

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**MARLON CRISTIANO DAL'MASO**

**VALIDAÇÃO DO SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE UM COMPONENTE  
MECÂNICO FUNDIDO POR MEIO DE SIMULAÇÃO DE SOLIDIFICAÇÃO**

**PATO BRANCO**

**2022**

**MARLON CRISTIANO DAL'MASO**

**VALIDAÇÃO DO SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE UM COMPONENTE  
MECÂNICO FUNDIDO POR MEIO DE SIMULAÇÃO DE SOLIDIFICAÇÃO**

**Validation of the feeding system of a mechanical casting component through  
solidification simulation**

Trabalho de conclusão de curso de graduação,  
apresentado como requisito para obtenção do título  
de Bacharel em Engenharia mecânica da  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
(UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Dalmarino Setti

**PATO BRANCO  
2022**



[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.

**MARLON CRISTIANO DAL'MASO**

**VALIDAÇÃO DO SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE UM COMPONENTE  
MECÂNICO FUNDIDO POR MEIO DE SIMULAÇÃO DE SOLIDIFICAÇÃO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação,  
apresentado como requisito para obtenção do título  
de Bacharel em Engenharia mecânica da  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
(UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Dalmarino Setti.

Data de aprovação: 09 de dezembro de 2022

---

Dalmarino Setti  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

---

Maria Nalu Verona Gomes  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

---

Silvana Patricia Verona  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

**PATO BRANCO**

**2022**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha família, pois sem o apoio deles, em especial meus pais e minha irmã, seria muito difícil passar por essa jornada.

Aos meus amigos de sala.

Gostaria de deixar registrado também, o meu orientador, Prof. Dr. Dalmarino Setti, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória.

## RESUMO

A Fundição de metais consiste no preenchimento de uma cavidade existente, que é o molde com metal líquido, com objetivo de formar a geometria da peça final fundida após a solidificação. Com o avanço da Tecnologia, as indústrias de Fundição têm sofrido grandes mudanças no perfil de fornecimento de seus produtos. A otimização do processo produtivo aliada à utilização de ferramentas computacionais de simulação de solidificação é de enorme valia na modernização do processo de fabricação de peças fundidas. Desta forma, este trabalho tem como objetivo principal utilizar a simulação de solidificação na validação do sistema de alimentação de um componente mecânico fundido, em ferro fundido nodular FE50007. A partir da revisão de literatura sobre solidificação do ferro fundido nodular e dimensionamento de sistemas de canais de alimentação e massalotes. Uma peça agrícola foi o componente em estudo. A partir do modelo 3D dessa peça, foram realizados os cálculos do módulo de Chvorivov e dimensionado o sistema de canais e massalote, por fim, desenvolver as simulações de solidificação. As simulações de solidificação realizadas utilizaram dois métodos, o de Elementos Finitos (FEM) e o método de Diferenças Finitas (FDM), utilizando três tamanhos de malhas (3,5, 2,5 e 1,5 mm) e dois diâmetros de massalotes com altura igual, 1,5D (57 e 49 mm de diâmetro). Em nenhuma simulação os resultados mostraram microporosidade acima de 1%, devido ao correto dimensionamento do sistema de canais e massalote. O diâmetro de massalote escolhido, corresponde ao menor diâmetro ( $D$ ) = 49 mm, pois resultou em um melhor rendimento metalúrgico do conjunto e devido ao elevado tempo de solidificação, o melhor *software* para a simulação foi o NovaFlow & Solid, com método das Diferença Finitas (FDM), quando comparado ao outro *software* utilizado, o Altair Inspire Cast com o método de Elementos Finitos (FEM).

Palavras-chave: Sistema de Alimentação; Massalotes; Ferro Fundido Nodular; *Software* Simulação de Solidificação

## **ABSTRACT**

Metal casting consists of filling an existing cavity, the mold, with a liquid metal to form the geometry of the final cast part after solidification. With the advance of technology, the foundry industries have suffered significant changes in the supply profile of their products. The optimization of the production process allied to the use of computational solidification simulation tools is of enormous value in the modernization of the manufacturing process of castings. Thus, this work has as its primary objective to use the solidification simulation to validate the feeding system of a mechanical component cast in nodular cast iron FE50007. An agricultural part was the component under study. From the 3D model of this part, the Chvorinov modulus calculations were performed, the channel system and riser were dimensioned, and finally, the solidification simulations were developed. The solidification simulations performed used two methods, the Finite Element Method (FEM) and the Finite Difference Method (FDM), using three mesh thicknesses (3.5, 2.5, and 1.5 mm) and two risers diameters with equal heights of 1.5D (57 and 49 mm diameter). No simulation showed porosity above 1% due to the correct sizing of the feeding system and riser. The chosen diameter of the pellet corresponds to the minor diameter ( $D$ ) = 49 mm because it resulted in a better metallurgical yield of the assembly. Due to the high solidification time, the best software for the simulation was NovaFlow & Solid with the Finite Difference Method (FDM) compared to other software used Altair Inspire Cast with the Finite Element Method (FEM).

*Keywords: Feeding System; Risers; Ductile Iron; Solidification Simulation Software.*

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - (a): Em uma escala microscópica, um sólido se precipita em uma matriz líquida. (b): O processo de precipitação é visto na escala atômica como um agrupamento de átomos adjacentes para formar (c): um núcleo cristalino seguido pelo (d): crescimento da fase cristalina.....	15
Figura 2 - Evolução da variação total de energia livre $\Delta G$ com o raio do embrião do núcleo.....	17
Figura 3 - Em A, nucleação heterogênea de um sólido a partir de um líquido. As energias interfaciais sólido-superfície ( $\gamma_{SI}$ ), sólido-líquido ( $\gamma_{SL}$ ) e líquido-superfície ( $\gamma_{LL}$ ) estão representadas por vetores. O ângulo de contato ( $\theta$ ) também é mostrado. Em B gráfico esquemático para a energia livre em função do raio do embrião/núcleo.....	18
Figura 4 - Taxa de nucleação em função da temperatura tanto para a nucleação homogênea quanto para a nucleação heterogênea. Os graus de super-resfriamento ( $\Delta T$ ) para cada curva também são mostrados.....	19
Figura 5 - Tipos de interface sólido/líquido: (a) rugosa ou difusa; (b) lisa ou facetada.....	20
Figura 6 - Microestrutura de ferro fundido nodular, de matriz ferrítica. Ataque: Nital.....	22
Figura 7 - Diagrama de Henderson, faixa de composição química ideal para produzir Ferro Fundido Nodular.....	24
Figura 8 - Diagrama Fe-C. Sistema metaestável em linhas sólidas e sistema estável em linhas tracejadas.....	26
Figura 9 - Esquema do crescimento da grafita em veios e em nódulo.....	27
Figura 10 - Estágio de crescimento da grafita esférica e austenita no nodular.....	27
Figura 11 - Sistema de alimentação para uma fundição.....	30
Figura 12 - Canal de distribuição contínuo.....	31
Figura 13 - Massalote de Alimentação.....	32
Figura 14 - Exemplo da Análise de Simulação de Solidificação.....	38
Figura 15 - Fluxograma das etapas.....	39

<b>Figura 16 - Desenho tridimensional da unidade do rotor.....</b>	<b>40</b>
<b>Figura 17 - Regras Gerais de Dimensões para Pescoços de Massalote.....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 18 - Interação de Simulação de Solidificação.....</b>	<b>47</b>
<b>Figura 19 - Seções da Peça.....</b>	<b>50</b>
<b>Figura 20 - Sistema de Alimentação e Peça.....</b>	<b>54</b>
<b>Figura 21 - Interface inicial <i>software</i> Altair Inspire Cast.....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 22 - Interface inicial <i>software</i> NovaFlow &amp; Solid.....</b>	<b>56</b>
<b>Figura 23 - Microporosidade Malha de 3.5 mm Altair Inspire Cast / NovaFlow &amp; Solid Diâmetro 57 mm.....</b>	<b>59</b>
<b>Figura 24 - Microporosidade Malha de 3.5 mm Altair Inspire Cast / NovaFlow &amp; Solid Diâmetro 49 mm.....</b>	<b>59</b>
<b>Figura 25 - Microporosidade Malha de 2.5 mm Altair Inspire Cast / NovaFlow &amp; Solid Diâmetro 57 mm.....</b>	<b>60</b>
<b>Figura 26 - Microporosidade Malha de 2.5 mm Altair Inspire Cast / NovaFlow &amp; Solid Diâmetro 49 mm.....</b>	<b>61</b>
<b>Figura 27 - Microporosidade Malha de 1.5 mm Altair Inspire Cast / NovaFlow &amp; Solid Diâmetro 57 mm.....</b>	<b>61</b>
<b>Figura 28 - Microporosidade Malha de 1.5 mm Altair Inspire Cast / NovaFlow &amp; Solid Diâmetro 49 mm.....</b>	<b>62</b>



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades mecânicas do ferro fundido nodular segundo ABNT NBR 6916:2017.....	22
Tabela 2 - são observadas as composições para diferentes tipos de ferros fundidos nodulares de acordo com a ABNT NBR 8650:2015.....	23
Tabela 3 - Porcentagem de carbono e silício no ferro fundido nodular com predominância de matriz perlítica.....	23
Tabela 4 - Características da Peça.....	40
Tabela 5 - Condições de contorno.....	48
Tabela 6 - Valores Módulos de Chvorinov das Seções da Peça.....	51
Tabela 7 - Valores dos cálculos do massalote do componente em estudo.....	52
Tabela 8 - Informações do Massalote a partir dos dados da Equação(5).....	52
Tabela 9 - Dados do Sistema de Alimentação.....	53
Tabela 10 – Informações da Simulação de Solidificação.....	57
Tabela 11 - Valores de Porosidade nas Simulações.....	58
Tabela 12 - Rendimento Metalúrgico.....	63

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
<b>1.1 Objetivos.....</b>	<b>12</b>
1.1.2 Objetivo específicos.....	12
<b>1.2 Justificativa.....</b>	<b>13</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>14</b>
<b>2.1 Solidificação.....</b>	<b>14</b>
2.1.1 Nucleação.....	14
2.1.2 Nucleação homogênea.....	16
2.1.3 Nucleação heterogênea.....	18
2.1.4 Crescimento.....	19
<b>2.2 Ferros fundidos.....</b>	<b>20</b>
2.2.1 Ferro fundido nodular.....	21
<b>2.3 Sistema de canais de enchimento e alimentação.....</b>	<b>28</b>
2.3.1 Elementos do sistema de canais de enchimento.....	29
2.3.2 Bacia de vazamento.....	30
2.3.3 Canal de descida.....	30
2.3.4 Canal de distribuição.....	31
2.3.5 Canais de ataque.....	31
2.3.6 Sistema de alimentação de peças com massalotes.....	32
2.3.7 Pescoço do massalote.....	33
2.3.8 Módulo de solidificação.....	33
<b>2.4 Simulação de solidificação.....</b>	<b>34</b>
2.4.1 Passos para realização da simulação de solidificação.....	35
2.4.2 Vantagens da simulação de solidificação em empresas de fundições.....	37
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>39</b>
<b>3.1 Componente mecânico e modelo 3D.....</b>	<b>39</b>
<b>3.2 Determinação do módulo de chvorinov para a peça.....</b>	<b>41</b>

<b>3.3 Dimensionamento do massalote.....</b>	<b>41</b>
<b>3.4 Determinação configuração do sistema de alimentação.....</b>	<b>43</b>
<b>3.5 Simulação de solidificação.....</b>	<b>47</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>50</b>
<b>4.1 Análise módulo de Chvorinov da peça.....</b>	<b>50</b>
<b>4.2 Análise módulo de chvorinov e volume do massalote.....</b>	<b>51</b>
<b>4.3 Configuração sistema de alimentação.....</b>	<b>52</b>
<b>4.4 Análise de simulação.....</b>	<b>54</b>
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>64</b>
<b>5.1 Sugestões de trabalhos futuros.....</b>	<b>65</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>66</b>
<b>ANEXO A - Lei n. 9.610, de 19 de fevereiro de 1998.....</b>	<b>69</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O processo de Fundição de metais teve seu início ainda na pré-história (ROSSITTI, 1993). A Fundição de metais consiste no preenchimento de uma cavidade existente, que é o molde, com metal líquido, com objetivo de formar a geometria da peça final fundida. A retirada da peça do molde ocorre depois do tempo de resfriamento, necessário para ocorrer a transformação líquido-sólido do metal utilizado na fabricação do componente fundido (BALDAN E VIEIRA, 2013).

Algumas das vantagens na utilização do processo de fundição podem ser classificadas como: ser um dos métodos mais simples e diretos e de melhor custo benefício para obter produtos metálicos com formas definidas, além da complexidade de formas possíveis de serem obtidas pelo processo, capacidade dimensional do peso, dimensões lineares, qualidade superficial, tolerâncias dimensionais, nível relativo de propriedades mecânicas e microporosidade (STOLL, 2009).

Desde o seu surgimento, o processo de Fundição de metais foi caracterizado pelo elevado grau de defeitos de fabricação, como peças incompletas, microporosidades, entre outros e a evolução era desenvolvida com base na tentativa e erro, para que esses problemas pudessem ser resolvidos. A falta de conhecimento para a aplicação dos conceitos de mecânica, dos fluidos e transferência de calor no vazamento do metal líquido, influenciava diretamente no aumento do custo de produção, tempo de produção, defeitos de fundição, gerados sem o real entendimento da causa, entre outros. Somente muito tempo depois com o avanço da capacidade computacional, que a simulação de solidificação foi empregada como método de prevenção de defeitos (BONOLLO, 2001).

Com base nesse contexto, a indústria de Fundição, teve que passar por mudanças para assegurar a sua qualidade e confiabilidade no mercado, devido à grande concorrência. Diferente do tempo em que a tecnologia era de difícil acesso e os recursos que hoje auxiliam na análise dos componentes fundidos era inexistente, no atual cenário industrial essas exigências acabam forçando as empresas a investirem em tecnologia para a utilização de recursos como *softwares* de simulação de solidificação (*Softwares* CAE), ferramentas as quais a partir da execução de projetos de componentes fundidos, possibilitam a análise de defeitos antes da fabricação inicial do componente (OLIVEIRA, GUESSER, BAUMER 2003).

Atualmente existem uma grande variedade de *softwares* destinados ao desenvolvimento da simulação de solidificação, simulação de enchimento e de otimização dos sistema de canais e massalotes, com recursos que auxiliam na tomada de decisões. Dentre os principais benefícios desses *softwares* pode-se citar a redução do tempo de desenvolvimento de produtos e a melhora no desempenho de componentes ou de seu processo de fabricação. Para se obter resultados satisfatórios se faz indispensável a capacidade de transformar componentes em um modelo computacional adequado (IDAGAWA, 2013).

O presente trabalho consiste na aplicação da simulação de solidificação por meio de dois *softwares*, com dois diferentes métodos de simulação numérica, Método dos elementos finitos, ou *Finite Element Method* (FEM) e o Método das Diferenças Finitas ou *Finite Difference Method* (FDM), para validar um sistema de alimentação de um componente mecânico fabricado em Ferro Fundido Nodular, o qual foi dimensionado pelo método de cálculo da AFS.

## 1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal, validação do sistema de alimentação de um componente mecânico fundido, em ferro fundido nodular FE50007, por meio da utilização da simulação de solidificação.

### 1.1.2 Objetivo específicos

Como objetivos específicos deste trabalho, são definidos: (i) realizar uma revisão bibliográfica sobre solidificação, ferros fundidos nodulares, sistemas de canais e simulação de solidificação; (ii) dimensionar o sistema de alimentação do componente; (iii) desenvolver a simulação de solidificação no componente com o sistema de alimentação em dois métodos diferentes; (iv) avaliar o rendimento do sistema a partir dos resultados das simulações.

## 1.2 Justificativa

A justificativa deste trabalho se baseia em um problema recorrente e real ocorrido em empresas de Fundição. Atualmente a indústria tem a tendência de balancear as necessidades comerciais, mantendo a eficiência, capacidades de operação de seus profissionais e o objetivo de maior lucratividade.

A procura de novos recursos e necessidades de atingirem os prazos de entregas, vem desafiando cada vez mais a equipe de Engenharia. Atualmente um dos recursos que vem sendo mais procurados para agregar valor e confiabilidade dos produtos de uma empresa, é a utilização de ferramentas de simulação baseadas em *Computer Aided Design (CAD)* e *Computer Aided Engineering (CAE)*. Essas melhorias se tornam possíveis pelo avanço da tecnologia computacional, apoiando a tomada de decisões e substituindo o processo de tentativa e erro, o qual era uma prática recorrente nas empresas de Fundição.

Desta forma, este trabalho tem por intuito colaborar com as empresas de Fundição, utilizando a tecnologia de simulação de solidificação, explorando o impacto resultantes de seu uso, principalmente em relação aos custos de fabricação e tempo de desenvolvimento de um componente, atingindo melhor qualidade dos componentes fundidos produzidos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Solidificação

A Solidificação é a descrição científico-tecnológica da transformação de um material da fase líquida para a fase sólida. (MÜLLER, 2002).

A partir do processo de solidificação, na qual ocorre a partir do preenchimento de um molde com a metal líquido como matéria prima, é possível se obter componentes e peças desde simples a complexas geometrias. A matéria prima como mencionado acima, pode ser aplicada a partir de diversas ligas de metais, tais como cobre, alumínio, magnésio, zinco, aços, ferros fundidos nodulares e cinzentos, entre outros metais que permitem a utilização do processo de fusão e solidificação de sua liga, alterando sua geometria inicial (BALDAM; VIEIRA, 2014).

O processo mais utilizado atualmente para a fundição de metais, é com a utilização da areia verde, basicamente utilizada para a confecção dos moldes nos quais os metais na forma líquida são vazados (CASTRO, KIMINAMI E OLIVEIRA, 2013).

Apesar de parecer um processo simples, consistindo na transformação das ligas no estado de sólido para líquido, para sólido novamente a partir de uma geometria pré-determinada, essas mudanças de fase são envolvidas por diversos fenômenos dinâmicos como fluidez de metal, temperatura, comportamento das ligas transições, entre outros comportamentos que alteram o produto final e as propriedades que influenciam no controle e desempenho do processo. Adiante, será abordada as duas principais etapas que iniciam essas influências de propriedades de transformação, a nucleação e o crescimento (FERREIRA, 2010).

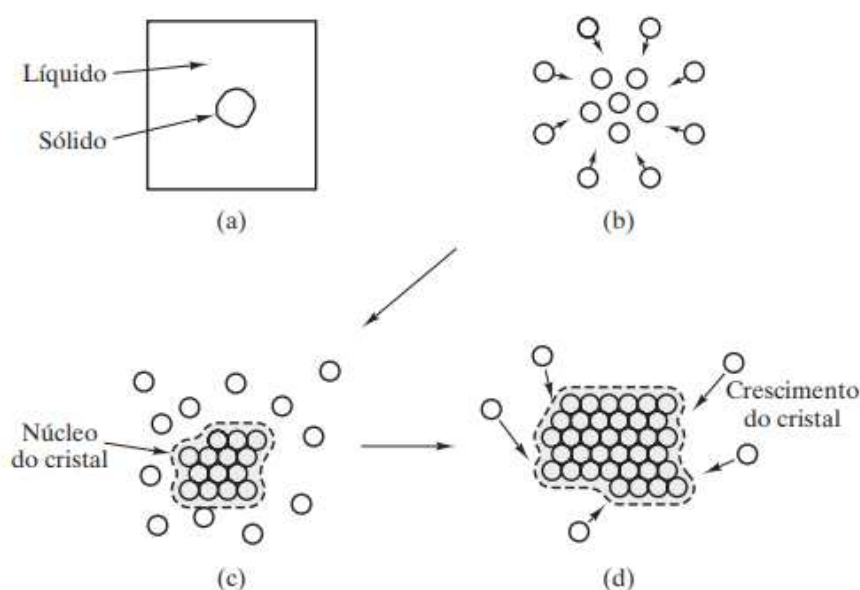
#### 2.1.1 Nucleação

Essa transformação de fase (líquido-sólido) se inicia com pequenos núcleos, os quais se originam nas flutuações atômicas locais e normalmente, têm apenas algumas centenas de átomos de tamanho, produzindo aleatoriamente vários núcleos. Esses precisam ter tamanho crítico, o suficiente para que consigam deslocar energia e assim formarem a fase de sólido a partir do líquido. A velocidade para essa transformação, é resultado da temperatura exata do ponto de fusão, nos

quais as fases sólida e líquida estão em equilíbrio e a força para essa não seja suficiente e ocorra.

A teoria clássica da nucleação, é baseada em um balanço de energia entre o núcleo e o líquido ao seu redor e que um pequeno agrupamento de átomos será estável somente se o crescimento posterior reduzir a energia líquida do sistema (CAMPOS FILHO, 1978). A Figura 1 ilustra essa descrição.

**Figura 1 - (a): Em uma escala microscópica, um sólido se precipita em uma matriz líquida. (b): O processo de precipitação é visto na escala atômica como um agrupamento de átomos adjacentes para formar (c): um núcleo cristalino seguido pelo (d): crescimento da fase cristalina.**



Fonte: William D. Callister Jr (2016)

Para que a força que resulte na solidificação e ocorrência do processo de nucleação aumenta nesse processo, é necessário que a temperatura diminua, assim a velocidade aumenta bruscamente. No entanto esse aumento não continua de forma indefinida, pois assim como o aumento da força depende da diminuição da temperatura, com o passar do tempo a sua velocidade também irá reduzir.

A diminuição da velocidade tem natureza exponencial e é outro exemplo do comportamento de Arrhenius (Svante August Arrhenius (1859–1927), químico sueco, deixou diversas contribuições para a física e química, incluindo a demonstração experimental para as taxas de reação química).

De forma resumida, define-se nucleação como a formação de uma nova fase a partir de outra, ou seja, fase líquida para a sólida, ela apresenta contornos bem



definidos de fácil caracterização dos meios que as formaram, Em termos de formação, a nucleação pode ocorrer de duas maneiras distintas: nucleação homogênea e nucleação heterogênea (CAMPOS FILHO, 1978).

### 2.1.2 Nucleação homogênea

O objetivo do trabalho não é entrar nos detalhes termodinâmicos que envolvem o princípio da nucleação homogênea, contudo um parâmetro que será abordado a seguir, é a variação da energia livre  $\Delta G$ , parâmetro importante da termodinâmica, envolvendo a energia livre (ou energia livre de Gibbs). De forma resumida, essa energia é uma função da termodinâmica que envolve a entalpia  $H$  (energia livre do sistema) e uma medida de aleatoriedade ou desordem dos átomos, a entropia  $S$  (CHALMERS, 1964; FLEMINGS, 1974; CAMPOS FILHO, 1978; GARCIA, 2007).

Denomina-se nucleação homogênea, a formação de um sólido dentro do metal líquido, por exemplo; à medida que os átomos se aglomeram para formar um arranjo semelhante a aquele encontrado na fase sólida, quando não há nenhum auxílio energético externo, esses aglomerados são chamados de embriões da fase sólida, ou seja um “Cluster” de átomos ligados uns aos outros, mesmo que acima do ponto de fusão. Com isso, cada núcleo esférico terá um raio  $r$ , eles crescem e levam à cristalização total. Esse processo chama-se de nucleação e a taxa na qual os embriões da fase estável aparecem, é denominada taxa de nucleação.

Para se manterem como núcleos estáveis dentro da forma líquida, é necessário que a mesma esteja a temperatura inferior a do ponto de fusão  $T_f$ , para isso a nucleação ocorre quando o próprio metal fornece os átomos para formar os núcleos. Em outras palavras, o líquido precisa ser submetido a um super-resfriamento térmico, para que haja a formação de núcleos sólidos estáveis.

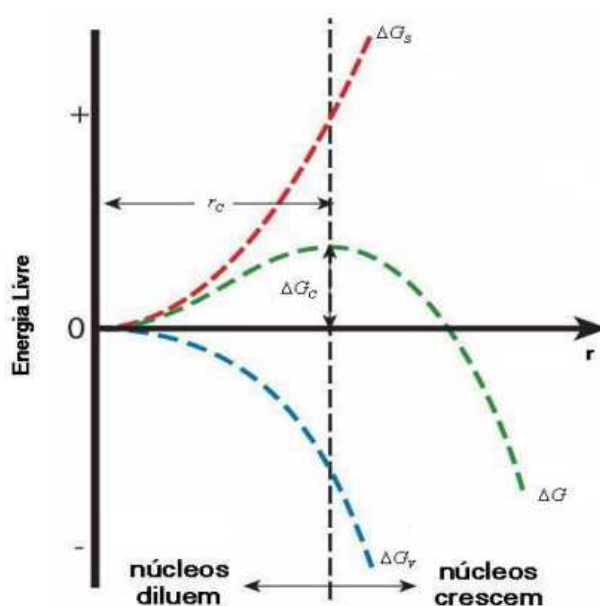
Porém em relação a variação de energia livre de volume  $\Delta G_v$ , na transformação do estado sólido para o líquido, será negativa, no entanto quando ocorrer a formação de embriões, haverá a também a formação de uma superfície que separa o líquido desordenado, da ordenação cristalina. Com relação a essa superfície, existirá uma variação de energia livre de superfície positiva  $\Delta G_s$ . Com isso o embrião só irá continuar existindo, se a energia livre total diminuir e a variação

total de energia livre  $\Delta G$ , é dada, pela somatória das variações de energia livre de volume e de superfície.

A nucleação homogênea gera a formação de embriões esféricos, ou seja, essa superfície é mais indicada energeticamente para a sobrevivência de um embrião, pois é a forma geométrica que apresenta melhor relação superfície e volume.

Abaixo está ilustrado que, a energia livre está em função das variações de energia livre de volume, de superfície e do raio da partícula.

**Figura 2 – Evolução da variação total de energia livre  $\Delta G$  com o raio do embrião do núcleo**



Fonte: CHALMERS (1964)

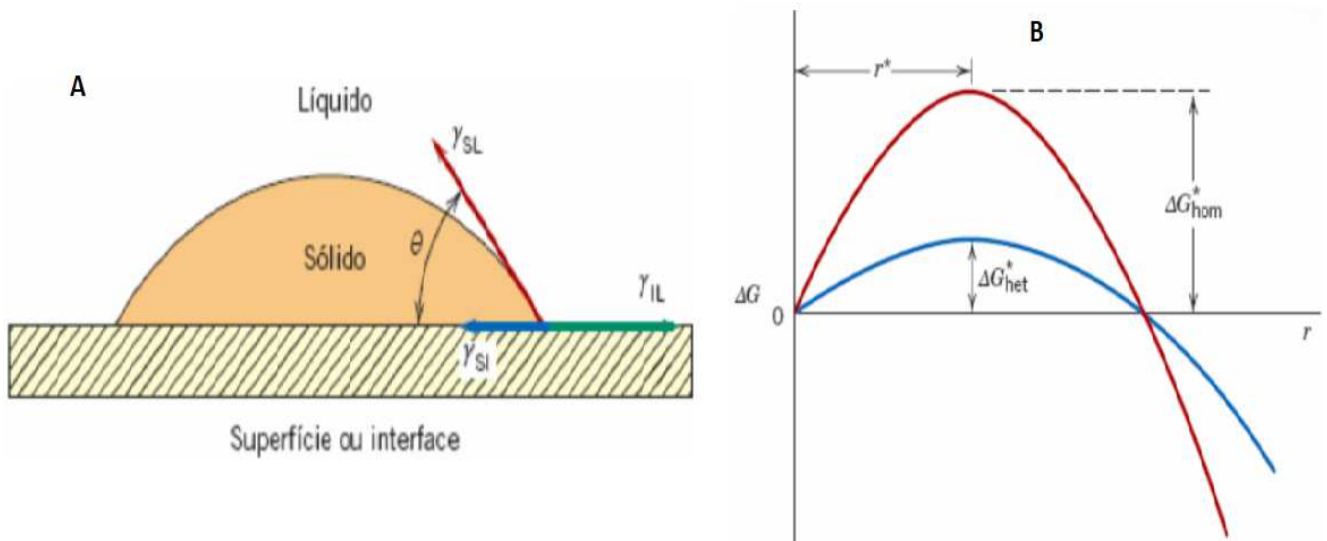
A partir da Figura 2, nota-se a existência de uma energia crítica  $\Delta G_c$  livre, que está associado a um raio crítico  $r_c$ . Isso ocorre pois o somatório das energias livre de superfície positiva  $\Delta G_s$ , mais a energia livre de volume  $\Delta G_v$ , forma uma curva resultante que atinge um valor máximo, assim conclui-se que a energia mínima de ativação  $\Delta G_c$ , que precisa ser atingida para formar o núcleo estável  $r_c$ , com isso o sistema será mais estável ao decréscimo de sua energia livre.

### 2.1.3 Nucleação heterogênea

Diferente da nucleação homogênea, a formação de um sólido dentro do próprio líquido, porém agora com o auxílio de algum tipo de estimulante energético externo, como impurezas, inclusões sólidas, paredes do recipiente, inoculantes e aditivos, é denominado de nucleação heterogênea. Tal nucleação, é caracterizada pela ingerência de agentes estranhos ao sistema, denominados substratos, que atuam como facilitadores energéticos do processo de nucleação (CHALMERS, 1964; FLEMINGS, 1974; CAMPOS FILHO, 1978; GARCIA, 2007).

Sob essas condições, pode se considerar que, o núcleo surge na forma de uma calota esférica, para compreender melhor, será considerado o crescimento de uma partícula sólida, sobre uma superfície plana, a partir da fase líquida. Considerando que as duas fases compreendem essa superfície, ou seja, ambas se espalham pela superfície como mostrado na Figura 3. Identificadas também na Figura, as três energias interfaciais em forma de vetores, que existem nas fronteiras entre as duas fases —  $\gamma_{SL}$ ,  $\gamma_{SI}$  e  $\gamma_{IL}$  —, assim como o ângulo de contato  $\theta$  (ângulo entre  $\gamma_{SI}$  e  $\gamma_{SL}$ ). A relação das forças de tensão superficial no plano da superfície plana.

**Figura 3 - Em A, nucleação heterogênea de um sólido a partir de um líquido. As energias interfaciais sólido-superfície ( $\gamma_{SI}$ ), sólido-líquido ( $\gamma_{SL}$ ) e líquido-superfície ( $\gamma_{IL}$ ) estão representadas por vetores. O ângulo de contato ( $\theta$ ) também é mostrado. Em B gráfico esquemático para a energia livre em função do raio do embrião/núcleo**

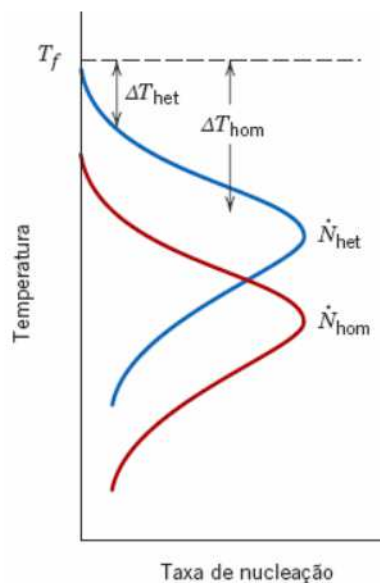


Fonte: William D. Callister Jr (2016)

O gráfico da Figura 3.B, representa os tipos de nucleação e as diferenças de magnitude de energia,  $\Delta G^*_{het}$  e  $\Delta G^*_{hom}$ , além da constância de  $r$ . Em que são apresentadas curvas, tanto para a nucleação homogênea, quanto para a nucleação heterogênea. As energias livres críticas e o raio crítico também são mostrados.

A energia deve ser acima do menor ponto de “ $\Delta G$ ”, durante o processo de nucleação heterogênea, para que ela ocorra, se relacionarmos a homogênea, ou seja, a nucleação homogênea ocorre mais lentamente. No que se diz a respeito para o processo de nucleação, a curva de  $N$ , em função de  $T$ , é deslocado para valores de maior temperatura “ $\Delta T$ ”, além de ilustrar um grau muito menor de super-resfriamento, é exigido para a nucleação heterogênea.

**Figura 4 - Taxa de nucleação em função da temperatura tanto para a nucleação homogênea quanto para a nucleação heterogênea. Os graus de super-resfriamento ( $\Delta T$ ) para cada curva também são mostrados**



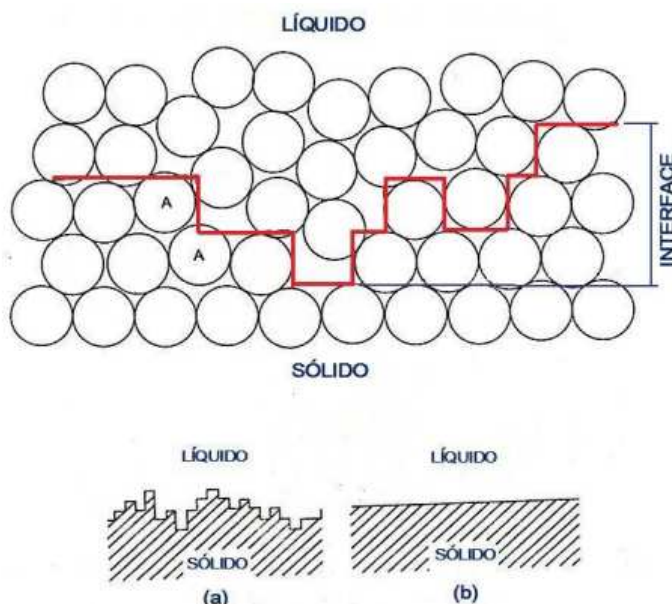
Fonte: William D. Callister Jr (2016)

#### 2.1.4 Crescimento

A partir do instante em que ocorre a formação do núcleo na solidificação, se dá início a fase de crescimento, que irá aumentar, dependendo da dificuldade em que os átomos encontram para se ligarem entre si, a interface de crescimento, ou seja, mudança da fase sólido/líquido em níveis atômicos. Tal interface se caracteriza por uma região, com faixas mistas e desordenadas entre as fases líquidas e sólidas,

onde irão se organizar em função do aumento da liberação do calor latente e posicionando de forma correta os átomos no reticulado.(CHALMERS, 1964; FLEMINGS, 1974; CAMPOS FILHO, 1978; GARCIA, 2007). A Figura 5, mostra dois tipos de estruturas de interface em nível atômico, lisa, ou faceada. A faceada está ilustrada como uma interface compacta e plana, na qual a transição de sólido/líquido ocorre em pequenas faixas de camadas. Por consequência da incorporação aleatória dos átomos, às camadas atômicas de maior ordenação, a variação de energia livre de superfície  $\Delta G_s$ , está ligada a formação desses dois tipos de interface.

**Figura 5 – Tipos de interface sólido/líquido: (a) rugosa ou difusa; (b) lisa ou facetada**



**Fonte: GARCIA (2001)**

Portanto quanto maior a diferença entre as estruturas e as ligações atômicas entre as fases, pode ser concluído que, mais estreita é essa região de transição entre as fases, assim a constante  $\alpha$  será maior.

## 2.2 Ferros fundidos

Podemos classificar os ferros fundidos a partir da sua composição, basicamente eles contêm, ferro (Fe), carbono © e silício (Si), por isso, normalmente são considerados: liga ternária “FeCSi”. Para modificar as suas propriedades, é feita a variação entre a proporção de C e Si, além de adicionar elementos de liga, tanto não metálicos, como metálicos, também podendo ser acrescentado o processo de

tratamento térmico. A proporção de C geralmente é acima de 2,0%, quantidade na qual superior à que pode ser retida em solução sólida na estrutura austenítica, resultando em carbono parcialmente livre, na forma de lamelas, veios e nódulos de grafita. Apresentando a reação eutética durante a mudança de fase até se solidificar (SERBINO, 2005).

Como já mencionado, os ferros fundidos são constituídos principalmente de ferro e carbono, em valores mais específicos, são ferros com carbono acima de 2% e altos teores de silício, sendo classificados como ligas ternárias de Fe – C – Si, na qual a composição é expressa em função do carbono equivalente ( $C_{eq}$ ), de acordo como mostrado na equação (1).

$$C_{eq} = \% C_T + \frac{(\% Si + \% P)}{3} \quad (1)$$

Em que:

$C_T$  é o carbono total.

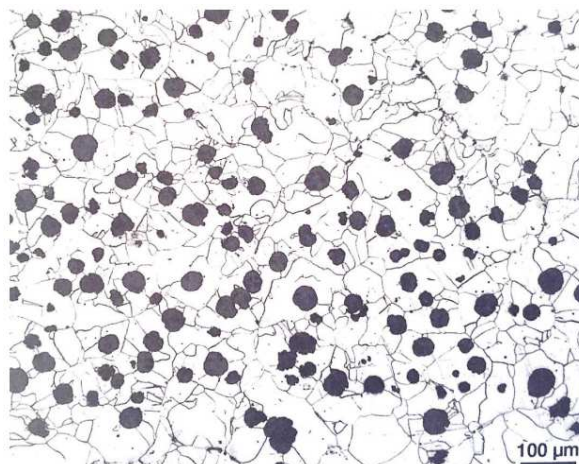
Essa equação indica através de porcentagem em peso, a quantidade de silício e fósforo do ferro fundido, que interferem nas propriedades mecânicas, do mesmo modo que o carbono total, no entanto, somente em um terço.

### 2.2.1 Ferro fundido nodular

O ferro fundido nodular é uma classe de ferro fundido, onde a ductilidade, resistência a impactos, à tração, alongamento e escoamento, são bem superiores comparados ao cinzento, se aproximando a características do aço, material metálico, no qual apresenta carbono livre na forma de grafita, com formato esferoidal, motivo que faz com que ele apresente tais propriedades mecânicas, é uma liga com razoável estabilidade dimensional e boa usinabilidade (CHIAVERINI, 1988).

Na Figura 6, é possível ver a sua microestrutura típica nas quais a região mais clara ilustra a matriz ferrítica e a mais escura os nódulos de grafita. Estes formatos são decorrentes da adição de certos elementos químicos de liga, como cério e magnésio no estado líquido, nas condições de fabricação, que modificam o crescimento.

**Figura 6 - Microestrutura de ferro fundido nodular, de matriz ferrítica. Ataque: Nital**



**Fonte: Colpaert (2008)**

A Tabela 1, apresenta a classificação dos ferros fundidos nodulares, conforme a ABNT NBR 6916:2017, com a grafita em diferentes tamanhos e quantidades, em função de suas propriedades mecânicas, que variam conforme o controle da microestrutura composta por matrizes ferríticas, ferríticas-perlíticas, ou perlíticas. É possível observar que com a predominância da matriz ferrítica, ocorre um ganho no alongamento, ou seja, na ductilidade do material, porém com uma diminuição da resistência à tração, as classes de maior resistência apresentam a predominância da matriz perlítica.

**Tabela 1 – Propriedades mecânicas do ferro fundido nodular segundo ABNT NBR 6916:2017**

<b>Classe</b>	<b>FE38017</b>	<b>FE42012</b>	<b>FE50007</b>	<b>FE60003</b>	<b>FE70002</b>	<b>FE80002</b>
Limite de Resistência à Tração (Mpa)	380	420	500	600	700	800
Limite de Escoamento (Mpa)	240	280	350	400	450	550
Alongamento Mínimo (%)	17	12	7	3	2	2
Dureza (HB)	140-180	150-200	170-240	210-280	230-300	240-312
Microestrutura Predominante	Ferrítica	Ferrítica	Ferrítica-Perlítica	Perlítica	Perlítica	Perlítica

**Fonte: ABNT (2017)**

Com relação a composição química dos ferros fundidos nodulares, alguns valores de Fe - Si são pré-estabelecidos, em torno de 3,7% de carbono e de silício

de 2,5 %, valores em massa. No entanto a composição química na especificação, está no limite de teor de fósforo inferior a 0,09% e o de Enxofre inferior a 0,02%, esses teores de fósforo e de enxofre são mais baixos que os demais ferros fundidos (COLPAERT, 2008).

Para a classificação prática da liga dos ferros fundido nodular, ocorre através de testes de limite de resistência à tração em MPa e seu alongamento mínimo em %, que são obtidos através deste teste (COLPAERT,2008). A Tabela 2, mostra algumas das composição dos Ferros Fundidos Nodulares conhecidos.

**Tabela 2 - são observadas as composições para diferentes tipos de ferros fundidos nodulares de acordo com a ABNT NBR 8650:2015**

Elemento	Classes de Ferros Fundidos Nodulares					
	FE 38017	FE 42012	FE 50007	FE 60003	FE 70002	FE 80002
C	3,4 a 3,8					
Si	2,1 a 2,8	2,1 a 2,5	2,5 a 2,8	2,5 a 2,8	2,3 a 2,8	2,1 a 2,8
Mn (máx)	0,3	0,3	0,5	0,5	10	1,0
P (máx)	0,09					
S(máx)	0,02					
Cu	-	-	0,2 a 0,7	0,5 a 1,0	0,5 a 1,0	0,5 a 1,0
Mg	0,04 a 0,06					

**Fonte: ABNT (2015)**

Na fabricação de ferro fundido nodular, o teor de fósforo deve ser o mais baixo possível, conforme mostra a Tabela 3, com isso, neste caso, o carbono equivalente relaciona especificamente carbono e silício, que devem variar de acordo com a tamanho da peça (NADKARNI, *et al.*, 1995).

**Tabela 3 - Porcentagem de carbono e silício no ferro fundido nodular com predominância de matriz perlítica**

TAMANHO (mm)	CARBONO (%)	SILÍCIO (%)	CARBONO EQUIVALENTE
3	3,90	2,90	4,87
6	3,85	2,65	4,73



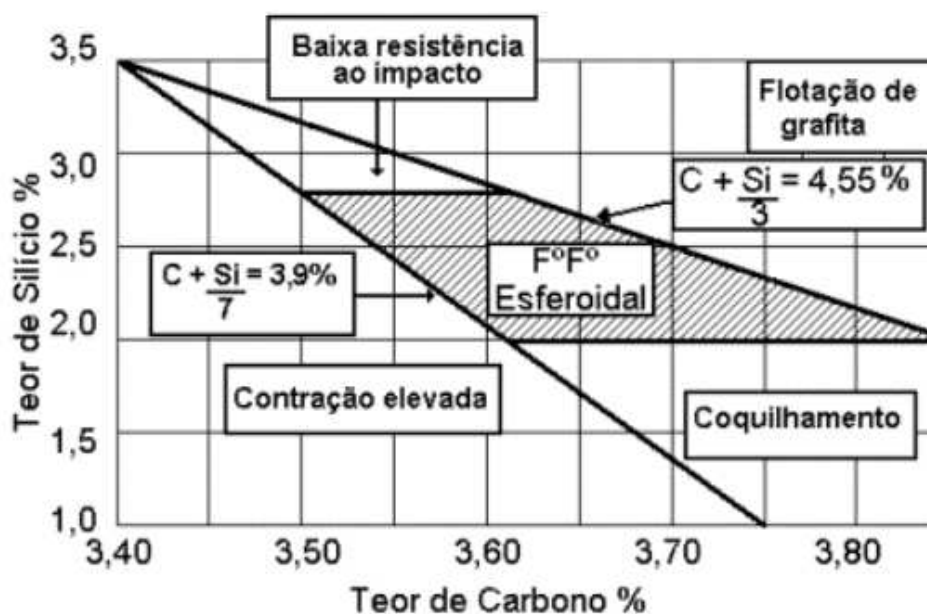
**Tabela 3 - Porcentagem de carbono e silício no ferro fundido nodular com predominância de matriz perlítica**

TAMANHO (mm)	CARBONO (%)	SILÍCIO (%)	CARBONO EQUIVALENTE
12	3,70	2,45	4,52
25	3,60	2,35	4,38
50	3,45	2,20	4,18
100	3,40	2,15	4,12

Fonte: Trudel e Gagné (1997)

A combinação entre alto ou baixo teores de carbono e de silício, relaciona os possíveis defeitos a serem gerados, quando se trabalha com carbono equivalente fora da faixa recomendada, para o ferro fundido nodular convencional, demonstrada no diagrama de Henderson, Figura 7.

**Figura 7 - Diagrama de Henderson, faixa de composição química ideal para produzir Ferro Fundido Nodular**



Fonte: Chiaverini, 1997 e Warmiling et. al (1999)

A liga é produzida com composição hipereutética (maior 4,3%  $C_{eq}$ ) e baixo teor de enxofre (S) e com adição de Magnésio, o qual provoca o crescimento da grafita esferoidal durante a solidificação, para isso o teor de Mg residual deve ser da ordem de 0,04% (faixa ideal 0,05 a 0,03%). Tornando-se necessário um tratamento

para adicionar o Mg, na forma de ligas metálicas FeSi-Mg (5 a 10% Mg) na base do fundido, chamado nodularização.

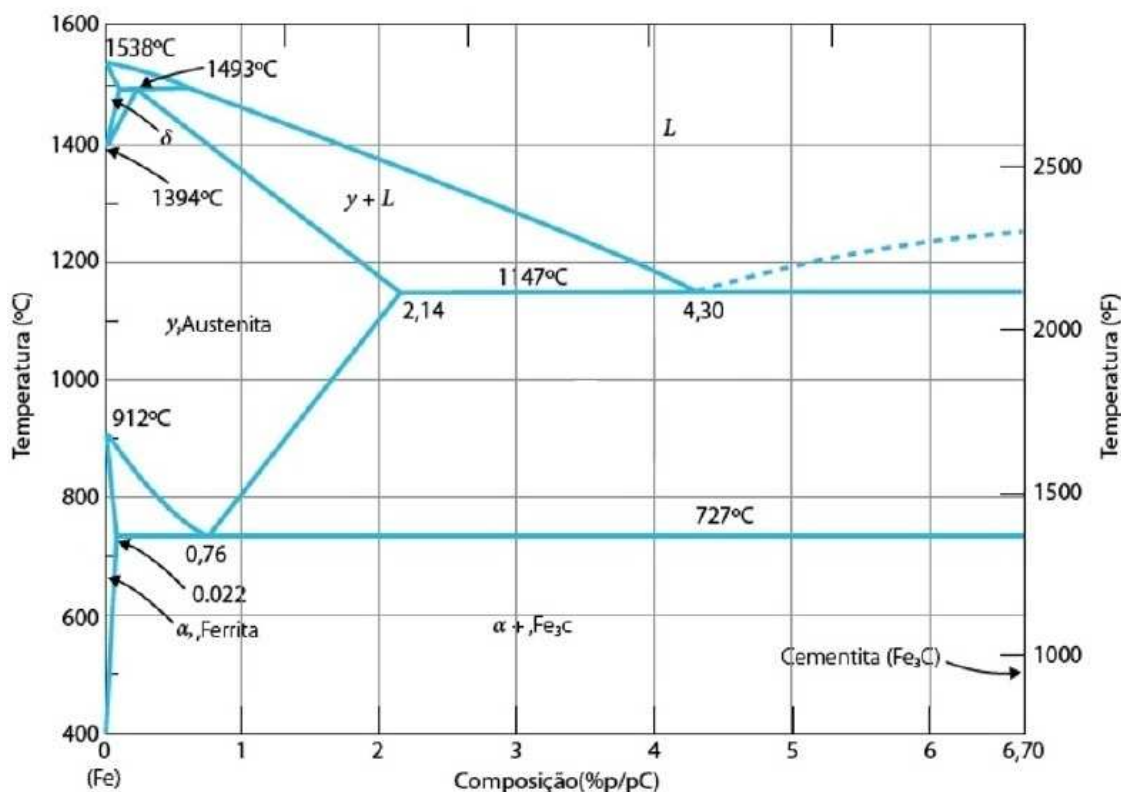
A partir do entendimento da influência dos elementos químicos que compõem a liga do ferro fundido nodular, torna-se mais fácil de compreender a solidificação do mesmo (CHIAVERINI, 1988).

De forma geral quando adicionado ferro, ocorre uma mudança nas distâncias entre os estágios eutéticos de equilíbrio estável e metaestável, na curva do diagrama do Fe-C, aumentando essa distância, o silício atrasa a precipitação de cementita, beneficiando a geração da grafita.

É possível observar que nos estados de equilíbrio metaestável e estável, a distância é de 7 °C e se adicionado silício, com uma quantidade de 2%, pode aumentar para até 35 °C. A partir do momento que isso acontece, o ponto eutético estável cresce em direção ao metaestável, ou seja, neste caso, a grafita crescerá no ferro de forma direcional a cementita. No diagrama metaestável, ilustra o ponto eutético que equivale a 4,3% de carbono em massa, a uma temperatura de 1147 °C (GARCIA, 2007).

A Figura 8 ilustra a diferença dos estágios, observada no diagrama Fe-C, nos quais dos sistemas mostrados, o metaestável está representado em linhas sólidas e o estável em linhas tracejadas.

Figura 8 - Diagrama Fe-C. Sistema metaestável em linhas sólidas e sistema estável em linhas tracejadas

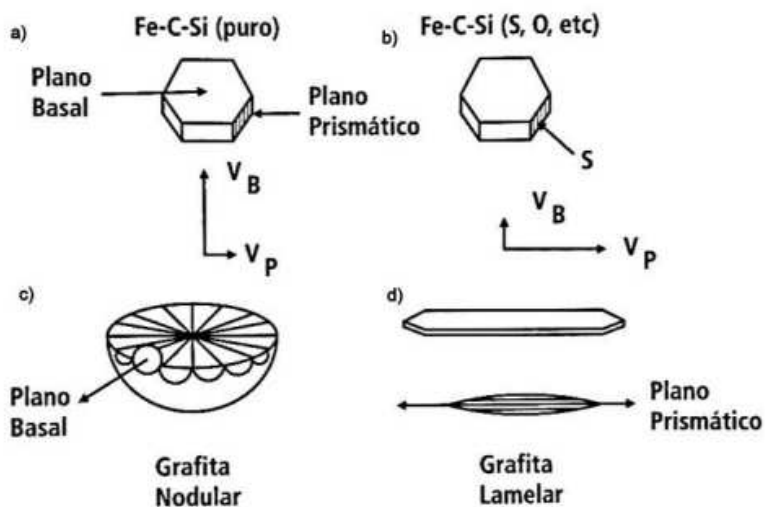


Fonte: Garcia (2007)

Como elementos de ligas muito importantes, que atuam como modificadores da grafita, tem-se o Magnésio e o Cério, agindo de forma que o crescimento da mesma ocorra de forma esferoidal. Como a grafita tem forma hexagonal em sua estrutura, durante a fase de solidificação, o crescimento ocorre na direção basais ou prismáticas dos planos, como é possível observar na Figura 9 em (a), o seu formato geométrico hexagonal da grafita.

Na sequência da imagem, Figura 9 (b) mostra os elementos como Ferro e Enxofre, que tendem a ser absorvidos nos planos primários, com isso a energia interfacial dos planos reduzem, até atingirem os valores menores que do plano basal, assim a grafita cresce no plano prismático, como mostrado na Figura 9 (d) (GUESSER,2009).

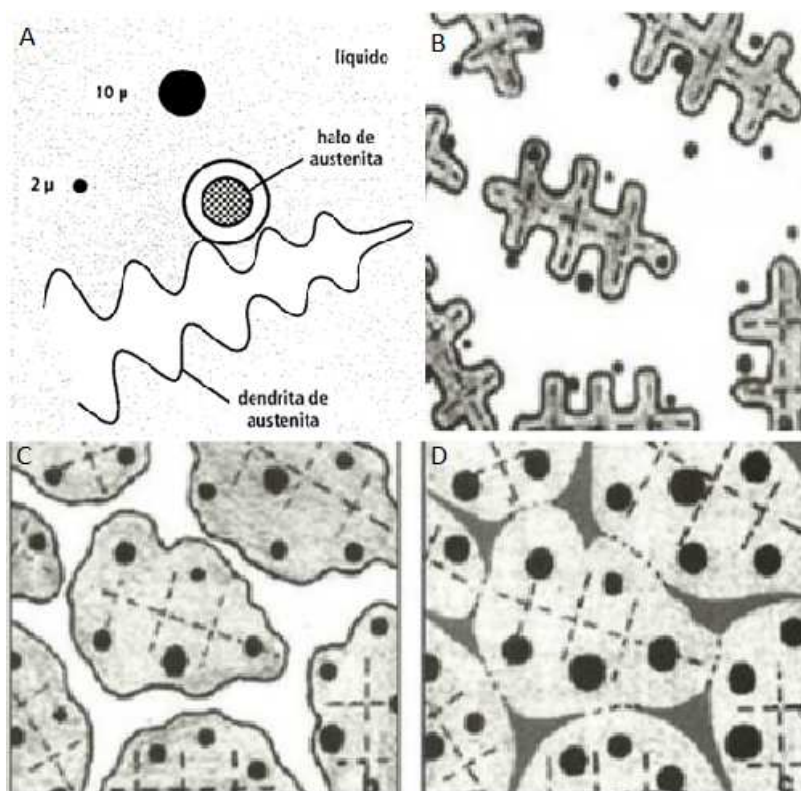
**Figura 9 - Esquema do crescimento da grafita em veios e em nódulos**



Fonte: Guesser apud Mcswain; Bates (1974)

Para que seja possível um melhor entendimento a respeito do estágio em que ocorre, o crescimento da grafita e austenita, pode ser observado abaixo, que ilustram tal ocorrência, na parte mais escura a grafita e na parte mais clara a austenita, durante a solidificação do ferro fundido nodular, na Figura 10 em A.

**Figura 10 - Estágio de crescimento da grafita esférica e austenita no nodular**



Fonte: Guesser,2009 apud Rivera et al (2003)

É possível observar a primeira etapa, na qual ocorre a formação da grafita envolvida pelo halo de austenita, logo após em B,C e D, o avanço de solidificação com o crescimento das mesmas.

Isto demonstra a primeira etapa, na qual a grafita cresce em contato com o metal na forma de líquido, então após, ela é envolvida de austenita e o crescimento se dará pela difusão deste envolvimento. Esse crescimento ocorre apenas pelo fato de que a velocidade para a austenita é superior à da grafita. Também é possível perceber que a austenita se solidifica com a formação dendrítica (GUESSER,2009).

Outra característica, que é comum, para todos os casos de solidificação dos metais de ligas fundidas, é a contração do líquido durante o processo de resfriamento na solidificação, salvo os ferros fundidos, os quais, ao contrário do mencionado no processo de solidificação, devido a precipitação da grafita na reação eutética, há um processo de expansão das mesmas (GUESSER,2009).

Como mencionado nos ferros fundidos, com a presença de composição hipoeutética, a solidificação inicia com a precipitação da austenita pró-eutética e posteriormente, a precipitação da grafita e austenita da reação eutética. Com isso, a precipitação da grafita, geralmente não é suficiente para compensar as contrações líquidas e de solidificação da austenita pró-eutética. A expansão volumétrica ocorre devido a menor densidade da grafita, sendo que é cerca de três vezes menor que a do ferro (BALDAM,2014).

Para o ferro fundido nodular, a grafita cresce pela difusão através do envolvimento de austenita, assim a expansão da mesma durante o avanço da solidificação se transmite, primeiro a este envolvimento, de modo que não compense a contração do líquido e da solidificação da austenita tão significativamente quanto os ferros fundidos cinzentos, que transmitem seu crescimento diretamente no líquido (GUESSER,2009).

### **2.3 Sistema de canais de enchimento e alimentação**

O dimensionamento correto de um sistema de canais de enchimento para um fundido, é fundamental para a obtenção de qualidade e custo benefício em uma produção. O sistema de canais deve garantir o enchimento em um tempo adequado e evitar turbulência do fluxo metálico, não apresentar erosão, gerar um gradiente

térmico adequado. Alguns dos fatores que podem estar associados a essas condições são o rendimento metálico, o espaço na placa ou molde, a geometria da peça e a altura da caixa de moldar, entre outros fatores que podem ser característicos de cada componente.

A maioria das causas dos problemas de alimentação atualmente, estão no dimensionamento incorreto dos sistemas de alimentação.

### 2.3.1 Elementos do sistema de canais de enchimento

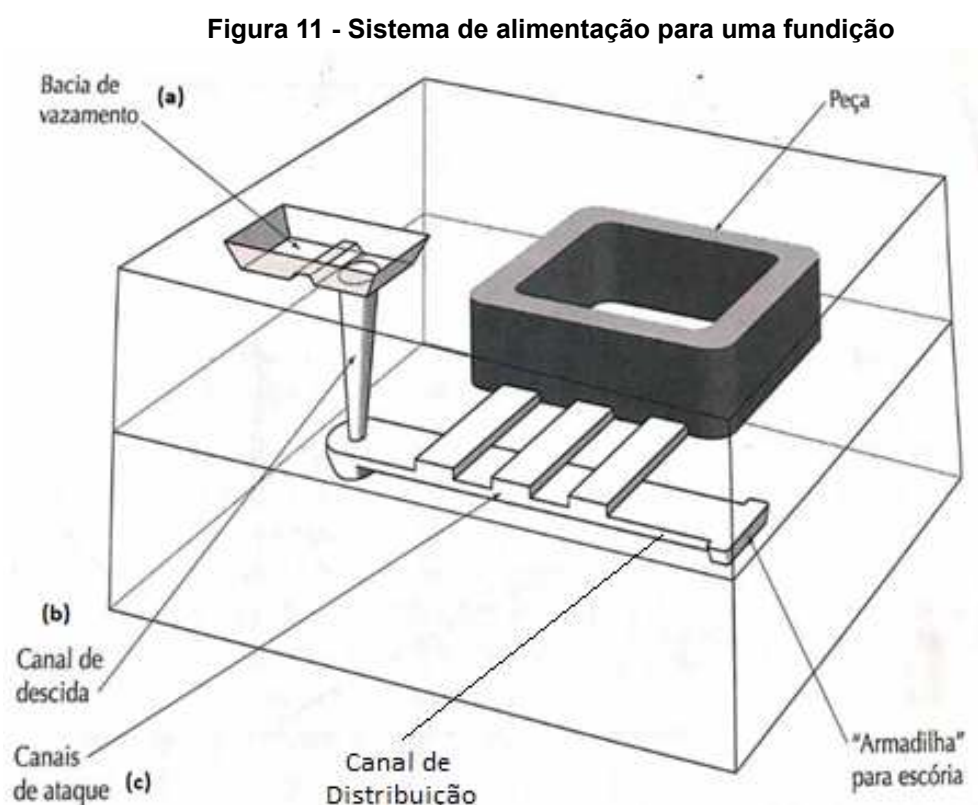
Para melhor entender o sistema de enchimento, ele pode ser separado em três seções: canal de descida, canal de distribuição e canal de ataque. Dentro do mesmo sistema também pode ser encontrado outros dispositivos, como bacia de vazamento, filtros de retenção, poços coletores e respiros, para então após essas seções se chegar nos massalotes ou montantes. Na formulação de um projeto para o sistema, define-se primeiramente a menor seção transversal, se esta corresponder à seção dos ataques, será dividida pela quantidade de canais presentes no sistema. Para os canais de distribuição, segue o mesmo procedimento em relação às divisões correspondentes.

Os sistemas de canais de enchimento, podem ser pressurizados, que corresponde a maior seção ao canal de descida, ou despressurizado, onde a menor seção é o canal de descida, no qual é utilizado para ligas com grande tendência a defeitos, resultando em menor rendimento metalúrgico, por exemplo, oxidação e absorção de gases, que necessitam de baixa velocidade de fluxo do líquido, pois a mesma, além de causar erosão e aspiração dos gases, determina a ocorrência de turbulência.

Além de poder ocorrer o preenchimento incompleto dos canais e sistemas mais pesados, devido às maiores áreas. A redução da altura do canal a partir do escoamento do metal, pode cooperar para a diminuição da velocidade, ou também com o alargamento da seção no sistema despressurizado. Outra característica da velocidade, a mesma é inversamente proporcional à seção transversal do sistema, pode-se controlá-la através da seção dos canais, permitindo que o fluxo seja o menos prejudicial possível.

### 2.3.2 Bacia de vazamento

Primeiro estágio do sistema, o qual o metal líquido é vazado diretamente da panela neste orifício, quando feito por gravidade Figura 11 (a), possui uma seção maior e conforme a bacia vai se enchendo, ocorre a separação da escória do metal neste ponto, a partir da diferença de densidade. A Figura 11 traz a ilustração do sistema de canais.



Fonte: Kiminame, Castro e Oliveira (2013)

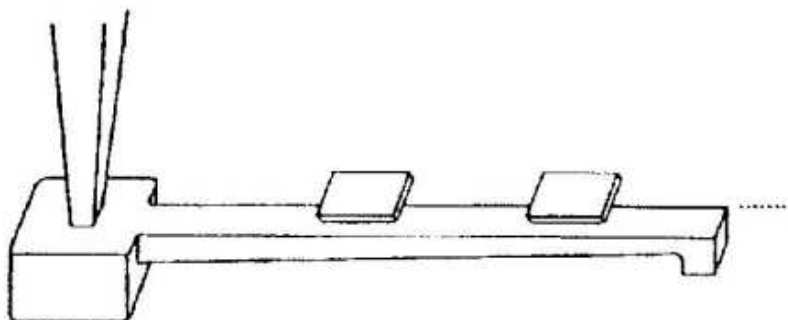
### 2.3.3 Canal de descida

Possui formato cônico como mostrado na Figura 11 (b), com a finalidade de evitar problemas, permitindo a descida do metal líquido de forma suave, diminuindo a turbulência, o que também poderia ocasionar o descolamento das paredes e vácuo, pelo arraste dos gases. Tendo altura suficiente para que o molde seja totalmente preenchido com o metal fundido.

### 2.3.4 Canal de distribuição

A principal função dessa seção é distribuir o metal pelos vários canais de ataque, geralmente apresenta uma bacia de, para reduzir o impacto do metal líquido. O canal de distribuição pode apresentar uma redução de secção por escalonamento, Figura 12, ou de forma contínua, para evitar o retorno do metal líquido sobre o fluxo. Na extremidade pode apresentar uma armadilha para escória, a qual segura as impurezas como, areia, que foram trazidas juntas com o metal até essa seção. Evitando assim, que esse metal não atinja nenhum canal de ataque e danifique o componente com inclusões dessa impureza.

**Figura 12 - Canal de distribuição contínuo**



**Fonte: Dissertação FRANCISCO GERMANO MARTINS (2003)**

### 2.3.5 Canais de ataque

Utilizada com a finalidade de distribuição correta, para vários pontos do componente a ser alimentado, se assim, garante um gradiente favorável de temperatura, evitando distorções por diferenças de temperatura Figura 11 (c). Além de ter o controle das velocidades desejadas e turbulência do escoamento de metal dentro dos padrões do número de Reynolds.

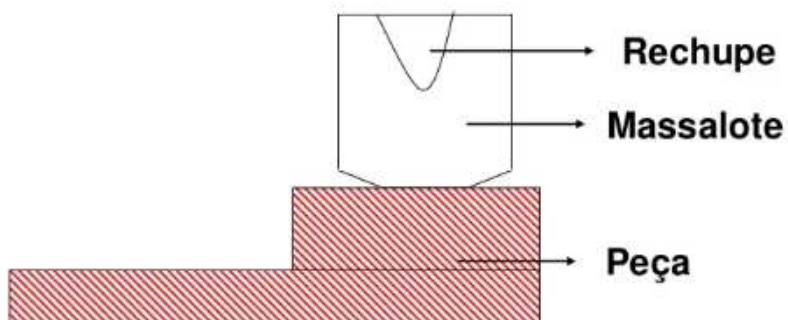
A posição do canal de ataque deve estar na parte de cima do canal de distribuição, com isso evita a entrada de partículas indesejadas e facilita a separação na desmoldagem. Além disso, a conexão com o canal de distribuição deve ser perpendicular, para evitar choques no vazamento do metal.



### 2.3.6 Sistema de alimentação de peças com massalotes

Devido às contrações ocorridas no processo de solidificação das ligas metálicas e das características das interfaces líquido-sólido, os componentes podem apresentar cavidades (defeitos), que podem variar de tamanho, tanto microscópicos, até consideráveis para a eliminação do componente, denominadas de Rechupes. O Método utilizado para evitar a ocorrência destes defeitos, é utilizar uma reserva de metal líquido, que tem por objetivo suprir as necessidades adicionais de metal, que ocorrem na contração mencionada acima, chamado de “massalote ou montante”, o qual nada mais é, que uma reserva que mantenha um contato contínuo com o molde, ainda no estado líquido, criando um gradiente térmico que promove suprir a necessidade de alimentação, até que todo o metal dentro do componente se solidifique, de modo que ele seja o último a se solidificar.

**Figura 13 - Massalote de Alimentação**



**Fonte: Guilherme O. Verran (1986)**

O massalote deve ter o tempo superior de solidificação, acima do componente fabricado e para garantir essa diferença, a relação de altura e diâmetro do mesmo deve conter uma ordem de 1 a 1,5 vezes. Ou seja, o massalote projetado, deve cumprir os critérios de contração volumétrica e térmicos. Com isso, o metal deve começar a solidificar, quando vazado na cavidade do molde, a uma distância extrema dos massalotes, normalmente ao lado ou acima da peça, separado por um canal de ataque, massalote, componente para depois desse processo ser quebrado, como mostrado na Figura 13.

A contração que vai sendo causada pelo resfriamento, vai indo em direção a última seção, que apresenta o metal na forma líquida, com isso, até atingir o

massalote, que será a última região a se solidificar, para que os vazios da contração se concentre nesta região. O dimensionamento do diâmetro do canal de ataque, mencionado, entre o massalote e componente, deve ser o suficiente para que não se solidifique antes do resto do sistema.

De forma resumida, para se manter a eficiência do massalote, alguns requisitos devem ser seguidos. Deve ser a última região a solidificar - ponto quente; O tempo de solidificação deve ser maior que o do componente; conter quantidade de metal suficiente para compensar a contração metálica; além de ter a massa mínima em relação à peça para maximizar o rendimento metálico do sistema.

Para o cálculo de forma aproximada das dimensões do massalote, é considerada a regra de Chvorinov e utilizada a equação fundamental, para deduzir as dimensões, onde o massalote deve solidificar depois da secção alimentada, atendendo ao requisito térmico (MARIOTO 2018).

### 2.3.7 Pescoço do massalote

Como mencionado anteriormente, o pescoço do massalote é a união da peça (componente) ao massalote. O correto dimensionamento, garante o gradiente de temperatura em direção ao massalote, ou seja, solidificação direcional, para que assim ele seja o último a se solidificar, como garantia do requisito térmico. O que ocasiona em uma compensação na contração volumétrica, sem haver interrupção do fluxo do metal.

Como já explicado, em relação a solidificação direcional, o módulo do massalote deve ser maior que o da peça, ou seja, o módulo do pescoço entre os componentes mencionados, deve ter um valor intermediário em relação aos mesmos e o dimensionamento do pescoço, é uma função da geometria da peça e da liga utilizada.

### 2.3.8 Módulo de solidificação

O módulo de solidificação, é o coeficiente de proporção térmica geométrica e transiente de corpos físicos, ou seja, de forma simplificada, ele proporciona a solidificação direcional no componente, pois, com o aumento do seu valor de resfriamento, fornece a determinação do caminho em que o metal irá se solidificar,

da seção mais distante que será alimentada, para o alimentador. “Um alimentador cumpre a sua função, quando o seu tempo de solidificação é superior ao da parte da peça que alimenta” (DAL KORHAL 1993).

Porém, seu valor deve ser determinada de forma criteriosa, pois o mau dimensionamento do sistema de alimentação e se o valor for elevado, pode baixar de forma considerável a eficiência do sistema, com isso, de forma geral, podemos determinar uma relação de 20% a 30% de diferença entre o módulo da peça e do sistema de alimentação, dependendo da liga utilizada (aços e ferros fundidos respectivamente), no qual, o maior valor será o do sistema devido a solidificação direcional (DAL KORHAL 1993, JOHN CAMPBELL, 2004).

## **2.4 Simulação de solidificação**

A simulação de solidificação permite ao profissional, uma análise de diferentes cenários e configurações, para um modelo a ser fabricado, com o auxílio recebido pelos diferentes métodos de simulação existentes no mercado, os quais possibilitam maior precisão na tomada de decisões em projetos. Com isso ocasiona em um aumento de maneira significativa a competitividade das empresas, pois com o uso desta tecnologia, aumenta a efetividade sobre os resultados obtidos por elas.

No processo de fundição de acordo com Oliveira e Galhardi (2016), o uso de simulação de solidificação, teve suas primeiras tentativas no ano de 1970, no entanto, em tal época, o método não foi bem recebido pelos profissionais, pois como era algo novo e que os mesmos ainda não sabiam, os benefícios que tal método traria, alegavam já terem atingido alto desempenho na produção de seus produtos e maior qualidade possível, a não precisarem, de computadores, para identificar os maiores desafios de um projeto, os quais apontavam alguns erros. Contudo, atualmente, a simulação de solidificação passou a ser reconhecida, como uma ferramenta indispensável no processo de fundição, sendo utilizada no desenvolvimento de produtos e na otimização de processos.

O método de simulação de solidificação, é utilizado por técnicos (profissionais), do processo como uma ferramenta diária, pois apresenta duas características importantes, para os cálculos, a rapidez e facilidade de utilização. Os *softwares* podem ter duas vertentes: preventiva, quando utilizado durante a fase de desenvolvimento, prevendo possíveis defeitos e conseqüente, diminuído o tempo

desde o início do projecto, até sua fase final de produção dos componentes, ou curativa, na medida em que este pode ser utilizado no processo de tentativa/erro, diminuindo o tempo e recursos gastos no mesmo.

Para os resultados obtidos, com uma simulação em determinados casos, podemos obter respectivamente: para o enchimento das cavidades, por exemplo, a previsão do caminho do fluxo metálico dentro de um molde, o perfil de temperatura, de velocidade e pressão; para os resultados associados à solidificação, destaca-se o perfil de solidificação propriamente dito, estimativa de regiões propensas à incidência de microporosidade, estimativa de microestrutura final, propriedades mecânicas e tensões residuais.

Porém como será analisado ao decorrer do trabalho, para se utilizar um programa de simulação de solidificação para fundição, um requisito de grande importância é conhecer muito bem o processo real, para se aplicar a simulação, como as características particulares em questão e se possível, conhecer o comportamento do qual está sendo utilizado, além do maior número possível de equipamentos que compõem a linha de produção.

Algumas características como: tipo de processo de moldagem, rigidez e compactação do molde, qual composição da areia utilizada na confecção de moldes e machos, tempo de desmoldagem disponível para a linha, ligas metálicas, tratamentos de nodulização e inoculação, melhor forma do vazamento (característico da indústria), podem ser variáveis, que se não bem conhecidas e aplicadas, alteram completamente os resultados finais dos componentes fabricados, além de uma análise incorreta feita pelo sistema de simulação numérico.

#### 2.4.1 Passos para realização da simulação de solidificação

Primeiro passo para qualquer método numérico, é definir as equações diferenciais, as condições iniciais e de contorno.

Conhecer a teoria por trás da modelagem matemática e computacional, é essencial para entender melhor problemas de operação e como buscar soluções para problemas corriqueiros da Engenharia. E para essas situações existem três métodos para a solução dos desafios de engenharia, cada um com suas particularidades e aplicações, são eles: Método dos elementos finitos (*Finite Element Method* – FEM) evoluiu com a melhoria na análise estrutural; O método dos volumes

finitos (*Finite Volume Method* – FVM) tem a preferência de profissionais, que precisam lidar com mecânica de fluidos; E o método das diferenças finitas (*Finite Difference Method* – FDM), por sua vez, é amplamente aplicado em fluxos granulares (Malalasekera 1995).

Os *softwares* que serão utilizados para o desenvolvimento deste estudo, utilizam os métodos dos elementos finitos (FEM) e o método das diferenças finitas (FDM), os quais permitem aperfeiçoar a geometria do objeto antes mesmo da fabricação. Os diferentes esquemas de diferenças finitas, são distinguidos por número de avaliações de passos de tempo. O método (FDM) é muito eficaz para cálculos de transferência de calor e fluxo de fluido, mas não é adequado para análise de tensões e deformações. Enquanto o (FEM) é mais flexível e particularmente adequado para modelos com domínios complexos e para a análise de tensões induzidas termicamente. Os métodos usam a discretização do sistema em vários elementos, para resolverem equações diferenciais, substituindo um número infinito de variáveis, por um número limitado de elementos de comportamento conhecido. Com relação às suas geometrias pode-se ter diferentes formas das divisões como nós e malhas: (i) nós: os elementos finitos ligados entre si por pontos e podem se mover de acordo com a aplicação de carregamento, assim provendo respostas sobre o fenômeno estudado; (ii) malha: a quantidade de nós irá representar o número de incógnitas que o problema terá e sua soma é conhecida como malha.

Essa metodologia resolve as equações matemáticas, utilizando aproximações devido às subdivisões da geometria, com isso a escolha da malha adequada é muito importante para a qualidade dos resultados. Sua precisão está relacionada à quantidade e tamanho dos nós e elementos, à qualidade da malha e ao tipo de função utilizada. Para uma melhor precisão, menor deve ser a área do elemento e maior a quantidade de nós e elementos na malha. Porém, um número muito grande de elementos, acarreta no aumento do erro de arredondamento, podendo prejudicar a precisão do resultado e consumo de potência computacional. Portanto, a geometria do que se quer analisar é dividida em elementos, que são pequenas partes que representam o domínio contínuo do problema. Dessa forma, é possível desenvolver a análise estrutural por meio de deslocamentos, deformações e tensões.

#### 2.4.2 Vantagens da simulação de solidificação em empresas de fundições

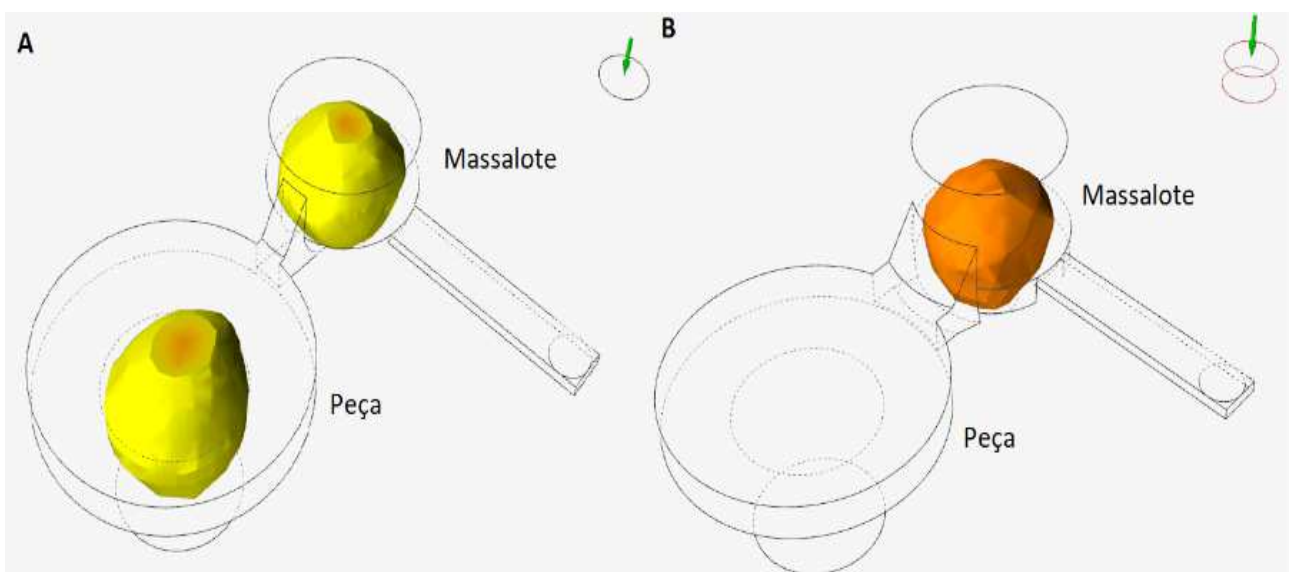
Segundo Ravi (2008), as vantagens do uso da tecnologia da simulação de solidificação, podem ser classificadas em:

Obter melhor qualidade e rendimento metalúrgico, permitindo melhoria na produtividade: Se uma tentativa feita a partir de uma simulação gerar resultados indesejados, pode ser revertida através da simulação e assim corrigido e um dos principais objetivos dentro de uma indústria, se trata da economia de recursos e maior produtividade.

Número de testes para aprovação do projeto: Dentro do chão de fábrica, os custos se elevam devido a modificação de ferramentas, a fusão, ferramentas, vazamento, inspeção e todos os processos que seguem até uma peça chegar ao estágio final. Com isso fica evidente que tais custos são diluídos através da garantia elevada de maiores acertos propostos através das simulações.

Agregar valor: Através das simulações de solidificação, o nível de confiança dentro de uma empresa para a fabricação de peças complexas, garantem uma melhor margem de lucro, também fornecem bases científicas, para a garantia de qualidade e certificação, pois é possível prever prováveis defeitos internos.

Gestão de conhecimento: Uma vez que o computador armazena entradas e resultados de cada simulação, essas informações podem ser utilizadas novamente em projetos similares, com isso os resultados armazenados também podem ser utilizados posteriormente para a formação de novos profissionais, esse é um benefício importante. A Figura 14 ilustra de modo geral as características discutidas acima.

**Figura 14 - Exemplo da Análise de Simulação de Solidificação**

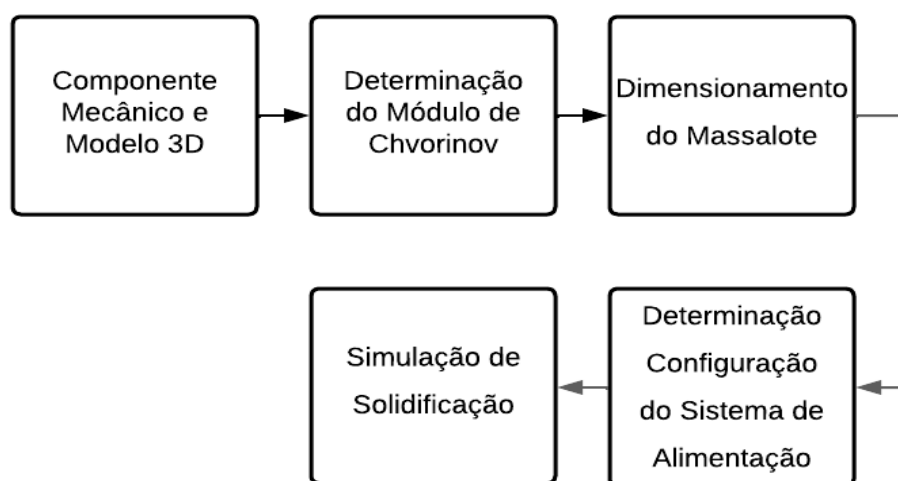
**Fonte: Autoria Própria (2022)**

A Figura 14.A, ilustra uma simulação na qual a peça apresenta grande microporosidade (em amarelo), com baixa solidificação direcional, na qual o massalote solidifica junto com a peça, ao invés de solidificar depois. A partir dessa análise, se pode redimensionar o sistema de alimentação, conforme a Figura 14.B, todos os pontos de defeitos são revertidos e o massalote cumpre seu objetivo, por meio da solidificação direcional, deste modo o massalote se solidifica por último (em laranja).

### 3 METODOLOGIA

Este trabalho consistiu no estabelecimento do procedimento para coleta de dados, metodologia para análise das informações coletadas e validação da alimentação de uma peça de colheitadeira agrícola (separador de grãos), por meio da simulação de solidificação, que decorreu de acordo com o fluxograma da Figura 15.

Figura 15 - Fluxograma das etapas



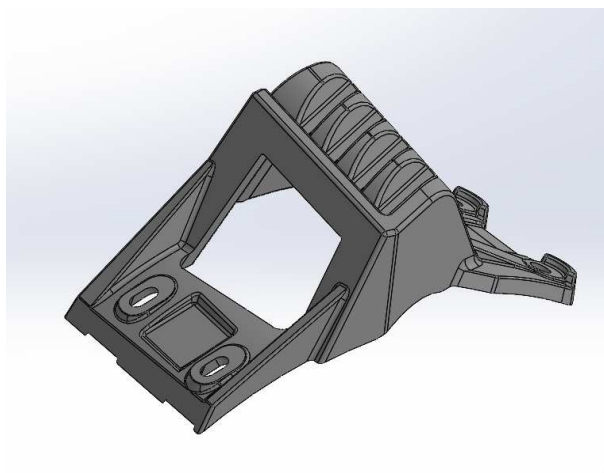
Fonte: Autoria própria (2022)

#### 3.1 Componente mecânico e modelo 3D

A peça que foi utilizada para o desenvolvimento deste trabalho, é um componente de um rotor de colheitadeira agrícola, presente na maioria dos modelos existentes no mercado, ilustrado na Figura 16, sua escolha ocorreu devido a sua complexidade, em função de que quanto mais complexa a geometria, maiores as dificuldades para conseguir dimensionar um sistema de alimentação.



**Figura 16 - Desenho tridimensional da unidade do rotor**



**Fonte: Fersul Manufaturados de ferro e LTDA (2022)**

O material da peça utilizado para realização deste trabalho, proporciona uma boa resistência mecânica, com alto limite de resistência à tração, de acordo com a Norma ABNT - NBR 6916. A peça é obtida por meio de fundição por gravidade em moldagem de areia verde.

**Tabela 4 - Características da Peça**

<b>Características da Peça e do Molde</b>	<b>Informações Utilizadas</b>
Material	Ferro Fundido Nodular FE50007
Densidade do Material	7.10 g/mm <sup>3</sup>
Massa da Peça	6.3 kg
Limite de Resistência à Tração	710 MPa
Material do Molde	Areia Verde
Densidade do Material do Molde	1.8 g/mm <sup>3</sup>

**Fonte: Autoria própria (2022)**

O componente foi dimensionado por meio do *software* CAD Solidworks, amplamente utilizado no campo de engenharia, é um *software* de computação gráfica, que permite a criação de objetos com modelagem tridimensional. O *software* CAD Solidworks atende profissionais de diversos setores de produção.

### 3.2 Determinação do módulo de Chvorinov para a peça

Em seguida foi determinado o módulo de Chvorinov da peça, para identificar o melhor ponto para a alimentação da mesma.

Primeiro, com os valores do volume ( $V$ ), total da peça e a área superficial ( $A$ ), em contato com o molde determinados a partir do *software* CAD, que já apresenta os resultados de acordo com a geometria da peça, foi possível calcular o módulo de Chvorinov da peça em sua totalidade, a partir da Equação (2).

$$M = \frac{V}{A} \quad (2)$$

Em que:

$M$  = Módulo de Chvorinov da peça ou seção em (cm);

$V$  = Volume em (cm<sup>3</sup>);

$A$  = Área em (cm<sup>2</sup>).

No entanto, a peça foi dividida em três seções e a partir delas foi calculado o módulo de Chvorinov de cada uma, para determinar se alguma das seções apresenta o valor do módulo de Chvorinov maior, que o módulo da peça completa. Para esse cálculo foi utilizado a Equação (2).

Em seguida, com os valores dos módulos de cada uma das seções, foi avaliado os resultados, de modo a se garantir que a solidificação ocorra de forma direcional, ou seja, da seção com menor módulo, para a seção de maior módulo, para o posicionamento do massalote.

### 3.3 Dimensionamento do massalote

Para o módulo de Chvorinov do massalote, multiplicou-se o valor de incremento de módulo, pela massa da peça, ou seção, como mostrado na Equação (3).

$$M_{Mass} = K * M \quad (3)$$

Em que:

$M_{Mass}$  = Módulo de Chvorinov do Massalote em (cm);

$m$  = Módulo da seção ou da peça em (cm);

$K$  = É uma constante de incremento do módulo, para garantir que o massalote solidifique, por último para ligas em geral, se considera o valor de 1,2.

Essa constante  $K$ , é uma forma empírica de compensar as características de solidificação da liga e possibilitar a solidificação direcional. Nos *softwares* de simulação, é conhecido como fração crítica de sólido.

Outro importante requisito do massalote, é seu volume. Para determinar o volume do massalote, existem dois tipos de procedimentos que são utilizados para se determinar o dimensionamento correto. Primeiro, conforme Equação (4), o qual se determina o volume a partir do módulo de Chvorinov, foi utilizado um massalote cilíndrico com altura ( $H$ ) = 1,5 e diâmetro ( $D$ ).

$$V_{Mass} = 179 * M_{Mass}^3 \quad (4)$$

Em que:

$V_{Mass}$  = Volume do Massalote em (cm<sup>3</sup>);

$M_{Mass}$  = Módulo de Chvorinov do Massalote em (cm).

O segundo procedimento é conhecido como Requisito Volumétrico do Massalote, o qual avalia se o massalote tem volume necessário para alimentar toda a peça e não apenas a seção de maior módulo, utilizando a Equação (5).

$$V_{Mass} = V * \frac{\beta}{(\eta - \beta)} \quad (5)$$

Em que:

$\eta$  = É o rendimento do massalote;

$\beta$  = É a contração de solidificação da liga;

$V$  = Volume da seção ou da peça em (cm<sup>3</sup>).

O rendimento do massalote, depende da forma e do material, ou seja, para massalote cilíndrico ( $H = 1,5$ ) o rendimento é de 14% ou 0,14, enquanto o valor da contração de solidificação utilizado em ferros fundidos nodulares, é de 2,7% ou seja, 0,027. Caso o maior módulo de Chvorinov seja de uma seção da peça, também será utilizado o valor da contração, obtido da combinação da Equação (4) com a Equação (5), considerando o volume da referida seção, para se determinar o valor da contração.

Os massalotes devem ter volume suficiente para garantir a alimentação da contração líquida de toda a peça e a contração de solidificação das partes com menores espessuras.

Com isso, após o volume ser calculado a partir dos dois requisitos, da Equação (4), com a Equação (5), é selecionado o maior valor, como o volume do massalote para a peça. No entanto, caso o maior volume seja o fornecido pela Equação (5), será necessário recalcular o módulo do massalote com base na Equação (4) e alterar o valor do módulo de Chvorinov do massalote.

As dimensões do massalote foram determinadas, utilizando o inverso na Equação (6), onde foi possível determinar o valor do diâmetro ( $D$ ) e altura ( $H$ ), considerando  $H=1,5.D$  e  $D=2r$ .

$$V_{Mass} = 3\pi r^3 \quad (6)$$

Em que:

$V_{Mass}$  = Volume do Massalote;

$r$  = Raio do Massalote;

### 3.4 Determinação configuração do sistema de alimentação

Após encontrado o volume do massalote, o qual é compatível com o Módulo de Chvorinov, para a peça, foi determinado o sistema de enchimento, que no caso da peça em estudo, é composto por apenas dois canais, são eles: canal de descida com forma cilíndrica (C1) e canal de distribuição com forma prismática (trapezoidal)

(C2), que se localizam antes do massalote. O canal de ataque com forma retangular, (C3), não foi necessário, pois a alimentação se deu pelo pescoço do massalote. E para esse caso utilizou um sistema de enchimento Divergente, onde a área de choque corresponde a área do canal de descida (S1). O sistema Divergente utilizou a relação de casais (S1:S2:S3) de 1:2:2 e é aplicado a ferros fundidos nodulares (ligas com alta tendência a oxidação. Inicialmente se determina a área de choque conforme Equação (7).

$$A_{choque} = \frac{P}{(\rho * t * V_e)} \quad (7)$$

Em que

$A_{choque}$  = Área de choque em (mm<sup>2</sup>);

$\rho$  = Massa específica da liga em (g/cm<sup>3</sup>);

$P$  = Massa total do conjunto em (g);

$t$  = Tempo de enchimento em (s);

$V_e$  = Velocidade de enchimento em (cm/s)

Para o cálculo do tempo de vazamento, é necessário antes saber a massa total do conjunto, ou seja, a soma da peça e o massalote, mostrado na Equação 8. O peso do conjunto foi calculado com base nos volumes da peça e massalote, conhecendo-se a massa específica do metal, ou liga que será utilizada.

$$P = m_m + m_p \quad (8)$$

Em que:

$P$  = Massa total do conjunto em (kg);

$m_m$  = Massa do massalote (kg).

$m_p$  = Massa da peça em (kg).

Com isso, para encontrar o tempo de vazamento, para o enchimento completo do sistema de alimentação e peça, é utilizada a Equação (9). O tempo é calculado com base em equações empíricas e varia com muitos fatores tais como: espessura de seção, peso do sistema, tipo de liga a ser fundida e com o tamanho da

peça. Portanto, normalmente estes fatores são ajustados, em coeficientes, para simplificação, como os apresentados na Tabela 7, onde  $K_{Vazamento}$  (1,8 para ferros fundidos nodulares) e  $x$  (0,5 para ferros fundidos nodulares), são coeficientes que dependem do material e das dimensões da peça. A Equação para o cálculo do tempo de vazamento, levou em consideração os valores dos coeficientes para o material ferro fundido nodular.

$$t = K_{Vazamento} * P^x \quad (9)$$

Em que:

$t$  = Tempo de enchimento em (s);

$P$  = Massa total do conjunto (kg);

Para o cálculo da velocidade de enchimento do sistema utilizado neste trabalho, foi adotado o sistema divergente aplicado para ferros fundidos nodulares. A Equação (10) apresenta o cálculo da velocidade de enchimento.

$$V_e = \alpha * (2 * g * H_{C1})^{0.5} \quad (10)$$

Em que:

$V_e$  = Velocidade de enchimento em (cm/s);

$\alpha$  = Coeficiente de perdas do atrito (valor 0,65 sistema divergente);

$g$  = Aceleração da gravidade (980 cm/s<sup>2</sup>);

$H_{C1}$  = Altura efetiva de vazamento em (cm), geralmente é altura da caixa superior do molde.

Com a área de choque Equação (7), se pode determinar o diâmetro do canal de descida e as dimensões do canal de distribuição. Considerando a relação (C1:C2) - 1:2, as Equações (11) e (12), determinam o diâmetro do canal de descida e a base do canal de distribuição respectivamente.

$$D_{CD} = \left( \frac{4 \cdot A_{choque}}{\pi} \right)^{0,5} \quad (11)$$

$$b = \left( \frac{1,2 \cdot A_{choque}}{3} \right)^{0,5} \quad (12)$$

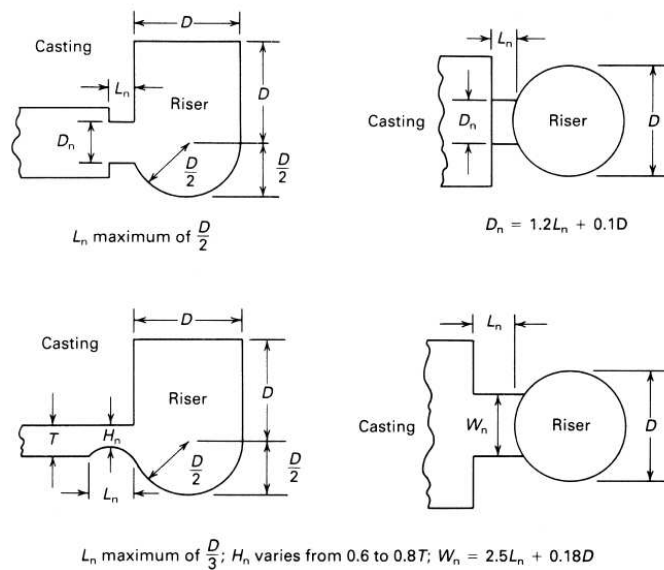
Em que

$D_{CD}$  = Diâmetro do canal de descida (cm);

$b$  = Base menor do trapézio com base maior igual a  $2b$  e altura igual a  $2b$  em (cm);

O cálculo da ligação entre o massalote e a peça, as dimensões do pescoço, dependem apenas do diâmetro do massalote, da espessura da seção da peça e da forma de partição da peça, conforme mostrado na Figura 17.

**Figura 17 - Regras Gerais de Dimensões para Pescoços de Massalote**



**Fonte: ASM Internacional (2009)**

As Equações (13) e (14) determinam suas medidas.

$$L_n = \frac{Dm}{3} \quad (13)$$

$$D_n = \frac{Dm}{3} \quad (14)$$

Em que:

$L_n$  = Distância do massalote e a peça em (cm);

$D_n$  = Largura e altura do pescoço em (cm);

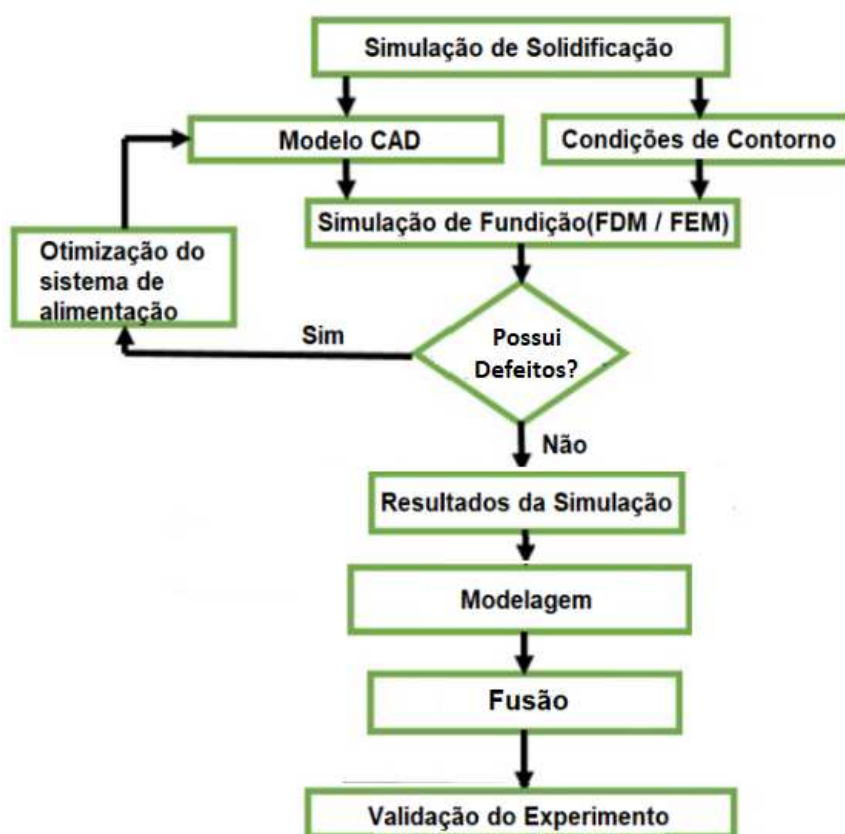
$D_m$  = Diâmetro do Massalote em (cm);

### 3.5 Simulação de solidificação

Para a realização da simulação, foi necessário possuir todo o projeto dos sistemas de alimentação e peça, pois a simulação permite uma aproximação apurada, de o que vai ocorrer e quanto mais informações melhor o resultado e a identificação de falha e conseqüentemente as alterações de projeto.

O *software* de simulação utiliza uma série de informações fornecidas pelo usuário. Para a aplicação da simulação de solidificação do modelo deste trabalho, utilizou-se de um processo de interação, de acordo como mostrado na Figura 18.

Figura 18 - Interação de Simulação de Solidificação



Fonte: Kabnure *et al* (2003)



Primeiro a partir da peça em modelo CAD 3D, foi realizada a transferência de forma direta do arquivo, no formato desejado, requerido para cada programa de simulação. Os *softwares* utilizados foram o Altair Inspire Cast, utilizando um modelo de malha, baseado no método dos Elementos Finitos (FEM) de criação e o NovaFlow & Solid, que utiliza o modelo de malha baseado no método das Diferenças Finitas (FDM). Ambos foram utilizados com versões gratuitas disponibilizadas para estudantes e permitiram a utilização de um computador convencional da marca ACER, com memória RAM de 8GB e placa de vídeo NVIDIA GEFORCE 940 X.

Para a realização da simulação nos *softwares* utilizados, algumas condições de contorno devem ser incluídas na interface dos mesmos, abaixo está representado na Tabela 6, as condições de contorno iniciais de ambos os *softwares*.

**Tabela 5 - Condições de contorno**

<b>Condições iniciais de Contorno</b>	
Material de Fundição	Ferro Fundido Nodular ISO GGG50
Densidade do Material de Fundição (g/mm <sup>3</sup> )	7,10
Peso do Conjunto Completo (kg)	8,1
Temperatura de Vazamento do Metal (°C)	1380 - 1400
Material do Molde	Areia Verde
Densidade do Material do Molde (g/mm <sup>3</sup> )	1,8
Temperatura do Molde (°C)	20
Processo	Por Gravidade
Tempo de Preenchimento (s)	5

**Fonte: Autoria Própria (2022)**

É possível perceber que algumas informações representadas na Tabela 5 são iguais para os *softwares* de simulação, pois representam características relacionadas à geometria ou método de fabricação da peça, determinados a parte dos *softwares*.

Para o desenvolvimento das simulações, em ambos os *softwares* foram escolhidas três dimensões de malha, 1,5, 2,5 e 3,5 mm. O tamanho da malha influencia drasticamente o tempo da simulação e a morfologia do defeito de microporosidade, como o Rechupe.

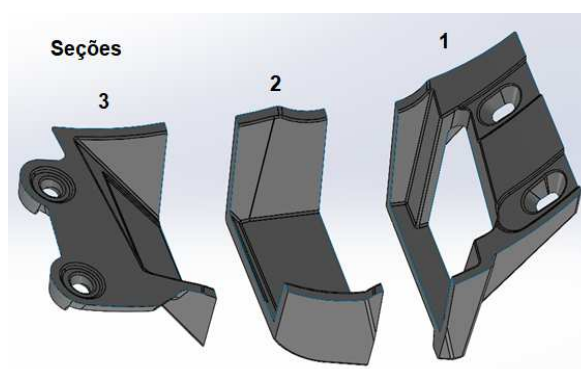
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente foi obtido o modelo 3D, do componente em estudo em formato DWG, ou STL, gerado pelo *software* SolidWorks, mostrado na Figura 16, que foi fornecido diretamente pela empresa, Fersul Manufaturados de Ferro e LDTA, uma empresa de fabricação de peças agrícolas, localizada na cidade de Pato Branco - PR. A mesma disponibilizou o modelo 3D do componente, porém não fabricou a peça até o momento da execução deste trabalho, entretanto, forneceu os dados em relação às informações que foram necessárias, para a execução do mesmo, ilustradas na Tabela 5.

### 4.1 Análise módulo de chvorinov da peça

Para se determinar o módulo Chvorinov da peça ilustrada na Figura 16, essa peça foi dividida em seções, conforme Figura 19. Essa divisão é necessária para avaliar se existe concentração de massa no componente e verificar a direcionalidade da solidificação. As informações necessárias, como volume ( $V$ ), área ( $A$ ), ao cálculo dos módulos de Chvorinov, (Equação (2)) das seções e da peça, foram obtidas a partir do modelo 3D da peça, diretamente do *software* SolidWorks os resultados são apresentados na Tabela 7.

Figura 19 - Seções da Peça



Fonte: Autoria Própria (2022)

A Figura 19 ilustra a divisão realizada das seções da peça, de acordo com os possíveis locais para a alimentação.

Tabela 6 - Valores dos Módulos de Chvorinov das Seções da Peça

Seção	Volume (cm <sup>3</sup> )	Área (cm <sup>2</sup> )	Módulo de Chvorinov (cm)	Massa (g)
1	332,22	712,07	0,467	2.360
2	280,32	541,83	0,517	1.990
3	279,70	665,60	0,420	1.986
Peça	892,23	1919,56	0,465	6.334

Fonte: Autoria Própria (2022)

Os resultados da Tabela 6, demonstram que o melhor ponto de alimentação, é a seção 2, com o valor de módulo de Chvorinov de 0,517 cm, para garantir que a solidificação ocorra de forma direcional e que, conseqüentemente, será a última a se solidificar, pois esta seção tem a maior propensão a formar defeitos de solidificação como Rechupes.

#### 4.2 Análise módulo de chvorinov e volume do massalote

O módulo de Chvorinov do massalote, deve ser maior que o módulo da peça, ou como neste caso, maior que o módulo de Chvorinov, da maior seção da peça, que corresponde a seção 2, com o valor de 0,517 cm, para isso, foi utilizado a Equação (3), com a constante  $k$ , com o valor de 1,2, essa constante é uma forma empírica de compensar as características, de solidificação da liga.

O massalote deve atender os requisitos de volume em relação ao cálculo com o módulo de Chvorinov e do requisito volumétrico, para que o massalote seja o último a solidificar. O cálculo do volume do massalote, a partir do módulo de Chvorinov, foi realizado com base na Equação (4), a qual considera um massalote cilíndrico com altura ( $H$ ) = 1,5 e diâmetro ( $D$ ).

Já a partir do requisito volumétrico do massalote, foi calculado com a Equação (5), em que, para massalote cilíndrico ( $H$ ) = 1,5, o rendimento é de 14% ou  $\eta = 0,14$  e a contração de solidificação da liga  $\beta = 0,027$ , Como uma seção da peça, apresentou o maior módulo de Chvorinov, foi calculada também uma contração a partir dos resultado da Equação (4), com a equação (5), com o volume da seção 2, que é de 280,32 cm<sup>3</sup>, este cálculo resultou em uma contração de  $\beta = 0,0186$ . Todos

os valores resultantes desses cálculos de volume, assim como o recálculo dos respectivos módulos de Chvorinov, são apresentados na Tabela 7.

A utilização de um massalote cilíndrico com altura ( $H$ ), = 1,5 vezes o diâmetro ( $D$ ) do massalote, se deve ao fato de que nos ferros fundidos nodulares, os massalotes são projetados para alimentar essencialmente a contração líquida, necessitando para isto, somente que sua parte superior esteja acima do nível mais alto da peça, para ser alimentada.

**Tabela 7 - Valores dos cálculos do massalote do componente em estudo**

<b>Módulo de Chvorinov Massalote (cm)</b>	<b>Volume Massalote (cm<sup>3</sup>) Equação (4)</b>	<b>Volume Massalote (cm<sup>3</sup>) Equação (5), <math>\beta = 0,027</math></b>	<b>Volume Massalote (cm<sup>3</sup>) Equação (5), <math>\beta = 0,0186</math></b>
0,620	42,66	213,188	136,696

**Fonte: Aatoria Própria (2022)**

O maior valor de volume corresponde ao da Equação (5), ou seja, será necessário recalculer o módulo de Chvorinov do massalote, a partir dos resultados apresentados pela Equação (5), para as duas contrações e com esses valores de volume do massalote, se calculou as dimensões das duas versões de massalote, com base na Equação (6). A Tabela 8 apresenta essas informações.

**Tabela 8 - Informações do Massalote a partir dos dados da Equação(5)**

<b>Módulo de Chvorinov Massalote (cm) <math>\beta = 0,027</math></b>	<b>Diâmetro Massalote (mm)</b>	<b>Módulo de Chvorinov Massalote (cm) <math>\beta = 0,0186</math></b>	<b>Diâmetro Massalote (mm)</b>
1,060	57	0,914	49

**Fonte: Aatoria Própria (2022)**

### **4.3 Configuração sistema de alimentação**

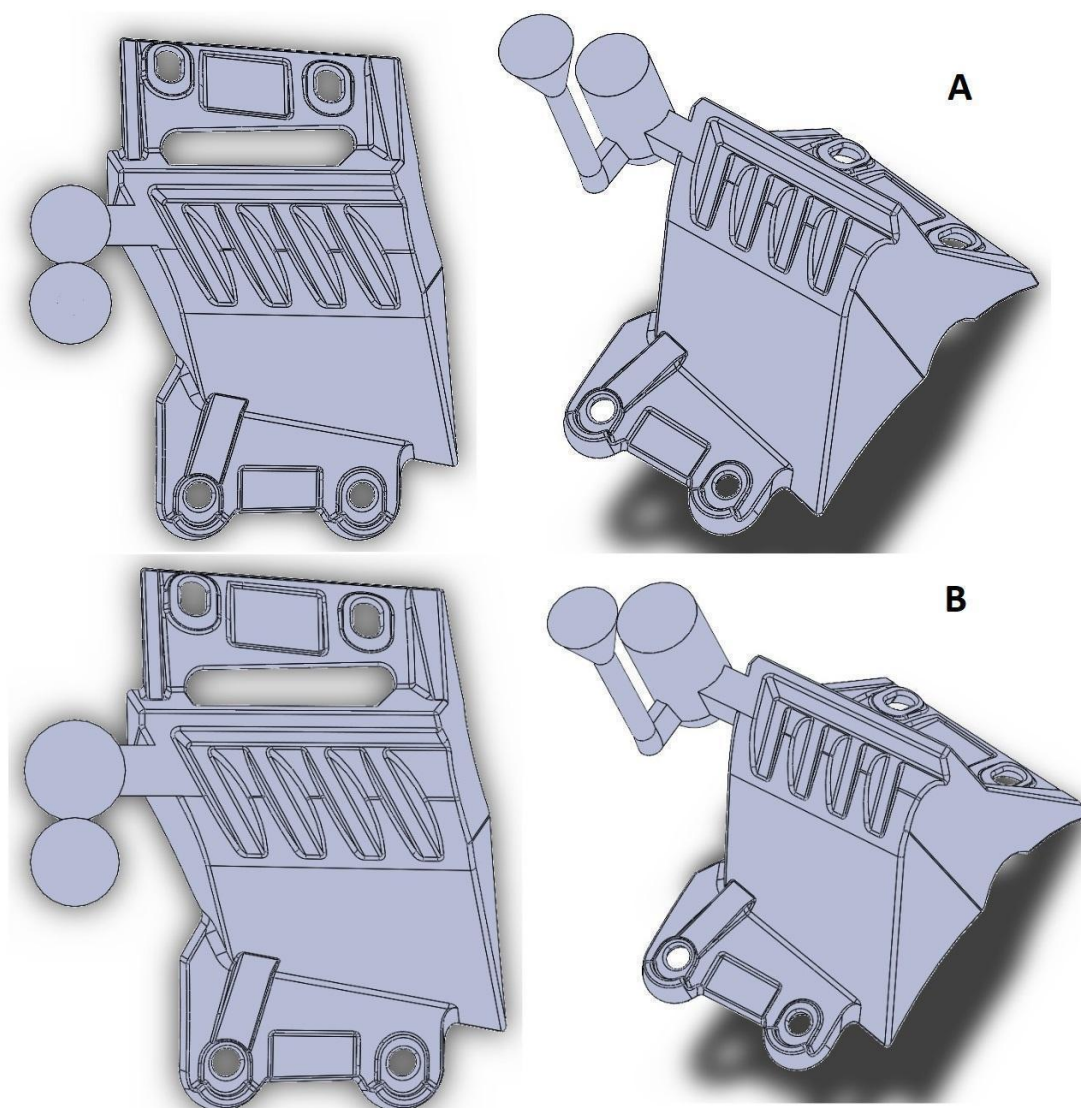
Os resultados do dimensionamento do sistema de alimentação, seguem a sequência apresentada na seção 3.4. A Tabela 9 apresenta as informações e os resultados do dimensionamento do sistema de alimentação.

**Tabela 9 - Dados do Sistema de Alimentação**

<b>Características</b>	<b>Massalote (57 mm)</b>	<b>Massalote (49 mm)</b>
Volume Total do Conjunto (cm <sup>3</sup> )	1153,90	1059,72
Massa do Conjunto (g)	8192,69	7524,05
Massa específica FE50007 (g/cm <sup>3</sup> )		7,10
Tempo de Vazamento (s)	5,15	4,94
Velocidade de Enchimento (cm/s)		111,45
Área de Choque (cm <sup>2</sup> )	2,010	1,925
Diâmetro do Canal de Descida (mm)	16,00	15,65
Base Menor Canal de Distribuição (mm)	8,97	8,77
Base Maior Canal de Distribuição (mm)	17,93	17,55
Altura Canal de Distribuição (mm)	17,93	17,55
Distância do Massalote a peça (mm)	19,00	16,00
Largura do Pescoço Massalote (mm)	28,50	24,50
Altura do Pescoço Massalote (mm)	28,50	24,50

**Fonte: Autoria Própria (2022)**

Com as dimensões do sistema de alimentação mostrados na Tabela 9, foi realizada a esquematização dos dois massalotes e canais na peça, como mostra a Figura 20.

**Figura 20 - Sistema de Alimentação e Peça**

Fonte: Autoria Própria (2022)

A Figura 20.A, mostra o sistema de alimentação do massalote, com diâmetro de 57 mm, enquanto a Figura 20.B, ilustra o sistema de alimentação com o massalote de 49 mm, através dela, é possível observar visualmente, a diferença entre as duas dimensões.

#### 4.4 Análise de simulação

Foram realizadas as simulações dos arranjos, com os respectivos diâmetros de massalote e os tamanhos de malhas, a partir dos *softwares* Altair Inspire Cast e NovaFlow & Solid, utilizando os projetos de modelo e canais desenvolvidos, até o momento neste trabalho, mostrado na Figura 20. A transferência do modelo CAD

para os *softwares*, se deu, para o Altair Inspire Cast, importado através do formato (Parasolid) e o NovaFlow & Solid, no formato (STL). Em seguida, conforme ilustrado no fluxograma da Figura 18 e com os dados e as condições de contorno da Tabela 5 implementadas, de simulação, em cada programa utilizado, foram realizadas as simulações. As imagens abaixo mostram a interface inicial dos *softwares* utilizados para as simulações.

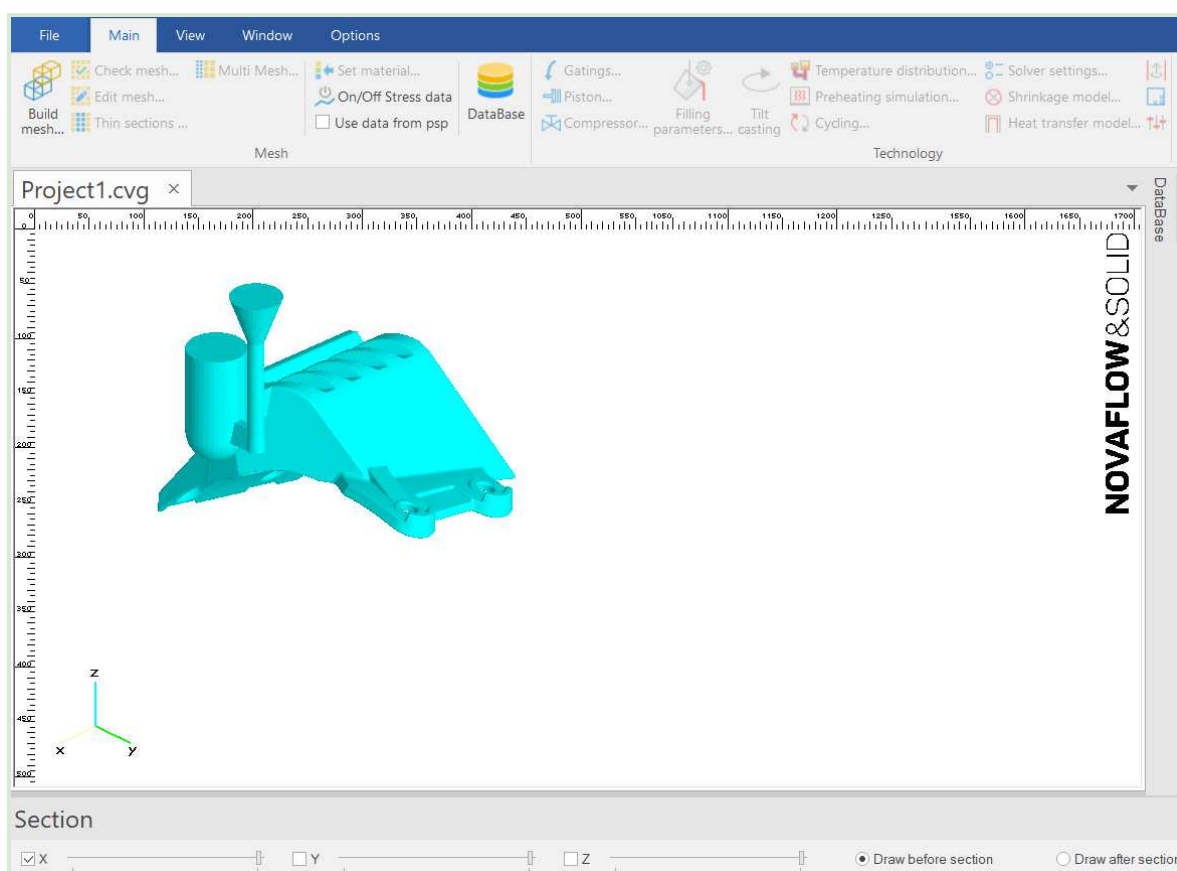
**Figura 21 - Interface inicial software Altair Inspire Cast**



Fonte: Autoria Própria (2022)



**Figura 22 - Interface inicial *software* NovaFlow & Solid**



**Fonte: Autoria Própria (2022)**

É possível observar na parte superior das Figuras 21 e 22, as guias de cada *software*, onde são acrescentadas as condições de contorno para a simulação.

De modo estratégico, as simulações foram realizadas em um processo iterativo, que é um fator que influencia diretamente no tempo e velocidade de processamento, junto à configuração do computador. A malha inicialmente definida, determina a complexidade, para a realização dos cálculos de transferência de calor, dentro do *software* de simulação, ou seja, quanto menor a malha, mais complexo, os cálculos e maior o tempo para simulação. A Tabela 10 apresenta os dados do tempo de simulação, em relação ao tamanho da malha, para cada uma das simulações.

Tabela 10 – Informações da Simulação de Solidificação

Software	Massalote (57 mm)		Massalote (49 mm)	
	Tamanho da Malha (mm)	Tempo de Simulação (Horas)	Tamanho da Malha (mm)	Tempo de Simulação (Horas)
Altair Inspire Cast (FEM)	1,5	19:10	1,5	13:12
	2,5	07:05	2,5	05:47
	3,5	02:06	3,5	01:59
NovaFlow & Solid (FDM)	1,5	10:35	1,5	07:48
	2,5	01:10	2,5	01:02
	3,5	00:25	3,5	00:20

Fonte: Autoria Própria (2022)

Conforme os dados apresentados na Tabela 10, o tempo de simulação, é diretamente influenciado pelo tamanho da malha, para os dois métodos de simulação, quanto menor o tamanho da malha, mais demorada é a simulação.

Além disso, os resultados mostraram uma grande divergência no tempo de simulação, entre os dois *softwares*, quando realizadas com os mesmos tamanhos. Para o NovaFlow & Solid, que utiliza o método das Diferenças Finitas (FDM), o tempo foi muito menor, ao comparar com o Altair Inspire Cast, que utiliza o método dos Elementos Finitos (FEM).

O método (FDM), utiliza a série de Taylor, dividindo a malha, em vários elementos, (domínios "infinitesimais"), no entanto, apresenta duas características em desvantagem, a presença de contorno não bem representado e a falta de possibilidade, de refinar a malha em pontos específicos. Essas características do método (FDM) possibilitam uma simulação mais rápida. Enquanto o método (FEM), apresenta flexibilidade na discretização e malha ajustada ao problema, mas inferioridade na complexidade matemática.

Após o processamento, é possível analisar os resultados obtidos, com a simulação da solidificação da peça, que dentre os critérios apresentados pelos *softwares*, utilizou-se a ferramenta para a análise que prevê, a microporosidade na peça, o qual é o principal tipo de defeito, associado a solidificação de ferros fundidos. Isso ocorre devido a contração de solidificação do metal no momento da solidificação, produzindo pequenos vazios, o que pode comprometer a resistência do

componente. A contração devido a esse fator, ocorre geralmente nos pontos quentes, que são as regiões de maior concentração de massa.

Em todos os fundidos, à ocorrência de contração do metal aceitável, para o caso dos ferros nodulares, a contração sólida linear, varia mais precisamente de 1,3, a 1,5%. Enquanto, a microporosidade pode chegar a 2,0%, geralmente sendo aceito até 1,0%, desde que não seja concentrada no mesmo ponto, (FUOCO, 2016). A Tabela 11, mostra os resultados de microporosidade, em porcentagem nas simulações realizadas com cada tamanho de malha.

**Tabela 11 - Valores de Microporosidade nas Simulações**

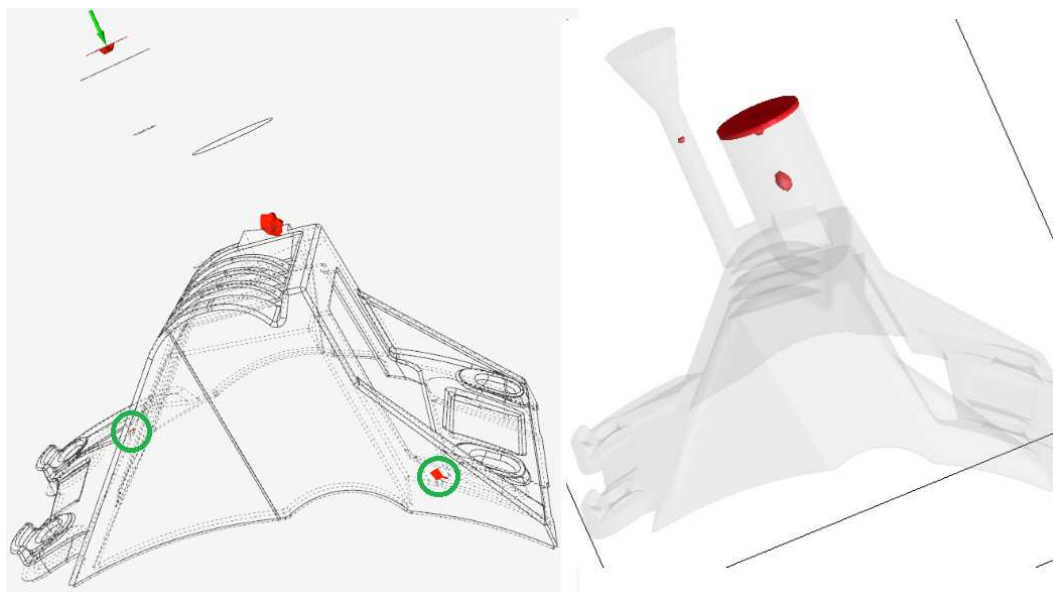
<i>Software</i>	Massalote (57 mm)		Massalote (49 mm)	
	Tamanho da Malha (mm)	Volume de Microporosidade (%)	Tamanho da Malha (mm)	Volume de Microporosidade (%)
<b>Altair Inspire Cast</b>	1,5	0,081	1,5	0,060
	2,5	0,070	2,5	0,056
	3,5	0,063	3,5	0,046
<b>NovaFlow &amp; Solid</b>	1,5	0,083	1,5	0,071
	2,5	0,073	2,5	0,057
	3,5	0,064	3,5	0,049

**Fonte: Autoria Própria (2022)**

Os resultados mostrados na Tabela 11, ilustram que quanto mais grosseiras a malha, existe mais dificuldade na detecção dos defeitos, ocasionados pela microporosidade, contudo com o refino da mesma, melhor a precisão dos resultados. Outro ponto bastante importante a ser observado, é que os valores acima do volume de microporosidade, estão relacionados apenas ao volume da peça e não de todo o conjunto.

Abaixo nas Figuras 23 a 26, mostram os resultados, após cada simulação com os diferentes *softwares* e tamanhos de malha.

**Figura 23 - Microporosidade Malha de 3.5 mm Altair Inspire Cast / NovaFlow & Solid Diâmetro 57 mm**



**Fonte: Autoria Própria (2022)**

A Figura 23, mostra em vermelho, os pontos onde se concentram a microporosidade, no entanto, segundo a representação do *software* NovaFlow, & Solid, à direita da imagem, não é possível detectar de forma visual os pontos de microporosidade.

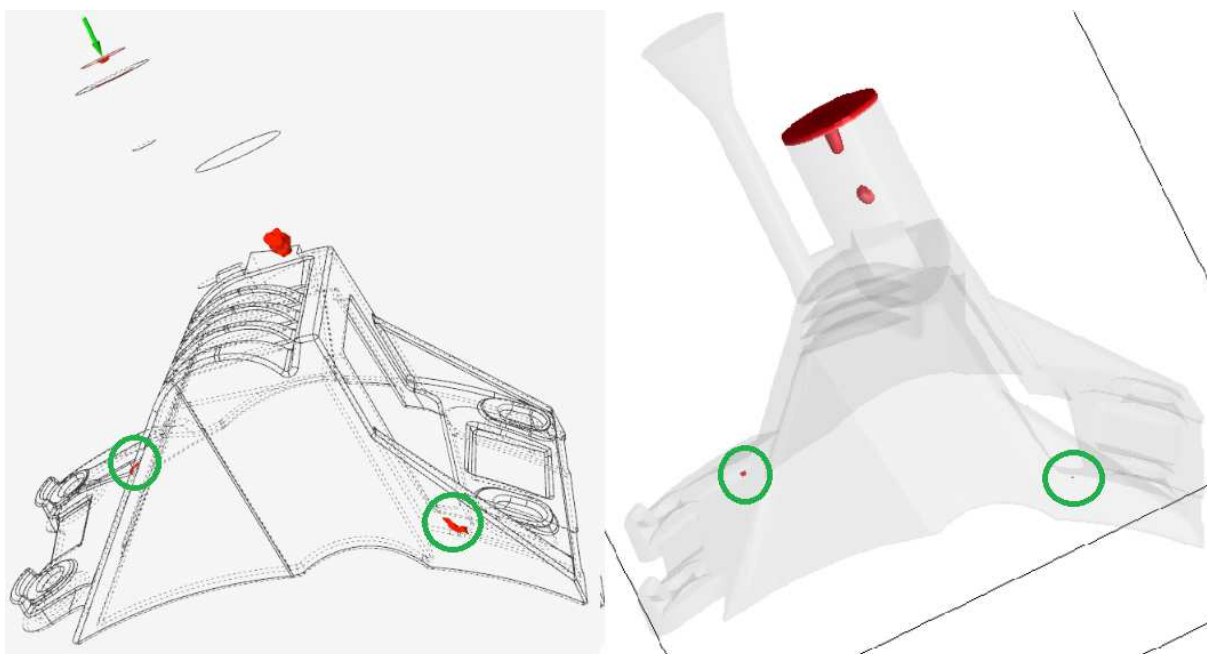
**Figura 24 - Microporosidade Malha de 3.5 mm Altair Inspire Cast / NovaFlow & Solid Diâmetro 49 mm**



**Fonte: Autoria Própria (2022)**

Na Figura 24, assim como a anterior, demonstra os pontos de concentração da microporosidade, em vermelho, também é possível comparar com a Figura 23, a semelhança entre as simulações apesar da diferença no diâmetro, nos dois massalotes, mesmo que pequena a diferença entre os valores da porcentagem, de microporosidade, os locais dos pontos assemelham se entre si. As Figuras 25 a 28, evidenciam a ocorrência de microporosidade na peça, indicadas por um círculo verde.

**Figura 25 - Microporosidade Malha de 2.5 mm Altair Inspire Cast / NovaFlow & Solid Diâmetro 57 mm**



Fonte: Autoria Própria (2022)

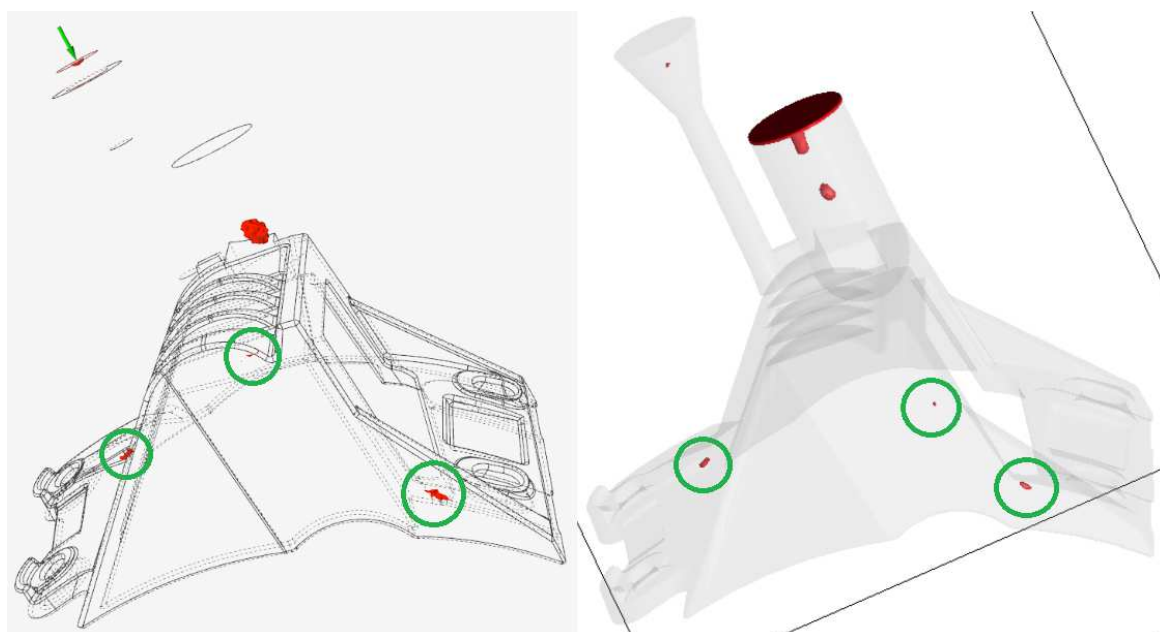
**Figura 26 - Microporosidade Malha de 2.5 mm Altair Inspire Cast / NovaFlow & Solid Diâmetro 49 mm**



**Fonte: Autoria Própria (2022)**

Neste ponto a Figura 26, mostra uma pequena diferença entre os dois softwares, a esquerda com o método (FEM), apresenta um ponto visível a mais de microporosidade, no entanto como observado na Tabela 11, a diferença na porcentagem de microporosidade, é praticamente desprezível.

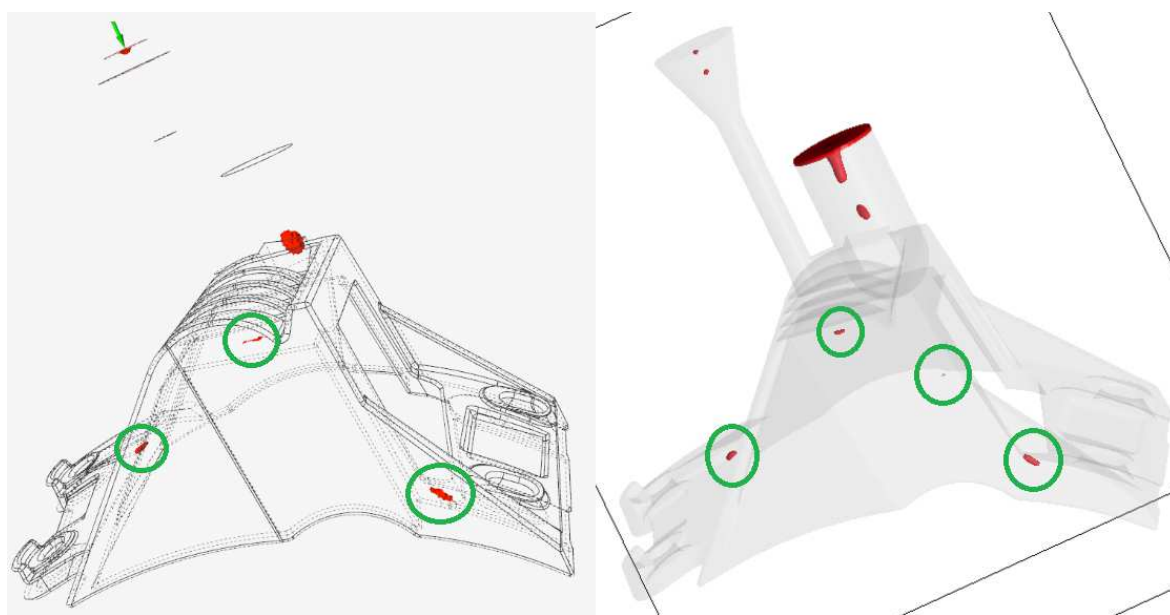
**Figura 27 - Microporosidade Malha de 1.5 mm Altair Inspire Cast / NovaFlow & Solid Diâmetro 57 mm**



**Fonte: Autoria Própria (2022)**

As Figuras 26 e 27, mostram os resultados das simulações entre os dois Softwares, com tamanho de malha de 2,5 mm.

**Figura 28 - Microporosidade Malha de 1.5 mm Altair Inspire Cast / NovaFlow & Solid Diâmetro 49 mm**



**Fonte: Autoria Própria (2022)**

Por meio da análise dos resultados das simulações, mostrados nas Figuras 23 a 28, se observa que quanto mais fina a malha, tem-se uma ideia melhor, de como ficará a distribuição da microporosidade (micro), isso representa um grande ganho de precisão, no projeto do sistema de alimentação. Os pontos que apresentaram, microporosidades visíveis, correspondem aos locais onde, à ocorrência de maior concentração de massa, principalmente em locais mais distantes e isolados do sistema de alimentação.

Em quaisquer dos resultados, com os três tamanhos de malhas, simulados em ambos os *softwares*, nenhum deles apresentou, o valor acima da porcentagem de microporosidade, máxima aceitável de até 1 %, que pode ser atribuído, que o sistema de alimentação, foi dimensionado da forma correta, isso pode ser comprovado, observando que apenas os locais na região dos massalotes e canais de descida, os valores de microporosidade, mostraram elevada concentração (em vermelho), devido a solidificação direcional.

Com isso, para determinar a melhor escolha de *software*, a ser utilizado para a simulação de solidificação, foi baseado no tempo, pois apesar de, em todos os casos, apresentarem uma pequena diferença, no volume de microporosidade, em ambos os *software*, não houve contradição na representação dos locais de microporosidade. Portanto, o NovaFlow & Solid, que utiliza o método de Diferenças Finitas (FDM), representa um ganho bastante considerável, em relação a velocidade de simulação, em relação ao *software* Altair Inspire Cast, que utiliza o método de Elementos Finitos (FEM).

A partir da análise dos resultados das simulações, é mostrado que a melhor escolha de diâmetro de massalote, corresponde ao menor ( $D$ ) = 49 mm, pois resultará em um maior rendimento metalúrgico, para a fabricação no futuro e também, no menor volume de microporosidade, ao comparar os resultados das simulações. O rendimento pode ser calculado e comparado entre os dois diâmetros de massalote utilizado, dividindo o peso da peça, mostrado na Tabela 4, pelo peso dos conjuntos, mostrados na Tabela 9.

**Tabela 12 - Rendimento Metalúrgico**

<b>Diâmetro de Massalote (mm)</b>	<b>Rendimento (%)</b>
49	84,12
57	77,26

**Fonte: Autoria própria (2022)**

Portanto, como observado na Tabela 12, o rendimento metalúrgico é consideravelmente maior, para o conjunto com o massalote, com menor diâmetro, possibilitando diminuição de custos de fabricação.



## 5 CONCLUSÃO

Com base no objetivo principal, de utilizar a simulação de solidificação, na validação do sistema de alimentação, de um componente mecânico fundido, em ferro fundido nodular FE50007, destacam-se as seguintes conclusões:

Foi realizada uma revisão de literatura, a respeito de solidificação, ferro fundido nodular, dimensionamento de sistemas de canais de alimentação, massalotes e sobre simulação de solidificação e assim, obteve-se o conhecimento necessário para prosseguir o estudo e determinar o sistema de alimentação do componente em estudo.

Desta maneira, foi possível realizar os cálculos para obter o sistema de alimentação para a peça, de modo, a garantir que não apresentasse defeitos para a fabricação e permaneça dentro dos padrões estabelecidos, a partir da revisão bibliográfica. Com isso, os critérios de dimensionamento foram atendidos.

As simulações de solidificação realizadas, utilizaram dois métodos, o de Elementos Finitos (FEM) e o método de Diferenças Finitas (FDM), utilizando três tamanhos de malhas, (3,5, 2,5 e 1,5 mm) e dois diâmetros de massalotes com altura igual 1,5D (57 e 49 mm de diâmetro), que possibilitaram determinar de acordo com vários parâmetros, como volume de microporosidade e tempo de simulação, por meio de comparação e que apresentaram bons resultados a respeito da escolha do melhor método.

O uso de malhas mais finas (1,5 mm), representou ganho na precisão da simulação, para a apresentação dos defeitos, por microporosidade, mas não justifica seu uso desde o início do projeto, mas sim após seu refinamento. Pois de forma preliminar, em que serão necessários grandes ajustes, é aconselhado o uso de malhas mais grosseiras, pois o tempo de cálculo é consideravelmente mais curto. E devido a diferença no tempo de simulação, é recomendado a utilização do método de Diferenças Finitas (FDM).

Em quaisquer das simulações realizadas, em ambos os *softwares*, nenhum valor ficou acima da porcentagem de microporosidade máxima aceitável de 1%, devido o sistema de alimentação ter o dimensionado correto. Por isso, a melhor escolha de diâmetro de massalote, corresponde ao menor ( $D$ ) = 49 mm, pois resultou em um melhor rendimento metalúrgico do conjunto (84,12%).

Desta maneira, os objetivos propostos por este trabalho, foram alcançados, permitindo a escolha do melhor método de dimensionamento e simulação de solidificação da peça de colheitadeira agrícola, (separador de grãos) utilizada.

### **5.1 Sugestões de trabalhos futuros**

Como sugestões de trabalhos futuros, que podem ser realizados para a continuação do estudo desenvolvido no presente trabalho, propõe-se, a realização das simulações, com outros tipos de ferros fundidos, assim como a utilização de outros modelos, com diferentes dimensões e complexidade de geometria, analisando novos parâmetros. Sugere-se também, a busca de novos *softwares*, que utilizam dos métodos de Elementos Finitos (FEM) e o método de Diferenças Finitas (FDM), disponíveis no mercado, para comparar, se os resultados e as diferenças entre os mesmos, sempre analisando a viabilidade do método utilizado, para buscar melhores resultados e agilidade. Assim para a melhoria de previsão, de possíveis defeitos em componentes fabricados, a partir da Fundição de ferros fundidos.

## REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6916:2017 - **Ferro fundido nodular ou ferro fundido com grafita esferoidal** — Rio de Janeiro, 2017.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8650:2015 - **Emprego de ferro fundido nodular para produtos automotivos - procedimentos**. Rio de Janeiro, 2015.

ASM. **Metals Handbook, Volume 15, Casting, Design Considerations, Riser Design**. Estados Unidos da América 1992.

BALDAM, R. L. **Fundição: Processos e tecnologias Correlatas**. 2 ed. Editora: Érica Brochura, (2014).

CALLISTER JR, D. WILLIAM e RETHWISCH G. DAVID. **Ciência e engenharia dos materiais, Uma introdução**. 10. ed. Rio De Janeiro: LTC, 2021.

CAMPOS FILHO, M. P. E DAVIES G. J. **Solidificação e fundição de metais e suas ligas**. Rio de Janeiro: S.A, 1978.

CHALMERS, F. ALAN. **A Fabricação da Ciência**. São Paulo: UNESC, 1994.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. Associação Brasileira de Metais, São Paulo, 1982/ 1997.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 1982/1997.

COLPAERT, HUBERTUS. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. Blucher: São Paulo, 2008.

D. KOSHAL. **Manufacturing Engineer's Reference Book, Cap. 3.2 Sand Casting**. Elsevier. 1993.

FLEMINGS, M.C. **Processo de Solidificação**. McGraw-hill. Nova York, 1974.  
GARCIA, A. **Solidificação: Fundamentos e Aplicação**. Unicamp, Campinas SP, 2001.

FUOCO, RICARDO. **Regras básicas para alimentação de peças em ferros fundidos cinzentos e nodulares**. Curso Alimentação e enchimento de moldes, São Paulo, 2016.

GERMANO, F. **Estudo da viabilidade técnica do processo molde cheio para fundições em areia**. Dissertação submetida à universidade federal de Santa Catarina para obtenção do grau de mestre em ciência e engenharia de materiais Florianópolis, Maio /2003

GUESSER, W L. **Propriedades mecânicas dos ferros fundidos**. 1. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2009.

JOHN CAMPBELL. **Castings Practice, The 10 Rules of Castings, Cap. 6 – Avoid shrinkage damage**. Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004.

MALALASEKERA, W. e H. K. VERSTEEG “**An introduction to computational fluid dynamics.**” *The finite volume method, Harlow*. Prentice Hall (2007): 1995.

MARIOTTO, L. C. **Regeneração de Areias de Fundição**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, S.A, 2001.

MÜLLER, A. **Solidificação e Análise Térmica dos Metais**. 1ª ed. Capítulos 1, 2, 3 e 4. Ed. UFRGS. Porto Alegre, 2002;

NARIMAN RAFAEL . **Material Matters – Steel Casting Design Considerations**. 2004.

NASCIMENTO, D., SANTANA, P.I. **Ferros Fundidos Cinzento e Branco**. UNISOCIESC. 2016.

OVERVIEW E. ABHILASH AND M. A. JOSEPH. **Modeling and Simulation of Casting Process**: INDIAN FOUNDRY JOURNAL. Vol. 55, No.10, 2009, pp 28-37.

PIESKE, A: CHAVES FILHO, L M: REIMER, J F. **Ferros fundidos cinzentos de alta qualidade**. SOCIESC, 1976.

RAVI, B.. SRINIVASAN, M.N. **Casting solidification analysis by modulus vector method**, Int. J. Cast Metals Res., Vol.9, pp. 1-7. 1996.

SERBINO, E. M. **Um Estudo dos Mecanismos de Desgaste em Disco de Freio Automotivo Ventilado de Ferro Fundido Cinzento Perlítico com Grafita Lamelar**. 2005. 111 páginas. Monografia. USP – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

SETTI, D. **Dimensionamento de Sistema de Alimentação: massalotes e canais de alimentação. Disciplina de Processos Metalúrgicos de Fabricação.**

08/03/2021. Notas de Aula. Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) – campus Pato Branco, 2021.

SHACKELFORD, F. JAMES. **conceitos relacionados à ciência e à engenharia dos materiais.** 6. ed. São Paulo: Pearson Universidades, 6 junho de 2008.

SILVA RIBEIRO. **Apontamentos de Fundição I, 4º ano do MIEMM.** FEUP. 2007/2008

STOLL, H. W. **Casting Design Issues and Practices.** In: **Casting Design and Processes.** Metals Park: ASM International, 2009

TRUDELA, GAGNÉ M. ***Effect of Composition and Heat Treatment Parameters on the Characteristics of Austempered Ductile Irons.*** Pergamon, Canadá, 1997. -  
WU, C. Z., et. al., ***Phase Transformation in Austempered Ductile Iron by Microje Impact, Materials Characterization,*** 2002, 43–54.

WARMLING, G. et. al. **Influência do Cobre no Ferro Fundido Nodular Ausferrítico,** Sociesc. 1999.

**ANEXO A - Lei n. 9.610, de 19 de fevereiro de 1998**



**Presidência da República  
Casa Civil  
Subchefia para Assuntos Jurídicos**

**LEI Nº 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998<sup>1</sup>.**

**Altera, atualiza e consolida a legislação sobre direitos autorais e dá outras providências.**

**O PRESIDENTE DA REPÚBLICA** Faço saber que o Congresso Nacional decreta e eu sanciono a seguinte Lei:

Título I - Disposições Preliminares

Art. 1º Esta Lei regula os direitos autorais, entendendo-se sob esta denominação os direitos de autor e os que lhes são conexos.

Art. 2º Os estrangeiros domiciliados no exterior gozarão da proteção assegurada nos acordos, convenções e tratados em vigor no Brasil.

Parágrafo único. Aplica-se o disposto nesta Lei aos nacionais ou pessoas domiciliadas em país que assegure aos brasileiros ou pessoas domiciliadas no Brasil a reciprocidade na proteção aos direitos autorais ou equivalentes.

Art. 3º Os direitos autorais reputam-se, para os efeitos legais, bens móveis.

Art. 4º Interpretam-se restritivamente os negócios jurídicos sobre os direitos autorais.

Art. 5º Para os efeitos desta Lei, considera-se:

I - publicação - o oferecimento de obra literária, artística ou científica ao conhecimento do público, com o consentimento do autor, ou de qualquer outro titular de direito de autor, por qualquer forma ou processo;

II - transmissão ou emissão - a difusão de sons ou de sons e imagens, por meio de ondas radioelétricas; sinais de satélite; fio, cabo ou outro condutor; meios óticos ou qualquer outro processo eletromagnético;

III - retransmissão - a emissão simultânea da transmissão de uma empresa por outra;

IV - distribuição - a colocação à disposição do público do original ou cópia de obras literárias, artísticas ou científicas, interpretações ou execuções fixadas e fonogramas, mediante a venda, locação ou qualquer outra forma de transferência de propriedade ou posse;

V - comunicação ao público - ato mediante o qual a obra é colocada ao alcance do público, por qualquer meio ou procedimento e que não consista na distribuição de exemplares;

VI - reprodução - a cópia de um ou vários exemplares de uma obra literária, artística ou científica ou de um fonograma, de qualquer forma tangível, incluindo qualquer armazenamento permanente ou temporário por meios eletrônicos ou qualquer outro meio de fixação que venha a ser desenvolvido;

VII - contrafação - a reprodução não autorizada;

VIII - obra:

a) em co-autoria - quando é criada em comum, por dois ou mais autores;

b) anônima - quando não se indica o nome do autor, por sua vontade ou por ser desconhecido;

c) pseudônima - quando o autor se oculta sob nome suposto;

d) inédita - a que não haja sido objeto de publicação;

e) póstuma - a que se publique após a morte do autor;

f) originária - a criação primígena;

g) derivada - a que, constituindo criação intelectual nova, resulta da transformação de obra originária;

h) coletiva - a criada por iniciativa, organização e responsabilidade de uma pessoa física ou jurídica, que a publica sob seu nome ou marca e que é constituída pela participação de diferentes autores, cujas contribuições se fundem numa criação autônoma;

i) audiovisual - a que resulta da fixação de imagens com ou sem som, que tenha a finalidade de criar, por meio de sua reprodução, a impressão de movimento, independentemente dos processos de sua captação, do suporte usado inicial ou posteriormente para fixá-lo, bem como dos meios utilizados para sua veiculação;

IX - fonograma - toda fixação de sons de uma execução ou interpretação ou de outros sons, ou de uma representação de sons que não seja uma fixação incluída em uma obra audiovisual;

X - editor - a pessoa física ou jurídica à qual se atribui o direito exclusivo de reprodução da obra e o dever de divulgá-la, nos limites previstos no contrato de edição;

XI - produtor - a pessoa física ou jurídica que toma a iniciativa e tem a responsabilidade econômica da primeira fixação do fonograma ou da obra audiovisual, qualquer que seja a natureza do suporte utilizado;

XII - radiodifusão - a transmissão sem fio, inclusive por satélites, de sons ou imagens e sons ou das representações desses, para recepção ao público e a transmissão de sinais codificados, quando os meios de decodificação sejam oferecidos ao público pelo organismo de radiodifusão ou com seu consentimento;

XIII - artistas intérpretes ou executantes - todos os atores, cantores, músicos, bailarinos ou outras pessoas que representem um papel, cantem, recitem, declamem, interpretem ou executem em qualquer forma obras literárias ou artísticas ou expressões do folclore.

Art. 6º Não serão de domínio da União, dos Estados, do Distrito Federal ou dos Municípios as obras por eles simplesmente subvencionadas.

<sup>1</sup> Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l9610.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9610.htm).