESSER, W. L.; BAUMER, I. **O uso da simulação do processo de fundição no desenvolvimento de peças em ferro fundido nodular**. IV Seminário de Fundição, Volta Redonda, RJ, 14 a 16 de Maio de 2003.

SULTANA, N.; RAFIQUZZAMAN, M.; RAHMAN, Y.; DAS, A. **Solidification and Filling Related Defects Analysis Using Casting Simulation Technique with Experimental Validation**. International Journal of Mechanical Engineering and Applications. Vol. 6, No. 6, 2018, pp. 150-160. doi: 10.11648/j.ijmea.20180606.12.

RAVI, B. **Casting Simulation and Optimisation: Benefits, Bottlenecks, and Best Practices**. Indian Foundry Journal. January 2008, Special Issue.

KUCHARČÍK, L.; BRŮNA, M.; SLÁDEK, A. **Influence of Chemical Composition on Porosity in Aluminium Alloys**. Archives of foundry engineering, Slovakia, Vol. 14, Issue 2/2014 (5 - 8).

ALMEIDA, G. F. C. *et al.* **Estudo de ligas al-si fundidas em molde de areia verde: efeito da adição de refinador e de modificadores de grão nas propriedades mecânicas**. 18º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. P. 9083-9093. Porto de Galinhas, 2008.

Telecurso 2000. **Processos de Fabricação**. Volume I. Apostila do Curso Técnico em Mecânica.

OLIVEIRA, Daniel Casanova P.M. **Utilização do software ProCast no projecto de alimentação e gitagem de uma peça de aço vazado**. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto. Porto, p. 62. 2009.

TÂMEGA, Fábio. **Fundição de processos siderúrgicos**. Londrina. Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2017. 200 p.

MORO, Noberto. **Processos de fabricação**. Disponível em: <<http://norbertocefetsc.pro.br/downloads/fundicao.pdf>>. Acesso em: 1 de maio de 2021.

ABAL, 2007. **Fundamentos e Aplicações do Alumínio**. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4638869/mod_resource/content/0/09_1fundamentos-Alumnio.pdf>. Acesso em: 3 de abr. de 2021.

Ligas Al-Si. Infomet. Disponível em: <<https://www.infomet.com.br/site/metais-e-ligas-conteudo-ler.php?codAssunto=52>>. Acesso em: 5 de maio de 2021.

Essen Aluminium. Disponível em: <<https://essenaluminium.com/wp-content/uploads/2016/01/Sand-Casting-and-CO2-Process-Essen-Aluminium.jpg>>. Acesso em: 4 de maio de 2021.

About ESI Group. Disponível em: <<https://www.esi-group.com/company/about-esi-group>>. Acesso em 3 de maio de 2021.

FileCR. ESI Procast. Disponível em: <https://filecr.com/wp-content/uploads/2018/12/Scr1_ESI-ProCAST_free-download.png>. Acesso em 3 de maio de 2021.