

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**GABRIELA CRISTINA PARDINHO DA SILVA SOUZA**

**ESTUDO DE CASO DE MELHORIA DE RENDIMENTO METÁLICO E  
REDUÇÃO DE DEFEITOS EM PEÇA FUNDIDA DO SETOR  
AUTOMOBILÍSTICO**

**LONDRINA**

**2023**

**GABRIELA CRISTINA PARDINHO DA SILVA SOUZA**

**ESTUDO DE CASO DE MELHORIA DE RENDIMENTO METÁLICO E  
REDUÇÃO DE DEFEITOS EM PEÇA FUNDIDA DO SETOR  
AUTOMOBILÍSTICO**

**Case study of improvement of foundry metallic yield and reduction of  
defects in automotive casting**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia de Materiais da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientador: Prof.<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Silvia Midori Higa  
Coorientador: Vicente H. de Figueiredo Moraes Neto

**LONDRINA**

**2023**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**GABRIELA CRISTINA PARDINHO DA SILVA SOUZA**

**ESTUDO DE CASO DE MELHORIA DE RENDIMENTO METÁLICO E  
REDUÇÃO DE DEFEITOS EM PEÇA FUNDIDA DO SETOR  
AUTOMOBILÍSTICO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia de Materiais da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 07/junho/2023

---

Prof. Dr. Silvia Midori Higa  
Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

---

Prof. Dr. Odney Carlos Brondino  
Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

---

Prof. Dr. Marcio Florian  
Doutorado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

**LONDRINA**

**2023**

## AGRADECIMENTOS

Como disse Mandela: “a trajetória para o sucesso está sempre ligada àqueles que nos apoiam e acreditam em nós”. Este trabalho de conclusão de curso está, portanto, intrinsecamente ligado a muitos.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná, especialmente ao campus Londrina, meus agradecimentos: pela educação gratuita e de qualidade, pelo espaço onde construí tantas memórias e pela equipe de servidores, que me conduziu até esta última etapa da graduação.

À Multimetal Industria Metalúrgica Ltda., dedico meu mais sincero agradecimento, pela confiança no potencial deste trabalho e por permitirem o desenvolvimento deste projeto dentro de suas instalações.

À minha orientadora Prof. Dr. Silvia Midori Higa, agradeço imensamente todo o apoio que prestou para o desenvolvimento deste trabalho. Seu apoio e abraço à ideia foram fundamentais neste processo.

Ao meu coorientador, Vicente: o seu apoio foi imprescindível para o desenvolvimento desse TCC. Contar com você em todos os momentos de construção deste trabalho, que atestará minha formação em nossa área, tem sido substancial. Seu apoio também é parte importante desta entrega. Obrigada.

A nós, Vicente, uma vida linda – com muito companheirismo e amor.

Ao meu filho Miguel, que ainda não conheceu este mundo: sua existência, antes mesmo do nascimento, foi o meu principal fomento. Contar com sua companhia ao longo deste último semestre foi inspirador.

Vicente e Miguel, que esse seja mais um marco em nossas vidas.

Amo vocês.

## RESUMO

No presente trabalho foi realizado um estudo de caso de melhoria no processo de fabricação de uma peça do setor automobilístico fundida em ferro fundido nodular que apresentava um custo de não qualidade elevado pelo defeito de rechupe e inclusão de areia, assim como um rendimento metálico baixo de 48,5%. O método usado para propor alterações no processo, para aumentar o rendimento metálico e reduzir o custo da não qualidade, foi baseado no uso do *software Quikcast*<sup>®</sup> de simulação de fundição, por meio do qual foi possível compreender as características de solidificação na peça que mais influenciam o resultado final. Inicialmente realizou-se um estudo da produção de um suporte do ajustador, produzido na empresa Multimetal Industria Metalúrgica Ltda., onde se obteve as condições de contorno do processo para realizar as simulações. Com os estudos e aferições auxiliados pelo *software* foi confirmada a possibilidade de aumento do rendimento metalúrgico e também foram propostas as causas raízes de não qualidade por rechupe como resultado da fração sólida e do comportamento da temperatura durante o resfriamento. Já a causa raiz de não qualidade por inclusão de areia era conhecida, no entanto para realizar as alterações propostas era necessário validar a integridade da peça por simulação após a criação das propostas de melhorias. As alterações propostas resultaram na redução do custo de produção devido ao aumento do rendimento metálico do conjunto, assim como redução do índice de não qualidade do fundido.

**Palavras-chave:** fundição; simulação de solidificação; rechupe.

## ABSTRACT

This work presents a case study about the production improvement of a part made of nodular cast iron in which there was a high cost of poor quality by a defect of shrinkage and sand inclusion, along with a low metallic yield of 48,5%. The method used to propose changes in the process, in order to increase metallic yield and reduce poor quality, was through casting simulation by the software Quikcast®, with this resource it was possible to understand the conditions of casting which matter the most to the result. This work started with the study of the current production condition of an automotive part produced by the company Multimetal Industria Metalúrgica Ltda. This initial study led to the discovery of the boundary conditions necessary to simulate the process. After analyzing the simulation results it was confirmed the viability of an increase in metallic yield as well as propositions for the root cause of poor quality by shrinkage based on the analysis of fraction solid and analysis of filling temperature. The root cause of the poor quality by sand inclusion was known, however, to make the necessary changes to the process, a validation for internal sanity was needed and the software was able to confirm it. The proposed solutions yielded positive results as there was a cost reduction for the production of the casting, this cost reduction was due to the increase in metallic yield of the casting along with a reduction of the index in poor quality.

**Keywords:** casting; numerical simulation; shrinkage.

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>8</b>
<b>1.1.</b>	<b>Objetivos</b> .....	<b>9</b>
1.1.1.	Objetivo Geral.....	9
1.1.2.	Objetivos Específicos .....	9
<b>1.2.</b>	<b>Justificativa</b> .....	<b>9</b>
<b>2.</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>11</b>
<b>2.1.</b>	<b>Fundição</b> .....	<b>11</b>
2.1.1.	Fundição em molde de areia verde .....	12
<b>2.2.</b>	<b>Solidificação e resfriamento de metais</b> .....	<b>15</b>
2.2.1.	Nucleação e inoculação .....	20
<b>2.3.</b>	<b>Projeto de fundição</b> .....	<b>22</b>
2.3.1.	Dimensionamento de massalotes e canais de alimentação .....	23
<u>2.3.1.1.</u>	<u>Técnicas para aumento do rendimento dos massalotes</u> .....	<u>25</u>
<b>2.4.</b>	<b>Defeitos de fundição</b> .....	<b>26</b>
<b>2.5.</b>	<b>Ferro fundido nodular</b> .....	<b>27</b>
2.5.1.	Grafita Nodular e o processo de solidificação .....	30
<b>2.6.</b>	<b>Software de simulação de solidificação</b> .....	<b>33</b>
<b>3.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>36</b>
<b>3.1.</b>	<b>Materiais</b> .....	<b>36</b>
<b>3.2.</b>	<b>Métodos</b> .....	<b>38</b>
3.2.1.	Fluxograma .....	38
3.2.2.	Modelamento 3D .....	39
3.2.3.	Simulações de solidificação .....	39
3.2.4.	Análise de Sanidade da peça.....	40
3.2.5.	Verificação da microestrutura por microscopia óptica .....	41
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>42</b>
<b>4.1.</b>	<b>Proposta de melhoria de rendimento metálico</b> .....	<b>42</b>
<b>4.2.</b>	<b>Estudos de alterações nos resfriadores</b> .....	<b>51</b>
<b>5.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>58</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>59</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A fundição é um método de manufatura de materiais metálicos muito tradicional e econômico, pelo qual é possível transformar a matéria-prima diretamente no produto final sem a necessidade de muitas etapas de operação. Teve início a milhares de anos e continua até hoje sendo aprimorada e amplamente usada na indústria para fabricação de produtos para diversos ramos do mercado, dentre eles o setor automobilístico.

Apesar de ser um dos mais simples processos de manufatura de materiais metálicos, a fundição envolve processos que precisam ser desenvolvidos de maneira criteriosa para se obter os melhores resultados, uma vez que muitos parâmetros são imprescindíveis para a obtenção de peças com boa qualidade e que atendam as especificações do cliente. Para isso é preciso ter amplo conhecimento das diversas etapas do processo de fundição, desde o projeto e confecção do modelo até o acabamento final da peça.

Um dos principais objetivos das indústrias é alcançar o melhor desempenho de sua produção, garantindo sua reprodutibilidade e a redução de falhas e desperdícios, para que assim possa se tornar cada vez mais competitiva no mercado. No ramo da fundição não é diferente, a busca pela melhoria de processos e redução de defeitos é um trabalho contínuo e de grande importância, onde atuam engenheiros e projetistas.

No presente trabalho, uma peça do setor automobilístico denominada suporte do ajustador foi analisada com o propósito de elaborar possibilidades de melhorias de rendimento metálico e redução dos defeitos mais recorrentes do processo. A peça foi escolhida visto que sua demanda de produção anual era alta e seus índices de qualidade não estavam dentro do ideal tornando-a relevante dentro do mix de peças da empresa. Para isso propostas de mudanças no projeto da modelação para redução do peso de conjunto e evitar o aparecimento dos defeitos foram trabalhadas, para reduzir assim a quantidade de desperdícios, o que acarretaria ganhos na produção e maior retorno financeiro para a empresa.



## 1.1. Objetivos

### 1.1.1. Objetivo Geral

Propor melhoria no processo de fabricação de uma peça do setor automobilístico obtida por fundição em molde de areia a verde, visando a redução de custos na produção e melhoria no produto final.

### 1.1.2. Objetivos Específicos

A partir do objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Levantar dados de produção e refugo da peça com potencial de estudo desde o ano de 2021 até julho de 2022;
- Analisar e prever a solidificação da peça fundida, com o auxílio de *softwares* apropriados;
- Propor soluções de produção com foco em redução de custos e melhoria de processo, a partir de novos modelamentos e simulações;
- Acompanhar as produções seguintes para monitorar a eficácia das mudanças sugeridas;
- Propor formas de evitar o aparecimento dos defeitos identificados no componente a partir do entendimento da sua origem e analisar a eficácia de tais modificações.

## 1.2. Justificativa

O engenheiro de processo, através do seu conhecimento e entendimento de normas técnicas e da aplicação de uma determinada peça ou componente, juntamente com seu domínio e uso de ferramentas e capacidade de análise crítica de dados, é capaz de realizar melhorias em um processo, tanto em termos da redução de custos de produção, proporcionando maior lucro para o fabricante, assim como melhorias na qualidade da peça para que ela tenha maior facilidade de montagem e uso pelo cliente.

No setor industrial, as mudanças e melhorias são essenciais para o desenvolvimento e aprimoramento dos processos que podem resultar em diversos ganhos, como, por exemplo, na qualidade de trabalho dos operadores, na qualidade

dos produtos para os clientes e um dos principais pontos de interesse da gestão, na lucratividade e redução de custos da empresa.

Outro ponto relevante quando se trabalha com peças voltadas ao setor automobilístico é atender ao nível de exigência elevado e critérios de segurança rigorosos das mesmas, uma vez que podem causar danos e acidentes caso falhe em serviço. Portanto, garantir as melhores propriedades mecânicas e reduzir o surgimento de defeitos internos é uma das prioridades quando se pensa no desenvolvimento de projetos de fundição desse porte.

Com base nesses pontos o presente trabalho se justifica pelo uso dos recursos e conhecimentos de engenharia para melhorar e otimizar os processos, proporcionando ganhos consideráveis para o produto e para o processamento do mesmo. Especificamente, o dimensionamento do conjunto será analisado, levando em consideração as variáveis do processo da empresa, de maneira a reduzir os desperdícios com o auxílio de *softwares* que permitam reproduzir e entender a realidade no ambiente virtual, verificando hipóteses e sendo base para análises críticas para tomada de decisões.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção serão apresentados os principais tópicos da literatura relacionados ao tema do trabalho. Será abordado inicialmente o tema de fundição, com foco em moldagem em areia verde, seguido de conceitos relacionados ao controle de parâmetros de fundição com base no projeto do modelo, uma introdução ao ferro fundido nodular e por fim, uma breve discussão sobre o auxílio de *softwares* de simulação de solidificação na fundição.

### 2.1. Fundição

A fundição é um processo no qual metais e/ou ligas metálicas são transformados em produtos acabados e semiacabados, a partir da sua fusão e posterior vazamento no interior de uma cavidade de um molde, cuja forma corresponde à peça desejada na sua forma definitiva ou quase definitiva. É um processo de manufatura muito antigo, porém muito versátil, que possibilita a obtenção de peças de tamanhos e formas diversas, com complexidade e tolerâncias variadas. Típicas aplicações de produtos fundidos se encontram no setor automotivo, sistemas de distribuição de água, elevadores e máquinas agrícolas são alguns exemplos (BALDAM, 2014; CAMPBELL, 2013; CHIAVERINI, 1986).

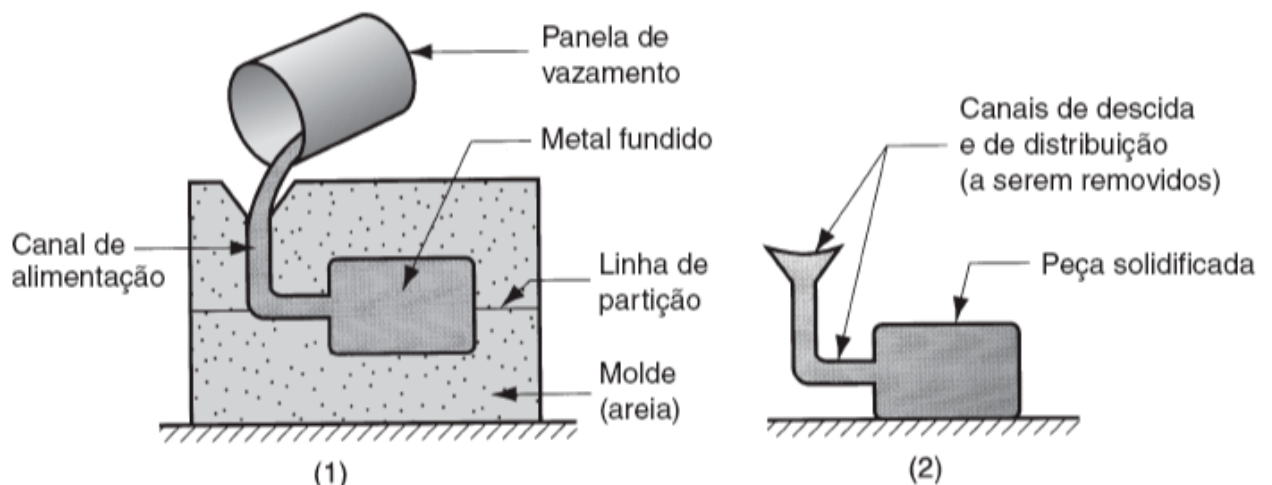
Com a evolução das tecnologias e avanços do conhecimento científico, houve também a evolução desse método de fabricação milenar que é ainda hoje um dos processos de fabricação mais econômicos do mercado. Pode se dizer que a fundição teve seu início com a produção de adornos em cobre e bronze a milhares de anos antes de Cristo e seguiu um cronograma evolutivo passando por avanços no desenvolvimento de fornos e processos que favorecem o conhecimento e controle da composição química das ligas (BALDAM, 2014).

O processo de fundição pode ser classificado de diversas maneiras, uma delas é baseada no tipo de molde usado, podendo ser descartáveis ou permanentes. A construção do molde é normalmente feita com um material de alto ponto de fusão em relação à liga ou metal fundido, podendo ser agregados refratários como a areia ou ligas metálicas de alto ponto de fusão. A escolha do processo adequado dependerá das características e exigências das peças a serem produzidas, além da importância de serem ponderados os fatores econômicos para que se possa ter um projeto viável.

Considerando tal classificação, o processo de moldagem em areia é o método mais tradicional e econômico usado em fundição (BALDAM, 2014; CAMPBELL, 2013).

O início de um processo de fundição de uma peça parte de seu desenho técnico que é a base para a confecção do modelo, canais, massalotes e definição da necessidade ou não de machos, confeccionados em areia e resina por exemplos, usados para peças que possuem geometrias com faces internas. Na sequência são realizadas as etapas de confecção do molde no qual será vazado o metal em temperatura adequada, que após seu resfriamento é desmoldado, seguindo para as etapas finais de acabamento da peça, como exemplificado na Figura 1.

**Figura 1 - Processo de fundição. (1) Vazamento do metal líquido na cavidade do molde e (2) Conjunto de fundição já solidificado e desmoldado**



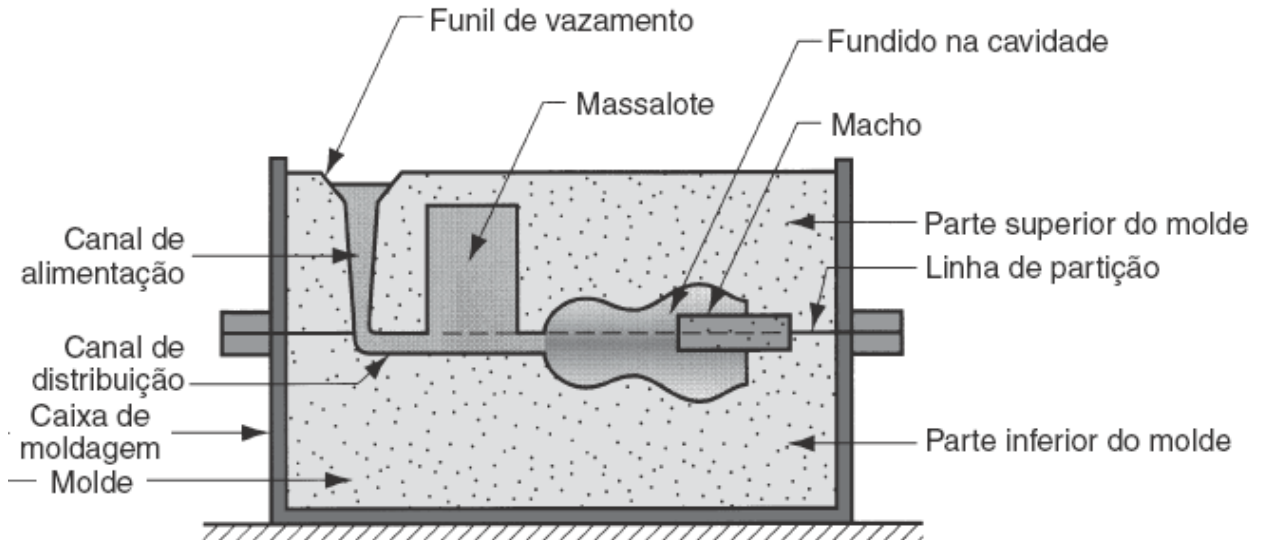
Fonte: Groover (2017)

### 2.1.1. Fundição em molde de areia verde

A moldagem em areia verde é muito empregada na fundição por ser econômica e capaz de produzir em série de peças de qualidade para a maioria dos metais. A etapa de moldagem consiste em compactar uma mistura plástica de areia sobre um modelo obtendo assim o molde que receberá o metal. É um processo aparentemente simples, mas que exige controle e planejamento, já que possui grande influência nas variáveis que controlam a solidificação e acabamento da peça, uma vez que apesar de econômica no panorama geral, pode gerar maiores quantidades de refugo quando comparada a outros tipos de moldagem (BALDAM, 2014).

No molde está contido o sistema de canais de alimentação e distribuição, além dos massalotes que serão responsáveis pela alimentação correta de metal dentro das cavidades, garantindo o preenchimento total das mesmas. Na Figura 2 está ilustrado um exemplo de molde de areia com detalhamento de seus componentes.

**Figura 2 - Exemplo de um molde de areia com detalhamento de canais e massalote**



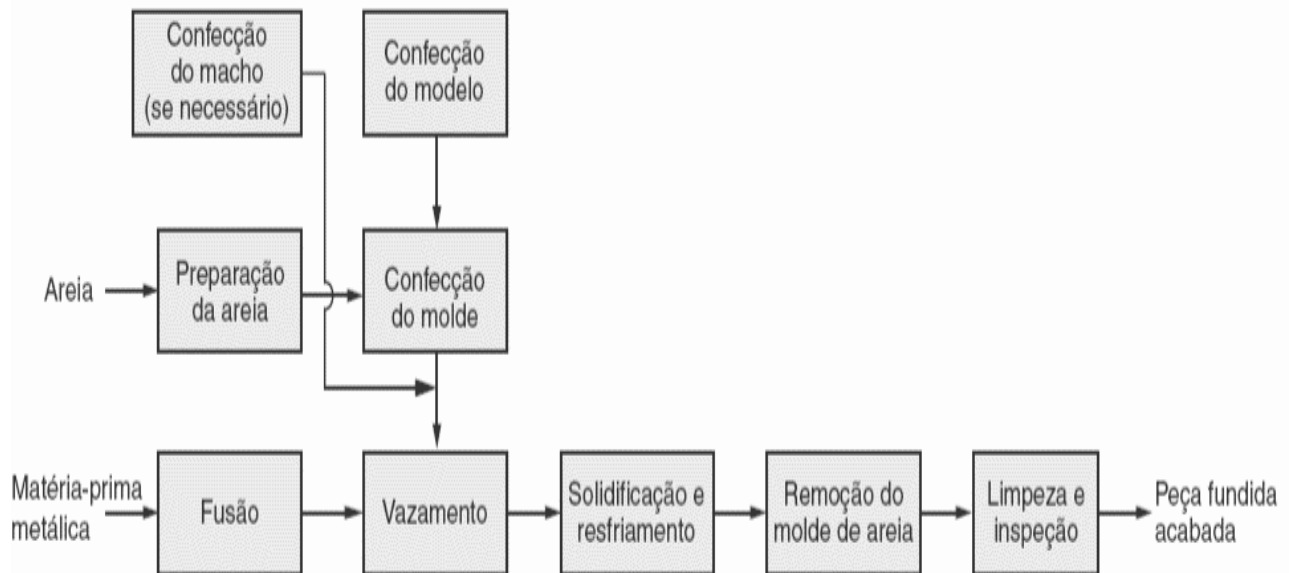
Fonte: Adaptado de Groover (2017)

Existem várias maneiras de construir o molde, mas geralmente as três matérias-primas base são: areia-base (cromita, sílica, sílica vítrea e zirconita), ligantes (argila, cimento, resinas e silicato de sódio) e produtos de adição (carvão mineral, óxido de ferro e serragem). A areia deve possuir boas propriedades refratárias para suportar as altas temperaturas do metal vazado sem nenhum tipo de degradação significativa, além disso o tamanho de grão, sua forma e distribuição também impactam nas propriedades do molde, como resistência e permeabilidade (BALDAM, 2014; CHIAVERINI, 1986).

O molde deve atender a diversos requisitos para garantir as melhores condições durante o processo de fundição, mas antes de chegar à confecção do molde existem etapas de grande importância que antecedem as operações de fundição propriamente ditas, como mostrado na Figura 3. Uma delas envolve o desenvolvimento de um projeto de modelação para o dimensionamento e construção

do modelo a partir do qual o molde será confeccionado (CHIAVERINI, 1986; GROOVER, 2017).

**Figura 3 - Etapas para a produção em fundição em areia**



**Fonte: Groover (2017)**

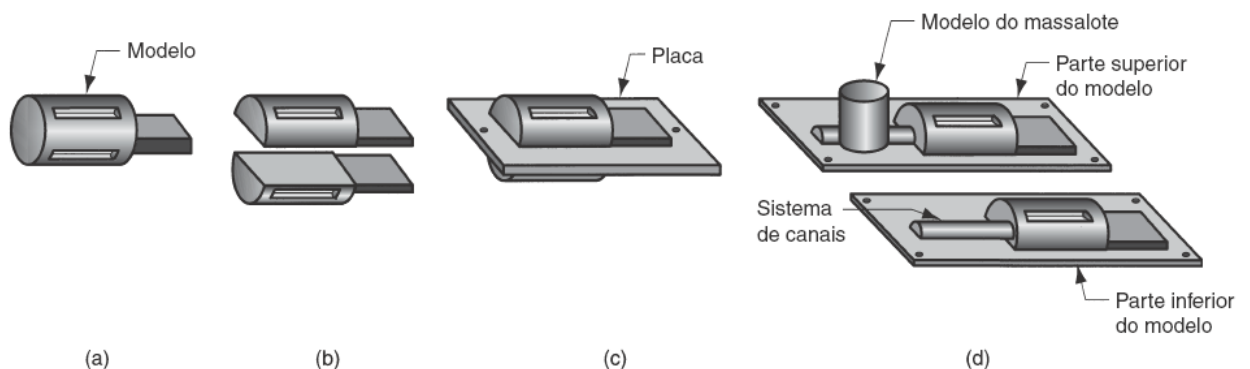
Para formar a cavidade, o método mais tradicional é compactar a areia de moldagem ao redor do modelo (parte superior e inferior) em um contêiner chamado caixa de moldagem. Essa compactação pode ser realizada por vários métodos: socagem manual, máquinas de pressão pneumática, impacto ou projeção centrífuga onde a areia é compactada com alta velocidade (CHIAVERINI, 1986).

O modelo de fundição é basicamente uma reprodução em tamanho real da peça, com dimensões maiores para considerar a contração de solidificação e as tolerâncias para usinagem. Para a confecção do modelo podem ser usados vários tipos de materiais como plásticos, metais e madeira, que é comumente mais usada devido à facilidade de ser trabalhada. Porém modelos de madeira tendem a empenar e desgastar mais rápido sendo mais utilizados para confecção de protótipos. Na produção de fundidos, os modelos em metais, como, por exemplo, o alumínio, são mais vantajosos devido à maior durabilidade (CHIAVERINI, 1986; GROOVER, 2017; ROSSITTI, 1993).

Alguns tipos diferentes de modelos podem ser considerados de acordo com as peculiaridades de cada projeto, como ilustrado na Figura 4. O mais simples é o modelo sólido (individual), Figura 4 (a), mas sua aplicabilidade nem sempre é tão simples uma vez que fica difícil determinar a linha de divisão entre as duas partes do molde o que muitas vezes limita seu uso em produção de pequenos lotes. Os modelos bipartidos, Figura 4 (b), consistem em duas peças cujo plano de separação coincide com a divisão do molde, tais modelos são mais apropriados para peças de geometria complexa e quantidades moderada de produção (GROOVER, 2017).

Na produção de grandes quantidades as placas modelo são mais usadas. Pode-se ter duas variações desse tipo de modelo, primeiro como mostrado na Figura 4 (c), onde cada parte do modelo é fixada de um lado da placa, também chamado de placa reversível. Uma segunda opção de placa modelo é o ilustrado na Figura 4 (d), no qual cada parte é fixada em placas separadas e dessa forma, podem ser fabricados de maneira independente (GROOVER, 2017).

**Figura 4 - Tipos de modelos: (a) modelo sólido, (b) modelo bipartido, (c) placa reversível e (d) placa modelo com cada parte em uma placa**



Fonte: Groover (2017)

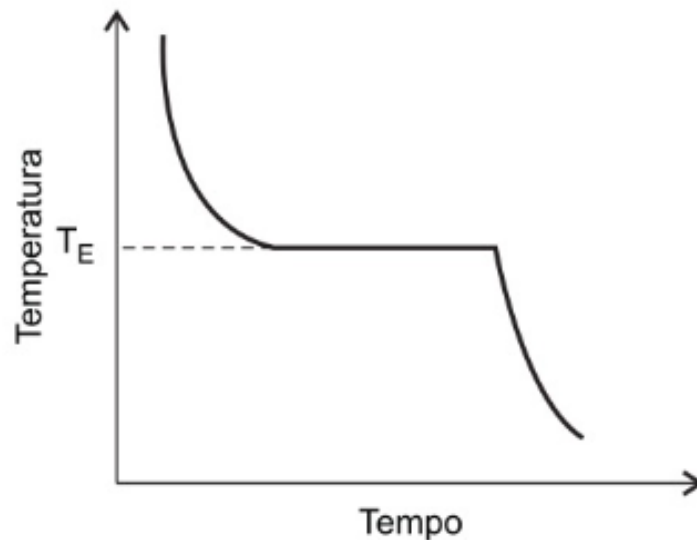
## 2.2. Solidificação e resfriamento de metais

A solidificação é um processo que envolve a transformação do metal líquido ao seu estado sólido. Alguns aspectos que envolvem o mecanismo físico da solidificação incluem o tempo, a contração, a direção de solidificação e o projeto do massalote, além do tipo de metal ou liga que será solidificada. A composição irá influenciar nesse fenômeno e será responsável por suas características finais, pois durante esse processo os átomos que antes estavam arranjados de maneira aleatória

no estado líquido começam se organizar de maneira ordenada em uma rede cristalográfica (CAMPBELL, 2013; GROOVER, 2017).

Nos metais puros o comportamento da solidificação é mais conhecido e de melhor entendimento, já que possui um comportamento mais simples quando comparado com as ligas metálicas. Na Figura 5 é visto uma curva de resfriamento de um metal puro hipotético, evidenciando que a solidificação ocorre em uma temperatura de equilíbrio de solidificação constante em função do tempo, durante o qual o calor latente de fusão é liberado para o molde (CAMPBELL, 2013; GROOVER, 2017).

**Figura 5 - Curva de Resfriamento de um metal puro**



**Fonte: Baldam (2014)**

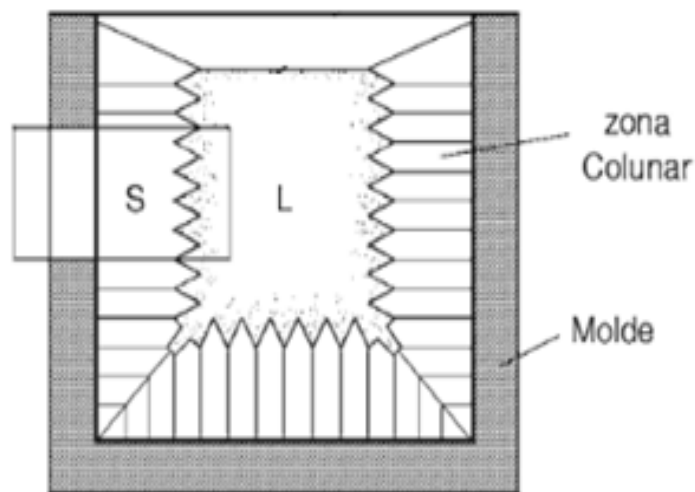
Muitos fenômenos estão envolvidos no processo de solidificação dos metais e são de extrema importância para tentar controlar o processo. Uma dessas peculiaridades é a cristalização, que consiste no aparecimento das primeiras células cristalinas unitárias que servem como núcleos para o desenvolvimento dos grãos e da estrutura do metal em processo de solidificação (CHIAVERINI, 1986).

A solidificação tem início com a nucleação, que em muitos casos pode ser iniciada pela própria parede do molde, porém o uso de agentes nucleantes é muito comum para o controle desse fenômeno. Devido à diferença de temperatura entre o



molde e o metal ocorre a nucleação por toda a superfície do molde, onde cada ponto de nucleação dará origem a um cristal ou grão que seguirá crescendo na direção mais favorável com o avanço do resfriamento do metal, variando sua velocidade de acordo com as propriedades térmicas do molde e do metal, resultando em uma estrutura similar a ilustrada na Figura 6, na qual S se refere a parte já solidificada e L à porção ainda líquida, onde há o crescimento dos grãos em direção perpendicular ao molde adquirindo essa geometria colunar (CAMPBELL, 2013; GROOVER, 2017).

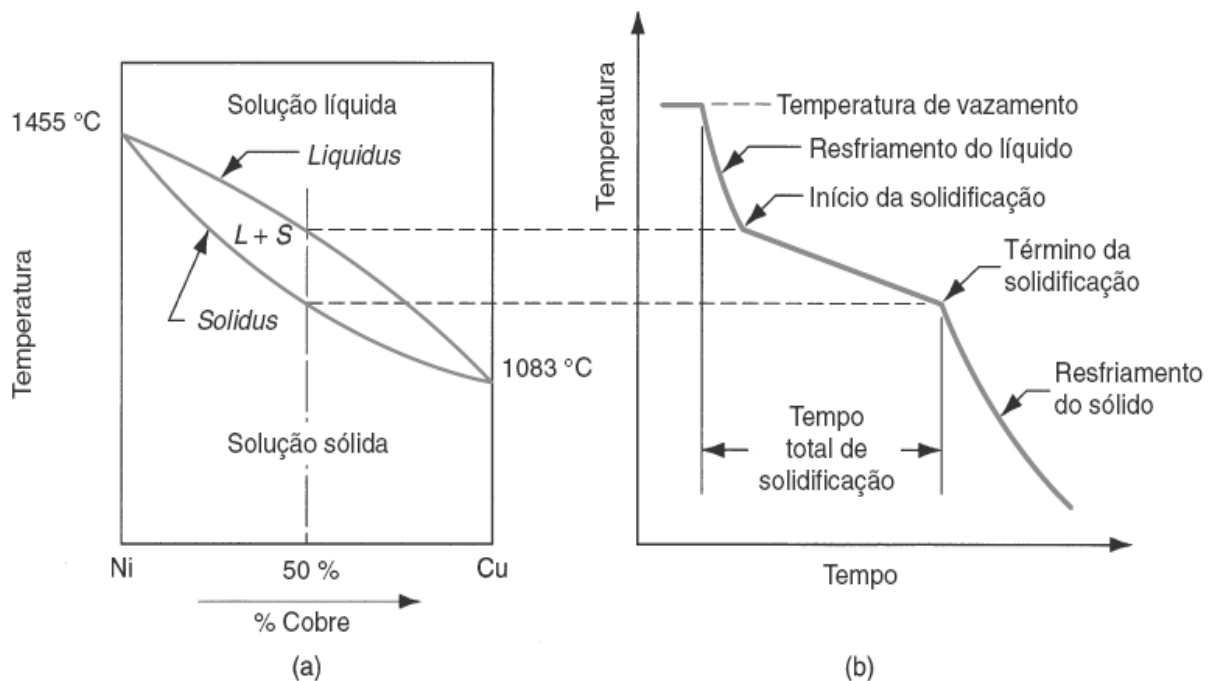
**Figura 6 - Zona de solidificação para um metal puro em fundição convencional**



**Fonte: Adaptado de Campbell (2013)**

Para ligas metálicas, exceto as de composição eutética, a curva de resfriamento se mostra um pouco mais complexa, possuindo uma inclinação onde há variação de tempo e temperatura no intervalo de solidificação total. Isso ocorre porque existe a formação das fases termicamente estáveis para aquela condição de resfriamento. Portanto, ao atingir a temperatura *liquidus*, o sólido começa a se formar, porém ainda coexistindo com metal líquido até a completa solidificação ao atingir a temperatura *solidus*, como visto na Figura 7, que exemplifica a curva de resfriamento para uma liga de cobre-níquel, relacionando-a com seu diagrama de fases (CAMPBELL, 2013; GROOVER, 2017).

**Figura 7- (a) Diagrama de fases - sistema de ligas cobre-níquel e (b) Curva de resfriamento da liga com composição 50%Ni-50%Cu**

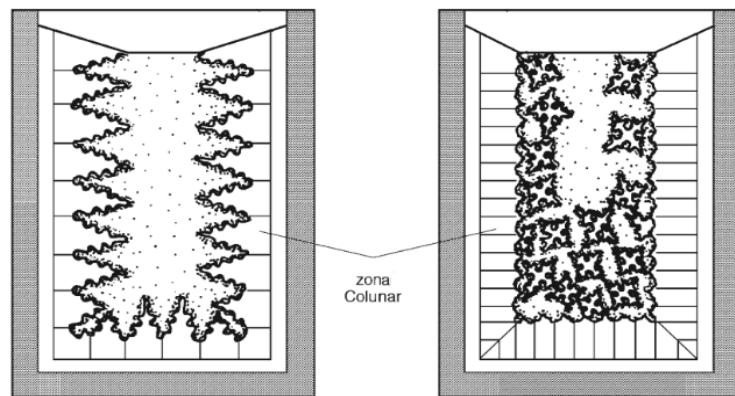


**Fonte: Groover (2017)**

O crescimento dos cristais, chamado de crescimento dendrítico, não se dá de maneira uniforme, pois varia com os eixos cristalográficos bem como com a direção de transferência de calor, as instabilidades da interface sólido-líquido e a composição do metal, que devido a sua variação durante a solidificação, pode gerar segregações ao final do processo, acarretando diversos efeitos prejudiciais às propriedades e características desejadas (BALDAM, 2014; CAMPBELL, 2013; CHIAVERINI, 1986).

A nucleação nas ligas também ocorre de maneira similar a descrita anteriormente para os metais puros, porém a movimentação do líquido pode causar quebra das pontas das dendritas e carregá-las para dentro do líquido, fazendo assim com que estas atuem como núcleos para novos grãos, como mostrado na Figura 8. Além disso, é também no interior da cavidade, chamado de ponto quente, que poderão ocorrer as segregações de elementos de liga (CAMPBELL, 2013; GROOVER, 2017).

**Figura 8 - Estrutura de grãos característica de uma liga fundida**



**Fonte: Adaptado de Campbell (2013)**

Um ponto relevante para o estudo da solidificação é o entendimento das diferenças do metal em seus estados físicos, como por exemplo a densidade. Um metal sólido na maioria dos casos possui uma densidade maior do que quando se encontra em seu estado líquido, logo ocupa menos espaço. Resumidamente ele irá sofrer um fenômeno de contração de volume responsável por introduzir rechupe e porosidade no local onde o metal se solidificará por último (CAMPBELL, 2013).

A contração de volume deve ser estudada para que se possa dimensionar corretamente o modelo, os canais e massalotes. São basicamente 3 tipos de contração: líquida, de solidificação e a sólida. A contração líquida se dá com a diminuição da temperatura até o início da solidificação; a contração de solidificação corresponde à variação de volume que ocorre durante a solidificação e a contração sólida ocorre já no estado sólido a partir da temperatura do fim da solidificação, determinada pelo coeficiente de expansão térmica do metal sólido (CHIAVERINI, 1986; GROOVER, 2017).

Dentre os tipos de contração no metal a mais relevante é a contração de solidificação, também conhecida como contração primária, já que é dela que os defeitos tenderão a ocorrer, uma vez que os demais tipos de contração já são compensados de forma mais direta no projeto. Essa etapa de contração requer mais atenção pelo fato de que a diferença de densidade entre o líquido e o sólido que está sendo formado pode resultar em porosidades ao final da solidificação (CHIAVERINI, 1986).

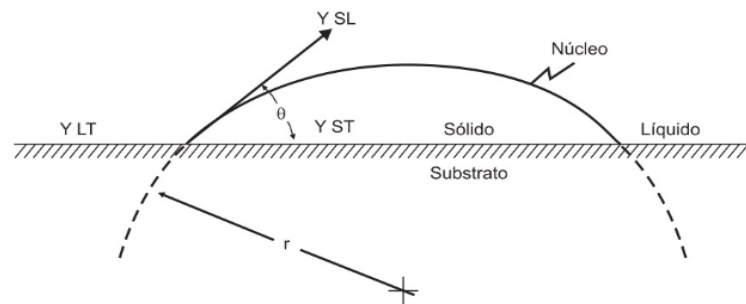
### 2.2.1. Nucleação e inoculação

Como já discutido anteriormente, os líquidos possuem ordem atômica de curto alcance, são classificados como amorfos, enquanto os sólidos possuem longas redes de átomos ordenados, que são formadas a partir da nucleação e crescimento dos grãos. A teoria clássica da nucleação assume que esta ocorre com a formação espontânea de aglomerados de átomos ou moléculas durante o resfriamento. Dessa maneira, torna tal fenômeno como constante e independente do tempo, porém muitas vezes foge a esse padrão (STEFANESCU, 2015).

A nucleação pode ser classificada com base na natureza do substrato nucleante em homogênea ou heterogênea. A nucleação homogênea ocorre quando a temperatura se encontra abaixo da temperatura de transformação na qual ocorrem variações de densidade, configurações atômicas e quantidade de calor por exemplo, fazendo com que ocorra a formação de minúsculas partículas do sólido cristalino, chamados embriões, com composição igual à do líquido. Conseqüentemente, uma energia de interface será criada aumentando a energia livre do sistema, o embrião continua em crescimento até atingir um tamanho mínimo crítico, resultando em uma diminuição de energia livre, se tornando um núcleo estável que terá um crescimento espontâneo gerando os grãos, caso seja submetido a um super-resfriamento térmico (BALDAM, 2014; STEFANESCU, 2015).

A nucleação desencadeada por substratos diferentes do metal é chamada de nucleação heterogênea, pode ser iniciada por óxidos, fragmentos de cristais, pelas paredes do molde e pela adição de produtos químicos como refinadores de grão ou inoculantes. Nesse tipo de nucleação ocorre a ligação do metal nos locais mais favoráveis do nucleante de onde cresce o núcleo átomo por átomo. Uma característica importante entre o metal e o nucleante é sua capacidade de molhabilidade, uma vez que quanto menor o ângulo de contato entre o metal e o substrato maior sua afinidade, como mostrado na Figura 9, diminuindo assim a barreira energética para o início da nucleação, tornando-a favoravelmente mais rápida. Essa taxa também é aumentada com a presença de um maior número de sítios de nucleação disponíveis (STEFANESCU, 2015).

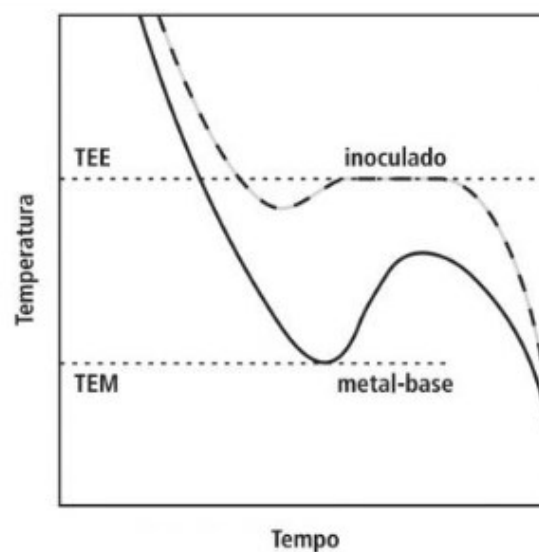
**Figura 9 - Formação de um núcleo heterogêneo sob um substrato e as tensões superficiais envolvidas**



**Fonte: Baldam (2014)**

A inoculação, nucleação heterogênea, é frequentemente usada em processos comerciais, uma vez que a nucleação homogênea é cineticamente inviável, pois para que ela ocorra devem existir instabilidades no sistema, proporcionadas por exemplo pelo super-resfriamento do metal, que dificilmente será favorável em processos comerciais. De acordo com a Figura 10, quando não há introdução de um nucleante, a temperatura de transformação do metal é mais baixa, temperatura metaestável (TEM), podendo gerar microestruturas indesejadas no metal. Quando inoculado o metal se transforma a uma temperatura estável (TEE) gerando estruturas mais controladas e em uma faixa de temperatura melhor para o processo (GUESSER, 2009).

**Figura 10 - Curvas de análise térmica para ferros fundidos não inoculados e inoculado**



**Fonte: Guesser (2009) apud Kanno et al. (2006)**

Para se ter um agente nucleante eficiente, este deve atender alguns requisitos como: estar sólido no fundido (ter ponto de fusão maior); baixo ângulo de contato com o metal; estar bem disperso no líquido ou possuir superfície rugosa; possuir estrutura cristalina próxima ao metal sólido. Os inoculantes também podem ser usados para refino, controle de morfologia dos grãos e microestrutura (BALDAM, 2014; STEFANESCU, 2015).

### **2.3. Projeto de fundição**

A obtenção de peças fundidas tem início com o estudo do modelo e dos sistemas de alimentação que serão usados no projeto. Como discutido, são diversos parâmetros que influenciam esse caminho e que terão impacto na qualidade e no custo do projeto. Portanto, considerando que as exigências estão cada vez mais rigorosas, a etapa do projeto de fundição deve sempre continuar em processo de melhoria, uma vez que é fundamental para a competitividade no mercado (GROOVER, 2017).

Segundo Chiaverini (1986) geralmente o projeto considera as seguintes etapas iniciais: desenho da peça, projeto e confecção do modelo (modelagem), a partir daí segue o processo de fundição com a moldagem e fusão (Figura 3). O projeto de desenvolvimento do ferramental será determinado pelo tipo de máquina de moldagem disponível na empresa, pelo material e dimensões do molde, que irão determinar a viabilidade de produção das peças.

Com relação às especificações da peça é preciso considerar seu desenho e o metal que a compõe para que os fenômenos que ocorrem na solidificação, tanto dimensionais quanto físico-químicos, sejam levados em consideração. De acordo com Chiaverini (1986) e Groover (2017) algumas recomendações são:

- Projeto adequado das seções das peças, de modo que não haja cantos vivos e mudanças bruscas de seções e sim uma variação gradual, evitando concentrações de tensão;
- Considerar uma espessura mínima de paredes é fundamental para ligas de resfriamento mais rápido que podem chegar a não preencher tais cavidades ou proporcionar pontos de maior dureza influenciados pela velocidade de resfriamento sobre a estrutura da liga;

- Prever conicidade no modelo para facilitar a confecção do molde, usando os chamados “ângulos de saída”.

Ainda, segundo Chiaverini (1986), sobre o projeto do modelo alguns aspectos importantes valem a pena serem mencionados:

- Contração do metal ao solidificar que é diretamente dependente do tipo de liga usada, tanto a volumétrica compensada diretamente nas dimensões do modelo, quando a de solidificação compensada por uso de massalotes;
- Prever sobremetal para posterior usinagem da peça;
- Verificar a linha de divisão do modelo entre as partes superiores e inferiores, sendo recomendado ser feita sempre num mesmo plano de divisão da peça;
- Estudar a localização dos machos e prever as cavidades de colocação dos mesmos;
- Prever canais de vazamento e alimentação da peça.

### 2.3.1. Dimensionamento de massalotes e canais de alimentação

O massalote é uma reserva de metal líquido adjacente à peça que tem como função promover a compensação das contrações líquida e de solidificação. Projetar um massalote é um passo que envolve variáveis como alimentação da peça, direção de solidificação, posicionamento e as particularidades do metal a ser fundido. Algumas das condições que um massalote deve atender são (BALDAM, 2014):

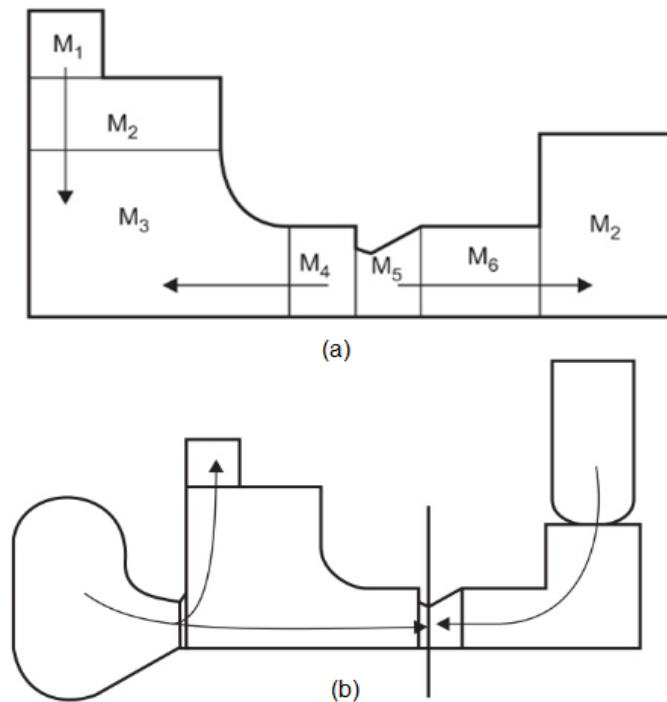
- Estar localizado no ponto quente da peça;
- Solidificar após a solidificação da peça;
- Ter as dimensões adequadas para ser capaz de compensar a contração;
- Atuar com pressão máxima até o fim da solidificação;
- Deve possuir o menor peso possível para diminuir custos.

Para entender onde será posicionado o massalote e qual seu tempo de solidificação pode-se usar a equação de Chvorinov, Equação (1), que fornece o tempo de solidificação de uma seção baseada em uma constante dependente do molde, do volume e da área da seção, sendo essa relação volume/área chamada de Módulo Parcial de solidificação da peça, muito usada para determinar a sequência de

solidificação da peça a partir de sua subdivisão em seções mais simples, como mostrado na Figura 11 (BALDAM, 2014; GROOVER, 2017).

$$t = C \left( \frac{V}{S} \right)^2 \quad \text{Eq. (1)}$$

**Figura 11 - (a) Determinação da sequência de solidificação e (b) ação dos massalotes na alimentação da peça pelo uso de módulos de solidificação**



**Fonte: Adaptado de Baldam (2014) apud Senai (1987aa)**

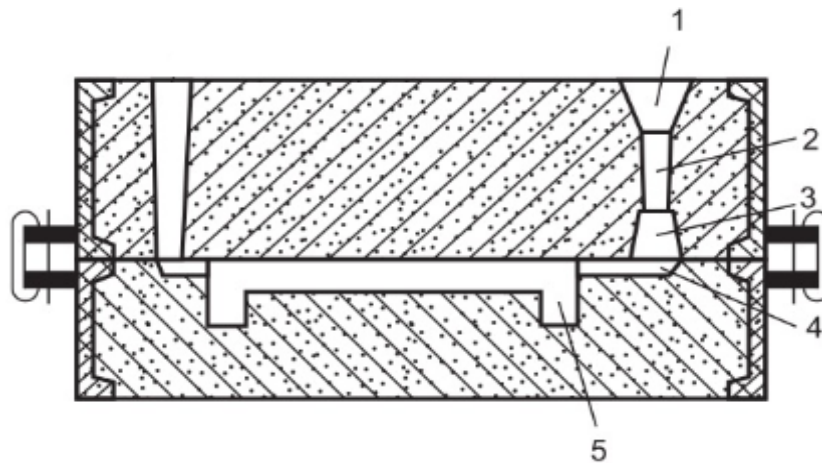
Existem alguns tipos de massalotes classificados como direto (topo), que é conectado no topo da superfície, ou lateral, conectado lateralmente por meio de um conduto. Existe ainda uma segunda subclassificação, o tipo aberto e o tipo cego. O primeiro fica localizado no topo do molde de maneira que fique parcialmente exposto ao ar, esse tipo facilita a saída de gases, porém perde mais calor, por isso são usados em conjunto com pós de cobertura ou materiais exotérmicos para ajudar diminuir a perda de calor. Já o segundo tipo se encontra totalmente contido dentro do molde, possui maior eficiência térmica. No entanto, por ter menor altura perde força na alimentação da peça em alguns casos (BALDAM, 2014; GROOVER, 2017).

O projeto dos canais é responsável pelo completo preenchimento da peça de forma que garanta sua integridade. Além disso, também deve levar em consideração



a velocidade de enchimento, rendimento metálico e posicionamento na peça, para que tenham controle do fluxo de metal, diminuindo a velocidade e turbulência, contribuindo com gradientes térmicos que facilitem a alimentação e também evitem regiões de baixa pressão para atenuar a aspiração de gases. Na Figura 12 observa-se uma ilustração esquemática de um sistema de alimentação comum. Podem ainda ser construídos canais de respiro que são responsáveis pela saída de ar e gases provenientes de combustão da resina e da areia durante o vazamento do metal no molde (BALDAM, 2014; ROSSITTI, 1993).

**Figura 12 - Sistema de alimentação comum; 1 - bacia de alimentação, 2 - canal de descida, 3 - canal de distribuição, 4 - canal de ataque e 5 - massalote**



**Fonte: Adaptado de Baldam (2014)**

#### 2.3.1.1. Técnicas para aumento do rendimento dos massalotes

Para se obter uma peça com a sanidade desejada é preciso conhecer a direção de solidificação para que após o massalote dimensionado, este seja o último a solidificar. Muitas vezes é preciso alterar as condições de trocas térmicas para direcionar de maneira favorável a solidificação do conjunto. Isso pode ser realizado com uso de luvas exotérmicas, materiais isolantes nos massalotes, uso de resfriadores ou com estudo do posicionamento de canais de ataque (BALDAM, 2014).

Os resfriadores externos possuem a função de acentuar o gradiente térmico local favorecendo a alimentação, levando em consideração cálculos de dimensionamento do resfriador, o qual se baseia em um balanço térmico afim de reduzir o módulo da seção, bem como calcular a área de contato resfriador/peça para

garantir o funcionamento do mesmo, que seria a solidificação rápida de certas regiões da peça (BALDAM, 2014; GROOVER, 2017).

O uso de luvas também auxilia no controle das condições térmicas. Existem dois tipos de luvas, as isolantes e as exotérmicas. As luvas isolantes visam aumentar o tempo de solidificação do massalote sem aumentar seu volume. As luvas exotérmicas mantêm o metal do massalote líquido durante quase todo o período de solidificação da peça, pois aumentam o módulo aparente do mesmo (BALDAM, 2014).

#### **2.4. Defeitos de fundição**

É comum a presença de peças “não conforme” após um processo de fundição já que existem muitas variáveis dentro do processo que implicam em aparecimento de defeitos, porém, alguns desses defeitos são mais comuns. Portanto, se faz necessário um bom método de inspeção e planos para tomadas de ações quando os defeitos se tornam muito frequentes e impactam no andamento e na lucratividade da empresa.

Alguns desses defeitos descritos por Baldam (2014) e Groover (2017) são:

- Falha de enchimento: metal se solidifica antes de completar a cavidade. Pode ocorrer devido a uma fluidez insuficiente do metal, temperatura de vazamento baixa, vazamento muito lento e/ou seções muito finas do fundido;
- Inclusão de areia: com a erosão das paredes do molde de areia grãos de areia podem ser arrastados para o interior da cavidade, resultando em inclusões não metálicas;
- Cavidade de contração (rechupe): vazio interno no fundido, causado pela contração de solidificação quando não há metal fundido suficiente na última região a se solidificar;
- Microporosidade: rede de pequenos vazios distribuídos pelo fundido, causada pela contração de solidificação do metal nos espaços entre a estrutura dendrítica. Está usualmente associado a ligas e sua forma de solidificação;
- Deslocamento do molde: defeito causado pela movimentação das partes inferior e superior do molde resultando em um degrau na linha de divisão do fundido;

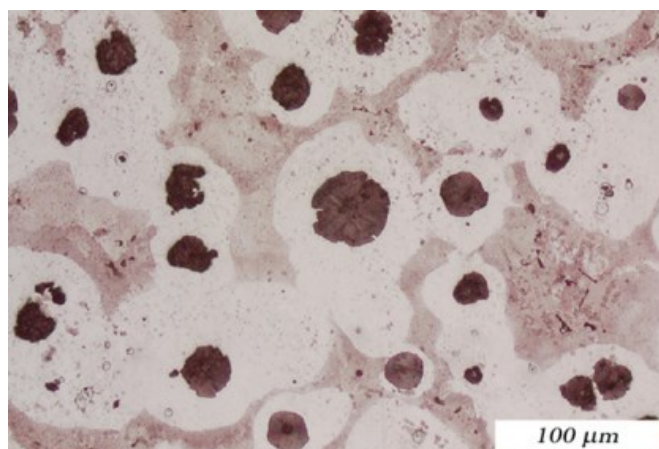
- Deslocamento de macho: similar ao deslocamento do molde, mas nesse caso há a movimentação do macho;
- Trinca ou quebra de molde: ocorre quando a resistência mecânica do molde é insuficiente, gerando trincas e fissuras;
- Junta fria: resulta na junção defeituosa entre fluxos de metal fundido em diferentes temperaturas, existindo ou não uma soldagem parcial entre ambos.

## 2.5. Ferro fundido nodular

O ferro fundido é uma das ligas ferrosas de maior relevância que tem por principal característica teores de carbono (em torno de 2,5% e 4%) e silício relativamente elevados em relação ao aço comum, e sua microestrutura apresenta parte do carbono em forma de grafita ou cementita. São ligas que apresentam solidificação geralmente em uma fase pró-eutética (austenita, grafita) e se completa com uma solidificação eutética (austenita + grafita + carbonetos) (BALDAM, 2014; CHIAVERINI, 1986; GUESSER, 2009).

O ferro fundido nodular em particular recebe esse nome devido a forma esferoidal em que a grafita se encontra em sua microestrutura, mostrada na Figura 13, também conhecido como ferro fundido dúctil, já que sua organização microestrutural proporciona maior propriedade de ductilidade quando comparado a outros tipos de ferro fundido. Desde sua descoberta no final da década de 1940 tem crescido mundialmente sua produção justamente por suas propriedades mecânicas (RUNDMAN, IACOVIELLO, 2016).

**Figura 13 - Microestrutura de ferro fundido nodular, de matriz ferrítica-perlítica**



Fonte: Adaptado de Rundman, Iacoviello (2016)

Esse tipo de ferro fundido é normalmente produzido a partir de um tratamento com magnésio, adicionado no ferro fundido em forma de uma liga que quando diluída, reduz a violência da reação com o ferro fundido. A reação de tratamento tem sucesso quando o magnésio se dissolve no banho de ferro dando uma composição de aproximadamente 0,03-0,05% de magnésio, fornecendo as condições corretas de formação dos nódulos de grafita durante a solidificação. Teores menores ou maiores que essa faixa de magnésio podem gerar grafita vermicular ou grafita explodida, respectivamente, que irão acarretar na degradação da ductilidade (RUNDMAN, IACOVIELLO, 2016).

A microestrutura resultante das condições do processo de fundição será responsável pelas propriedades finais desse componente. A partir dessa microestrutura e suas respectivas propriedades, existem diversas classificações definidas para os ferros fundidos nodulares, de acordo com ABNT podem ser classificados de acordo com a Tabela 1. O tipo mais usado em construção mecânica é o FE-5007, que pela classificação DIN-1693 se enquadra na classe GGG-50 (INFOMET, 2023).

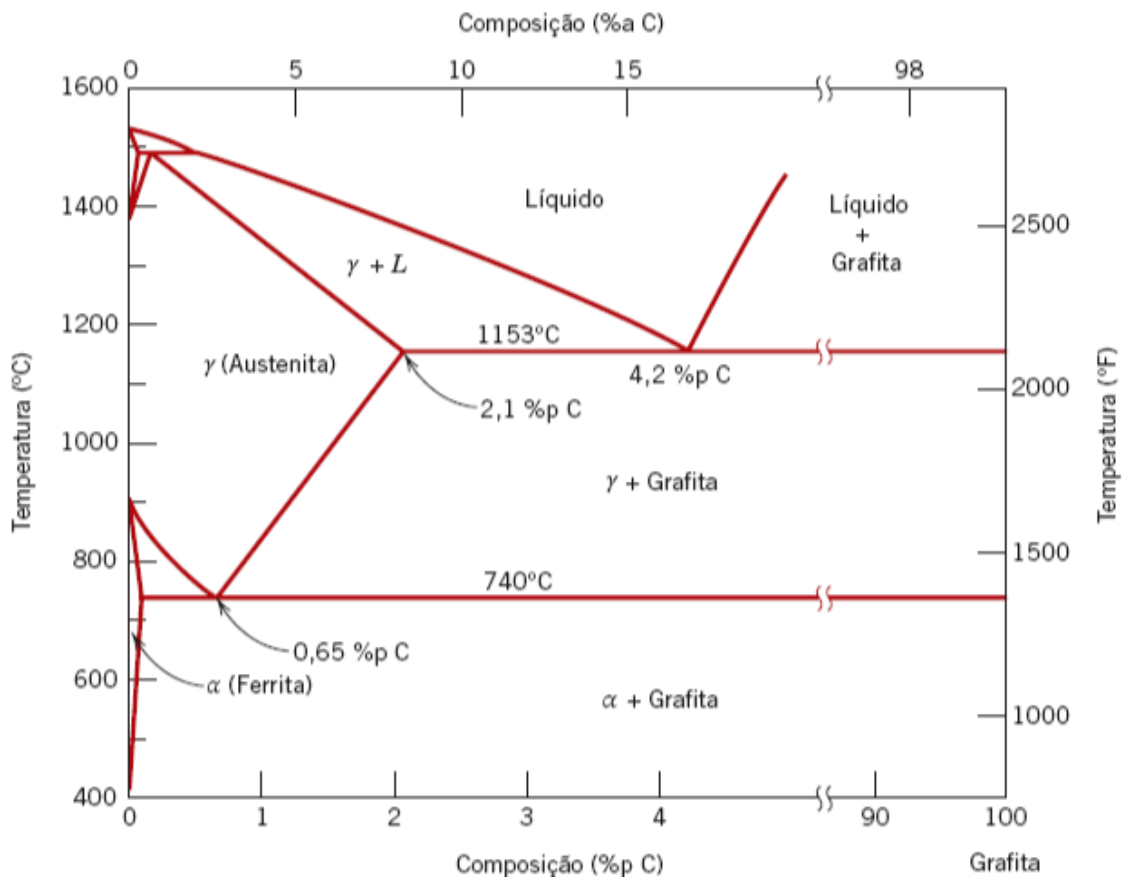
**Tabela 1 - Propriedades mecânicas do ferro fundido nodular**

<b>Classe</b>	<b>Limite mínimo de resistência à tração (MPa)</b>	<b>Limite mínimo de escoamento (0,2%) – (MPa)</b>	<b>Alongamento (%)</b>	<b>Faixa de dureza Brinell (HB)</b>	<b>Estrutura metalográfica predominante</b>
FE 38017	380	240	17,0	140-180	FERRÍTICA
FE 42012	420	280	12,0	150-200	FERRÍTICA
FE 50007	500	350	7,0	170-240	FERRÍTICA E PERLÍTICA
FE 60003	600	400	3,0	210-280	PERLÍTICA
FE 70002	700	450	2,0	230-300	PERLÍTICA
FE 80002	800	550	2,0	240-312	PERLÍTICA

**Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6919 (2017)**

O estudo dos ferros fundidos inicia-se com o entendimento da solidificação, principalmente em condições de equilíbrio. Uma ferramenta importante muito utilizada é o diagrama de fases Ferro-Carbono, apresentado na Figura 14. A partir dele é possível ter noção de muitos fenômenos relacionados à temperatura-composição e às transformações de fases. Mas a realidade é que os ferros fundidos são ligas complexas que envolvem vários outros elementos, os quais podem ser envolvidos na análise com o auxílio de conceitos como Carbono Equivalente (CE) e/ou de Grau de Saturação (Sc), que retornam o deslocamento no diagrama Ferro-Carbono em relação ao teor de carbono. No Brasil o mais usado é o conceito de carbono equivalente, representado pela Equação (2) (GUESSER, 2009).

**Figura 14 - Diagrama de fases Ferro-Carbono com a grafita como uma fase estável**



Fonte: Callister (2020)

$$CE = C + \frac{(Si+P)}{3} \quad \text{Eq. (2)}$$

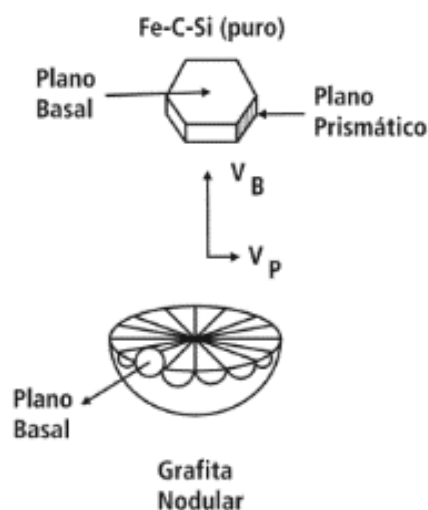
Onde C, Si e P representam as concentrações de carbono, silício e fósforo, respectivamente.

### 2.5.1. Grafita Nodular e o processo de solidificação

A grafita possui resistência mecânica muito baixa e quando encontrada na microestrutura dos ferros fundidos, pode ser entendida como uma descontinuidade da matriz, exercendo efeito de concentração de tensões. A forma dessa grafita tem profundo efeito sobre as propriedades mecânicas, sendo a forma esférica a que traduz menor efeito de concentração de tensões. Tal forma pode ser obtida a partir da reação do ferro com alguns elementos como o magnésio, citado anteriormente (GUESSER, 2009).

Durante a solidificação a velocidade de crescimento da grafita na direção dos planos basal ou prismático de sua estrutura hexagonal determinará sua forma conforme Figura 15. Os elementos usados no processo de nodularização possuem características de serem fortes desoxidantes e dessulfurantes, que alteram as energias interfaciais e favorecem o crescimento da grafita na direção basal, resultado na grafita nodular (GUESSER, 2009; LACAZE, 2016). Outro ponto importante é a quantidade de enxofre na composição dessa liga, que deve ser mantida controlada para que este não remova completamente o magnésio elementar do fundido e afete alguns fenômenos e propriedades finais (RUNDMAN, IACOVIELLO, 2016).

**Figura 15 - Esquema do crescimento da grafita nodular na direção do plano basal**

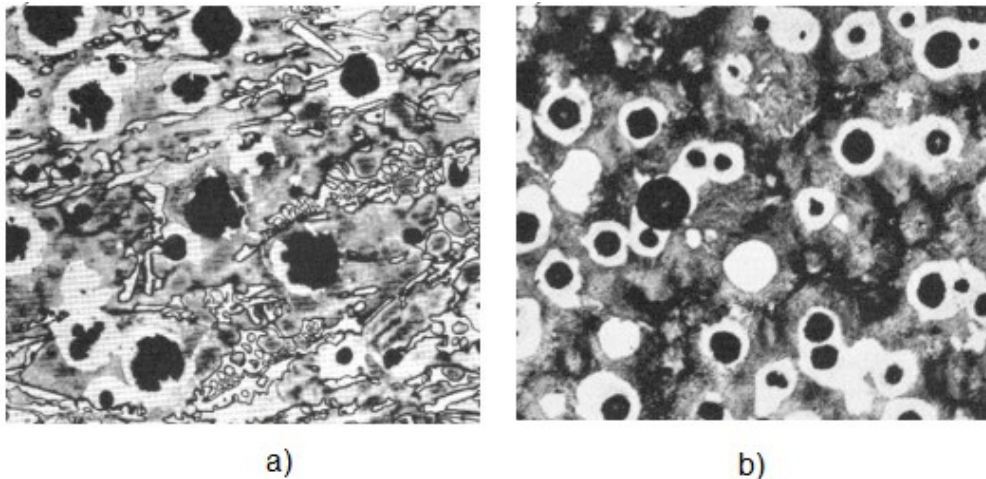


Fonte: Adaptado de Guesser (2009) apud McSwain & Bates (1974)

Além do processo de nodularização, um segundo tratamento é feito nos ferros fundidos nodulares para controle da microestrutura e propriedades, a inoculação. Tal processo favorece a precipitação da grafita e dificulta a formação de carbonetos. Geralmente os inoculantes são compostos de ferro e silício, podendo conter pequenas quantidades de cálcio, bário ou zircônio. O cálcio, por exemplo, é consumido em reações de desoxidação e dessulfuração, sendo que a quantidade restante reage com o carbono formando carboneto de cálcio que devido à sua semelhança com a grafita no que diz respeito ao parâmetro de rede, acabam atuando como substratos para nucleação da grafita (FRAŚ, GÓRNY, 2012; LACAZE, 2016; SOUZA *et al.*, 2014).

Por isso o tratamento de inoculação é responsável por aumentar significativamente o número de nódulos de grafite, além de elevar a temperatura de solidificação que favorece a formação dos nódulos de grafite em relação à formação da cementita (FRAŚ, GÓRNY, 2012; LABRECQUE, GAGNÉ, 1998). Na Figura 16 é mostrada uma comparação entre as microestruturas de ferro fundido nodular obtidos sem e com tratamento de inoculação, evidenciando um maior desenvolvimento de nódulos com morfologia de maior regularidade quando inoculado.

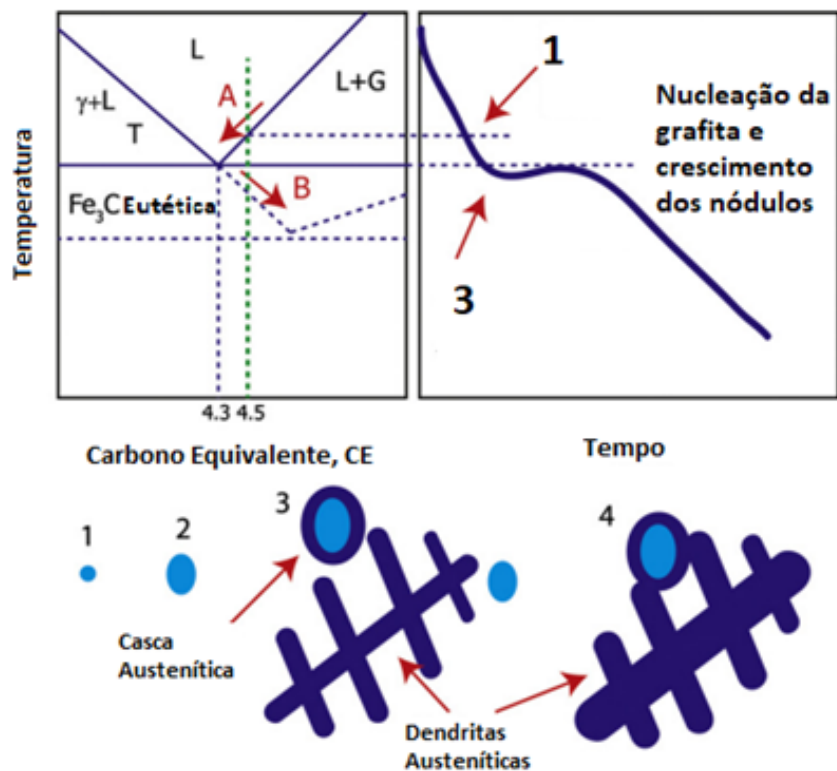
**Figura 16 - Microestrutura do ferro fundido nodular (a) após nodularização e (b) após nodularização e inoculação**



**Fonte: Adaptado de Labreque, Gagné (1998)**

Um exemplo da evolução microestrutural durante a solidificação de um ferro fundido nodular com  $CE > 4,3$  está ilustrado na Figura 17.

Figura 17 - Diagrama de fase, curva de resfriamento e passos descritivos da solidificação do ferro fundido nodular



Fonte: Adaptado de Rundman, Iacoviello (2016)

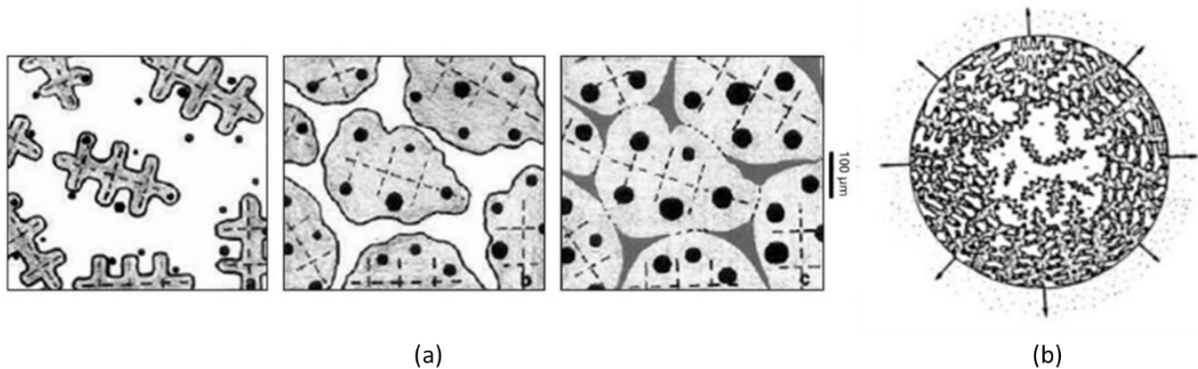
Nas etapas 1 e 2 (seta A) ocorre a nucleação e crescimento da grafita. À medida que a temperatura reduz abaixo da Temperatura de transformação eutética-T se dá o início da nucleação da fase austenita sobre a grafita, envolvendo-a como uma casca, e também seu crescimento em forma de dendritas de austenita (seta B). A supersaturação de carbono no líquido adjacente às dendritas fornecem condições para surgimento de novos nódulos de grafita que iniciam o ciclo novamente, bem como a difusão de carbono através da casca austenítica para o crescimento dos nódulos. Tal processo resulta em uma microestrutura típica desse fundido, com a mostrada na Figura 13, onde os nódulos de grafita são envoltos da fase ferrita que por sua vez é cercado por perlita e as quantidades de cada fase são dependentes da composição química, taxa de resfriamento e número de nódulos (AZEEM *et al.*, 2018; FRAŚ, GÓRNY, 2012; RUNDMAN, IACOVIELLO, 2016).

Os ferros fundidos possuem uma característica distinta de outras ligas que é a expansão durante a solidificação. O fenômeno de precipitação da grafita resulta em



uma expansão devido à menor densidade desta fase, permitindo a obtenção de peças muitas vezes sem o uso de massalotes para compensar a contração. No caso do ferro fundido nodular, a etapa de difusão da grafita ocorre para o interior dos nódulos envoltos pela fase austenita, Figura 18 (a), fazendo com que a primeira expansão seja transmitida à austenita e parte dessa expansão seja transmitida para o molde, Figura 18 (b). Dessa maneira, a contração do líquido e da solidificação da austenita não é totalmente compensada, sendo necessário o uso de alimentadores para evitar a formação de rechupes (BOERI *et al.*, 2020; GUESSER, 2009).

**Figura 18 - (a) Crescimento dendrídico, difusão de carbono para o interior dos nódulos: primeira expansão e (b) segunda expansão transmitida ao molde**



Fonte: Adaptado de Guesser (2009) e Rivera *et al.* (2003)

## 2.6. Software de simulação de solidificação

Na indústria da fundição vem sendo cada vez mais exigida a inserção de novas tecnologias na prestação de seus serviços, visto que o mercado demanda serviços e produtos cada vez melhores. Um dos recursos que vem sendo inserido no ciclo de desenvolvimento de componentes nas fundições são os *softwares* de simulação de solidificação. O *software QuikCast®*, desenvolvido pelo grupo ESI, é uma ferramenta que permite realizar a simulação de solidificação com condições semelhantes à prática industrial possibilitando prever possíveis defeitos nas peças, baseando-se na transferência de calor do sistema de acordo com geometria, material e as condições indicadas (RIBEIRO, 2021; SOUSA *et al.*, 2014).

O uso de *softwares* de simulação permite modelar e verificar o processo de fundição para maximizar o rendimento e reduzir a ocorrência de defeitos. O resultado do aproveitamento dessa tecnologia pode refletir em redução de custos de produção,

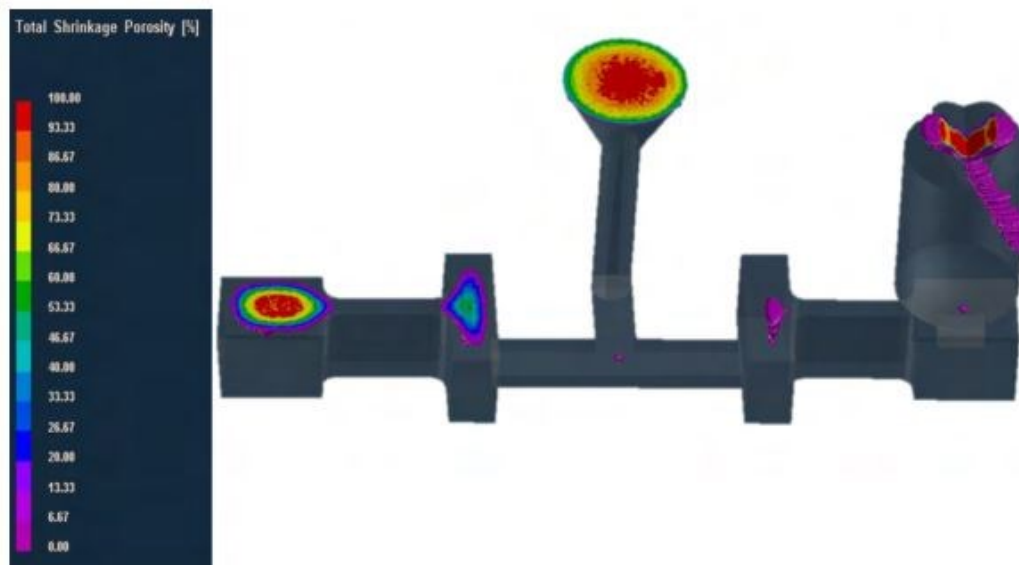
redução de desperdícios, tempos de ciclo, aumento da confiança do cliente, auxílio na tomada de decisões, melhoria contínua e redução de custos (KHAN, SHEIKH, 2018; SOUSA *et al.*, 2014).

A partir de modelos de desenho 3D desenvolvidos com o auxílio de *softwares* de modelamento como Solid Edge®, são criados os modelos para posterior uso no *software* de simulação, alimentando o programa com os materiais e parâmetros de fundição (LACARTA, 2018). Os parâmetros de pré-processamento como material do molde, tipo de metal fundido, temperatura de vazamento, temperatura do molde, presença de machos, filtros e luvas, entre outras condições de contorno, devem ser informados ao programa, podendo ou não já constar na base de dados do mesmo, para que este possa trabalhar munido do máximo de informações possível para refinar o resultado.

O *software* se baseia no método dos elementos finitos, um método matemático que subdivide um meio contínuo em elementos que mantêm as propriedades iniciais pré-estabelecidas, gerando uma malha com elementos unitários de dimensão mais reduzida que permite melhorar os resultados. Tais elementos representam coordenadas no espaço e podem assumir formatos diversos. A quantidade de elementos está diretamente ligada à precisão dos resultados, porém, elementos menores e em maior número demandam aumento da capacidade de processamento do computador utilizado (LOTTI *et al.* 2006; RIBEIRO, 2021).

O trabalho de Ribeiro (2021), aborda o uso do *software* de simulação como uma ferramenta para apoiar a análise do aparecimento de defeitos e também o estudo do modo de resfriamento dos conjuntos de fundição, com intuito de demonstrar que a substituição dos métodos de “tentativa e erro” usados até então pelo uso do *software* se mostra viável e vantajoso. Um exemplo de parâmetro analisado pelo *software* que foi usado no trabalho é o “*total shrinkage porosity*”, mostrado na Figura 19, que permite reproduzir a formação de rechupes, que foram satisfatoriamente validados com os cortes realizados nos corpos de provas estudados.

Figura 19 – Distribuição da porcentagem de rechupes previstos pela função “total shrinkage porosity” da simulação do software Quikcast®



Fonte: Ribeiro (2021)

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta sessão apresenta uma descrição sobre o material analisado e os métodos empregados no desenvolvimento do trabalho.

#### 3.1. Materiais

A peça analisada no trabalho foi um componente obtido por fundição em areia verde da empresa Multimetal Indústria Metalúrgica Ltda., situada na cidade de Cambé-PR. A peça denominada suporte do ajustador é mostrada na Figura 20.

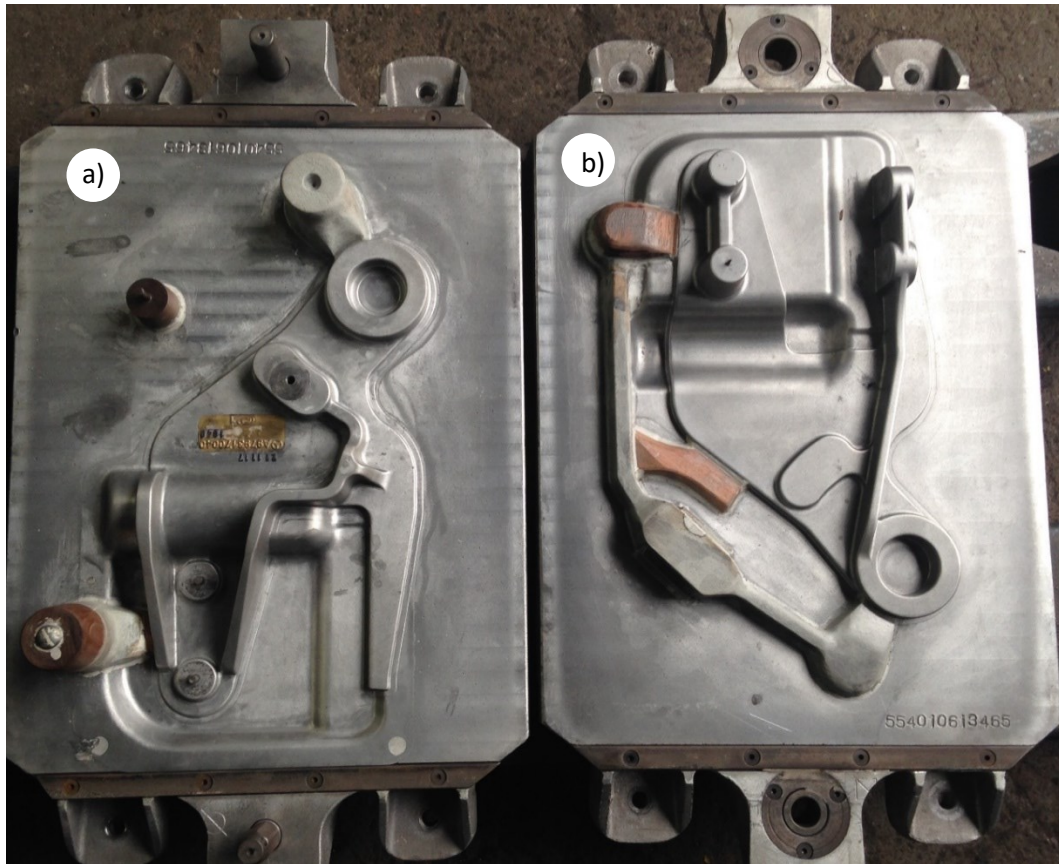
**Figura 20 - Peça em estudo: suporte do ajustador**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

O modelo a partir do qual a peça é confeccionada está mostrado na Figura 21, no qual pode-se observar que resulta em uma cavidade por molde. O peso de conjunto indicado em ficha técnica foi de 13,2 kg, o processo de fabricação de cada molde utilizava 4 resfriadores, 1 luva de alta exotermia e 1 filtro cerâmico comercializado pela FOSECO de dimensões 50x50x22 mm. A composição do ferro fundido nodular exigido para a peça é da classificação GGG-50 que pode ser observada na Tabela 2. A temperatura de vazamento nos moldes deve permanecer entre 1390°C e 1410°C, conforme a ficha técnica de fusão do suporte.

Figura 21 - Modelo de moldagem da peça estudada a) placa superior e b) placa inferior



Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 2 – Composição química do ferro fundido GGG-50 utilizado para a peça em estudo

Elemento	Faixa de % em peso
Carbono	3,7 – 3,8
Silício	2,6 – 2,7
Manganês	0,35 – 0,45
Fósforo	0,10 (máx)
Enxofre	0,02 – 0,02
Cobre	0,15 (máx)
Magnésio	0,03 – 0,04
Estanho	0,015 (máx)
Cromo	0,05 (máx)

Fonte: Ficha Técnica de Fusão Multimetal (2023)

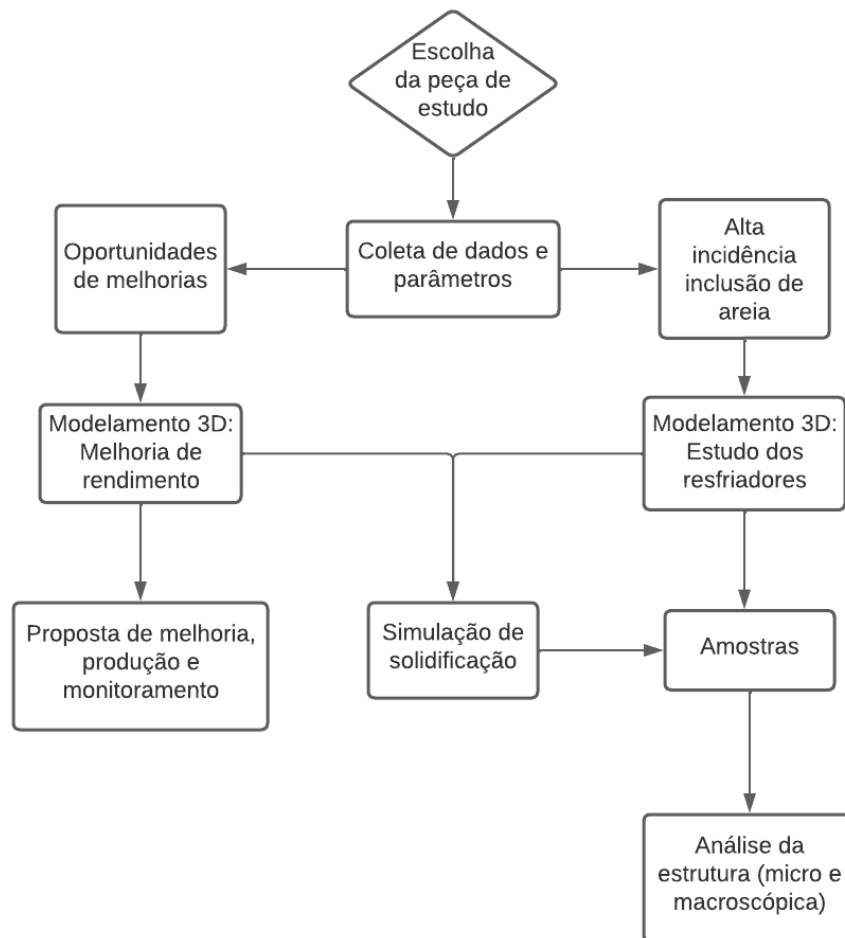
### 3.2. Métodos

O trabalho se baseia na proposta de analisar o modelamento da peça com o auxílio de *softwares* de modelação 3D e de simulação de solidificação para propor melhorias no projeto.

#### 3.2.1. Fluxograma

As etapas desse trabalho foram realizadas de acordo com o fluxograma mostrado na Figura 22, que organiza as atividades desenvolvidas para atingir os objetivos propostos, baseados na escolha de uma peça de importância para a empresa, seguindo então duas linhas de estudo: proposta de melhoria de rendimento metálico e um estudo para a redução do refugo causado por inclusão de areia.

**Figura 22 - Fluxograma de atividades**

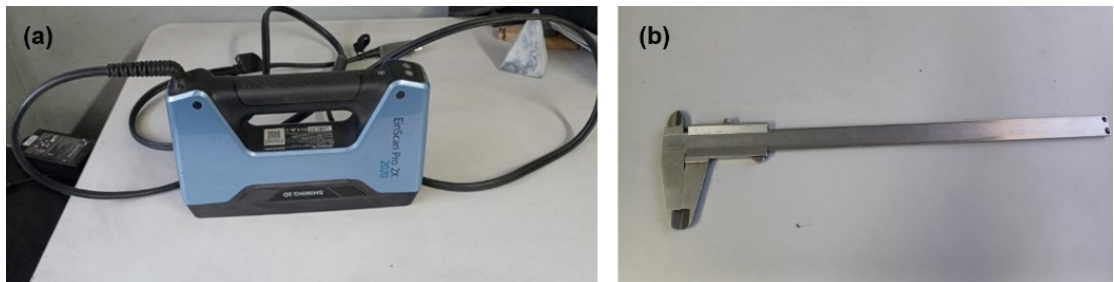


**Fonte: Autoria própria (2023)**

### 3.2.2. Modelamento 3D

Para o modelamento inicial para estudar as condições de trabalho da peça, foram mensuradas as dimensões do modelo atual e do sistema de canais com auxílio de um scanner e um paquímetro, mostrados na Figura 23, a partir dessas dimensões foram construídos os volumes sólidos dos canais e massalotes. Para o modelamento da peça foi utilizado o desenho técnico 2D como base para a criação do 3D no *software Solid Edge*<sup>®</sup>, pelo qual foi feita a montagem do conjunto, posteriormente salvo na extensão IGS para seguir para a etapa de simulação de solidificação no *software Quikcast*<sup>®</sup>.

**Figura 23 – Ferramentas usadas para dimensionar canais (a) aparelho de escaneamento Einscan Pro 2x 2020 e (b) paquímetro**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

Para os demais modelamentos realizados foram feitas apenas alterações nos desenhos iniciais dentro do próprio *software* de modelamento.

### 3.2.3. Simulações de solidificação

Para estudar o modo de solidificação, o sistema de alimentação da peça e os fenômenos envolvidos nas diversas situações analisadas, foram realizadas simulações de solidificação por meio do *software Quikcast*<sup>®</sup>, a partir dos modelamentos 3D criados com *Solid Edge*<sup>®</sup>.

Para tais análises se faz necessário um roteiro do método de funcionamento do *software*:

- I. Configurações da malha
  - Criação da malha a partir do modelamento 3D
  - Verificação da integridade da malha para a simulação
  - Criação do molde

- II. Inserção das condições de contorno
  - Informar o sentido da gravidade
  - Nomear e atribuir materiais aos volumes
  - Informar condição de troca de calor do molde
  - Informar pressão de enchimento
  - Informar condições de vazamento: temperatura e vazão
  - Informar condições de permeabilidade das interfaces com a parte metálica do sistema (molde, resfriadores e machos)
  - Atribuir condições de contorno do filtro
  - Informar condições de rugosidade das interfaces com a parte metálica do sistema
  - Atribuir as condições de troca de calor das interfaces metal/areia, metal/resfriador e metal/luvas
  - Indicar condições de simulação e seu refinamento de resultado
- III. Análise dos resultados da simulação
  - Verificar o enchimento com a variação de temperatura para averiguar o funcionamento do sistema de canais e massalotes
  - Analisar a velocidade do metal líquido no molde para identificar se o fluxo de enchimento é ideal
  - Identificar e analisar os pontos quentes (hot spots)
  - Análise do crescimento da fração sólida
  - Análise da porosidade total (*total shrinkage*)

#### 3.2.4. Análise de Sanidade da peça

Algumas análises foram realizadas a partir de cortes das peças em pontos específicos para analisar a sanidade interna. Os cortes foram feitos com auxílio de uma serra de fita metálica mostrada na Figura 24, registrando as descontinuidades internas visíveis nos cortes.



**Figura 24 - Serra usada para corte das peças e análises de sanidade**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

### 3.2.5. Verificação da microestrutura por microscopia óptica

Para a etapa de estudo dos resfriadores foi realizada uma análise de microestrutura das amostras com auxílio de microscópio óptico. As seções a serem analisadas foram cortadas e desbastadas em esmerilhadeira, posteriormente lixadas nas lixas de gramatura 80, 220 e 400, seguida de um polimento em alumina em suspensão de 1 nanômetro e então atacadas com uma solução de 8% de Nital. Após a preparação das amostras, estas foram analisadas por microscopia óptica, utilizando o microscópio TOPCON, mostrado na Figura 25, e registradas as imagens.

**Figura 25 - Microscópio óptico**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A escolha da peça para estudo foi baseada na demanda de produção e nos índices de refugo que a mesma apresentava. Na Tabela 3 têm-se os dados referentes à produção da peça e seus índices de refugo no ano de 2021 até setembro de 2022. Pode-se observar que refugo total da peça nesses períodos analisados foi de 5,51 e 3,18 % onde os dois principais motivos eram inclusão de areia e rechupe.

**Tabela 3 - Dados de produção e refugo da peça em estudo: suporte do ajustador**

<b>Data</b>	<b>Produção (n° total de peças)</b>	<b>% Refugo total</b>	<b>% Inclusão de areia</b>	<b>% Rechupe</b>
<b>2021</b>	10.936	5,51	2,37	1,76
<b>Janeiro a Setembro de 2022</b>	6.155	3,18	1,23	1,13

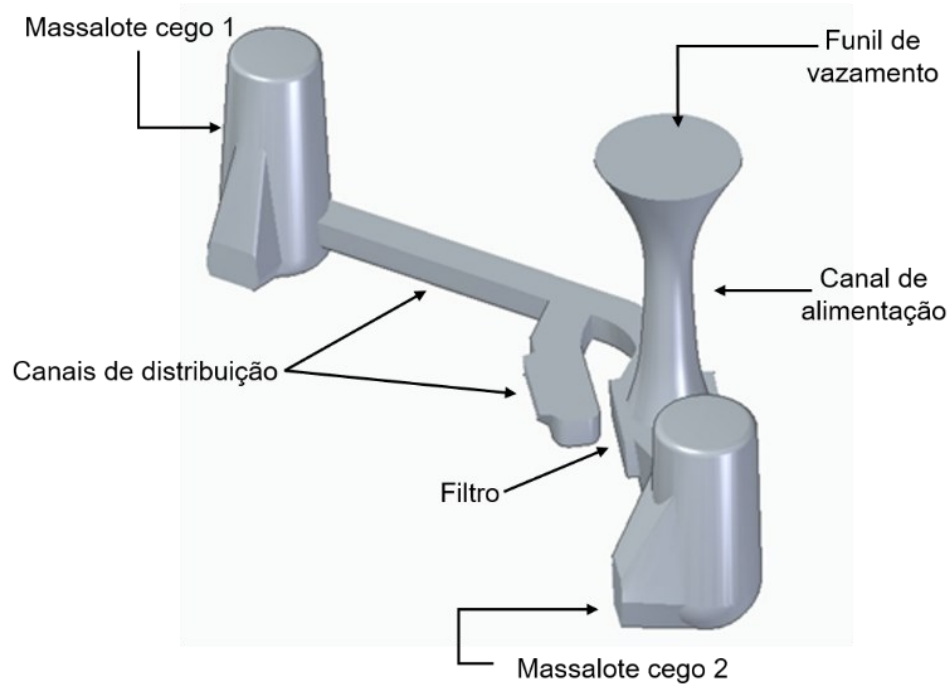
**Fonte: Multimetal Ltda. (2023)**

Com base na demanda da peça durante os períodos analisados e nos índices de refugo, foi iniciado um projeto de estudo para identificar melhorias de rendimento e possível redução de refugo para o suporte do ajustador, primeiramente atacando oportunidades de melhorias de conjunto o que permitiu atacar o problema de rechupe e posteriormente estudando maneiras de reduzir o refugo de maior relevância, no caso, o refugo por inclusão de areia.

##### **4.1. Proposta de melhoria de rendimento metálico**

O trabalho iniciou a partir do escaneamento do sistema de alimentação da peça, mostrado na Figura 26, para que a partir deste fosse possível a coleta de informações dimensionais, auxiliada e conferida com paquímetro, para a então construção do sistema de alimentação do conjunto de fundição com auxílio do *software* de modelamento *Solid Edge*<sup>®</sup>, para a situação atual de trabalho do modelo.

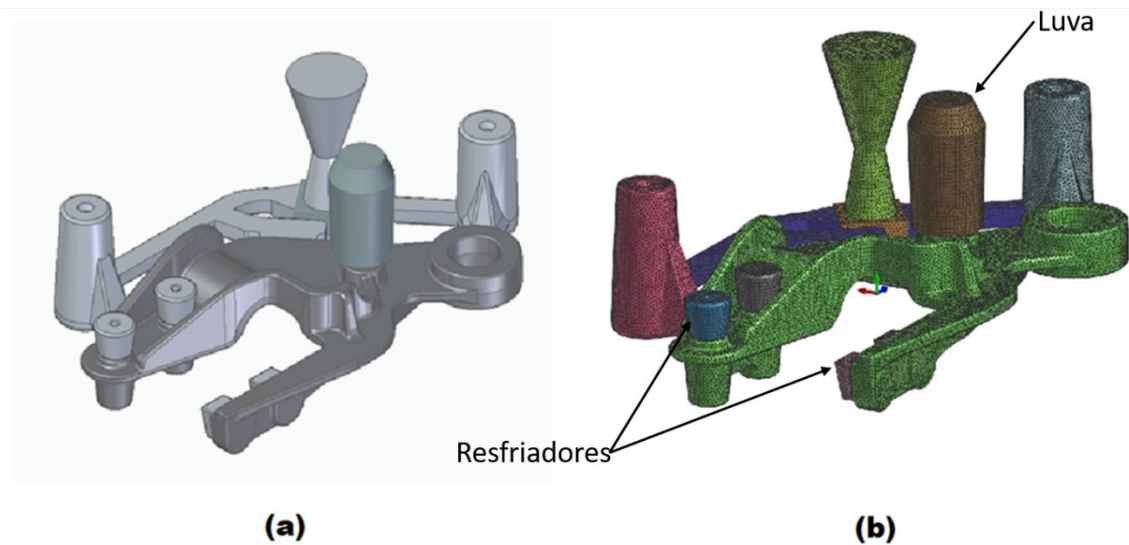
**Figura 26 - Sistema de alimentação escaneado**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

A partir do desenho técnico da peça e dos dados fornecidos pelo escaneamento do sistema de alimentação da peça, foi modelado o conjunto de fundição para o suporte do ajustador, Figura 27 (a), para iniciar as simulações de solidificação do estudo.

Figura 27 – (a) Modelamento 3D e (b) modelamento com a criação da malha para a situação inicial do conjunto de fundição da peça em estudo



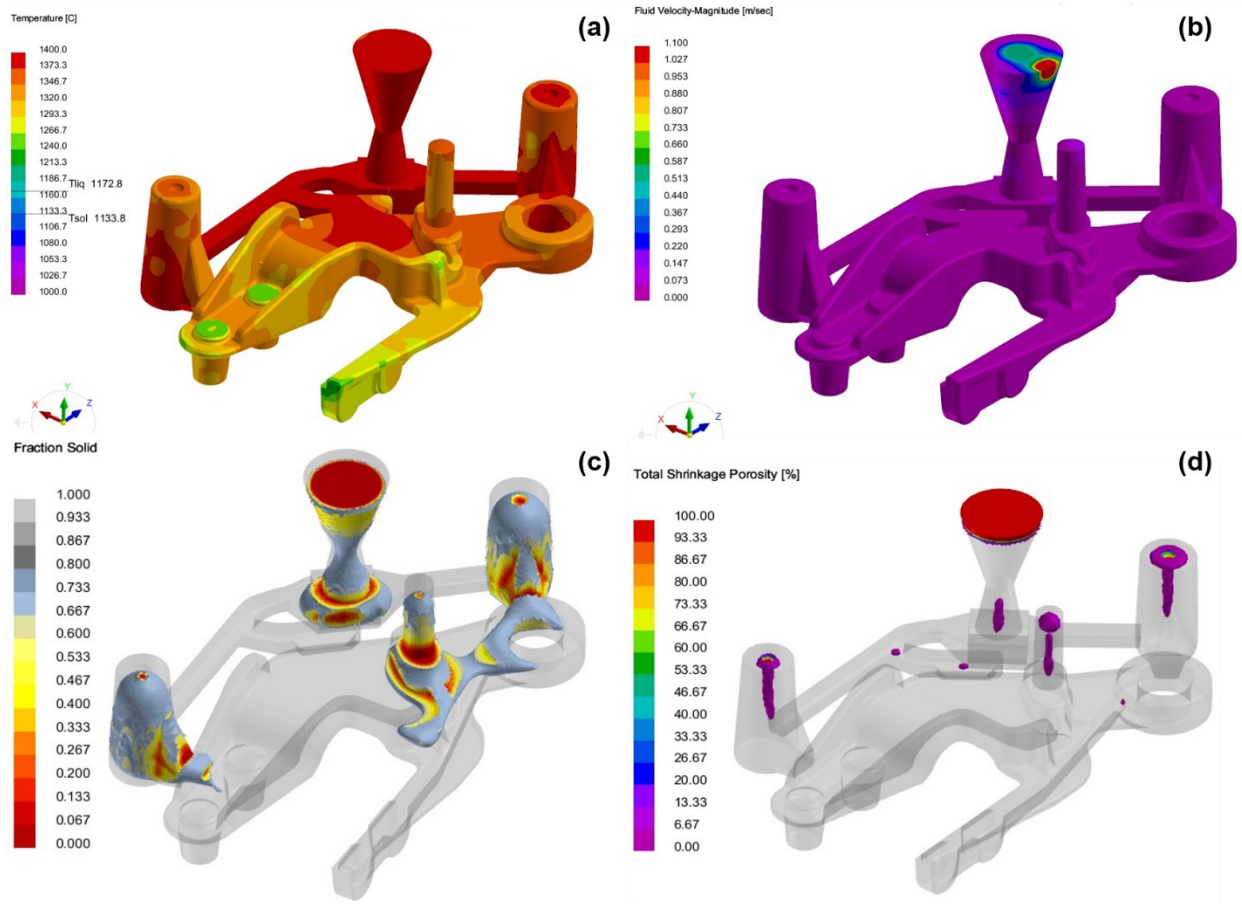
Fonte: Autoria própria (2022)

O arquivo do modelamento na extensão IGS foi aberto no *software Quikcast*<sup>®</sup>, onde foi criada e verificada a malha, Figura 27 (b), e inseridas as condições de contorno. A primeira condição de contorno inserida foi o sentido da alimentação que é feita sob ação da gravidade, foram então atribuídos nomes e materiais aos componentes do conjunto, como luvas, resfriadores, massalotes, peça, canais, molde e seus respectivos materiais. Em seguida, o *software* foi alimentado com outras informações pertinentes como a forma de troca de calor do molde, que ocorre com o ambiente definido numa temperatura de 20°C, a pressão de enchimento, igual à pressão atmosférica, a temperatura de vazamento da liga no molde no valor de 1400°C, valor intermediário à faixa de temperatura estabelecida em ficha técnica e a vazão do metal no molde que foi estabelecida pela cronometragem do tempo de vazamento realizado pelo operador resultando em 2,5 kg/s. Também são informadas as especificações do filtro, as condições de rugosidade e permeabilidade do molde, já padronizadas no *software* em conjunto com o grupo ESI para o tipo de processo de fundição da empresa. Foram indicadas também as interfaces que trocam calor entre si para informar quais retêm ou retiram calor do sistema com maior facilidade, finalizando assim a alimentação do *software* e podendo dar início à simulação informando o nível de refinamento requerido.

A partir do resultado da simulação inicial apresentado na Figura 28, pôde-se observar alguns dos parâmetros mais importantes da análise: o comportamento do resfriamento da peça, a velocidade de enchimento, uma análise da fração sólida e porosidade. O primeiro tópico refere-se ao modo de resfriamento da peça, mostrado na Figura 28 (a). Nota-se que o ponto de alimentação e o massalote cego 2 apresentam temperaturas mais altas, sendo os últimos pontos a resfriar da peça. Devido à alta temperatura na seção do massalote pode-se suspeitar que a peça esteja alimentando o massalote, uma condição não ideal de projeto. Na Figura 28 (b), observa-se que o fluxo do fluido ocorre bem abaixo de 1 m/s durante o enchimento da peça, garantindo um enchimento sem fluxo turbulento e sem possibilidade de erosão do molde, com exceção do canal de descida onde realmente a velocidade será maior.

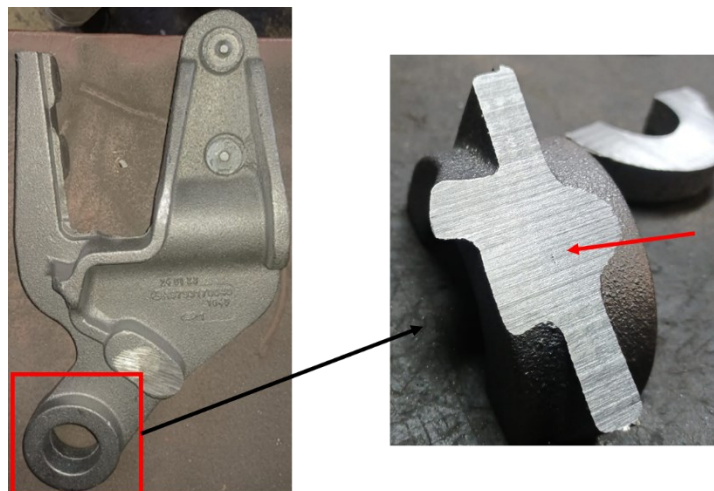
Na Figura 28 (c) é apresentada a análise da fração sólida na qual se observa as porções líquidas se transformando em sólidas. A partir da imagem é possível notar que se forma uma região líquida extensa, a qual gera maior possibilidade de descontinuidade de alimentação, podendo haver tendência de porosidade. Na Figura 28 (d) é apresentada a análise das regiões de maior probabilidade de incidência de porosidade, as quais confirmam as suspeitas da análise de fração sólida, que foram confirmadas com o corte da peça, como mostrado na Figura 29, porém é de difícil visualização já que se trata de uma microporosidade que não acarreta danos à qualidade da peça.

**Figura 28 - Resultados das variáveis analisadas pela simulação de solidificação inicial (a) comportamento do resfriamento da peça, (b) velocidade de enchimento, (c) análise das frações sólidas e (d) ocorrência de porosidades**



Fonte: Autoria própria (2022)

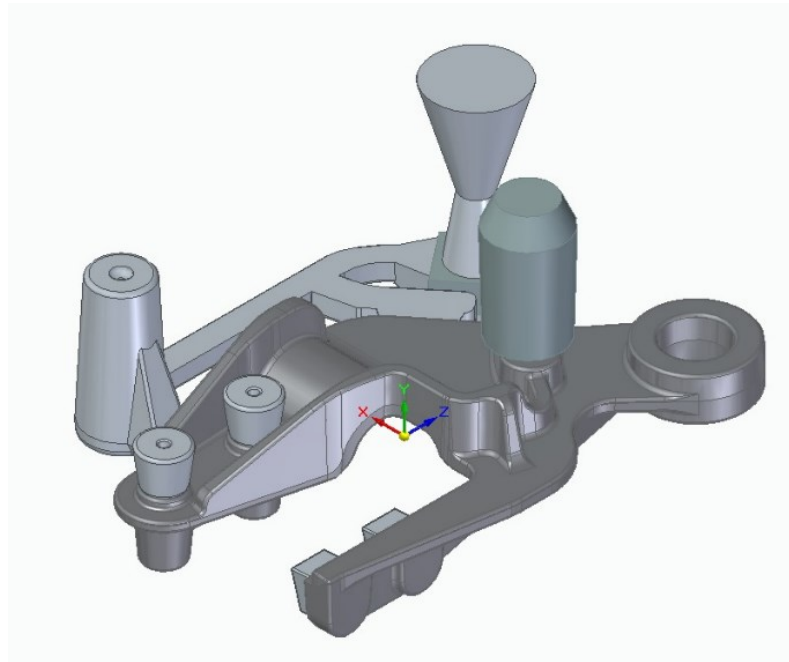
**Figura 29 - Cortes da peça para identificação de microporosidade na situação inicial de projeto**



Fonte: Autoria própria (2022)

A partir da análise dos resultados da simulação inicial foi proposta a alteração do conjunto de fundição da peça, visto que, o *software* indica que a retirada do massalote não gera alterações na sanidade da peça e melhora o rendimento metálico. Foi então realizada um novo modelamento para o conjunto do suporte com a sugestão de retirada do massalote cego 2, proposta 1, como mostrado na Figura 30.

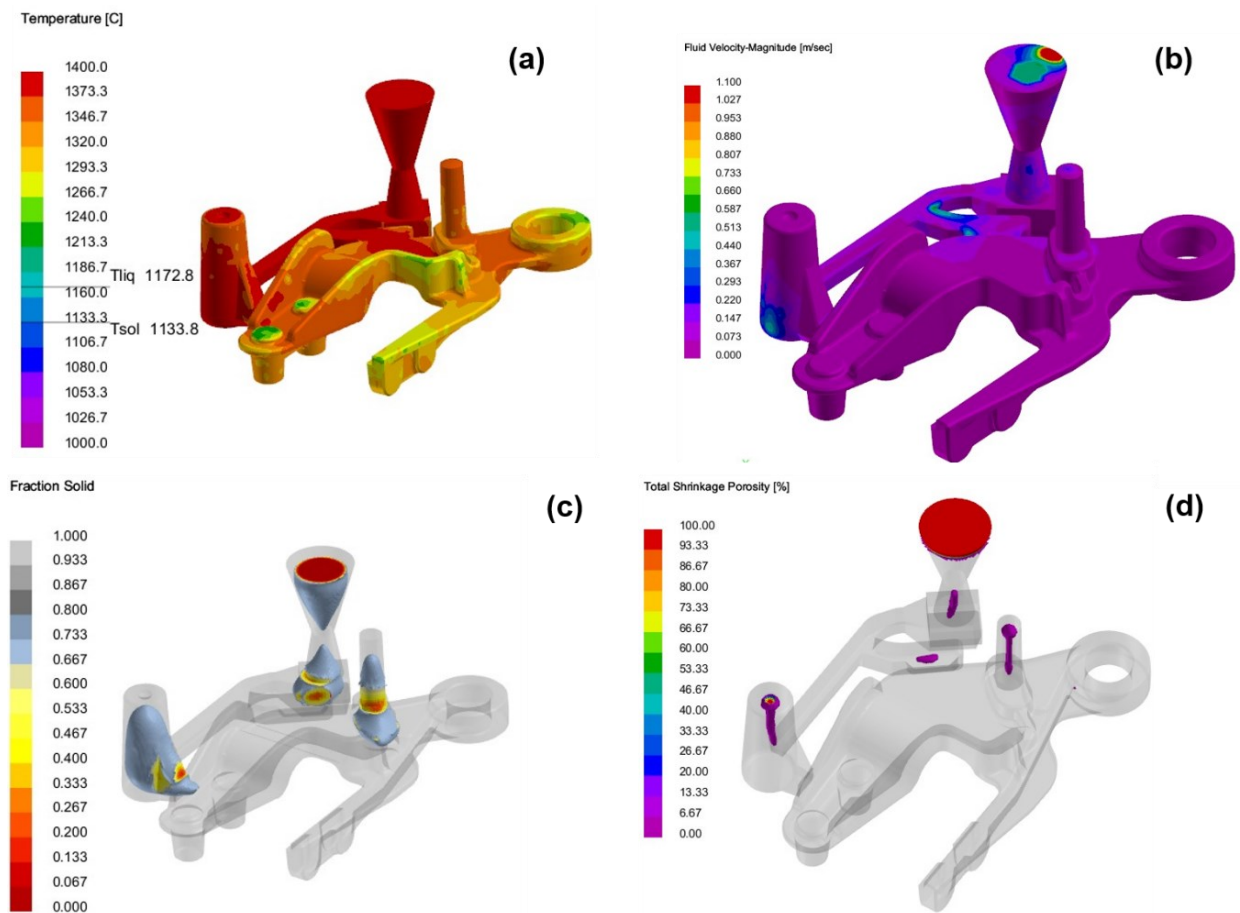
**Figura 30 - Modelamento 3D da proposta 1 de alteração do conjunto de fundição**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

A partir do modelamento foi realizada uma nova simulação de solidificação com as mesmas informações e parâmetros descritos anteriormente para a simulação inicial, para verificar a sanidade da peça após a mudança proposta. Na Figura 31 é mostrado o resultado da simulação de solidificação do modelamento proposto e verifica-se que o *software* não mostra a presença de defeitos significativos para o processo, visto que o comportamento do resfriamento e velocidade de enchimento se mostram adequados e a probabilidade de ocorrência de porosidades se manteve como da simulação inicial, sugerindo que não haverá danos a sanidade interior da peça.

**Figura 31 - Resultados da simulação para a proposta 1 (a) comportamento da temperatura durante o resfriamento, (b) velocidade de enchimento, (c) análise de fração sólida e (d) tendência de porosidade**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

As alterações foram então passadas ao encarregado da modelação para que fossem realizadas as próximas produções da peça com as alterações propostas. Acompanhando os dados das produções seguintes às alterações notou-se uma redução de custos considerável para a empresa, sendo que uma delas foi a redução do peso de conjunto de 13,2 kg para 11,5 kg, uma diferença de 1,7 kg de liga metálica que gerou um aumento do rendimento metálico de 48,5% para 55,7%.

Além disso, defeitos de rechupe que eram frequentemente encontrados na peça tiveram grande redução de ocorrência, como pode ser constatado na Tabela 4, que apresenta os dados de refugo de outubro de 2022 a abril de 2023, indicando uma redução significativa do percentual desse defeito quando a alteração foi



implementada, baixando de uma média de 1,5% de refugo durante o ano de 2021 e início de 2022 para menos de 0,1% nas produções seguintes à alteração.

**Tabela 4 - Dados de Refugo após alterações no modelamento**

<b>Data</b>	<b>Produção (n° total de peças)</b>	<b>% Refugo Total</b>	<b>% Refugo por inclusão de areia</b>	<b>% Refugo por rechupe</b>
<b>outubro de 2022</b>	917	2,94	1,96	0,00
<b>novembro de 2022</b>	1331	5,93	3,91	0,00
<b>dezembro de 2022</b>	219	7,31	3,19	0,00
<b>janeiro de 2023</b>	359	9,47	6,12	0,28
<b>fevereiro de 2023</b>	261	2,68	1,92	0,38
<b>março de 2023</b>	1406	3,70	2,70	0,07
<b>abril de 2023</b>	371	4,31	2,70	0,00

**Fonte: Multimetal Ltda. (2023)**

A maior ocorrência do refugo de rechupe no modelamento inicial era devido à incidência de dois tipos de porosidade, majoritariamente aparecendo na base da luva, como mostrado na Figura 32, e em menor frequência na seção do massalote. Essas porosidades tiveram uma maior ocorrência devido às variáveis do processo da empresa Multimetal que geravam uma condição de fundição muito distinta da simulada. No entanto, ao comparar a condição de fração sólida do modelamento inicial com o da proposta 1, observa-se que há um caminho de material líquido mais longo a se solidificar no modelamento inicial, pois o massalote do modelamento inicial gera uma situação da peça alimentar o massalote, pois ele gera um ponto quente em uma região que não necessita de alimentação e não compensa a contração de solidificação. Essa indicação leva a crer que a luva possa vir a ser insuficiente para alimentar essa massa líquida e que há um estrangulamento na seção do massalote cego 2, os quais ocasionam porosidade nessas regiões.

**Figura 32 - Exemplo de rechupe frequentemente encontrado na base da luva**

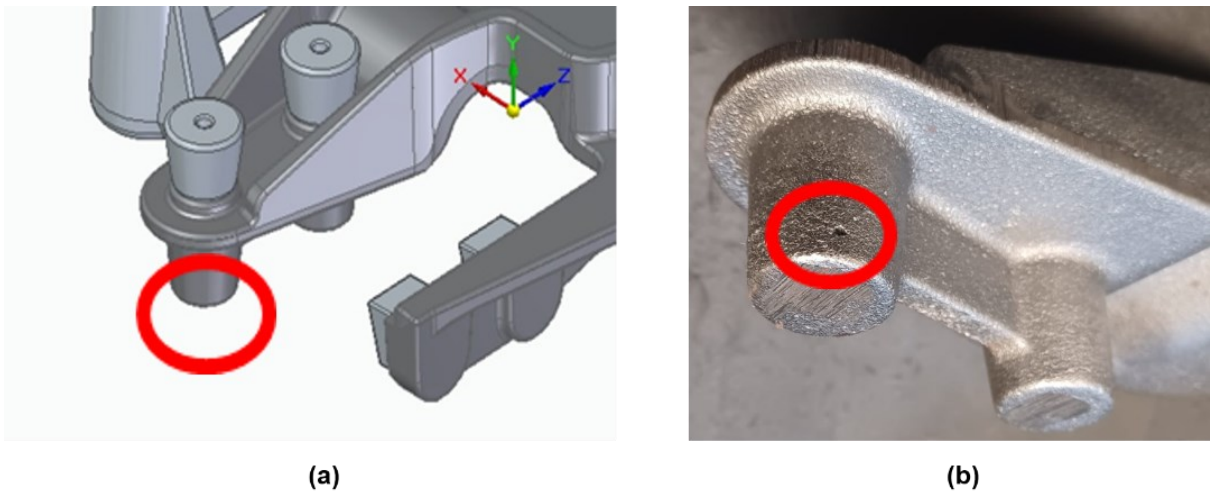


**Fonte: Aatoria própria (2022)**

O defeito interno da peça observado em ambos os modelamentos não se trata de uma condição de não conformidade, pois é caracterizado como uma microporosidade que se enquadra dentro do nível 1 de resultado da análise de sanidade da peça por raio X, conforme a norma ASTM E 689, aceitável para a aplicação da peça, um item que não exige selo de segurança. Portanto, como a peça já vinha sendo fornecida dentro dessa condição, não houve prejuízo na questão de sanidade da peça.

Apesar dos avanços e ganhos adquiridos com a melhoria de rendimento metálico para este conjunto, um problema crescente foi o aumento do refugo por inclusão de areia. Esse defeito geralmente ocorre na região indicada na Figura 33 e a explicação para sua ocorrência seria o desprendimento de areia devido à colocação dos resfriadores na parte superior do molde, principalmente durante a colocação dos grampos nas caixas de moldagem, que pode ter sido agravado devido à mudança de equipe de operadores para novos contratados menos experientes. Tendo em vista esse problema, algumas propostas de alterações foram estudadas com intuito de reduzir o surgimento desse tipo de defeito.

**Figura 33 - Local de aparecimento do defeito de inclusão de areia**

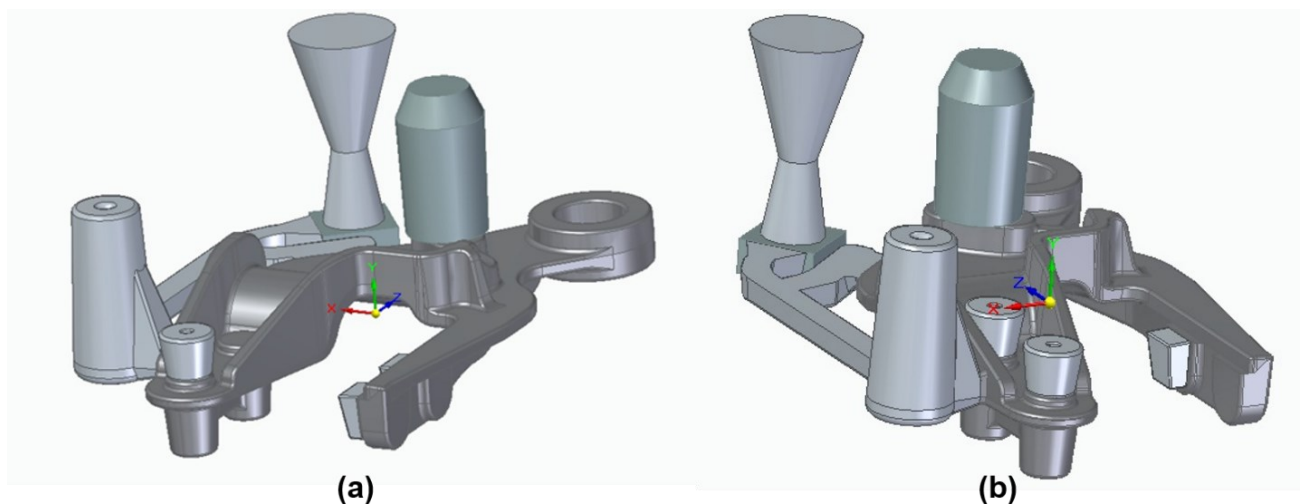


Fonte: Autoria própria

#### 4.2. Estudos de alterações nos resfriadores

Visto que a inserção dos resfriadores poderia estar agravando a ocorrência dos defeitos de inclusão de areia, alguns modelamentos e simulações de solidificação foram feitos para o conjunto, alterando o posicionamento e a presença dos mesmos. A primeira configuração estudada está mostrada na Figura 34, na qual foi estudado a retirada de um tipo de resfriador em cada modelamento para analisar os resultados.

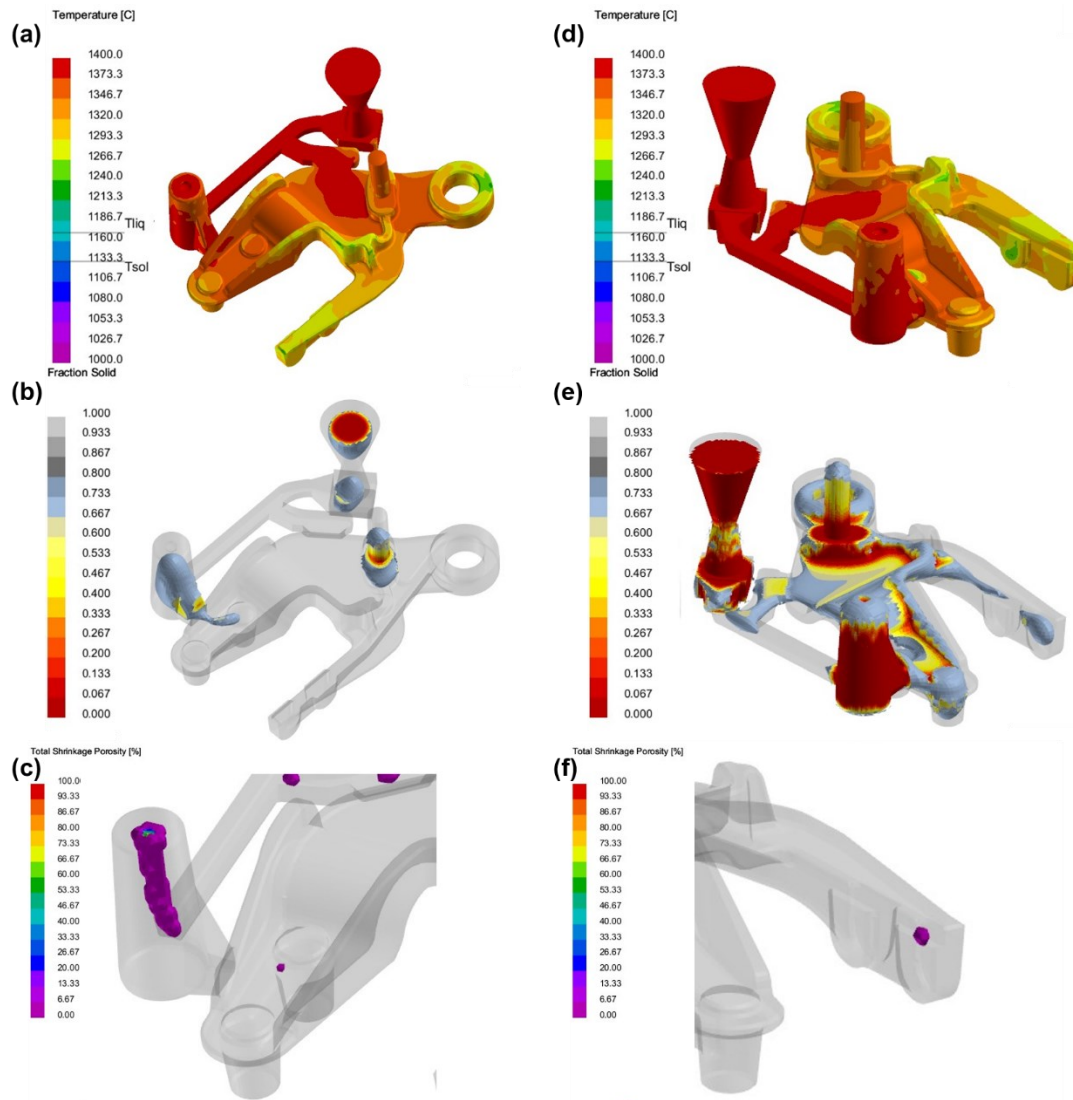
**Figura 34 – (a) Proposta 2 e (b) Proposta 3 do estudo dos resfriadores**



Fonte: Autoria própria (2023)

Na Figura 35 tem-se os resultados das simulações para as propostas 2 e 3 dos estudos de alterações dos resfriadores.

**Figura 35 - Resultados da simulação para proposta 2: (a) temperatura de resfriamento, (b) fração sólida, (c) ocorrência de porosidade e para Proposta 3: (d) temperatura de resfriamento, (e) fração sólida e (f) ocorrência de porosidade nos estudos dos resfriadores**

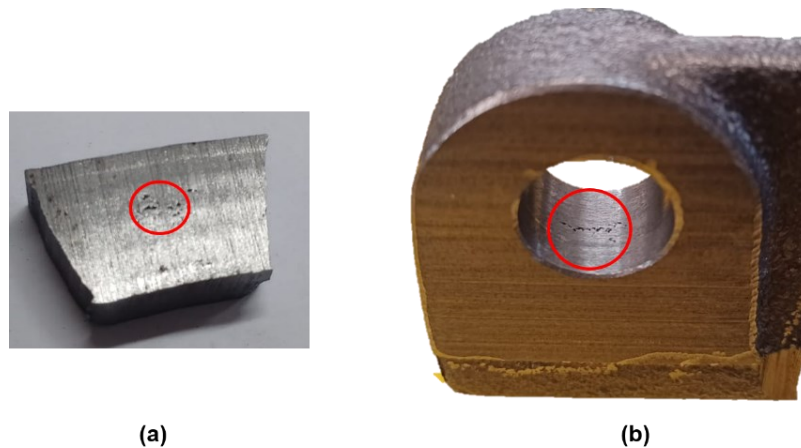


**Fonte: Autoria própria (2023)**

Analisando as Figuras 35 (a) e (d), o comportamento da temperatura para ambos os modelamentos mostra que a região onde os resfriadores foram retirados demoram mais para solidificar. Na Figura 35 (b) e (e), a análise de fração sólida condiz com a análise de temperatura e mostra uma descontinuidade na solidificação que sugere probabilidade de ocorrência de defeitos, que é confirmado pela análise de porosidade mostradas na Figuras 35 (c) e (f).

Para validar os resultados obtidos no *software* foram fundidas amostras com as alterações propostas para as duas situações e verificou-se a presença das porosidades indicadas após o corte e usinagem das amostras, como mostrado na Figura 36.

**Figura 36 - Porosidades encontradas nas amostras do estudo dos resfriadores (a) proposta 1 após o corte e (b) proposta 2, após usinagem**

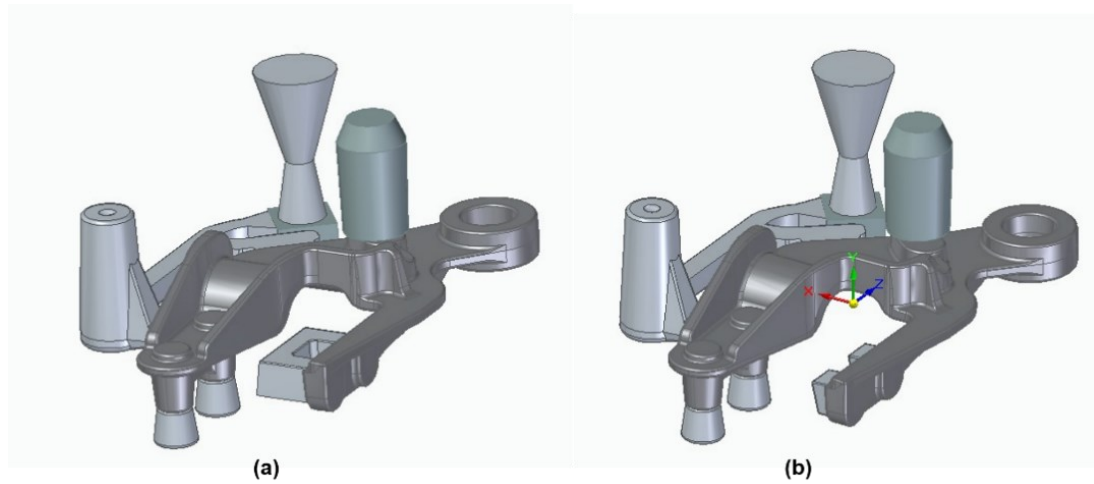


**Fonte: Autoria própria (2023)**

Uma vez que a proposta de retirada dos resfriadores foi concluída como inviável devido à ocorrência de porosidades, principalmente por tais pontos serem locais de usinagem, uma solução sugerida foi a inversão dos resfriadores para a parte inferior do molde, o que evitaria o desprendimento de areia dentro do molde durante o fechamento que geravam as inclusões de areia. No entanto, em uma conversa com o líder de produção da moldagem onde foi exposto a ideia de alteração dos resfriadores foi levantado o ponto de que a colocação de muitos resfriadores em apenas um dos lados do molde poderia acarretar perdas de produtividade, já que a inserção destes tomaria mais tempo dos operadores durante a produção.

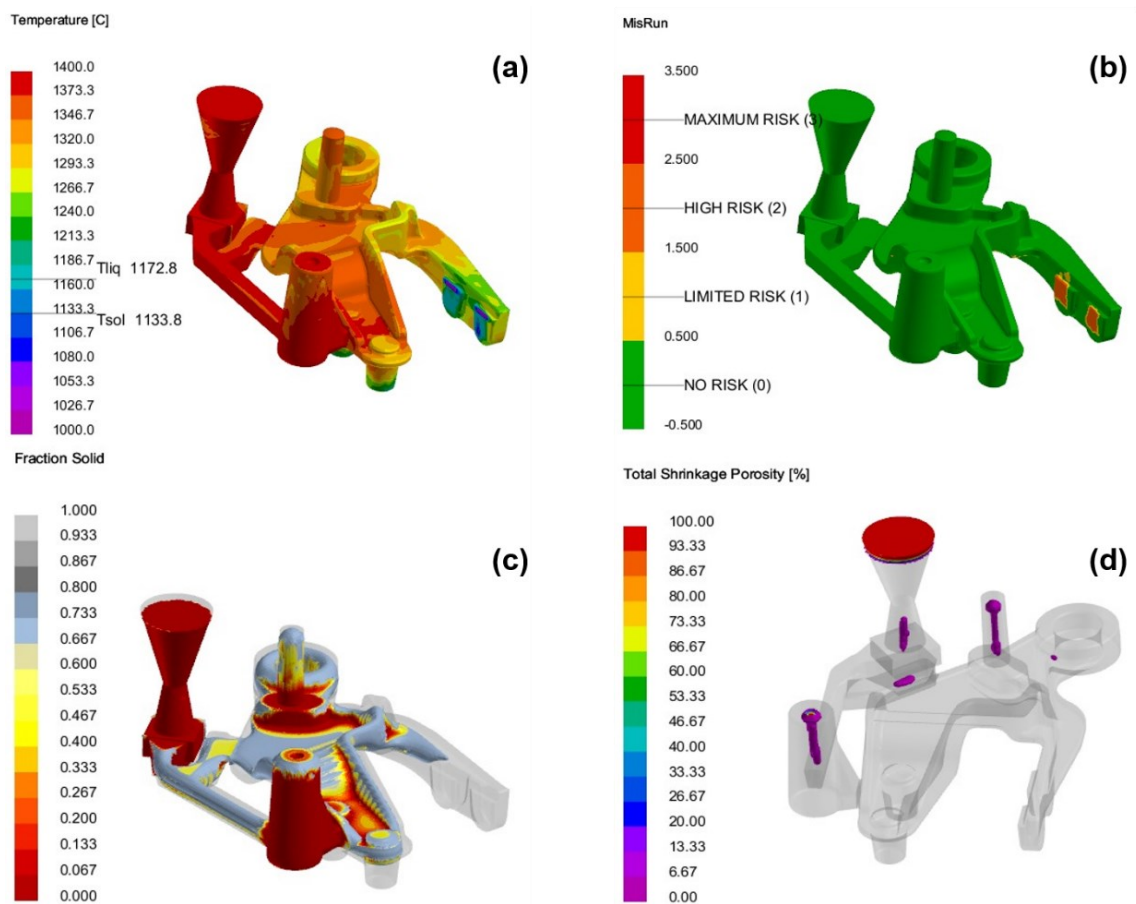
Diante disso, o próximo modelamento proposto foi feito com a inversão dos resfriadores e a tentativa de reduzir o número de resfriadores utilizados, unindo dois dos resfriadores em um. Um modelamento considerando apenas a inversão dos resfriadores também foi sugerido e analisado. Os modelamentos das propostas 3 e 4 estão representados na Figura 37 (a) e (b), respectivamente, e os resultados das análises feitas nas simulações de solidificação são mostrados nas Figuras 38 e 41.

**Figura 37 – Modelamentos das propostas (a) 3 e (b) 4 do estudo dos resfriadores**



Fonte: Autoria própria (2023)

**Figura 38 - Resultados da simulação de solidificação para o modelamento da proposta 3: (a) comportamento da temperatura durante resfriamento, (b) análise de risco de carbonetos, (c) análise de fração sólida e (d) ocorrência de porosidade**

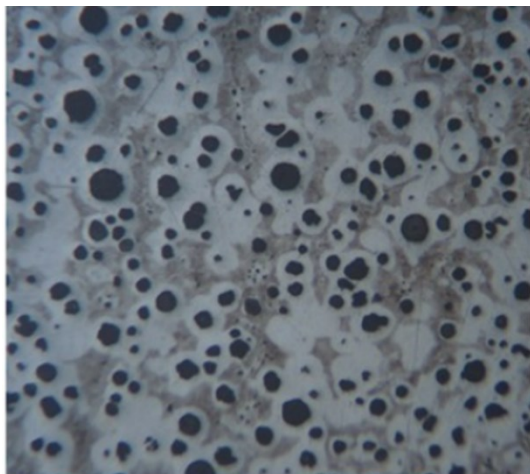


Fonte: Autoria própria (2023)

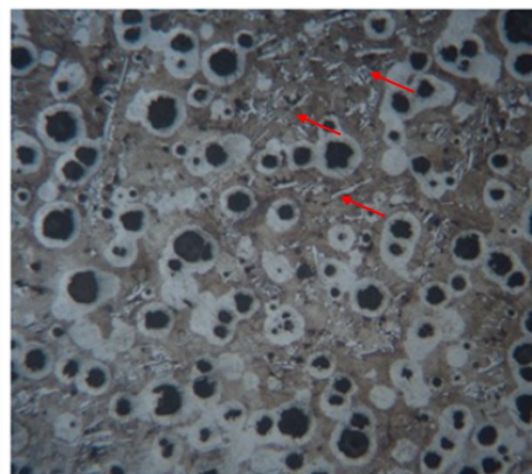
Para a proposta 3, aplicou-se um resfriador maior com propósito de diminuir o número de resfriadores a serem inseridos no molde, os resultados obtidos indicaram alto risco de aparecimento de carbonetos na região do resfriador. Na Figura 38 (a) é mostrado o acompanhamento da temperatura durante o resfriamento da peça, ficando evidente que o resfriamento na região do resfriador alterado ocorre rapidamente, o que pode ser confirmado na Figura 38 (c), a partir da análise de fração sólida. Apesar da análise de porosidades permanecer de acordo com o aceite nas produções até então, uma análise de risco de ocorrência de carbonetos mostrada na Figura 38 (b) deixa claro que a região mostra alto risco para o surgimento de carbonetos.

Fazendo uma análise microestrutural da região em questão, foram obtidas as micrografias mostradas na Figura 39, que compara uma microestrutura padrão para a liga de ferro fundido nodular composta por uma matriz ferrítica, Figura 39 (a), com a microestrutura obtida no local do resfriador para a amostra em discussão. Na micrografia da Figura 39 (b) pode-se observar a presença de carbonetos (apontados pelas setas) em uma microestrutura de ferro fundido nodular de matriz perlítica.

**Figura 39 - Micrografias da (a) microestrutura padrão de ferro nodular e (b) microestrutura não conforme com presença de carbonetos**



**(a)**



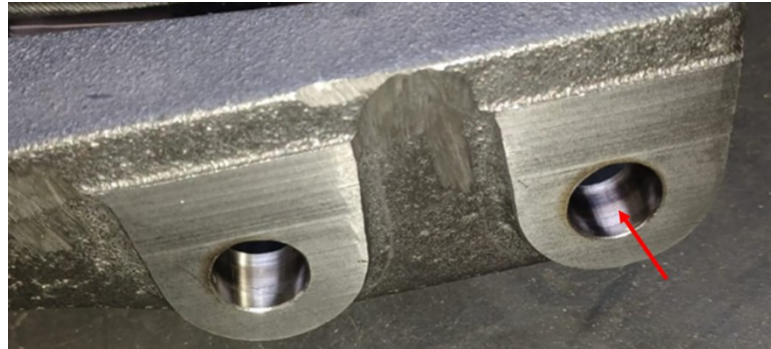
**(b)**

**Fonte: Autoria própria (2023)**

Além dessas evidências, a característica da peça após usinagem também confirmou a presença dos carbonetos, devido à mudança de coloração nos locais onde os furos foram usinados. Como é possível conferir na Figura 40, a peça

apresentou uma coloração escura no local da usinagem indicando que foi queimada pela ferramenta de usinagem uma vez que, a presença dos carbonetos torna a região ainda mais dura exigindo muito mais esforço da broca utilizada, o que reduz a vida útil da ferramenta.

**Figura 40 - Amostra com presença de carboneto após usinagem com alteração de coloração (região indicada pela seta) devido à queima da ferramenta durante a usinagem**

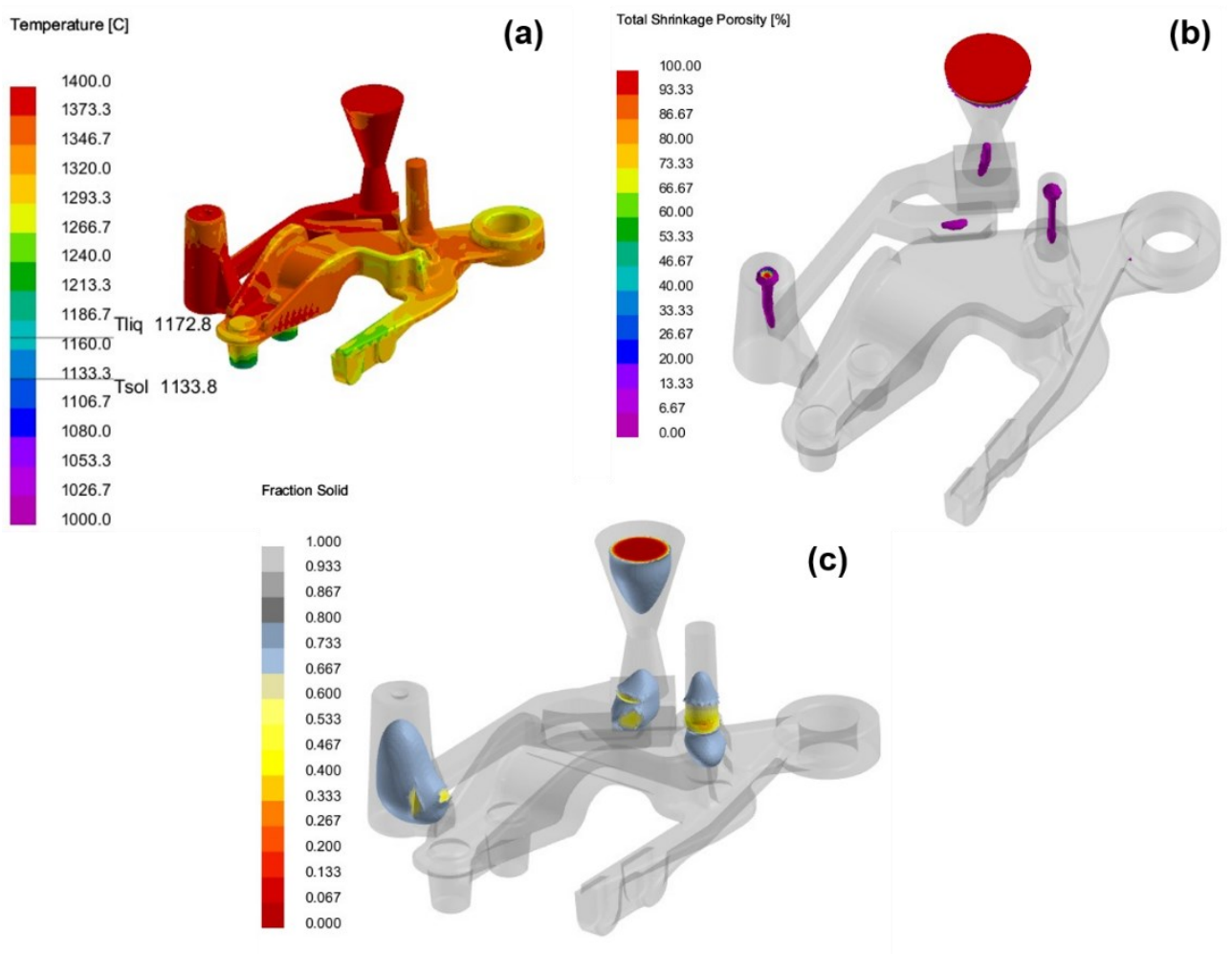


**Fonte: Autoria própria (2023)**

Por esse motivo a substituição dos resfriadores foi descartada, mantendo-se então a sugestão de inversão dos resfriadores para a parte inferior do molde, conforme o último modelamento sugerido, a proposta de alteração 4 mostrada na Figura 37 (b). As análises de simulação para essa condição não mostraram alterações significativas no comportamento da peça em relação ao modo de produção atual da mesma, como pode ser constatado na Figura 41, sendo uma possibilidade viável para atacar os problemas de refugo por inclusão de areia. A influência dessa modificação na produtividade e os índices de refugo da peça devem ser monitoradas nas próximas produções da empresa para identificar se os ganhos são maiores que as possíveis perdas indicadas anteriormente pelo líder de produção.



**Figura 41 - Resultados para simulação de solidificação do modelamento da proposta 4: (a) comportamento da temperatura durante o resfriamento, (b) possibilidade de ocorrência de porosidade e (c) análise de fração sólida**



Fonte: Autoria própria (2023)

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo de caso detalha o papel do engenheiro de processo em uma melhoria de fabricação de peça fundida de ferro fundido nodular auxiliada pelo uso de um *software* de simulação de fundição, disponível na empresa, propriamente aferido para o processo da mesma, mostrando o grande potencial de gerar aperfeiçoamento do processo a partir da tecnologia disponível e conhecimentos da engenharia do processo.

Os resultados obtidos pelo trabalho se mostram vantajosos para a empresa, visto que a partir de estimativas de custos, no qual o preço dos insumos para a carga do forno no mês de abril de 2023 foi de R\$3,12/kg, e considerando uma produção com o modelo alterado de 4864 moldes nos meses de outubro de 2022 a abril de 2023 com uma diferença de 1,7 kg por molde, obteve-se uma economia de aproximadamente R\$25.798,00 apenas analisando os ganhos resultantes da redução do peso de conjunto.

O índice de refugo por rechupe teve significativa diminuição entre os anos de 2021 e 2023 devido às alterações propostas. Somado a esses resultados, os estudos das alterações dos resfriadores têm grande potencial de gerar ainda mais redução de refugo e conseqüentemente, redução de custos com a não qualidade. Visto que dentre as alternativas estudadas a última se mostra viável para produção e com grande chances de redução de refugo por inclusão de areia associada aos resfriadores.

Outro ponto importante que o trabalho proporciona é a justificativa da aquisição de tecnologias como os *softwares* de modelamento e simulação de solidificação, que permite entender o processo e mostra os benefícios de se ter um bom projeto de fundição para garantir sempre as melhores condições de fabricação do produto e estudar de maneira contínua as oportunidades de melhorias encontradas nos desafios da realidade da fábrica.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 6916**. Ferro fundido nodular ou ferro fundido com grafita esferoidal – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- AZEEM, M. A., BJERRE, M. K., ATWOOD, R. C., TIEDJE, N., & LEE, P. D. Synchrotron quantification of graphite nodule evolution during the solidification of cast iron. **Acta Materialia**, 155, p. 393–401, 2018. doi:10.1016/j.actamat.2018.06.007
- BALDAM, R. L.; VIEIRA, E. A. **Fundição: Processos e Tecnologias Correlatas**. 2 ed. Ver. São Paulo: Érica, 2014. ISBN 9788536519746.
- BOERI, R. E., LÓPEZ, M. G., TENAGLIA, N. E., MASSONE, J. M. Solidification, Macrostructure and Shrinkage Formation of Ductile and Compacted Irons. **International Journal of Metalcasting**, 2020. doi:10.1007/s40962-020-00444-z
- CALLISTER, W. D. Jr. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução**. 10 ed Rio de Janeiro: Grupo GEN – LTC editora, 2020. ISBN 9788521637325.
- CAMPBELL, F. C. **Metals Fabrication: Understanding the Basics**. Ohio: ASM International, 2013. ISBN 9781627080187. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=MbhpBAAAQBAJ>. Acesso em: 28 mar. 2023.
- CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica - Processos de Fabricação e Tratamento**. v.2. 2 ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.
- FRAŚ, E., & GÓRNY, M. Inoculation Effects of Cast Iron. **Archives of Foundry Engineering**, v 12, n 4, p. 39–46, 2012. doi:10.2478/v10266-012-0104-z
- GROOVER, M. P. **Fundamentos da Moderna Manufatura Versão SI**. v. 1, 5 ed. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2017. *E-book*. ISBN 9788521634126. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521634126/>. Acesso em: 16 mar. 2023.
- GUESSER, W. L. **Propriedades mecânicas dos ferros fundidos**. 1 ed. São Paulo, SP: Blucher, 2009.
- INFOMET. Especificações e propriedades do ferro fundido nodular. Disponível em: <https://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=164>. Acesso em 21 mar. 2023.
- KHAN, M. A. A., SHEIKH, A. K. A comparative study of simulation software for modelling metal casting processes. **International Journal of Simulation Modeling**, v. 17, n. 2, p. 197-209, 2018. Disponível em: [https://doi.org/10.2507/IJSIMM17\(2\)402](https://doi.org/10.2507/IJSIMM17(2)402). Acesso em: 30 mar. 2023.

- LACARTA, L. V. **Análisis de sistemas de alimentación y simulación mediante Quikcast del proceso de fundición por gravedad de una pieza de aluminio.** Trabalho de conclusão de Curso em Engenharia de Tecnologias Industriais - Escola de engenharia e Arquitetura, Universidade de Zaragoza, Zaragoza, 2018.
- LACAZE, J. Trace Elements and Graphite Shape Degeneracy in Nodular Graphite Cast Irons. **International Journal of Metalcasting**, v. 11(1), p. 44–51, 2016. doi:10.1007/s40962-016-0115-6
- LOTTI, R. S. et al. Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos. **Revista Dental Press de Ortodontia e Ortopedia Facial**, v. 11, n. Rev. Dent. Press Ortodon. Ortop. Facial, 2006 11(2), p. 35–43, mar. 2006.
- RIBEIRO, J. P. S. **Incorporação de dados de análise térmica na simulação de solidificação de ferro fundido nodular.** 2021. Dissertação - Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais – Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Portugal, 2021.
- RIVERA, G., BOERI, R., SIKORA, J. Influence of the inoculation process, the Chemical composition and the cooling rate, on the solidification macro and microstructure of ductile iron. **International Journal of Cast Metals Research**, v 16(1-3), p. 23-28, nov. 2003
- ROSSITTI, S. M. **Processos e variáveis de fundição.** Grupo Metal: Aço inoxidável e Ligas especiais, 1993.
- RUNDMAN, K. B., IACOVIELLO, F. **Cast Irons.** Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. 2016. doi:10.1016/b978-0-12-803581-8.09803-9
- SOUSA, T. A.; SILVA, R. P.; RAMOS, T. A.; CARDOSO, A.; OLIVEIRA, R. Análise do comportamento do ferro fundido nodular GGG60 no processo *shell molding* e comparação com software Magma. **Revista da ABIFA**, ed. 165, p. 72-82, fev. 2014.
- STEFANESCU, D. M. **Science and Engineering of Casting Solidification.** 3 ed. Springer, 2015. doi:10.1007/978-3-319-15693-4