

**Jairo Marcelo Müller**

**ENSAIO PARA VERIFICAÇÃO DA OCORRÊNCIA DE FALHA EM  
DIFERENTES VARIÁVEIS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA PARA  
FUNDIÇÃO: UM ESTUDO DE CASO**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica na Faculdade Horizontina FAHOR, sob a orientação do Professor Mestre Sirnei César Kach

**Horizontina - RS**

2017

**FAHOR - FACULDADE HORIZONTINA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o trabalho final de curso**

**ENSAIO PARA VERIFICAÇÃO DA OCORRÊNCIA DE FALHA EM DIFERENTES  
VARIÁVEIS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA PARA FUNDIÇÃO: UM ESTUDO DE  
CASO**

**Jairo Marcelo Müller**

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em  
Engenharia Mecânica

Aprovado em: 20/11/2017  
Pela Comissão Examinadora

---

Mestre. Sirnei Cesar Kach  
Presidente da Comissão Examinadora - Orientador

---

Mestre. Juliana da Luz  
FAHOR – Faculdade Horizontina

---

Mestre. Jonathan Felipe Camargo  
FAHOR – Faculdade Horizontina

**Horizontina - RS**

**2017**

## **DEDICATÓRIA**

Dedico esse trabalho a minha esposa, pais, irmãos e sogros, como também a todos os professores e amigos que de alguma forma me auxiliaram nessa trajetória acadêmica.

## **AGRADECIMENTO**

Agradeço primeiro a Deus por proporcionar-me a vida e ser a minha força e refúgio em todas as horas boas e ruins.

Agradeço de forma muito especial a esposa Juliane, aos meus pais Alfredo e Leoni, meus irmãos Lidiane e Maico, meu cunhado Leandro, meus sogros Julita e Waldi pelo apoio que recebi durante minha trajetória acadêmica, tenho certeza que sem o incentivo de vocês não teria chegado até aqui.

Agradeço também, ao professor orientador mestre Sirnei Kach pela sua atenção e dedicação em auxiliar-me na realização deste trabalho.

Agradeço a empresa Candeia, em especial ao Valdecir, Jonas e Marcos por auxiliar durante a coleta de informações.

Agradeço ainda, a direção, professores e funcionários da FAHOR e ao vasto círculo de amizade que me auxiliaram direta ou indiretamente para que meu sonho se realize.

## **EPIGRAFE**

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor seja feito. Não sou o que deveria ser, mas graças a Deus, não sou o que era antes”. (Marthin Luther king)

## RESUMO

O processo produtivo de uma fundição apresenta suas complexidades devido ao seu excesso de variáveis. Com base nisso, este estudo pesquisou sobre um determinado problema gerador da micro porosidade em um item aplicado em equipamentos voltados diretamente ao ramo agrícola. Objetiva-se dessa forma, realizar uma análise e apresentar comparações entre variações que vão acontecer utilizando composições químicas diferentes evidenciadas através do processo de simulação, uma vez que, os resultados fornecidos pelo software que foram correlacionados com os resultados obtidos nos ensaios de laboratório no item real. A metodologia utilizada para a elaboração desse trabalho é denominada como sendo um estudo de caso com uma abordagem qualitativa, pois todas as informações necessárias foram coletadas por meio da elaboração de ensaios laboratoriais e simulações computacionais em uma empresa de fundição situada no município de Santa Rosa - RS. Os resultados obtidos demonstraram que a variação no percentual de carbono presente na composição química do material é diretamente proporcionalmente para a formação ou não do defeito de micro porosidade na peça. Nesse sentido, conclui-se que os ganhos foram muitos significativos e irão auxiliar na evolução dos resultados esperados do projeto.

**Palavras-chave:** Fundição. Simulação. Micro porosidade.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Vazamento de metal liquido no molde	17
Figura 2 – Peças com cavidade produzidas por fundição	18
Figura 3- Colocação de machos no interior do molde	22
Figura 4- Machos produzidos no processo <i>Shell Moulding</i>	23
Figura 5 - Molde com sistema de canais e enchimento	24
Figura 6 - Representação de luvas exotérmicas	26
Figura 7- Apresentação da matriz perlítica, ferrítica e grafítica	27
Figura 8 - Estrutura cristalina do ferro fundido cinzento sem ataque	29
Figura 9 - Estrutura cristalina do ferro fundido branco sem ataque	30
Figura 10- Demonstração de um nódulo esferoidal anulando ação de trincas	31
Figura 11- Microestrutura de um ferro fundido nodular	32
Figura 12- Forno de indução	35
Figura13 - Aparência da peça submetida a defeito por rechupe	38
Figura 14 - Imagem de uma peça submetida a defeito por inclusão	39
Figura 15 - Aspecto de peças com defeito ocasionado por bolha de gás	40
Figura 16 - Representação por imagem de um defeito por cicatrizes	41
Figura 17- Representação por imagem de um defeito provocado por desencontro	41
Figura 18- Características do defeito por lavagem / arraste	42
Figura 19 - Representação por imagem de um defeito provocado por desencontro	43
Figura 20 - Representação por imagem de um defeito provocado por quebra de molde	43
Figura 21- Representação por imagem de um defeito provocado por rabo-de-rato	44
Figura 22 - Representação por imagem de um defeito provocado por rebarba	45
Figura 23- Defeito de porosidade	46
Figura 24 - Análise metalografica com auxílio de microscópio	49
Figura 25 - Equipamento de ensaio de tração	50
Figura 26- Equipamento medidor de dureza (durômetro)	51
Figura 27- Representação do funcionamento de um espectrômetro	53
Figura 28 - Disponibilização do corte/constatação da presença de micro porosidade	57
Figura 29- Equipamentos utilizados para ensaios químicos e mecânicos	58
Figura 30 - Molde com a montagem completa do sistema de alimentação	59
Figura 31- Processo de vazamento do metal do forno	60

Figura 32- Gráfico tensão x deformação do item real em estudo	66
Figura 33- Localização da retirada das amostras	68
Figura 34 - Micrografia da amostra do dente e do interior da peça	68
Figura 35: Ensaio metalográfico quimicamente atacado	70
Figura 36 -Equipamento para medida de dureza	71
Figura 37 - Localização e probabilidade em porcentagem (%) para o surgimento de micro porosidade	72
Figura 38 - Gráfico de interferência do carbono e do silício para a ocorrência de micro porosidade	75
Figura 39- Visualização do defeito para a pior situação (Design 15)	76
Figura 40- Melhor design simulado pelo magma para eliminação da micro porosidade	76



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise comparativa das propriedades dos ferros fundidos cinzento, nodular e vermicular	30
Tabela 2 - Composição química aceitáveis para produção de fundidos nodulares	33
Tabela 3 - Composição química para o ferro fundido nodular GGG60 de acordo com a norma DIN 1693	34
Tabela 4 - Propriedade mecânica para o ferro fundido nodular GGG60 conforme a norma DIN 1693	34
Tabela 5 - Fontes causadoras de gás em um molde	48
Tabela 6 - Composição química encontrada para o ferro fundido nodular GGG60 com auxílio de um espectrômetro	65
Tabela 7 - Resistência a tração, alongamento e limite de escoamento conforme a norma e o encontrado no item em estudo	65
Tabela 8 - Resistência à tração, alongamento e limite de escoamento simulados pelo magma	67
Tabela 9- Contagem de nódulos com total por mm <sup>2</sup>	69
Tabela 10 - Percentual de microconstituintes por amostragem	70
Tabela 11 - Correlação de dureza encontrada no item em estudo X dureza simulada pelo magma	71
Tabela 12 - Proposta de alteração da composição química para o C, Si e Mg	73
Tabela 13 - Designs possíveis para a composição proposta pelo magma	74

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT – Associação brasileira de normas técnicas

ASTM – *American society for testing and materials*

C – Carbono

Ce – Cério

CO<sub>2</sub> – Dióxido de carbono

Cr – Cromo

Cu – Cobre

DIN – *Deutsche industrie norm.*

HB – Dureza brinell

Mg – Magnésio

Mn – Manganês

Mpa – Mega pascal

NBR – Normas brasileiras

P- Fósforo

RS – Rio grande do sul

S – Enxofre

SAE - *Society of Automotive Engineers*

Si – Silício

TFC – Trabalho final de curso

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1 TEMA .....	15
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	15
1.3 PROBLEMA DE PESQUISA .....	15
1.4 JUSTIFICATIVA .....	16
1.5 OBJETIVOS .....	16
1.5.1 Objetivo Geral .....	16
1.5.2 Objetivos Específicos .....	16
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>17</b>
2.1 INTRODUÇÃO A FUNDIÇÃO .....	17
2.2 PROJETO .....	18
2.3 SISTEMA DE MOLDAGEM.....	19
2.4 MOLDAGEM EM DIFERENTES TIPOS DE AREIA .....	20
2.4.1 Moldagem em areia verde.....	21
2.4.2 Moldagem <i>shell moulding</i> (moldura de casca) .....	21
2.4.3 Moldagem em areia-resina.....	21
2.4.4 Moldagem / CO <sub>2</sub> .....	22
2.5 MACHARIA E SUAS ESPECIFICAÇÕES .....	22
2.6 SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO .....	24
2.6.1 Canais de alimentação.....	25
2.6.2 Particularidades dos massalotes .....	25
2.7 CARGA METALICA.....	26
2.8 PRINCIPAIS FERROS FUNDIDOS .....	28
2.8.1 Ferro fundido cinzento.....	299
2.8.2 Ferro fundido branco .....	29

2.8.3 Ferro fundido dúctil ou nodular .....	30
2.8.3.1 Particularidades do ferro fundido nodular GGG60 .....	33
2.9 FORNO POR INDUÇÃO .....	355
2.10 DEFEITOS DE FUNDIÇÃO .....	377
2.10.1 Defeito por rechupe .....	37
2.10.2 Defeito por inclusão .....	388
2.10.2.1 Inclusão de escória .....	38
2.10.2.2. Inclusão de areia .....	399
2.10.3 Defeito por bolhas de gás .....	39
2.10.4 Defeito por cicatrizes .....	40
2.10.5 Defeito por desencontro .....	411
2.10.6 Defeito por erosão (lavagem / arraste) .....	422
2.10.7 Defeito por escamas de expansão .....	422
2.10.8 Defeito por quebra de molde .....	433
2.10.9 Defeito por rabo-de-rato .....	444
2.10.10 Defeito por rebarba .....	444
2.10.11 Defeito por porosidade .....	455
2.11 ENSAIO METALOGRAFICO .....	488
2.12 ENSAIO DE TRAÇÃO .....	50
2.13 ENSAIO DE DUREZA .....	51
2.14 ENSAIO QUÍMICO .....	522
2.15 SIMULAÇÃO NUMÉRICA .....	533
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>555</b>
3.1 IDENTIFICAÇÃO DO ITEM EM ESTUDO .....	566
3.1.1 Análise da amostra coletada .....	566
3.2 VERIFICAÇÃO DOS ENSAIOS DE LABORATÓRIO .....	577
3.3 AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO .....	588

3.3.1 Dimensionamento de sistema de alimentação .....	60
3.4 Formulação das características químicas e temperatura de vazamento .....	60
3.4.1 Descrição do passo a passo .....	61
3.5 Utilização da simulação numérica através do software Magma .....	61
<b>4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>644</b>
4.1 ANÁLISE DE CORRELAÇÃO ENTRE RESULTADOS DO PROJETO ORIGINAIS X RESULTADOS OBTIDOS COM SIMULAÇÃO DO MAGMA .....	644
4.1.1 Ensaio químico .....	644
4.1.2 Ensaio de tração .....	655
4.1.3 Ensaio metalográfico .....	677
4.1.3.1 Ensaio metalográfico quimicamente atacado .....	699
4.1.4 Ensaio de dureza .....	70
4.2 ANÁLISE DE PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE MICRO POROSIDADE PARA A COMPOSIÇÃO ORIGINAL .....	70
4.2.1 Simulação do magma com alteração na composição química do material ....	733
<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>788</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>799</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>845</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>934</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Diversas são as formas de transformação dos metais existentes na metalurgia, podendo citar os processos de usinagem, soldagem, conformação mecânica e a fundição. Este último citado que por sua vez, é considerada um dos mais antigos métodos de transformação dos metais em peças semiacabadas do mundo.

Com a descoberta da fundição, possibilitou ao homem da época a fabricação de diversas ferramentas que até então eram confeccionadas de pedra, madeira e metais não ferrosos como o cobre e o bronze.

Desta forma, a fundição nada mais é do que o ferro transformado do estado sólido para o estado líquido onde posteriormente é vasado do interior de um forno de fundição para dentro da cavidade de um molde com o auxílio de placas de transferência. Concluído o processo de enchimentos dos moldes, inicia-se o resfriamento do metal, torna novamente ao estado sólido assumindo a forma do molde e as medidas da peça que se deseja produzir. Esse processo possibilita a produção de peças que variam desde itens pequenos e simples como também a produção de conjuntos grandes e complexos.

A gama de aplicação de peças fundidas já permite que seja encontrada em todas as áreas da indústria, e estende-se desde simples conexões e tubulação de água até componentes de extrema responsabilidade utilizados em equipamentos aeronáuticos e espaciais. Muito já foi investido para melhoria de processos, ferramentas, desenvolvimento de novas técnicas de produção. Mesmo diante de tanta evolução tecnológica, os defeitos provenientes desses processos ainda não podem ser totalmente controlados.

Diante disso, é de grande importância destacar que a fundição também possui inúmeras falhas decorrentes em seu processo, segundo Kessler (2011), as peças procedentes da fundição deverão apresentar características de utilização, isto é, deverão assumir as formas, a composição e as tolerâncias dimensionais especificadas no projeto, estando em desacordo disso a peça é considerada defeituosa, sendo que, esses por sua vez geram diversos transtornos para a indústria, remetendo a custos em retrabalho e atrasos na produção.

## 1.1 TEMA

Esse projeto de pesquisa irá desenvolver um estudo de caso, relacionado à ocorrência de falhas por micro porosidade em um item corrente de produção.

## 1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Se delimita o tema desde a verificação das amostras fundidas e cortadas, onde se identificou a presença de micro porosidade, até a proposta de solução do problema com base em simulação numérica.

## 1.3 PROBLEMA DE PESQUISA

Com o constante crescimento das indústrias alavancadas por um aumento do consumo de máquinas e equipamentos, a exigência por peças cada vez mais complexas e de melhor qualidade, tornou-se um desafio para empresas que atuam na área de fundição. Com isso, as fundições tiveram que investir mais em controles de qualidade, como também, tornar seus processos mais enxutos, a fim de garantir que as peças entregues aos clientes estejam sem defeitos.

A empresa em questão concentra sua produção voltada diretamente para atender o setor metal mecânico, mais ligado na produção de máquinas agrícolas, sendo que, esses produtos são itens de extrema importância para o funcionamento do equipamento não podendo apresentar falhas, despertando com isso um cuidado ainda maior em garantir que os processos estejam em conformidade. As falhas em qualquer processo de fabricação sempre trazem muitos transtornos para a indústria em geral, sendo que, para a indústria de fundição não é diferente, pois as não conformidades sempre representa um custo a mais para a empresa, refletindo diretamente no preço final repassado ao cliente.

Defeitos de fundição estão ligados a uma causa raiz específica do processo, porém, quando se trata de defeitos relacionados à micro porosidade, a lista de possíveis variáveis causadoras é extensa, que inclui o reflexo de um dimensionamento incorreto do ferramental, composição química do material, temperatura, areia de moldar, velocidade de vazamento, compactação dos moldes, reação de resinas presentes nos machos, entre outros.

Nesse sentido, a solução dos defeitos gerados em um processo de fundição trazem algumas dificuldades para a qualidade em descobrir qual das variáveis realmente é a causadora do problema. Sendo assim, o trabalho teve como problema de análise, por meio de simulação, pesquisa das variáveis de processo e verificação do projeto de ferramental, buscando responder a seguinte pergunta: As diferentes composições químicas são causadoras dos defeitos de micro porosidade?

#### 1.4 JUSTIFICATIVA

Justifica-se esse trabalho porque se trata de um item corrente com um grave problema de micro porosidade, sendo assim, será realizado ensaios comparativos através de simulações com o software magma para diferentes composições químicas, a fim de analisar a interferência do C, Si e Mg na formação do defeito. A utilização do software magma proporciona vantagens consideráveis ao processo, uma vez que possibilita prever por antecipação as propriedades do fundido, diminui os tempos para o início de produção, proporcionando a diminuição ou até mesmo a eliminação dos números de protótipos experimentais, apresenta redução de peças não conformes, diminui o consumo de energia elétrica, entre outros.

#### 1.5 OBJETIVOS

##### 1.5.1 Objetivo Geral

Esse estudo tem por objetivo realizar uma análise das possíveis causas geradoras de micro porosidade em um item corrente de produção, através de ensaios e simulações realizadas pelo software magma onde serão realizadas comparações para diferentes composições químicas.

##### 1.5.2 Objetivos Específicos

Em conformidade com o objetivo geral, os objetivos específicos são:

- a) Análise da falha através do software magma (micro porosidade);
- b) Comparativo dos ensaios de laboratório com ensaios computacionais;
- c) Variação a composição química (C, Si e Mg) para encontrar variação de falha



## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo enfatiza-se a fundamentação teórica sobre o tema, com uma breve descrição sobre fundição e seus processos. Também os principais defeitos decorrente registradas pela empresa em questão e algumas informações significativas no que diz respeito ao defeito por micro porosidade.

### 2.1 INTRODUÇÃO A FUNDIÇÃO

Soares (2000) enfatiza que a fundição se destaca sobre os processos de fabricação existentes no ramo da metalurgia, sendo que, itens oriundos desse processo podem ser encontrados praticamente em todos os segmentos da indústria. Cabe salientar que, o processo de fundição é capaz de fabricar peças simples citando como exemplo, as tubulações utilizadas em bueiros, porém, pode-se fabricar peças de extrema responsabilidade e complexidade, como as utilizadas em aviões e equipamentos espaciais.

De acordo com Oliveira (2013), o processo de fundição tem sua consolidação em transformar a estrutura física do material, onde esse ferro é aquecido por intermédio de um forno, passando do estado sólido para o estado líquido. Este por sua vez, após ter atingido a temperatura recomendada e ajustadas as características químicas do material é vazado para dentro da cavidade de um molde, retendo as formas e dimensões pré-determinadas pela peça que se deseja produzir, conforme pode ser observado na Figura 1. A Figura representada como (1.a) demonstra o momento em que o metal é vazado para o interior do molde, já a Figura (1.b) representa o vazamento concluído.

Figura 1 - Vazamento de metal liquido no molde



Fonte: Coutinho Neto (2004).

O processo de fabricação por fundição não garante exatidão nas dimensões das peças, podendo sofrer variações em torno de 0,8 mm a 1,2 mm, dependendo do tamanho da peça, tendo com isso, a necessidade de retrabalho através do processo de usinagem, para a retirada do material excedente (OLIVEIRA, 2013).

A fundição para muitos casos possui vantagem se comparado a outros processos de fabricação, pois se analisarmos a produção de peças com cavidades internas, bem como, a produção de peças extremamente grandes, tornam-se muito menos complexas produzi-las, como podemos ver conforme Figura 2. Porém, as propriedades mecânicas de peças fundidas são geralmente inferiores às produzidas como, por exemplo, em um processo de conformação (MACHADO, 2002).

Figura 2 – Peças com cavidade produzidas por fundição



Fonte: Machado (2002).

Sendo assim, Callister (2002), diz que a utilização da fundição justifica-se mediante a 3 pontos fundamentais:

“...(1) a forma acabada é tão grande ou complicada que qualquer outro método seria impraticável, (2) uma liga específica possui uma ductilidade tão baixa que a conformação tanto a quente como a frio seria difícil, e (3) em comparação a outros processos de fabricação, a fundição é o processo mais econômico (CALLISTER, 2002, p. 264) ...”

## 2.2 PROJETO

De acordo com Wobeto (2008), o mercado mundial tornou-se mais competitivo impulsionado com o aumento da demanda de automóveis e de máquinas agrícolas, pois com a modernização do campo, fez com que as indústrias de fundição evoluíssem em seus processos produtivos, aumentando em

produtividade, diminuindo custos e uma melhora significativa na entrega de produtos com qualidade, obedecendo prazos de entrega.

Furtado (2012), salienta que um bom planejamento em projetos de fundição tem como principal objetivo o aumento da lucratividade, mesmo que indiretamente, preocupa-se em reduzir impactos ambientais, economizando recursos como exemplo, energia elétrica.

Segundo Wobeto (2008), o setor de planejamento recebe o pedido do clientes, esse pedido segue para o setor de projeto responsável pela elaboração do modelo da peça, que podem ser construídos em madeira, metal ou algum outro material similar. Após os modelos concluídos, torna-se possível fazer o molde que vai servir de matriz na confecção dos moldes em areia que receberão o metal líquido.

Neste sentido Chiaverini (1986), salienta que é de extrema importância considerar os fenômenos que ocorrem com a peça ao se solidificar dentro do molde, a fim de evitar que ocorra algum tipo de defeito. Nesse caso, os fatores a considerar são:

- Considerar a contração do metal ao solidificar;
- Considerar uma espessura mínima de parede;
- Evitar fissuras de contração;
- Eliminar os rebaixos;
- Deixar sobremetal;
- Verificar a divisão do modelo;
- Estudar a localização dos machos;
- Prever colocação de canais de alimentação.

### 2.3 SISTEMA DE MOLDAGEM

De acordo com Chiaverini (1986), o molde é um recipiente contendo uma cavidade interna, da qual possui as formas e as dimensões da peça. É necessário que o molde seja capaz de resistir a entrada do metal em estado líquido a uma temperatura elevada como também suportar as contrações do metal no período de resfriamento.

O sistema de moldagem vem sofrendo alterações positivas em seus processos ao longo da história, com a modernização frequente e a mecanização dessa atividade tão importante para manter-se o padrão de qualidade nos moldes. Chiaverini (1986) salienta que a moldagem pode ser executada manualmente quando a atividade fim no processo de moldagem é exercida todo manual, onde a areia é adicionada no ferramental e comprimida com o auxílio de um soquete de madeira ou ferramenta similar, tudo executado manualmente.

Os processos de moldagem evoluíram e a fim de tornar as fábricas cada vez mais produtivas, nesse sentido os processos migraram de manuais para mecanizados. As máquinas desenvolvidas para essa atividade geralmente são de caráter exclusivas para cada processo e podem ser equipamentos de compressão, de impacto, vibratória, sopragem e máquina de projeção centrífuga (CHIAVERINI, 2002).

Neste sentido, enfatiza-se que "...existem tecnologias diferenciadas de compactação de moldes, sendo que a forma com que o molde é adensado pode impactar diretamente na qualidade do fundido". (MAIS; GUESSER; MASIERO, 2014).

#### 2.4 MOLDAGEM EM DIFERENTES TIPOS DE AREIA

De acordo com Callister (2002), a utilização de areia para confecção de moldes e machos, é um dos métodos para obtenção de peças fundidas mais utilizados hoje na indústria, incentivado pelo baixo custo e uma manufatura tanto quanto mais simples. Neste sentido Kondic (1973), enfatiza que uma das razões que explica sua utilização é a abundância e a facilidade de extração.

Segundo Soares (2000), a fundição disponibiliza de diversos processos para a confecção dos moldes e machos, variando de acordo com o material a ser fundido ou mesmo a característica da peça, nesse sentido segue os mais utilizados: Moldagem em areia verde, moldagem *shell moulding* (moldura de casca), moldagem em areia-resina e moldagem / CO<sub>2</sub>.

### **2.4.1 Moldagem em areia verde**

O processo de moldagem por areia verde é considerado o mais utilizado na indústria de fundição, não apenas por ser considerado um modo barato, mas também por possibilitar a confecção de molde com extrema qualidade, podendo ser utilizados tanto em metais ferrosos como em metais não ferrosos, sendo que, os principais componentes da areia verde são: areia, bentonita (argila desidratada que serve de liga para a mistura), pó de carvão e água (KLINSKY, 2013). Carnin (2008), enfatiza que se dá o nome de "areia verde" devida a mistura possuir umidade no momento em que o metal é vazado no molde.

### **2.4.2 Moldagem *shell moulding* (moldura de casca)**

Esse processo considerado mais recente, foi desenvolvido na Alemanha no período da segunda guerra mundial 1943, pode ser utilizado tanto para produção de moldes como de machos. Segundo Coutinho Neto (2004), esse processo é semelhante ao de areia verde, exceto por haver em sua mistura o aglomerante resina, cerca de 1 a 6% de seu volume, esse aglomerante garante a união dos grãos dispensando com isso a compactação da areia. O desenvolvimento de seu ferramental pode ser bastante complexo, porém, uma vez desenvolvido torna-se possível produzir 5 a 50 cascas por hora, dependendo do tamanho e complexidade. A espessura da casca é outra variável que pode mudar dependendo do tempo exposto ao molde, temperatura e da quantidade de resina empregada na mistura.

### **2.4.3 Moldagem em areia-resina**

Conhecido também como processo de cura a frio, esse método é mais utilizado em moldes de médio e grande porte, sua mistura é composta de areia, resina líquida e um componente catalizador realizado à temperatura ambiente. No momento que a resina líquida entra em contato com o catalizador dá-se início ao processo de endurecimento, podendo perdurar por alguns minutos ou mesmo várias horas, dependendo do processo utilizado e da quantidade de catalizador adicionados à mistura, sendo mais aplicado na produção de moldes do que em machos (ADEGAS, 2007).

De acordo com Coutinho Neto (2004), esse processo não é utilizado em larga escala por proporcionar um tempo mais elevado para a cura do molde, conseqüentemente terá uma produtividade baixa, como também, produz maior quantidade de resíduos sendo então, utilizado apenas para casos específicos.

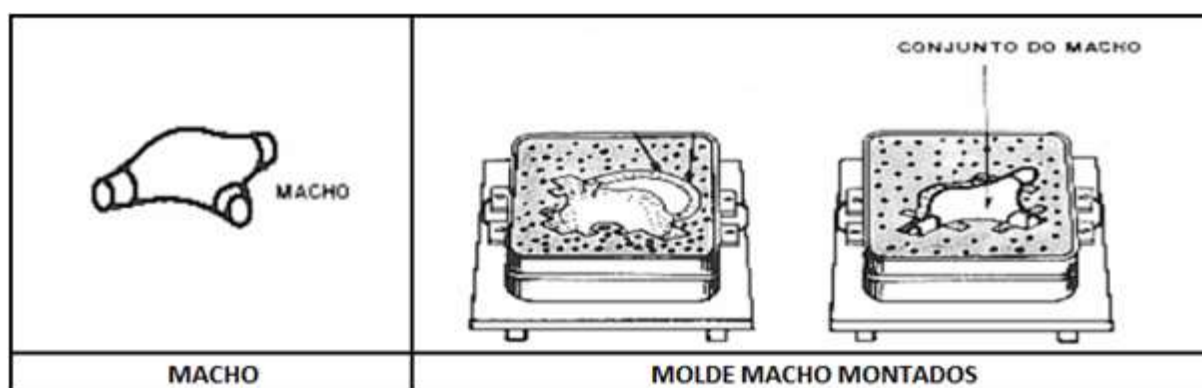
#### 2.4.4 Moldagem / CO<sub>2</sub>

Os moldes fabricados através do processo CO<sub>2</sub> tem por características a utilização da areia verde, que após prensado dentro da cavidade de um molde são submetidos ao gás CO<sub>2</sub> que é insuflado em um tempo médio de 25 segundos. No momento que o gás entrar em contato com o silicato de sódio, ocorre uma reação provocando o endurecimento instantâneo da areia. Esse método proporciona moldes mais resistentes, conseqüentemente peças com melhor acabamento se comparado ao processo por areia/verde de acordo com (COUTINHO NETO, 2004).

#### 2.5 MACHARIA E SUAS ESPECIFICAÇÕES

De acordo com Chiaverini (1986), os machos são utilizados na fundição em peças que apresentam alguma cavidade com finalidade de formar vazios, furos e reentrâncias da peça, conforme pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 - Colocação de machos no interior do molde



Fonte: Adega (2007).

Nesse sentido, Wobeto (2008), diz que eles devem ser refratários, robusto a ponto de resistir a entrada do metal líquido em sua volta e ainda se tornar quebradiço após o resfriamento facilitando a extração da peça acabada.

No entanto, Moreira (2004), *apud* Pedro (2013), salienta que é necessário que a areia usada na modelação dos machos seja selecionada, para que assuma características que lhe proporcionem estabilidade térmica e dimensional, é indispensável introduzir na mistura de areia base aglomerantes ou pequenas quantidades de outras substâncias que possibilitam maior resistência. As resinas utilizadas para dar liga aos grãos de areia são resinas furâmicas (apresenta base de álcool, sua cura se dá mediante a introdução de um catalizador), fenólicas (resina curadas através de um catalizador líquido), e tem por finalidade aumentar a velocidade de endurecimento, resistência e colapsibilidade do macho.

Por outro lado, para Coutinho Neto (2004), os machos são componentes sólidos, projetados com material de moldagem compatível a liga de metal a qual vai ser submetido, levando também em consideração o tamanho da peça a ser fundida. Os moldes dos machos são componentes com uma cavidade onde a mistura de moldagem é socada em seu interior, obtendo características próprias conforme cada aplicação, para a produção de machos são necessárias as características:

- Não apresentar desgaste ou deformação em suas características dimensionais;
- O macho produzido deve ser facilmente retirado;
- Bom acabamento superficial.

De acordo com Soares (2000), os processos mais utilizados na produção de machos tem sido o silicato/CO<sub>2</sub>, areia-resina e por último considerado por produzir machos mais complexos o processo por *shell moulding* conforme Figura 4.

Figura 4 - Machos produzidos pelo processo Shell Moulding



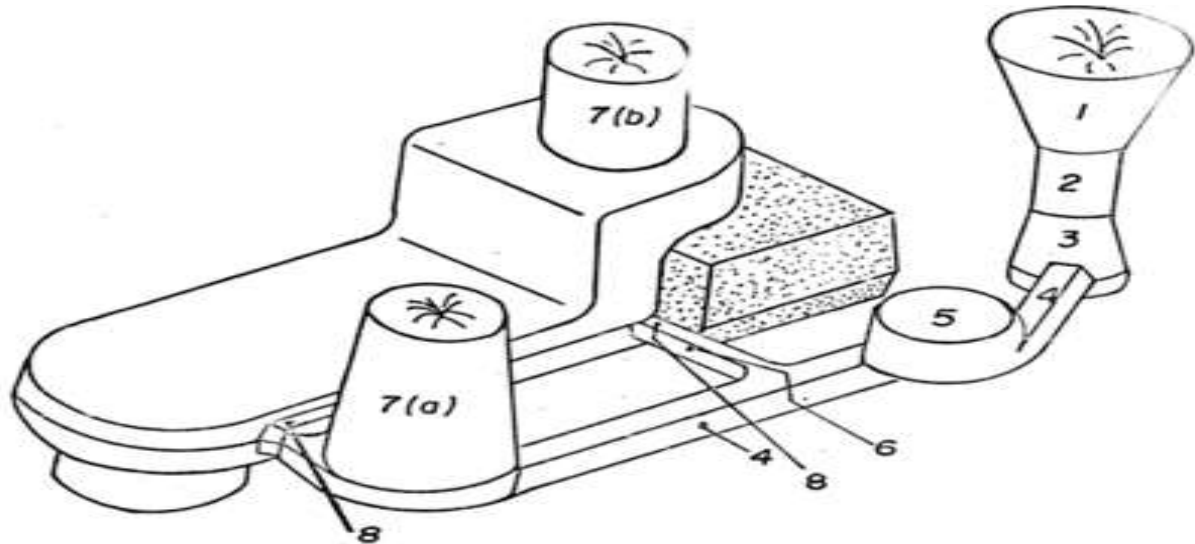
Fonte: Verran (2016)

Coutinho Neto (2004), diz que o processo *shell moulding* na produção de machos é bastante utilizado, pois devido ao aquecimento da areia aliado a resina na mistura, proporciona a formação de uma casca em volta do modelo, que oferecem maior resistência no momento do vazamento do metal em estado líquido, diminuindo a probabilidade de ocorrência de algum defeito nas peças.

## 2.6 SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO

O sistema de alimentação compõe uma parte muito importante em um processo de fabricação de peças fundidas, pois é através desse componente que o metal em estado líquido chega até a cavidade interna do molde. O vazamento do metal líquido para dentro da cavidade do molde é possível por meio de um furo deixado durante o processo de moldagem denominado canal de alimentação (WOBETO, 2008). A Figura 5 possibilita a visualização dos componentes internos de um sistema de alimentação conforme (KESSLER, 2009).

Figura 5 - Molde com sistema de canais e enchimento



Nomenclatura de um Sistema de Canais

1. Funil
2. Canal de descida
3. Pé do canal de descida
4. Canal de distribuição primário
5. Canal de espuma, escumudar ou retentor de escória
6. Canal de distribuição secundária
7. Massalote ou montante: (a) quente; (b) frio
8. Canal de ataque

Fonte: Kessler (2009).



De acordo com Kessler (2002), esses canais de alimentação, tem por finalidade conduzir o metal líquido até o molde, e podem ser constituídos por: funil ou copo, canal de descida, canal de distribuição e canal de ataque, que por sua vez possuem um papel muito importante não apenas de conduzir o material até o molde, mas de controlar variáveis que influenciam na qualidade.

### **2.6.1 Canais de alimentação**

De acordo com Marques (2008), a utilização de cálculos para o dimensionamento dos canais de alimentação caracteriza-se como indispensável na confecção de peças fundidas. O dimensionamento correto desse sistema corresponde a um escoamento suave do metal, permitindo que o esfriamento seja direcionado para os alimentadores, evitando com isso, a ocorrência de peças com defeito ocasionado por contrações ou gases aprisionados durante o enchimento.

Marques (2008), enfatiza que durante o vazamento do metal para a cavidade do molde, esse por sua vez está sujeito a três variáveis importantes a serem consideradas como, alteração de velocidade por efeito da gravidade, mudança brusca de direção no interior da árvore e o deslocamento das paredes na cavidade interna do molde. Essas variáveis proporcionam uma série de problemas, pois se não controladas por meio de um correto dimensionamento da árvore, expõe o metal a oxidação, inclusão de hidrogênio, como também, o deslocamento de gases indesejados para o interior da cavidade, comprometendo a qualidade da peça, sendo que, todo o sistema de alimentação pode ser visualizado conforme Figura 5.

### **2.6.2 Particularidades dos massalotes**

A utilização de alimentadores ou massalotes, conforme pode ser visualizado no item 7 da Figura 5, é considerada como essencial em um processo de fundição, pois sua principal função é compensar a contração que o material possa apresentar durante o processo de solidificação. É importante salientar que para um alimentador cumprir sua função com excelência, ele precisa ser colocado em locais que apresentem pontos quentes na peça, ou seja, a parte da peça que vai se solidificar por último; outro ponto importante é que o alimentador precisa apresentar um volume suficiente para atender a necessidade da peça (MARQUES, 2008).

Para Marques (2008), a colocação de um massalote só tem fundamentação quando o seu tempo de solidificação é superior ao da peça. A atribuição para esse sistema normalmente é de 20% para aços e de 30% para fundidos nodulares a cima do módulo dos pontos quentes. A utilização de camisas exotérmicas Figura 6, permite que o tempo de trabalho do massalote aumente o seu rendimento.

Figura 6 - Representação de luvas exotérmicas



Fonte: Abifa (2014).

De acordo com Marques (2008), outro fator importante que vale ressaltar, é que quando utilizado luvas exotérmicas nos massalotes o volume total de material utilizado é reduzido melhorando com isso o rendimento da placa.

## 2.7 CARGA METALICA

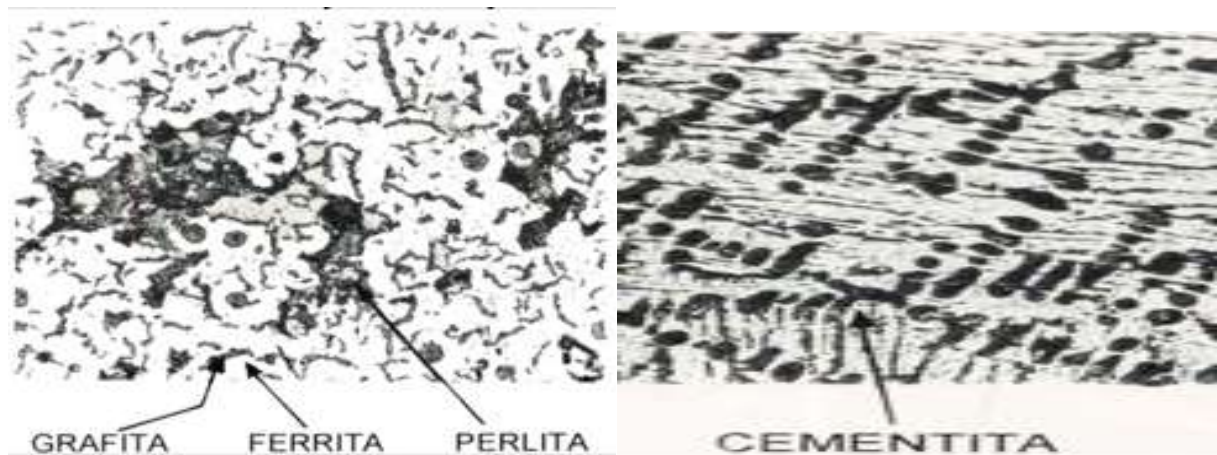
Para se obter uma qualidade boa em peças de fundição, é necessário que vários parâmetros em seu processo de fabricação sejam levados em conta, sendo um deles muito importante a composição química. De acordo com Kessler (2009), uma característica marcante nos ferros fundidos é a presença em sua composição estrutural, o carbono (C) e silício (Si) com teores alcançando cerca de 2,0 a 4,2 %, já a presença de certas substâncias mesmo que em pequenas quantidades como manganês (Mg); fosforo (P), enxofre (S), cobre (Cu), entre outros, são responsáveis pelas características que o fundido vai adquirir depois de concluído, como dureza, resistência a tração, usinabilidade e ductilidade.

Para Kessler (2009), as características que mais podem influenciar na estrutura são os percentuais presentes de carbono e silício, pois o carbono influencia diretamente na quantidade de grafita que irá se formar já o silício

corresponde como elemento grafitizante (Forma como se apresenta os veios da grafita), e sua presença vai determinar se a formação vai ser de um ferro fundido cinzento ou ferro fundido branco.

A presença do carbono e do silício combinados com velocidade de resfriamento estão diretamente ligados com a qualidade do produto acabado, pois um resfriamento mais rápido dificulta a decomposição da cementita tendendo a formação de ferro fundido branco, porém, quando o resfriamento for muito lento, tende a ocorrer a formação de grafita, conseqüentemente produzirá um produto acabado contendo em sua estrutura a formação de perlita, ferrita e grafita, conforme pode ser visualizado na Figura 7.

Figura 7 - Apresentação da matriz perlítica, ferrítica e grafítica



Fonte: Kessler (2009).

De acordo com Kessler (2009), teores de carbono, silício, manganês, fósforo e enxofre dosados em diferentes quantidades são responsáveis pela formação de diferentes ligas de fundidos, porém, a homogeneização dessas substâncias contribui para a formação de certas microestruturas importantes para a qualidade do fundido.

- Grafita – Possui grande importância para a qualidade de um fundido, sendo que, apresenta propriedades que irão definir, por exemplo, sua ductilidade e tenacidade. Sua estrutura pode apresentar-se em formato de lamelas ou arredondada, conforme a quantidade presente na composição. Podemos encontrar essa forma de grafita apenas em fundidos cinzentos e nodulares.

- Ferrita – Esse componente pode ser considerado como sendo ferro puro, porém suas características são de baixa dureza atingindo cerca de (80MB), sendo que essa baixa dureza proporciona uma ótima usinabilidade ao material, porém, essa fragilidade faz com que sua utilização seja em componentes que ofereçam pouco esforço.
- Cementita – Responsável pela formação do ferro fundido branco, pois em sua composição contém carboneto de ferro atingindo um índice de 6,7% de carbono. Essa composição proporciona ao fundido característica de alta dureza atingindo teores de até (700 HB). Utilizado geralmente em componentes que estejam sujeitos ao desgastes por abrasão. Não desejável sua presença nos fundidos cinzentos e nodulares.
- Perlita – A presença dessa substância em fundidos nodulares e cinzentos, proporcionam uma elevação nos teores de resistência e dureza. Sua característica proporciona um formato de finas lâminas distribuídas alternadamente. Sua classificação é intermediária, ficando entre a ferrita e a cementita. (KESSLER (2009)).

## 2.8 PRINCIPAIS FERROS FUNDIDOS

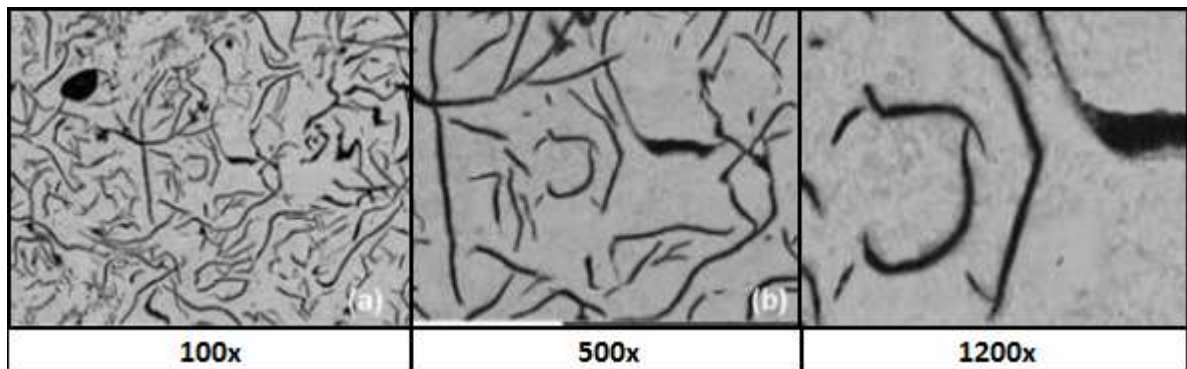
Diante de uma indústria metal mecânica, onde certas aplicações eram exclusivas apenas para ligas de aços, pode-se dizer que os ferros fundidos ocuparam um lugar de destaque, graças a melhorias em seus elementos de liga e um aperfeiçoamento na aplicação de tratamentos térmicos como também, a descoberta do ferro fundido nodular. Nesse sentido, torna-se de grande importância o estudo dos diferentes tipos de ferros fundidos para a engenharia, onde o engenheiro mecânico tem a opção de escolher o ferro fundido mais adequado de acordo com a necessidade e características do projeto (CHIAVERINI, 2002).

No entanto, Chiaverini (2002), enfatiza que são encontrados 6 tipos de ferros fundidos que variam de acordo com sua microestrutura e composição química sendo eles: ferro fundido cinzento, ferro fundido branco, ferro fundido mesclado, ferro fundido maleável, ferro fundido nodular e ferro fundido vermicular.

### 2.8.1 Ferro fundido cinzento

De acordo com Chiaverini (2002), o ferro fundido cinzento é uma liga muito utilizada na metalurgia, por apresentar características significativas, sendo elas a facilidade de fusão e moldagem, além disso, suas propriedades mecânicas apresentam uma boa resistência ao desgaste, capacidade boa em absorver vibrações e um custo de fabricação consideravelmente baixo, pois a sua usinabilidade é considerada excelente, sendo que, sua estrutura cristalina pode ser visualizada conforme a Figura 8.

Figura 8 - Estrutura cristalina do ferro fundido cinzento sem ataque



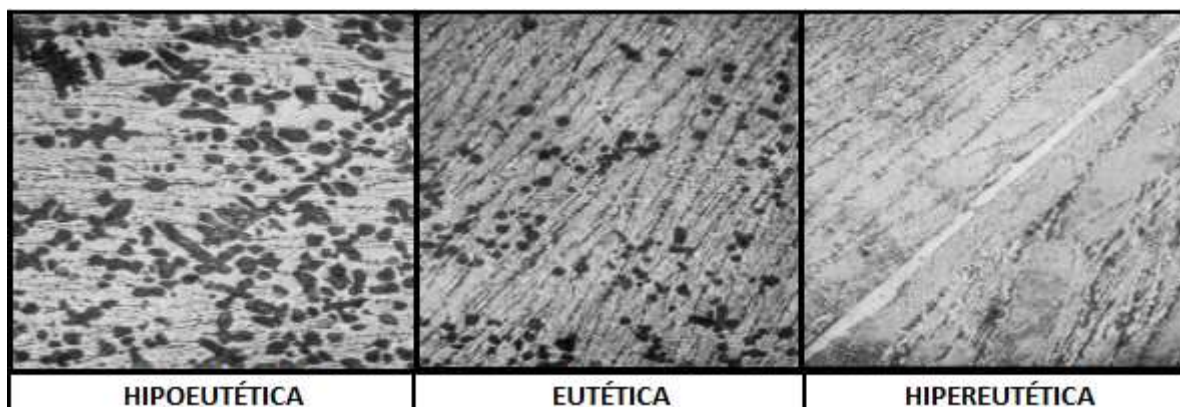
Fonte: Coutinho (2015).

O ferro fundido cinzento leva esse nome por proporcionar em sua superfície fraturada uma tonalidade acinzentada.

### 2.8.2 Ferro fundido branco

Recebe esse nome devido em sua superfície de fratura constituir uma tonalidade esbranquiçada, conforme pode ser visualizado na Figura 9. Esse fundido caracteriza-se por possuir alta dureza e elevada resistência a abrasão, adquiridas por um processo de resfriamento rápido e por apresentar baixas porcentagens de silício em sua composição química, entre 1 a 3%, sendo que, essa condição influencia diretamente a pouca grafitação (formato que a grafita se apresenta) da liga, tendendo a formação do ferro fundido branco.

Figura 9 - Estrutura cristalina do ferro fundido branco ampliado 100x



Fonte: Costa (2004).

Devido à dureza elevada, apresenta dificuldade de usinagem, tornando difícil mesmo com a utilização de ferramental de corte com alta qualidade. Sua aplicação tende a equipamentos de mineração, escavação, revestimentos de moinho, rodas de vagões, entre outros (CHIAVERINI, 2002).

### 2.8.3 Ferro fundido dúctil ou nodular

Essa liga de fundido denominada ferro fundido nodular ou ferro fundido dúctil, constitui em sua composição química grafita na forma de esferoides, destaca-se por apresentar características importantes como ótima ductilidade, boa tenacidade e características mecânicas excelentes, além disso, a característica mais importante desse fundido, seja o seu limite de escoamento, alcançando superioridade nos fundidos cinzentos, maleáveis e inclusive pode ser superior a algumas ligas de aço carbono mais comuns (CHIAVERINI, 2002). Na Tabela 1 pode-se visualizar a comparação entre alguns fundidos conforme a norma SAE J1887/2002.

Tabela 1 - Análise comparativa das propriedades dos ferros fundidos cinzento, nodular e vermicular

<b>Propriedades</b>	<b>Cinzento</b>	<b>Vermicular</b>	<b>Nodular</b>
Limite de resistência	55	100	155
Limite de escoamento	0	100	155
Modulo de elasticidade	75	100	110
Alongamento	0	100	200

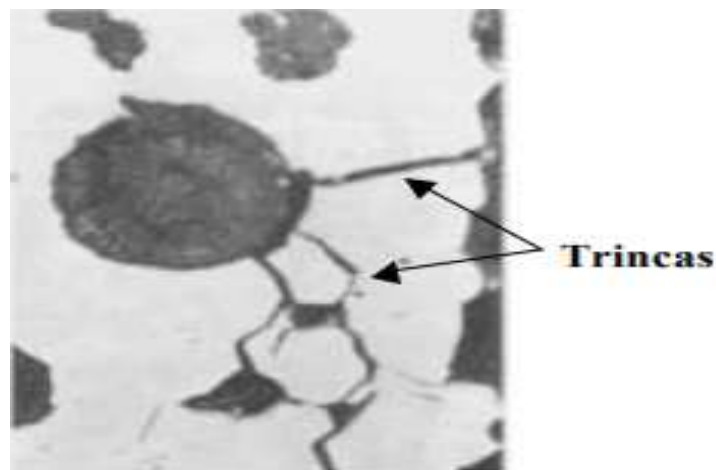
Fonte: Adaptado Vidal (2013).

De acordo com Souza (2012), para a formação das características que conhecemos nos fundidos nodulares, é necessário que a liga seja submetida a dois tratamentos, sendo eles a inoculação e a nodularização.

- Nodulação: esse processo ocorre no momento em que o metal é vazado do forno para o panelão, quando é adicionado um componente denominado de escorificante que tem como função precipitar as impurezas na superfície facilitando a sua retirada, além disso, promove a nucleação do metal proporcionando a formação de grafita.
- Inoculação: esse processo consiste pouco antes do enchimento dos moldes, quando o metal é vazado do panelão para os cadinhos de vazamento onde é adicionado o inoculante em uma proporção de 1 Kg para cada 250 Kg de metal. Esse elemento provoca uma reação química ao fundido fazendo com que ocorra uma alteração na grafita, ocasionando o formato esferoidal.

Maluf (2002), corrobora dizendo que essa característica arredondada na grafita, age como contentores de trincas, como pode ser visualizado na Figura 10, onde demonstra um nódulo inibindo que trincas se propaguem.

Figura 10 - Demonstração de um nódulo esferoidal anulando ação de trincas

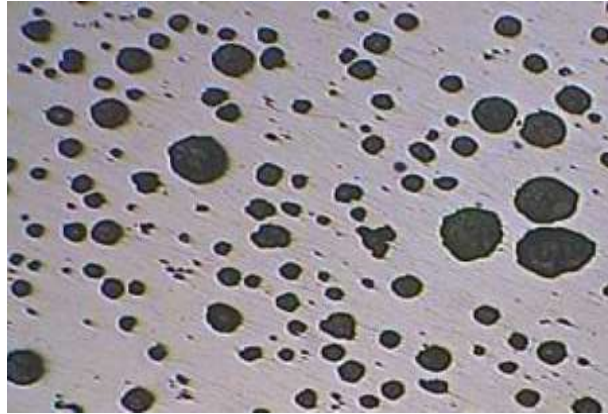


Fonte: Maluf (2002).

Um fator muito importante a salientar é que as características desejadas em um fundido nodular vão depender diretamente da composição de sua matriz, nesse sentido, para que tais quesitos sejam atingidos, seu percentual de grafita em formato esferoidal não deve ser menos que 80%, de acordo com a norma ASTM A247

(MALUF, 2002). A Figura 11 demonstra a microestrutura de um ferro fundido nodular com grafita esferoidal.

Figura 11 - Microestrutura de um ferro fundido nodular



Fonte: Souza (2012).

A produção de nodulares consiste na utilização de um forno de fundição, a carga metálica fundida no interior do mesmo proveniente da utilização de sucatas metálicas, retornos de fundição ou mesmo o próprio ferro gusa, submetidas a ajustes químicos caso haja necessidade (SOUZA, 2012).

Maluf (2002), saliente que, para a produção de ferros fundidos nodulares com qualidade, deve-se tomar alguns cuidados com a composição de sua carga metálica, pois comparado a outros fundidos, sua liga é considerada vulnerável a presença de impurezas. Nesse sentido, recomenda-se que a composição química para a produção de nodulares esteja conforme Tabela 2.

Maluf (2002), ainda diz que os ferros fundidos nodulares podem ser classificados ferríticos/perlíticos de acordo com sua estrutura química e características mecânicas, apresentando variações como:

- Nodular Ferrítico = Como o próprio nome já diz, esse fundido apresenta nódulos de grafita em uma matriz ferrítica. Essa composição proporciona a essa liga uma boa ductilidade, resistência a tração e impacto, sendo que, pode ser considerada semelhante a aços de baixo carbono.
- Nodular Ferrítico-Perlítico = Essa forma de nodulares é a mais encontrada, onde os nódulos de sua grafita apresentam matriz com ferrita e perlita, sendo que essa condição à colocam em uma posição intermediária em relação aos outros



fundidos nodulares. Sua principal característica consiste em apresentar uma boa usinabilidade e um custo de fabricação relativamente baixo.

- Nodular Perlítico = Conhecido por apresentar uma característica denominada como “olho de boi”, pois os nódulos de sua grafita apresentam uma matriz perlítica envolvida por uma pequena camada de ferrita, que justifica o nome dado. Esse nodular apresenta características significantes como ótima resistência a tração e fratura, boa durabilidade a abrasão e uma considerável ductilidade.

Tabela 2 - Composição química aceitáveis para produção de fundidos nodulares

Elemento	C	Si	Mg	Ce	S	Mn	P	Cr	Cu
<b>Ferrítico</b>	3 à 4 %	1,8 à 3 %	0,03 à 0,06	0,03% Máx	0,015% Máx	0,20% Máx	0,035% Máx	0,40% Máx	0,03% Máx
<b>Perlítico</b>	3 à 4 %	1,8 à 2,75 %	0,03 à 0,06	0,30% Máx	0,30% Máx	0,70% Máx	0,30% Máx	0,30% Máx	0,70% Máx
<b>Função</b>	Constituinte dos nódulos	Grafitizante, ferritizante	Esferoidizante	Esferoidizante em combinação com Mg	Combina com Mg	Formador de perlita	Fragiliza a estrutura	Potente formador de carbonetos	Resistência, dureza
<b>Observação</b>	Excesso causa grafita localizada	Controla a perlita "bruto de fusão"	Excesso promove carbonetos	Excesso promove carbonetos	Remoção do enxofre é essencial	Excesso promove carbonetos	Estabilizador da perlita	Retarda recozimento	Forte estabilizador da perlita

Fonte: Adaptado Maluf (2002).

Neste sentido, as características químicas e mecânicas dos ferros fundidos nodulares tem sim importância aos cuidados tomados em seus processos iniciais de fabricação, sendo que, um fator que deve ser levado em conta é a velocidade de esfriamento, pois se forem administrados com muita rapidez tendem a um aumento na formação de perlita e diminuição no diâmetro das partículas de grafita. (MALUF (2002).

#### 2.8.3.1 Particularidades do ferro fundido nodular GGG60

Sabe-se que a maioria dos países já possuem suas próprias normas técnicas para a classificação dos ferros fundidos, a fim de reduzir custos e possibilitar padrões mínimos de qualidade. A empresa a qual é responsável pela produção do item em estudo (roda dentada), apoia suas análises químicas e de propriedades

mecânicas conforme a norma DIN (*Deutsche industrie norm*) 1693, da qual estão centralizados todos os resultados apresentados para esse TFC. (GUESSER, 2009).

Brito e Gordo (2005), dizem que a norma DIN 1693, caracteriza-se por denominar seus fundidos nodulares com a sequência de letras GGG60 (representa o número e sua tensão mínima de rotura em kg/mm<sup>2</sup>), assemelhando-se conforme aos padrões internacionais como exemplo a norma ISO. Conforme a Tabela 3, podemos visualizar a composição química do fundido nodular GGG60 conforme a norma DIN 1693.

Tabela 3 - Composição química para o ferro fundido nodular GGG60 de acordo com a norma DIN 1693

Material	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cu	% Al	% Mg	% Cr	% Ni
GGG60	3,4	2,6	0,5	0,08	0,025	0,5	0,025	0,25	0,155	0,1
	3,65	2,9	0,55	Máx	Máx	0,55	Máx	0,05	Máx	Máx

Fonte: Adaptado Guesser (2009).

A correlação das análises correspondentes as propriedades mecânicas encontradas nos fundidos nodulares produzidos e relação aos valores conforme a Tabela 4 e com a norma DIN 1693, são de grande importância para que um padrão de qualidade seja mantido em um processo produtivo (KARSAY 1985).

Tabela 4 - Propriedade mecânica para o ferro fundido nodular GGG60 conforme a norma DIN 1693

Material	LR tração (Tensão Máx)	LE Escoamento (Tensão de Escoamento)	Alongamento	Dureza HB
GGG60	Min. 600 Mpa	Min. 380 Mpa	Min. 4%	217 a 269

Fonte: Adaptado Guesser (2009).

Esses parâmetros pré-determinados pelas normas regulamentadoras dos ferros fundidos nodulares, devem ser obedecidos categoricamente durante todo o processo de produção, afim de que, seus fundidos atendam ao especificado pelas mesmas (GUESSER, 2009).

## 2.9 FORNO POR INDUÇÃO

O processo de fabricação inicial em uma empresa voltada para fundição consiste na transformação do metal (sucata) do estado sólido para o estado líquido, pois, para isso é necessário que esse material seja aquecido a uma temperatura de fusão específica determinada para cada material, que pode ser ferroso ou não ferroso, para então, posteriormente ser vazado para dentro de um molde. Esse processo somente torna-se possível com a utilização de fornos de fusão específicos para essa finalidade, que podem ser totalmente distintos uns dos outros, variando conforme o metal a ser fundido, bem como a qualidade exigida nas peças ou quantidade conforme demanda da empresa (OLIVEIRA 2013).

A peça objeto desse estudo é proveniente de um processo onde o forno correspondente utilizado funciona por indução conforme Figura 12, porém de acordo com o Oliveira (2013), vários outros modelos de fornos de fundição são utilizados hoje, onde cada um deles possui suas particularidades e diferentes processos de funcionamento sendo eles os mais importantes: Forno cubilô; forno elétrico a arco e o forno por indução.

Figura 12 - Forno de indução



Fonte: Oliveira (2013).

Esse método de fusão de metais através da indução possui primeiros relatos de sua utilização na Inglaterra por volta do ano de 1887 por Ferranti, anos mais tarde, Kjellin construiu na Suécia o primeiro forno industrial com capacidade de produção de aço em torno de 80 kg por ciclo, alimentado por uma potência cerca de 78 kw (LOPES; NOVAIS; GERIOLE; 2011). Esse sistema posteriormente sofreu

alterações por diversos países, obtendo melhoria significativa tanto em qualidade de produção como também em produtividade e capacidade por ciclo, para chegar aos modelos disponíveis hoje nas siderúrgicas.

A utilização desse modelo de forno apresenta uma melhor eficiência em produtividade quando tratamos em fundir cargas metálicas condutoras, devido o forno trabalhar a base de indução eletromagnética, pois a funcionalidade desse modelo de forno tem por princípio formar uma corrente de Foucault (corrente induzida em massa metálica), precipitando um aumento elevado na temperatura precipitando a fusão do material. Neste sentido, devido a seu funcionamento os materiais mais utilizados para a formação das cargas constituem-se de sucata de aço e ferro fundido, massalotes, canais de alimentação, peças não conformes, ferro-silício e carbono (OLIVEIRA, 2013).

Lopes; Novais; Gerioli (2011) salientam que pode ser encontrado forno por indução com núcleo e fornos por indução sem núcleo, sendo este último menos produtivo que o primeiro.

Basicamente, o forno por indução sem núcleo compõe de um cadinho revestido internamente por um material refratário, além disso, seu transformador compõe-se por uma bobina geralmente construída em tubo de cobre vazado por onde passa a água responsável por resfriar o sistema e um conjunto hidráulico responsável por vascular o forno no momento do vazamento (LOPES; NOVAIS; GERIOLI, 2011).

Soares (2000), saliente que, as correntes induzidas provocam uma agitação no metal em estado líquido no interior do forno, semelhante a uma fervura bem agitada que pode ser bem vista em termos técnicos, pois esta agitação provoca uma boa homogeneização na mistura líquida tendo apenas o cuidado para que a agitação em excesso não danifique o refratário do forno.

Pode-se dizer que o forno por indução tem tomado o espaço de modelos como forno cubilô e forno a arco. Esta aceitação ocorre por serem muito mais versáteis simples de operar, podem ser trabalhados com cargas totalmente frias, fácil acesso ao metal líquido para adequação da composição química da carga e podem ser encontrados em tamanhos que variam de 500 Kg/h até 20 ton/h, (SOARES,2000).

## 2.10 DEFEITOS DE FUNDIÇÃO

No decorrer dos últimos anos, a indústria de fundição se deparou com um mercado cada vez mais competitivo, forçando os empresários do ramo a buscarem alternativas cada vez mais eficazes para se manter no mercado e conseguir fazer frente a concorrência, dentre elas está o aumento da qualidade dos seus produtos; prazos de entrega mais rápidos e a diminuição nos custos de produção. Dentro desta diminuição dos custos de produção é de importância do profissional do ramo de fundição conhecer as principais falhas que ocorrem em seu processo, mas também entender como elas acontecem no intuito de tomar ações corretivas rápidas e eficientes (OLIVEIRA, 2013).

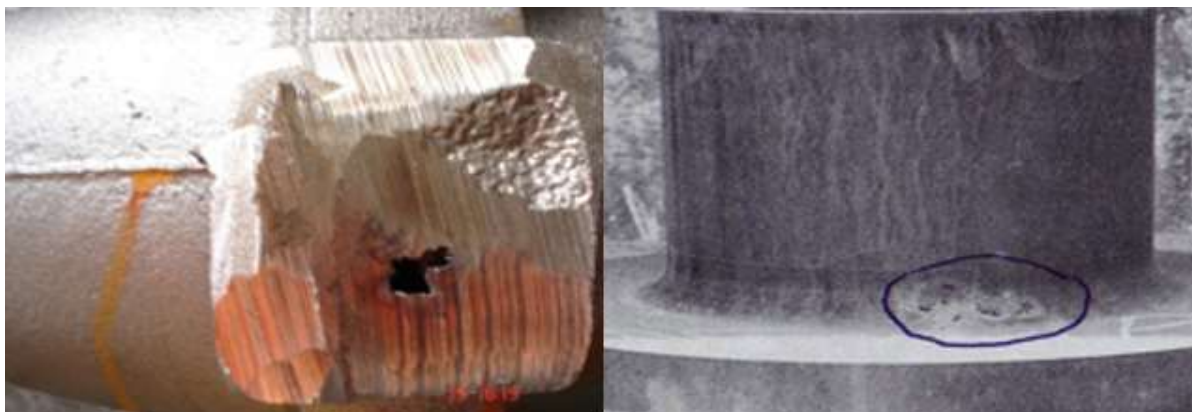
Os processos de fundição caracterizam-se por uma significativa quantidade de transformação físico-químicas dos materiais envolvidos. A possibilidade da ocorrência de defeitos pode ser gerada em diversos momentos deste processo (GIULIANO, 2008, p.64) ..."

Giuliano (2008), diz que inúmeros são os tipos de defeitos encontrados em fundidos, no entanto, alguns são mais comuns, sendo eles por: rechupe; inclusão; bolha de gás; cicatriz; desencontro; erosão; escamas de expansão; quebra de molde; rabo-de-rato e porosidade.

### 2.10.1 Defeito por rechupe

Essas regiões do fundido que apresentem pontos quentes, normalmente tem maior probabilidade de apresentar defeito por rechupe, pois no momento em que o metal esta resfriando ele é submetido a contrações e conseqüentemente a formação de cavidades e rachaduras nas peças, conforme Figura 13, e se não forem compensadas de uma forma correta (MARQUES, 2008).

Figura13 - Aparência da peça submetida a defeito por rechupe



Fonte: Kessler (2011)

Marques (2008) salienta que para tentar evitar esse tipo de transtorno, é necessário utilizar uma técnica denominada por solidificação direcionada, que consiste na utilização de massalotes alimentadores que terão a finalidade de compensar a peça no momento em que ela estiver apresentando contrações. A ideia é fazer com que ocorra o resfriamento primeiramente das partes mais finas da peça, migrando posteriormente para partes, mas grossa ficando por último os alimentadores.

### 2.10.2 Defeito por inclusão

Defeito por inclusão ocorre quando o metal está sendo trabalhado no estado líquido, e denomina-se como sendo inclusões metálicas e não metálicas (MARQUES, 2008).

De acordo com o mesmo autor, esses corpos estranhos indesejados que provocam prejuízos no fundido apresentam-se em duas classes; as inclusões endógenas por se tratar de reações químicas no próprio fundido com metais da própria mistura, ou ainda por inclusões exógenas, que consistem em sujidades inerentes do meio externo.

#### 2.10.2.1 Inclusão de escória

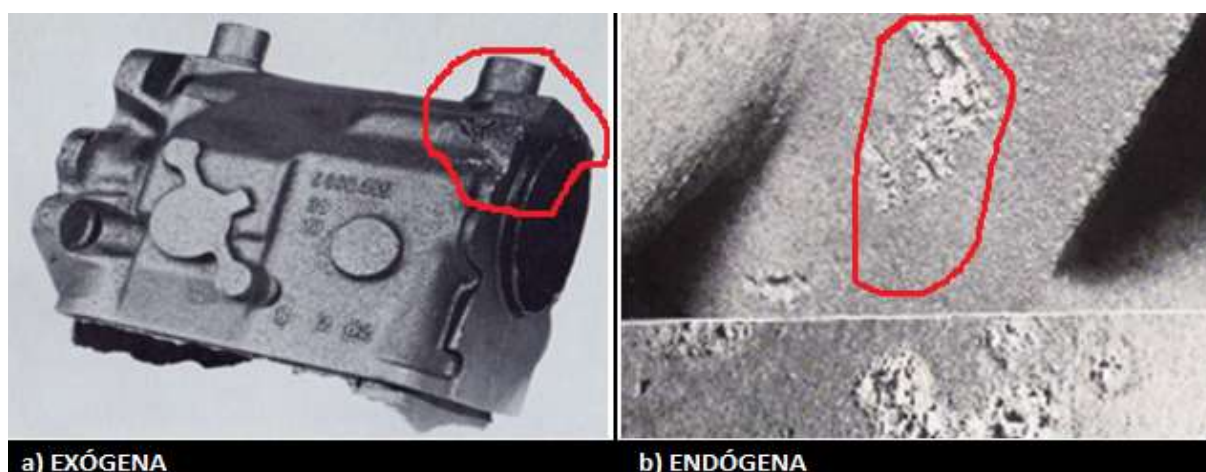
A inclusão de escória também denominada como endógenas conforme Figura 14(b), possuem em sua composição resquícios de nitretos, sulfuretos e óxidos (são formados mediante a reação química do metal com substâncias indesejadas na mistura), normalmente provenientes de matéria prima como sucata, contendo

algumas impurezas como tintas, graxas e oxidação. Essas inclusões não ocorrem em grandes quantidades, sendo necessário a utilização de um microscópio para tornar possível a sua visualização (MARQUES, 2008).

#### 2.10.2.2. Inclusão de areia

Diferente do defeito por inclusão de escória, a inclusão por areia ou exógena embora seja mais comum, caracteriza-se por ser mais agravante, pois a inclusão de areia ou mesmo de partículas resultantes de desgaste dos refratários podem provocar alterações químicas e mecânicas nas peças fundidas (MARQUES, 2008). A Figura 14(a) torna possível a visualização das características de uma peça com esse defeito.

Figura 14 - Imagem de uma peça submetida a defeito por inclusão



Fonte: Kessler (2011).

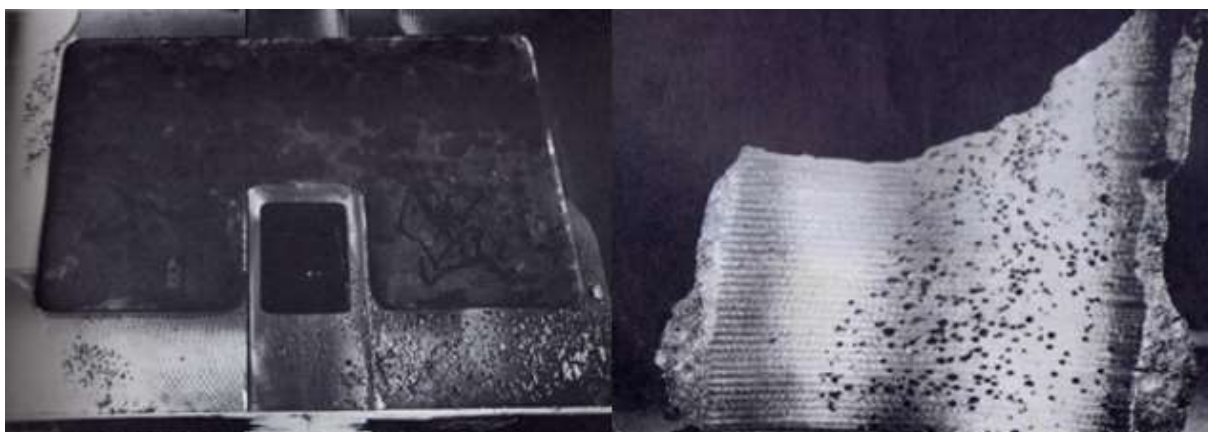
Kessler (2011), diz que o defeito por inclusão de areia nada mais é do que resultado da ocorrência de outros defeitos, como: erosão, escamas, rabo de rato, quebra de canto de molde, fechamento incorreto de moldes, movimentação inadequada dos moldes, falta de limpeza dos moldes, sendo eles, provenientes de uma areia com baixo teor de bentonita, muito seca, má prensagem, entre outros.

#### 2.10.3 Defeito por bolhas de gás

Esse defeito possui uma forma de cavidade aberta com a aparência de uma bolha e geralmente apresenta-se de duas formas, a primeira é caracterizada por uma falha proveniente do molde e caracteriza-se por localizar-se bem próximo da

superfície da peça não sendo possível sua visualização por possuir uma fina camada de metal, a segunda é provocado por carepas de oxidação que formam um aspecto de crosta na parte superior da peça e podem ser visualizada, logo após o jateamento (KESSLER, 2011). A Figura 15 mostra as peças sujeitas a esse defeito.

Figura 15 - Aspecto de peças com defeito ocasionado por bolha de gás



Fonte: Kessler (2011).

De acordo com Kessler (2011), as principais causas desse defeito, são provocadas por um teor elevado de umidade na areia devido ao excesso de argila; adição de alguns voláteis como carvão em pó em excesso e perda ao fogo muito alto devido à baixa adição de areia base na mistura. Possíveis soluções podem estar ligadas a cuidados com a quantidade de umidade da areia e melhorar o funcionamento do separador magnético com o intuito de eliminar a presença de carepas de oxidação na mistura caso seja constatado ser essa a causa raiz do defeito.

#### **2.10.4 Defeito por cicatrizes**

Esse defeito possui uma característica inteiramente superficial, podendo ser facilmente visualizado logo depois do desmolde conforme demonstra a Figura 16, seu aspecto lembra as cicatrizes deixadas pela varíola por apresentarem relevos em grande quantidade sobre a peça (KESSLER, 2011).



Figura 16 - Representação por imagem de um defeito por cicatrizes



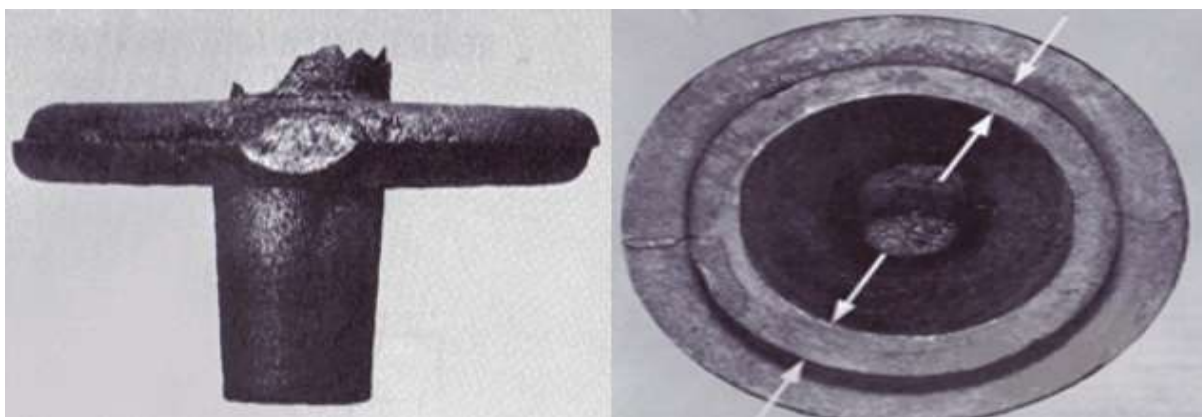
Fonte: Kessler (2011).

De acordo com Kessler (2011), as causas possíveis desse defeito, são ocasionadas devido a presença de sujidade em grande quantidade na areia ou mesmo o vazamento do metal estando ele muito viscoso ou ainda frio, sendo que, pode-se amenizar o seu aparecimento com a renovação da areia base e cuidados com a temperatura correta de vazamento do metal de fundição.

#### 2.10.5 Defeito por desencontro

As condições para que o defeito aconteça é bastante propícia quando não se toma as devidas precauções com a manutenção das caixas de molde, por ser comum com o passar do tempo ocorrer algumas folgas por desgaste no sistema de fechamento, outro cuidado importante é com a montagem do modelo na placa para que não fique deslocado e cuidados na movimentação dos modelos prontos, a fim de evitar batidas entre si (KESSLER, 2011). Visualiza-se na Figura 17 o defeito.

Figura 17- Representação por imagem de um defeito provocado por desencontro



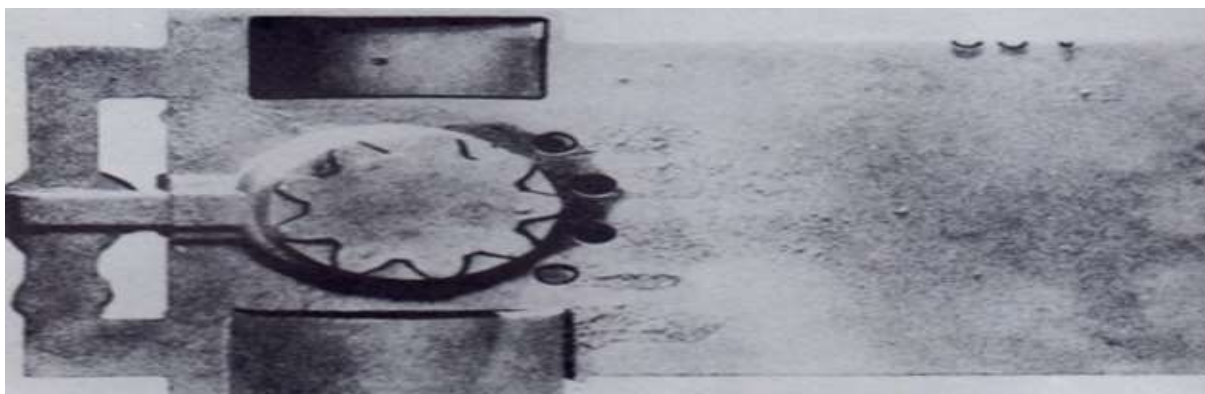
Fonte: Kessler (2011).

As soluções para esse defeito, pode-se dizer que são basicamente operacionais, sendo necessário a criação de um plano de manutenção preventiva nos ferramentais e qualificação do pessoal operacional, com os cuidados no processo.

#### **2.10.6 Defeito por erosão (lavagem / arraste)**

De acordo com Kessler (2011), a característica física das peças com esse tipo de defeito normalmente são irregularidades na superfície apresentando um aspecto rugoso. Podem ser relatadas várias causas, sendo que as mais comuns são causados pelo uso da areia com muito pouca umidade, processo de produção de moldes muito rápido, mal dimensionamento do canal de ataque e uma granulometria da areia muito grossa ou muito fina. Na Figura 18, demonstra uma peça submetida a defeito por (lavagem / arraste).

Figura 18 - Características do defeito por lavagem / arraste



Fonte: Kessler (2011).

Defeito relacionado à erosão pode ser solucionado, tomando cuidado no processo de dosagem de cada componente na mistura da areia de moldar (KESSLER, 2011).

#### **2.10.7 Defeito por escamas de expansão**

Essa forma de defeito possui uma característica de formar uma camada de pouca espessura conforme pode ser visualizado na Figura 19, normalmente irregular presa na peça por apenas alguns pontos de fixação, sendo preenchida com areia entre a peça e a camada fina de metal. Para Kessler (2011), o defeito tem uma

probabilidade de ocorrer em qualquer região da peça, porém, a tendência é que ele apareça com maior frequência nas partes superiores das peças.

Figura 19 - Representação por imagem de um defeito provocado por desencontro



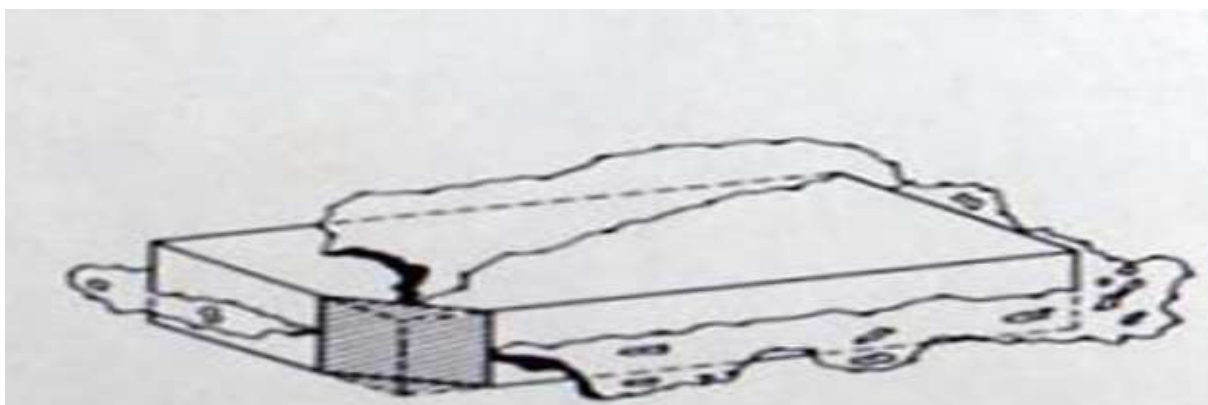
Fonte: Kessler (2011).

Esse problema é causado quando partículas de silício se expandem no momento em que o metal está sendo vazado, por conta disso, uma fina camada de areia penetra no molde resultando nesse defeito. As soluções são diversas, porém as mais importantes seriam controlar defeitos na mistura da areia; diminuir temperatura de vazamento e aumentar velocidade de vazamento (KESSLER, 2011).

#### **2.10.8 Defeito por quebra de molde**

Esse defeito permite ser detectado antes, durante ou depois do vazamento quando a peça é desmoldada (KESSLER, 2011). Conforme Figura 20 pode-se visualizar a aparência de uma peça fundida submetida a esse defeito.

Figura 20 - Representação por imagem de um defeito provocado por quebra de molde



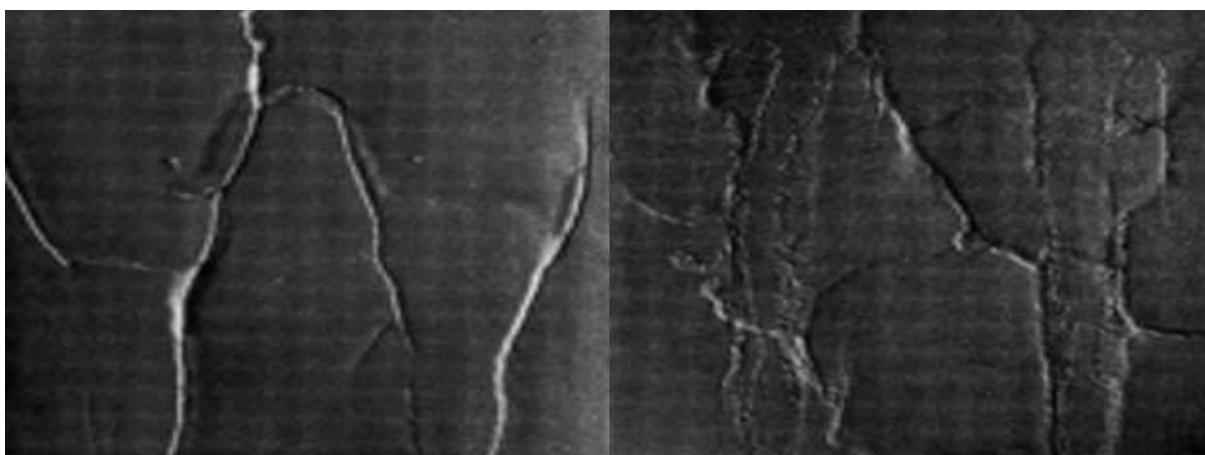
Fonte: Kessler (2011).

Kessler (2011), enfatiza ainda que tal defeito pode ser provocado por empenamento na placa do molde, resultando em moldes que não encaixam-se entre si (negativo/positivo), ou ainda, o defeito pode estar diretamente relacionado a baixa qualidade da areia/mistura utilizada no processo. Para o autor, essas falhas podem ser solucionadas criando *chek list* para as placas e melhorar a eficiência da mistura da areia e dos processos de moldagem.

#### **2.10.9 Defeito por rabo-de-rato**

Apesar de ser provocado pelo mesmo fator que causa o defeito por escama de expansão, esse por sua vez não provoca a ruptura da camada da areia seca ocasionando a cavidade, mas provoca pequenos veios na parte inferior das peças como pode ser vista na Figura 21, semelhante a estrias interligadas uma com as outras, podendo atingir até 5 mm de profundidade (KESSLER, 2011).

Figura 21 - Representação por imagem de um defeito provocado por rabo-de-rato



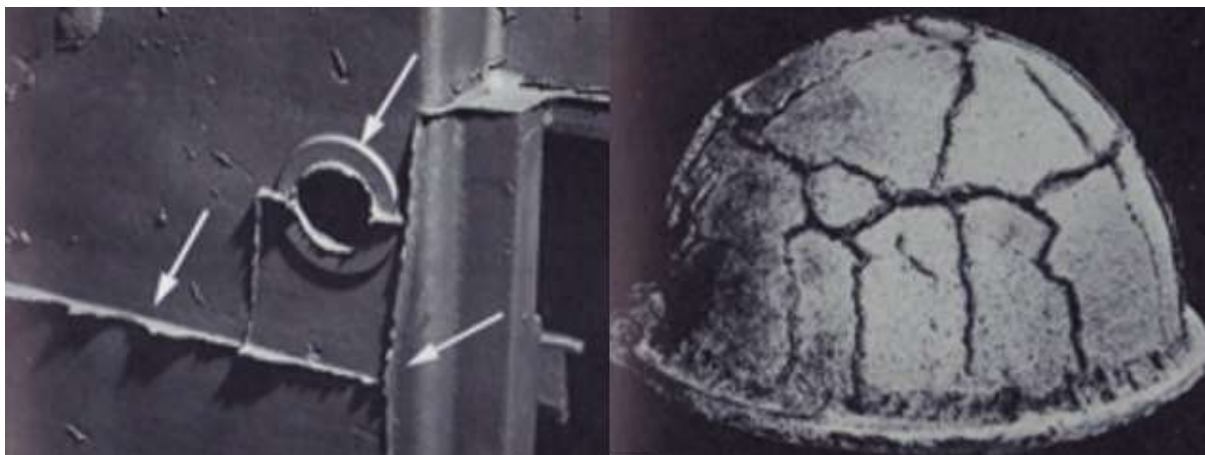
Fonte: Kessler (2011).

Para solução desse defeito, pode-se tomar como base as mesmas ações tomadas para o defeito por escama de expansão.

#### **2.10.10 Defeito por rebarba**

Defeito por rebarba são provocados por pequenos espaços formados por alguma anormalidade nos moldes ou machos, esses pequenos espaços preenchidos pelo metal posteriormente provocarão o surgimento de saliências na superfície das peças (KESSLER, 2011). Essas saliências podem ser visualizadas na Figura 22.

Figura 22 - Representação por imagem de um defeito provocado por rebarba



Fonte: Kessler (2011).

Esses defeitos normalmente surgem, quando a umidade, granulometria e compactação da areia não estão nos padrões esperados, consequentemente os moldes e machos produzidos apresentam baixa plasticidade com excesso de friabilidade. Apesar do defeito não condenar a peça a não-conformidade, o retrabalho de reparação pode ser considerado um tanto exaustivo (KESSLER, 2011).

#### **2.10.11 Defeito por porosidade**

A fundição ao longo dos últimos anos vem enfrentando um cenário onde as empresas ligadas a produção de equipamentos, máquinas agrícolas, indústria automobilística, entre outros, alteram seus modelos produzidos quase todos os anos. Essas alterações fazem com que as indústrias do ramo de fundição tendem a se adequar a um mercado cada vez mais exigente, que requerem um tempo de resposta mais rápido na entrega de novos produtos, que por sua vez, se tornam cada vez mais complexos.

Nesse sentido, por apresentar um baixo custo e proporcionar a produção de peças com geometrias diversas, as fundições tem utilizado para confecção de seus produtos, moldes e machos em areia (ROMUALDO, 2016).

De acordo com Romualdo (2016), a utilização da areia na produção de moldes e machos também apresenta algumas variáveis que necessitam ser controladas, e são responsáveis por um número maior de refugo ou de retrabalho se

comparado a outros processos. Porém, uma variável importante a ser considerada é o surgimento de pequenos poros também conhecidos como “porosidade” que apareceram normalmente durante a usinagem, e são ocasionadas por bolhas de gás retidas durante a solidificação do fundido.

Kessler (2011), diz que o defeito por porosidade são pequenos espaços indesejados no interior das peças fundidas, provocadas pela presença de gases, provenientes de reações químicas do próprio metal ou devido a reações sofridas pelo contato do metal aquecido com as paredes do molde.

Segundo Habibullah (2011), uma característica desse defeito é que as paredes internas das bolhas são lisas, com aspecto arredondado e não possui nem uma ligação com o exterior, sendo assim, não podem ser identificadas apenas com uma inspeção visual, sendo normalmente contatadas durante o processo de usinagem, conforme demonstra a Figura 23.

Figura 23 - Defeito de porosidade



Fonte: Souza (2015).

Esse defeito no entanto vai muito além de apresentar apenas alguns orifícios no interior das peças, pois essas discontinuidades podem causar sérios problemas como provocar o início de alguma trincas, como também ser a causa da diminuição da resistência mecânica do componente. Outro fator é quando utilizado peças que apresentam porosidade em motores, bombas, equipamentos pneumáticos, entre outros, podem apresentar algum tipo de vazamento prejudicando o funcionamento do sistema, além de prejudicar processos primários como usinagem e soldagem (ASM VOL, 1998).

Para Habibullah (2011), esse defeito pode ser causado por diversos fatores como: ar aprisionado na cavidade no momento do vazamento; reações entre a parede dos moldes e machos; gases dissolvidos pela reação de alguma substância da própria liga; decomposição de alguma substância adicionada da areia (água, carvão e ou algum volátil); gases atmosféricos; contração; revestimento úmido ou químico, entre outros.

No entanto, esses defeitos podem ser divididos em duas categorias, de acordo com Habibullah (2011).

- Endógenas – esse gás é fruto de reações químicas que ocorrem na própria mistura, essa reação ocorre durante todo o processo de fundição que pode ser no momento da fusão, fundição ou enquanto se solidifica. O gás mais comum presente é o oxigênio.
- Exógenas – esses gases são formados no momento em que o metal superaquecido entra em contato com as cavidades internas do molde e machos. A formação desses gases geralmente são oriundas devido a umidade da areia dos moldes, queima de substâncias orgânicas como carvão presente na areia, dilatação do ar entre poros do molde, queima da resina presente nos machos, entre outras substâncias.

Por tanto, de acordo com Habibullah (2011), ao analisar todas as causas que podem estar ocasionando o excesso de formação de gases, pode-se dizer que o de maior relevância sejam os causados por exógenas, por serem tratadas de falhas em processos externos, como elevada umidade de areia, granulometria da areia errada não permitindo a formação de poros para saída dos gases, permeabilidade irregular do molde, excesso de ligantes nos moldes e machos, areia rica em substâncias orgânicas, entre outros. Conforme Tabela 5 pode-se visualizar em porcentagem os maiores formadores de gás no interior do molde.

Tabela 5 - Fontes causadoras de gás em um molde

<b>Processo da origem dos gases</b>	<b>Molde de areia</b>
Evaporação de água dos moldes e da mistura de areia	8 à 12 %
Queima de material orgânico	5 à 8 %
Separação de material orgânico	45 à 65 %
Ejeção de água a partir da estrutura mineral	15 à 25 %
Decomposição de impurezas	1 à 5 %
Dilatação e deslocamento do ar	< 1 %
Dissociação dos gases	8 à 12 %

Fonte: Adaptado de Habibullah (2011).

Visualizando a Tabela 5, pode-se observar que o maior formador de gases é dada pela separação de material orgânico. Esse desprendimento acontece no momento em que os componentes orgânicos presentes a mistura da areia são queimados. A queima promove a formação de gases como dióxido de carbono e monóxido de carbono, que por sua vez, não sendo eliminados infiltram-se no metal causando a porosidade (HABIBULLAH, 2011).

Outra forma, bastante comum do aparecimento de porosidade em peças fundidas ocorre devido a erros de projeto ou falta de treinamentos aos colaboradores, denominado conforme (CONCER, 2016).

- Macroporosidade – resultado de problemas durante a alimentação do molde, devido a erros de cálculos nos canais de alimentação causando o excesso de velocidade ou lentidão ou ainda turbulência, esses erros vão provocar o aprisionamento do ar ocasionando o defeito.
- Microporosidade – normalmente ocorrem por apresentar pontos quentes devida aos moldes apresentarem baixa perda de calor ou ainda devido ao posicionamento dos massalotes em local errado. Esse pontos quentes por sua vez no momento em que resfriam exercem contração no material provocando com isso a porosidade.

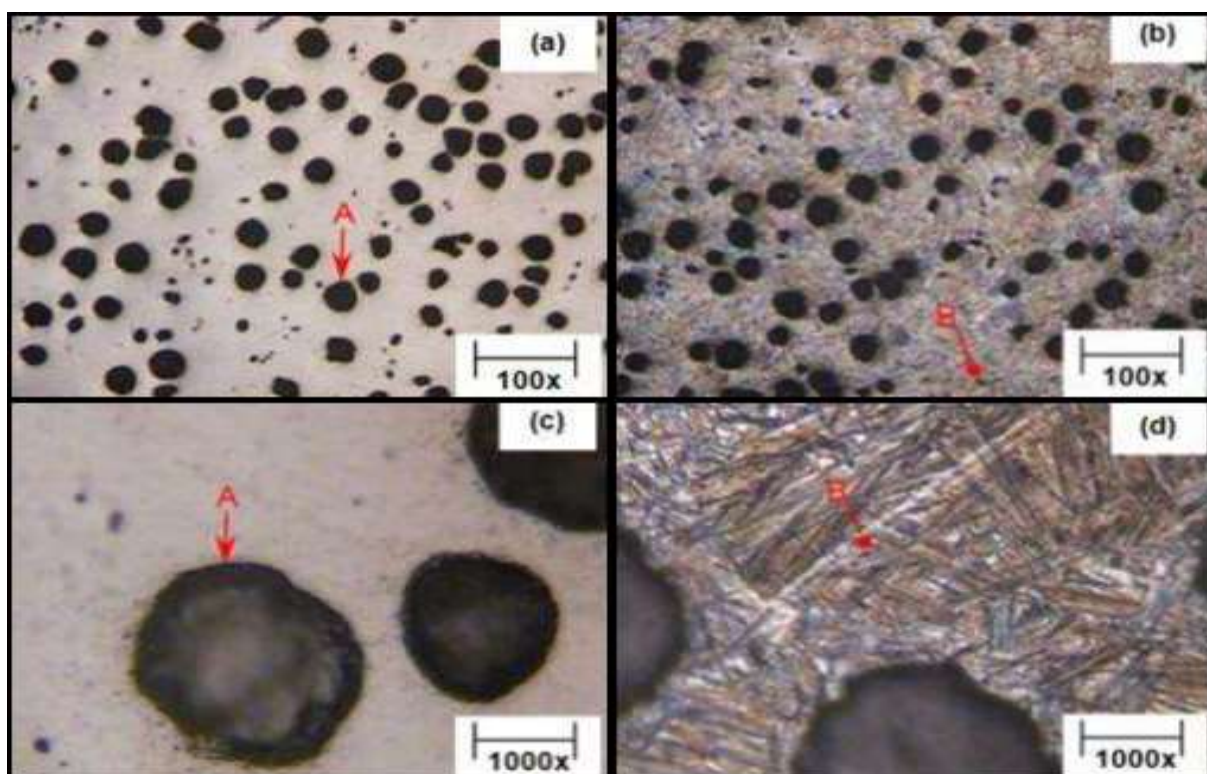
## 2.11 ENSAIO METALOGRAFICO

O ensaio metalográfico corresponde a verificação propriamente dita do material, pois essa análise torna possível a comprovação de algumas características importantes como a composição química, suas propriedades mecânicas, estrutura e a certificação de que a sua aplicação está sendo de forma correta. Sendo assim, o ensaio metalográfico se divide em estudo morfológico (micrográfico ou micrografia) e



estrutural (macrográfico ou macrografia ) (ROHDE, 2010). De acordo com a Figura 24, é possível visualizar uma análise micrográfico sem ataque e com ataque por nital com ampliação microscópica de 100X, e outras duas amostras, uma sem ataque e outra com ataque por nital com resolução microscópica de 1000X.

Figura 24 - Análise metalografica com auxílio de microscópio



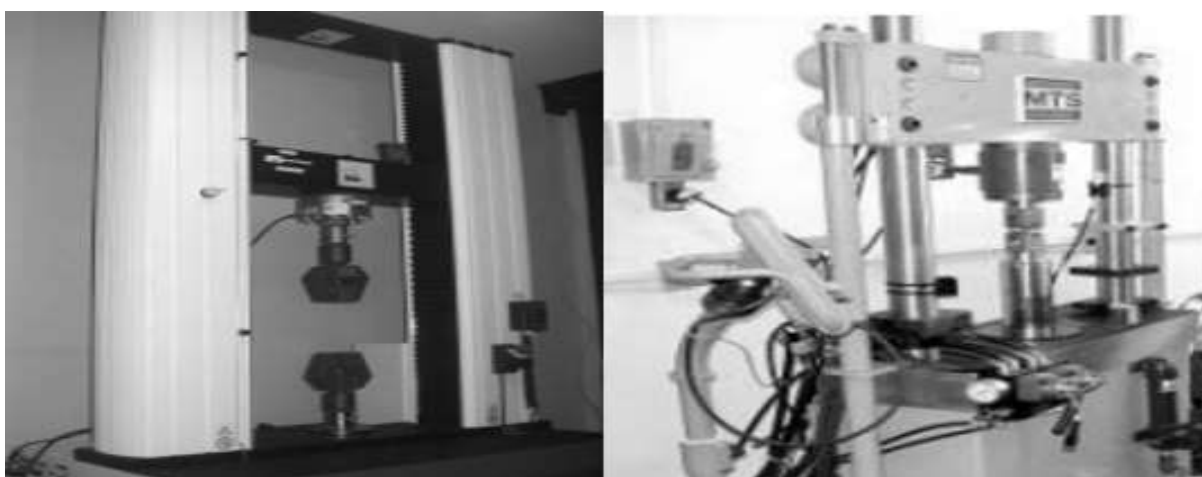
Fonte: Rodrigues Junior (2013)

De acordo com Rohde (2010), ensaio macrográfico ou macrografia, corresponde em analisar a superfície de um corpo de prova polida e atacada por um reagente específico. Essa visualização pode ser feita a olho nu ou com o auxílio de um microscópio ampliado não mais que (até 50X). Através dessa visualização pode-se ter uma ideia de todo conjunto, homogeneidade, distribuição, falhas, qualidade da solda quanto a penetração e presença de escórias, tratamento térmico entre outras. Ensaio micrográfico ou micrografia, corresponde a visualização apenas com o auxílio de microscópio, e permite uma resolução de aumento de (50X até 2500X). Pode-se observar as fases presentes, estrutura de grãos, quantidade de carbono (se o material é ferro fundido ou aço), verificação a qual família de fundido pertence, presença de inclusões, entre outros.

## 2.12 ENSAIO DE TRAÇÃO

A resistência ao limite de tração possui ligação à carga máxima que um corpo de prova pode suportar em um ensaio de tração. A finalidade de promover esse ensaio corresponde em conhecer o comportamento do material, quanto a sua resistência ao alongamento, seu limite máximo de tração antes do rompimento, na Figura 25 visualiza-se o equipamento responsável pelo ensaio de tração. Normalmente a resistência para ferros fundidos nodulares varia entre 400MPa para ferríticos e 1400MPa para os martencíticos (MAGALHÃES, 2011).

Figura 25 - Equipamento de ensaio de tração



Fonte: Adaptado Malafaia ( 2009)

De acordo com Bayer (2013), a realização de um ensaio de tração exige que o corpo de prova esteja correlacionado a força aplicada de acordo com a área da seção da peça. Nesse sentido, existe à necessidade de padronização, pois uma mesma força aplicada a corpos de prova com diferentes áreas da sua seção transversal ocasionarão resultados incorretos.

Bayer (2013), salienta que as propriedades importantes como limite de elasticidade, de resistência, alongamento, entre outras, são afetados quando utilizado corpos de prova com diferentes comprimentos e espessuras.

Para que os resultados dos ensaios de tração alcancem padrões confiáveis em seus resultados, é de grande importância que a precisão das amostras, bem como a qualidade da usinagem seja de ótima qualidade. Torna-se imprescindível

descartar amostras que apresentem trincas, entalhes ou qualquer outro tipo de defeito provenientes do processo de fundição, evitando que os resultados do ensaio sofram qualquer interferência por conta disso (FREDEL; ORTEGA; BASTOS, 2011).

De acordo com Fredel; Ortega e Bastos (2011), amostras que apresentam algum tipo de defeito interno em sua estrutura, tendem a apresentar uma grande facilidade no aparecimento de trincas e a consequência disso, tende a ser o rompimento precoce do corpo de prova, interferindo no resultado da curva tensão x deformação da amostragem.

### 2.13 ENSAIO DE DUREZA

Uma característica muito importante a considerar em um fundido é a sua dureza, e pode ser medida através de uma análise de sua deformação plástica. O equipamento utilizado para a elaboração desse ensaio corresponde ao durômetro, conforme demonstrado pela Figura 26. Ele proporciona a leitura da dureza do material por meio do tamanho da impressão deixada na superfície do material (FREDEL; ORTEGA; BASTOS, 2011).

Figura 26 - Equipamento medidor de dureza (durômetro)



Fonte: Adaptado Rolin (2014).

De acordo com Fredel; Ortega e Bastos (2011), esse ensaio é considerado não destrutivo, pois consiste na aplicação de uma força na superfície das peças por meio de pequenos perfuradores que podem ser esféricos ou pontiagudos. A perfuração vai corresponder a mediada da dureza, e podem ser por: Dureza Mohs;

Dureza Rockwell; Dureza Janka; Dureza Shore e Dureza Brinnell, sendo que esse último foi o utilizado para a mediada da dureza no item em estudo.

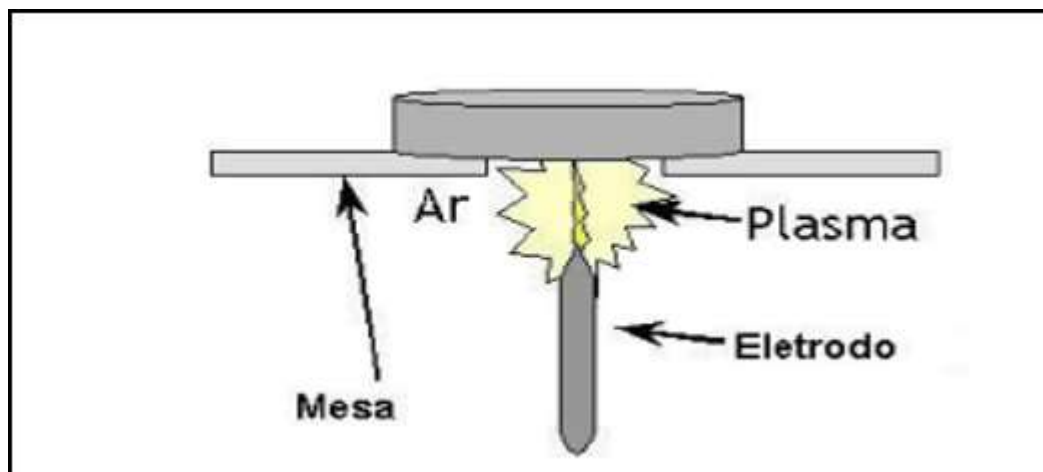
Para Fredel; Ortega e Bastos (2011), a medida da dureza pelo método Brinnell, tem sido um dos mais utilizados hoje nas empresas, sendo que sua abreviatura é descrita por HB. O ensaio de dureza Brinnell, corresponde a aplicação de uma força de 3000 Kgf aplicado através de um perfurador de cabeça esférica medindo 10 mm de diâmetro. Essa carga é aplicada por um tempo de 15 segundos, pois se for diferente disso, esse tempo deve aparecer junto com a descrição do resultado.

Esse ensaio pode ser utilizado para materiais ferrosos, aços, fundidos, itens não temperados e demais produtos provenientes da siderurgia. O equipamento pode ser considerado de fácil manuseio, porém possui limitação o restringem a médias não superiores a 500 HB. Ensaio de Dureza Brinnell são especificados pela ABNT A-370, sendo que, todo o processo de ensaio, desde a coleta e preparo dos corpos de prova até a verificação dos resultados devem obedecer a essa norma.

## 2.14 ENSAIO QUÍMICO

A análise química em uma indústria de fundição através da utilização de um instrumento de leitura denominado espectrômetro, permite realizar análise da composição química de materiais no seu estado sólido sendo eles ferrosos ou não ferrosos. Seu funcionamento corresponde à incitação de uma pequena centelha provocada por um eletrodo conforme Figura 27, essa por sua vez, faz com que a descarga promova uma movimentação nos elétrons do material. A partir do momento em que os elétrons retornam a sua formação de repouso, ocorre uma liberação de radiação também denominado de espectro, que permite a leitura da concentração química (MURTA, 2013).

Figura 27- Representação do funcionamento de um espectrômetro



Fonte: Adaptado Murta (2013).

De acordo com Murta (2013), a leitura somente é possível porque o espectro emitido pelo material corresponde a uma forma de ondas, nesse sentido, cada substância contida na amostra repele ondas de diferentes comprimentos, tornando com isso possível identificar sua presença. Um fator a considerar é que o ensaio químico por espectrometria permite apenas identificar a composição química e sua quantidade presente, porém, não proporciona visualizar a forma como cada componente se apresenta.

## 2.15 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

No Brasil temos hoje cerca de 1,3 mil empresas trabalhando no setor de fundição gerando cerca de 70 mil empregos, o que nos coloca como sendo o sétimo país com o maior volume de produção de fundidos. Parte dessa evolução deve-se a utilização de software (simulação numérica) como responsável em tamanho sucesso (OLIVEIRA. GALHARDI 2016).

Oliveira e Galhardi (2016), diz que essa nova tecnologia vem de encontro às indústrias com o propósito de deixar os processos mais enxutos, menos engessados. Vantagens como melhoria na qualidade de processos e produtos, bem como, ganho em produtividade e tempo de entrega são algumas das vantagens disponíveis com a utilização do software.

De acordo com Magma (2017), seu software tem sido considerado líder mundial em desenvolvimento e fornecimento de programas para simulação numérica

em processos de fundição. A principal função desse software é a possibilidade de compreender o processo de fusão e resfriamento antecipadamente, criando base para tomadas de decisões. Essas vantagens favorecem para que os tempos de início de produção reduzam, diminuindo gastos com peças não conformes, gastos com energia, aumento da durabilidade do ferramental, diminuição dos tempos de engenharia com desenvolvimento dos projetos, entre outros.

Kach (2014), salienta a que simulações em componentes aeronáuticos ou em armamentos nucleares são muito importantes para prever erros e acertos antecipadamente, devido à grande dificuldade e periculosidade que os mesmos oferecem caso sejam realizados ensaios práticos.

### 3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada para a elaboração desse trabalho é denominada como sendo um estudo de caso, pois, todas as informações relevantes para a elaboração desse estudo, como também, a análise de ensaios foram coletados em uma empresa de fundição.

Caracteriza como um estudo de caso, conforme Gil (2002), “tem como conceito principal realizar uma análise aprofundada de alguma situação específica, que por via de outros métodos não seria possível o detalhamento”.

Gil (2002), afirma ainda que o método explicativo é uma forma de aproximar o conhecimento empírico do conhecimento científico, proporcionando um embasamento estruturado, direcionando uma ideia lógica do porque de alguns fenômenos existem e como eles ocorrem.

Nesse sentido, pode-se dizer que o presente TFC se adequa a essa situação, pois o pesquisador realizará um embasamento teórico por meio da pesquisa bibliográfica, posteriormente serão realizados ensaios e testes computacionais com o auxílio do software Magma.

De acordo com Dalfovo; Lana; Silveira (2008), existem duas formas de descrever as abordagens dos problemas: pesquisa quantitativa e pesquisa qualitativa. De uma forma bem simplificada, o método quantitativo possui a intenção de garantir precisão nas informações coletadas, com auxílio de métodos matemáticos tomando o cuidado para que os dados resultantes não apresentem distorções, pois o método qualitativo não tem como principal forma de pesquisa a coleta de dados numéricos, isso quer dizer que as informações não são objetivas, e a intenção é compreender o problema relatado.

De acordo com que foi exposto, caracteriza-se o estudo como sendo qualitativo, uma vez que, após de apontado a falha na peça fundida, foi realizado a coleta de dados detalhados referente ao processo de fabricação, desse item com defeito, levando em conta a análise do sistema de alimentação usado e verificação quanto ao seu dimensionamento correto, simulação no *software* Magma para identificação de (pontos quentes, contração, turbulência, falhas em geral, etc), ações

de correção do problema, ajuste de ferramental, elaboração de amostras para novos testes, corte das amostras para verificação, análise e comparativo de resultados.

### 3.1 IDENTIFICAÇÃO DO ITEM EM ESTUDO

Para o desenvolvimento desse trabalho o item evidenciado corresponde a uma peça corrente de produção denominada “roda dentada”, tendo como material base de fabricação o ferro fundido nodular GGG60 ou GJS600 conforme a norma DIN. A norma DIN foi criada na Alemanha e pode ser considerada com uma das mais importantes normas do mundo, além disso, normas brasileiras como a ABNT ou mesmo, normas internacionais como a ISO, possuem seus padrões referenciados pela norma DIN.

A aplicação desse item dá-se a um equipamento voltado para máquinas agrícolas, sendo que, a real funcionalidade e condições de trabalho do mesmo no equipamento não foram disponibilizadas pelo solicitante da peça.

#### 3.1.1 Análise da amostra coletada

Para a elaboração de uma análise visual o procedimento é considerado simples, sendo que não há necessidade de preparação de amostra como lixamento, nem a utilização de microscópio ou ataque químico nas superfícies dos cortes, pois o defeito por micro porosidade permite ser visualizado a olho nu. Para a elaboração dos cortes foi utilizado uma serra pequena de bancada acoplada com disco de 7” movidos por uma motor elétrico de 1 cv.

Depois do resfriamento e posterior desmolde, uma das peças produzidas foi encaminhada até o setor de qualidade, onde a mesma foi submetida a um ensaio destrutivo com o intuito de detectar possíveis defeitos por descontinuidade no material. Conforme Figura 28, pode-se visualizar como a peça foi cortada.



Figura 28 - Disponibilização do corte e a constatação da presença de micro porosidade



Fonte: O autor (2017)

A peça separada para a análise foi cortada em quatro pedaços na posição vertical em relação ao furo. O objetivo de cortar o item dessa forma, foi tornar possível atingir áreas da peça com maior concentração de material, ou seja, os pontos mais grossos da peça com o aparecimento de pontos quentes, normalmente são os locais mais sujeitos a formação de micro porosidade. Após efetuado os cortes e analisados, o item foi reprovado como também todo o lote produzido, conforme demonstra Figura 28, o defeito por micro porosidade foi encontrado na peça.

### 3.2 VERIFICAÇÃO DOS ENSAIOS DE LABORATÓRIO

As verificações na qualidade dos fundidos como as características químicas e mecânicas das peças fabricadas é um processo rotineiro, sendo que, para cada carga do forno que é vazada existe verificação antes do vazamento e verificação após o vazamento. A análise feita antes do vazamento tem a finalidade de acertar a composição química do material como teor de carbono, silício, magnésio, cobre, etc. Já as análises feitas após o vazamento, são responsáveis em verificar as características químicas do material e análise da resistência mecânica. Conforme Figura 29 é possível visualizar os equipamentos utilizados para os ensaios químicos e mecânicos.

Figura 29 - Equipamentos utilizados para ensaios químicos e mecânicos



Fonte: O autor (2017).

Conforme mencionado anteriormente, para o item em estudo “roda dentada” todos os ensaios sendo eles: metalográfico, tração, dureza e químico foram feitos e estavam dentro do padrão recomendado conforme a norma regulamentadora, sendo que, os resultados obtidos para cada um deles podem ser visualizados conforme Anexo A.

### 3.3 AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO

O molde utilizado para a confecção do modelo foi desenvolvido em liga de alumínio e disponibilizado pela própria empresa solicitante da peça, porém o dimensionamento, confecção e colocação do sistema de alimentação foi desenvolvido pela empresa de fundição.

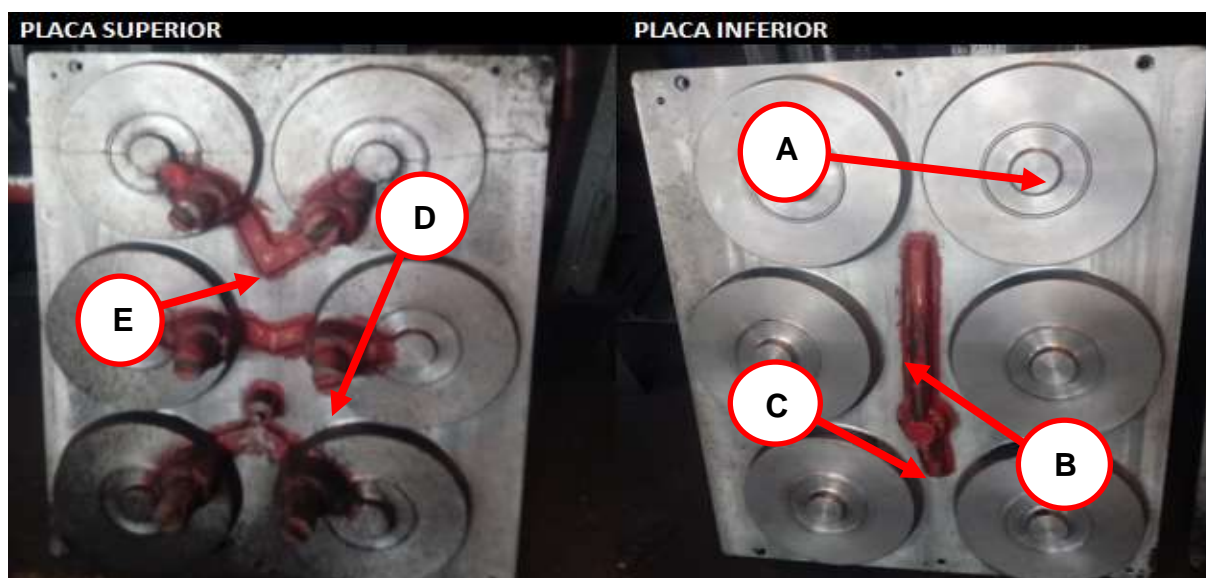
A construção do sistema de alimentação consiste em um processo quase que totalmente artesanal. Para a construção dos massalotes foi utilizado o alumínio, por ser um material leve, de fácil usinabilidade e apresentar um custo relativamente baixo. Os ajustes nos massalotes como a colocação de rebaixos para encaixes de luvas ou ajustes no seu volume, foram feitos com o auxílio de um centro de

usinagem disponibilizado apenas para essas atividades, dispõe de um torno mecânico, uma fresa e uma furadeira de bancada.

Para a construção do canal de descida como também os canais de distribuição e ataque o material mais utilizado foi à madeira, por apresentar uma durabilidade considerada boa, possibilita um processamento simples, é fácil de conseguir. O processo utilizado para a fabricação é artesanal, dispõe de uma serra manual elétrica para a abertura da madeira e uma lixadeira elétrica manual para o lixamento. Primeiramente a madeira é cortada de acordo com o comprimento do molde, em seguida o canal passa pelo processo de lixamentos a fim de retirar arestas permitindo com isso que o modelo não fique preso na areia no momento de moldar o modelo.

Depois de concluído todos os componentes do sistema de alimentação, os mesmos são fixados no modelo com auxílio de parafusos e cola, conforme pode ser visualizado na Figura 30.

Figura 30 - Molde com a montagem completa do sistema de alimentação



Fonte: O autor (2017).

Pode ser visualizado na Figura 30, as duas placas já estão montadas, tendo suas principais partes representadas pelas letras: (A) ressalto do macho; (B) canal principal; (C) canal de descida; (D) massalote e (E) canais de ataque.

### 3.3.1 Dimensionamento de sistema de alimentação

Para dimensionar o sistema de alimentação os cálculos necessários foram feitos por partes, sendo que cada componente do sistema foi dimensionado separadamente, devido cada um deles possuírem particularidades distintas. Os componentes calculados foram os massalotes, pescoço, canal de ataque, canal de distribuição e canal de vazamento (decida). O método da empresa utilizado para calcular o sistema de alimentação constitui-se da utilização da ferramenta excel, da qual foi alimentado com todas as fórmulas e parâmetros necessários para o dimensionamento conforme podemos visualizar no Anexo B.

### 3.4 FORMULAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS E TEMPERATURA DE VAZAMENTO

A partir do momento que a composição química do material já está ajustada corretamente como as porcentagens de carbono, silício, manganês e cobre, o passo seguinte foi atingir a temperatura desejada para o vazamento, que deve variar entre 1530°C à 1575°C. A Figura 31 apresenta o passo a passo do processo de retirada do metal liquido do forno até o posterior vazamento para o interior do molde.

Figura 31 - Processo de vazamento do metal do forno



Fonte: O autor (2017).

### 3.4.1 Descrição do passo a passo de acordo com a Figura 31

**1° Passo** = Atingido a temperatura ideal, o metal em estado líquido está pronto para ser vazado do forno.

**2° Passo** = O metal vazado do forno passa para um panelão de transferência onde é adicionada à liga um componente escorificante, da qual provoca uma reação no ferro fundido trazendo para a superfície as impurezas contidas na mistura, além disso, ocorre nessa reação a nucleação do metal provocando a formação da grafita.

**3° Passo** = A escória é retirada pelo operador do forno.

**4° Passo** = O ferro fundido é transferido do panelão para os cadinhos de vazamento.

**5° Passo** = Durante a transferência do panelão para os cadinhos de transferência é adicionado inoculante ao fundido, que é responsável pela inoculação do fundido da qual, promove a formação da grafita com característica arredondada, sendo que, para esse caso ocasionou na formação do ferro fundido nodular GGG60.

**6° Passo** = Após adicionado o inoculante, o metal já está pronto quimicamente e estruturalmente para ser vazado nos molde, porém, é necessário que a temperatura encontre-se entre 1410°C e 1330°C, sendo que, para a medida da temperatura é utilizado um pirômetro.

É de extrema importância para a qualidade final no fundido, que o tempo total utilizado para o vazamento, que corresponde do momento em que o metal é tirado do forno até o momento que ele é vazado no molde não exceda os nove minutos, pois isso provavelmente acarretará em peças vazadas com temperatura inferior a 1330°C, ocasionando defeitos como juntas frias, rechupe, peças incompletas, entre outros.

## 3.5 UTILIZAÇÃO DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA ATRAVÉS DO SOFTWARE MAGMA

Primeiramente vale salientar que, todo o desenvolvimento do ferramental como, dimensionamento do sistema de alimentação, como também, a temperatura de vazamento utilizada e a influência da composição química da carga metálica que acarretou na fundição do lote com defeito, até então não foram em nenhum momento auxiliadas pelo *software* Magma.

O Magma é um *software* responsável por possibilitar uma previsão do comportamento de todo um sistema envolvido no processo da produção de fundidos. Nesse sentido, a utilização desse *software* possibilitou fazermos uma análise em relação ao item em estudo de como se comporta o material no interior do molde durante o vazamento, sendo que, no processo real, esses detalhes não são impossíveis de serem visualizados.

A fim de facilitar o entendimento no que diz respeito ao funcionamento do *software* magma, demonstraremos através de figuras o comportamento no interior do molde no momento do vazamento para: comportamento do ar, direção de resfriamento, pontos quentes e o fluxo do material (turbulência).

Conforme o Apêndice A, pode-se visualizar o comportamento do ar presente nas cavidades internas do molde no momento do vazamento, e a direção que o ar toma enquanto o metal líquido preenche o interior do molde. A cor azul demonstra na peça o espaço ocupado pelo ar, evidenciando através da escala que o molde em areia verde não ofereceu resistência para a saída do ar, sendo a cor branca representada pelo espaço ocupado pelo metal. Podemos visualizar pela simulação que a dissipação do ar ocorreu de forma ordenada e correta, preenchendo primeiramente a base das peças, comprimindo o ar para os massalotes.

Para o direcionamento do resfriamento do material é possível visualizar através da escala do Apêndice B, que o material resfria das extremidades dos dentes em direção o centro da peça, ou seja, as partes mais finas resfriam por primeiro representada pela cor branca da escala, tendo a cor laranja e amarela da escala representada como sendo o último ponto a solidificar, ou seja, as partes mais grossas da peça, constatando com isso, que os massalotes estão dimensionados de forma correta, sendo eles os últimos a resfriar.

No Apêndice C, é possível visualizar o perfil da temperatura nas cavidades internas do molde representado na escala, podendo ser possível visualizar na peça os pontos com maior concentração de temperatura, sendo esses locais representados pelas cores amarela e vermelho, localizados nos massalotes e no centro da peça onde se encontra a maior concentração de material, local sujeitos para a ocorrência de defeito.

Neste sentido, no Apêndice D é possível visualizar o fluxo ou turbulência do material nas cavidades internas do molde através da escala, sendo com isso, possível visualizar que a cor mais amarela situada nos canais de decida e distribuição, concentraram a maior ocorrência de turbulência, sendo que, no interior da peça ocorreu um percentual de turbulência um pouco menor representada peça cor vermelha.

## **4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS**

A apresentação desse tópico está relacionado aos resultados obtidos através de simulações por via do software magma. Essas simulações correspondem a alterações de temperatura, volume, turbulência do material, pontos quentes, solidificação, contração e isolamento de massa em comparação ao projeto original.

### **4.1 ANÁLISE DE CORRELAÇÃO ENTRE RESULTADOS DO PROJETO ORIGINALIS X RESULTADOS OBTIDOS COM SIMULAÇÃO DO MAGMA**

O objetivo desse tópico é apresentar uma correlação entre os resultados dos ensaios obtidos em laboratório como tração, dureza, ensaio metalográfico, alongamento, limite de escoamento e análise química conforme visto no Anexo A, referente ao projeto original do item fundido em estudo e aplicarmos os mesmos parâmetros como composição química, tempo de vazamento e dimensionamento do sistema de alimentação, porém utilizaremos o software magma para gerar a contraprova. O intuito de utilizarmos o magma se restringe apenas em comprovarmos que o defeito produzido conforme projeto original confere com os resultados encontrados pelo magma, conseqüentemente proporcionado a validação do software.

Algumas verificações não foram possíveis analisar no projeto original para serem comparadas com os resultados obtidos pelo software, sendo elas: a turbulência do fluido nos canais de alimentação e no interior da peça, a propagação do ar na cavidade do molde, direção de solidificação e os pontos quentes. Esses comportamentos não podem ser visualizados sem o auxílio de um simulador, pois ocorrem no interior do molde no momento do vazamento, sendo que a consequência apenas pode ser visualizada posteriormente nas peças prontas.

#### **4.1.1 Ensaio químico**

A elaboração do ensaio químico correspondente ao ferro fundido nodular GGG60, foi realizado através da utilização de um equipamento denominado espectrômetro, sendo que seu funcionamento pode ser visualizado conforme descrito no referencial teórico desse trabalho representado pela Figura 27. De acordo com a Tabela 6, pode ser visualizada a composição química do ferro fundido



nodular GGG60 encontrado partir de ensaios realizados em laboratório através de um espectrômetro.

Tabela 6 - Composição química encontrada para o ferro fundido nodular GGG60 com auxílio de um espectrômetro

COMPOSIÇÃO QUÍMICA % NODULAR GGG60										
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Al	Mg	Cr	Ni
Valor Especificado	3,40 – 3,65	2,50 – 2,90	0,50 -0,55	MAX 0,080	MAX 0,025	0,50 -0,55	MAX 0,026	0,03 – 0,05	MAX 0,155	MAX 0,100
Valor Encontrado	3,58	2,75	0,52	0,02	0,0032	0,54	0,0034	0,031	0,037	0,016

Fonte: O autor (2017).

De acordo com a Tabela 6, pode-se fazer uma comparação entre a composição química padrão e um ferro fundido nodular GGG60 e os valores encontrados através do ensaio químico por espectrometria. Foi possível constatar que a composição encontrada na peça fundida está dentro dos padrões conforme a norma DIN. Para a elaboração da simulação pelo magma, faremos uso dos valores encontrados pelo ensaio químico da própria peça, para verificar a proximidade de resultados entre a prática e a simulação.

#### 4.1.2 Ensaio de tração

Os ensaios de tração foram feitos no próprio laboratório da empresa, sendo que, através desse ensaio foi possível verificar algumas características mecânicas essenciais para os fundidos nodulares GGG60, como a sua resistência a tração, limite de escoamento e alongamento. Conforme Tabela 7, é possível analisar essas características mecânicas de acordo com a norma, e ainda, os valores encontrados nos ensaios correspondentes ao item em estudo.

Tabela 7 - Resistência a tração, alongamento e limite de escoamento conforme a norma e o encontrado no item em estudo

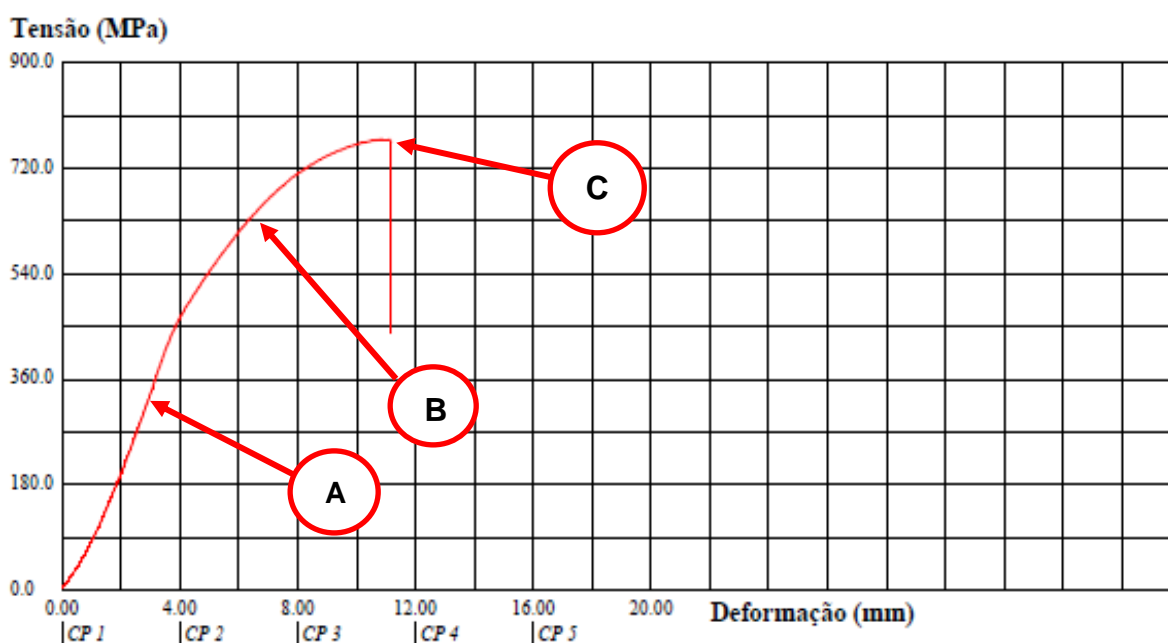
	RESISTENCIA TRAÇÃO (MPa)	ALONGAMENTO (%)	LIMITE DE ESCOAMENTO (MPa)
Conforme a Norma	Min 600 MPa	Min 3%	Min 380 MPa
Encontrado no item em estudo	771,5	5,4	488,14

Fonte: o Autor(2017).

De acordo com a Tabela 7, é possível fazermos uma correlação entre as características mecânicas do ferro fundido nodular GGG60 de acordo com o especificado pela norma, e comparar com os resultados encontrados no ensaio de tração realizado no item em estudo. Com isso, é possível visualizar que o material do item estudado está de acordo com o especificado pela fábrica conforme Anexo A.

A realização do ensaio de tração, possibilitou a visualização do gráfico tensão X deformação conforme Figura 32, representando a curva característica para o ferro fundido GGG60.

Figura 32 - Gráfico tensão x deformação do item real em estudo



Fonte: Adaptado pelo autor (2017).

O gráfico representado pela Figura 32 apresenta durante um período uma característica reta apontado pela seta A, onde podemos constatar que a deformação elástica (representa que quando retirado o esforço o material retorna ao seu estado original) atingiu um valor máximo de 270 MPa, a partir desse ponto, o material começou a sofrer por deformação plástica, (representa que quando retirado o esforço do material, esse vai apresenta deformação permanente, não retornando mais ao estado original) conforme apontado pela seta B, atingindo então a carga máxima de 771 MPa, momento quando ocorre o rompimento conforme demonstrado pela seta C.

Conforme Tabela 8 podemos visualizar uma correlação entre resultados de simulação geradas pelo magma e resultados encontrados por meio de ensaios no item.

Tabela 8 - Resistência à tração, alongamento e limite de escoamento simulados pelo magma

	<b>RESISTENCIA À TRAÇÃO (MPa)</b>	<b>ALONGAMENTO (%)</b>	<b>LIMITE DE ESCOAMENTO (MPa)</b>
<b>Encontrado no item em estudo</b>	771,5	5,4	488,14
<b>Simulação do Magma</b>	767,6	5,11	484,9

Fonte: O autor(2017).

Através do auxílio do magma foi realizado a simulação conforme parâmetros originais da peça fundida apresentados na Tabela 6, de acordo com os resultados representados na Tabela 8, sendo que os valores se assemelham ao ensaio real, tornando com isso validado a simulação. O resultados gerado pelo software magma podem ser visualizados conforme o Apêndice E para resistência a tração; Apêndice F para alongamento e Apêndice G para o limite de escoamento.

#### **4.1.3 Ensaio metalográfico**

Para a elaboração das análises metalográficas, foram coletadas duas amostras em pontos diferentes do item em estudo. O item caracteriza-se por apresentar partes mais grossas, com maior concentração de material sujeita a apresentar pontos quentes, localizado entre a base dos dentes e o furo do eixo conforme representado pela seta "A" na Figura 33 e uma parte mais fina localizada na região dos dentes conforme apontado pela seta "B".

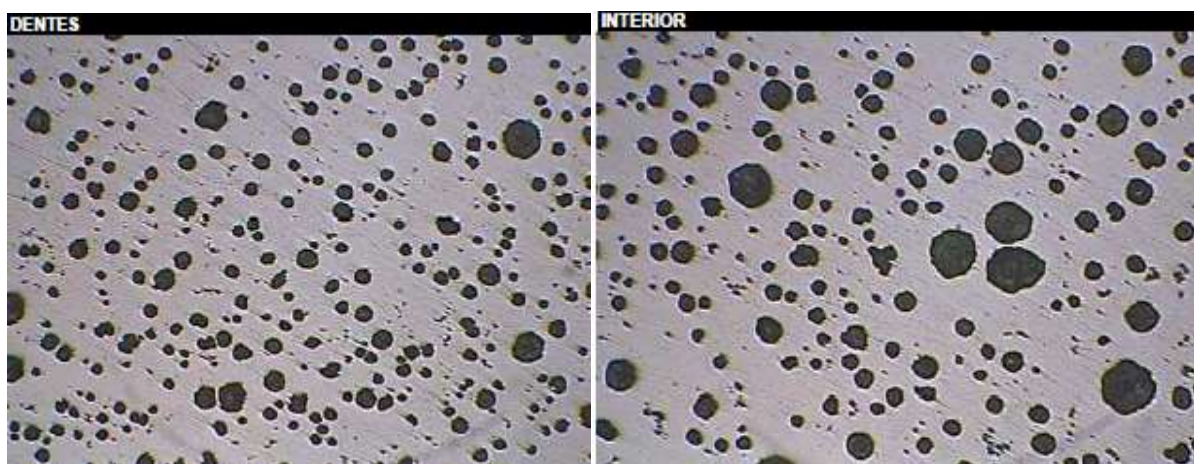
Figura 33 - Localização da retirada das amostras



Fonte: O autor (2017)

Com a retirada das amostras iniciou-se o processo de lixamento e polimento onde posteriormente foram coletadas imagens da superfície polidas mas amostras com o auxílio de um microscópio ampliado 100X. Conforme a Figura 34, pode ser visualizado a metalografia da amostra retirada do dente e da amostra retirada no interior da peça.

Figura 34 - Micrografia da amostra do dente e do interior da peça



Fonte: O autor (2017).

É possível verificar que a nodulação ocorreu de forma desordenada para cada uma das amostras. Para a amostra retirada na área do dente da peça representada pela seta “B” da Figura 33, a formação dos nódulos apresentou um tamanho menor, porém em maior quantidade influenciado pelo resfriamento mais rápido e ordenado. Para a amostra retirada no meio da peça representada pela seta “A” da Figura 33, a formação dos nódulos apresentaram um tamanho maior, porém em menor

quantidade, possivelmente influenciado pela presença de pontos quentes. A contagem dos nódulos pode ser visualizada conforme Tabela 9.

Tabela 9 - Contagem de nódulos com total por mm<sup>2</sup>

<b>Ferro fundido nodular GGG60</b>		
<b>Material</b>	<b>Total de nodulos contados</b>	<b>Nodulos por mm<sup>2</sup></b>
Dentes	222	408
Interior	157	288

Fonte: O autor (2017).

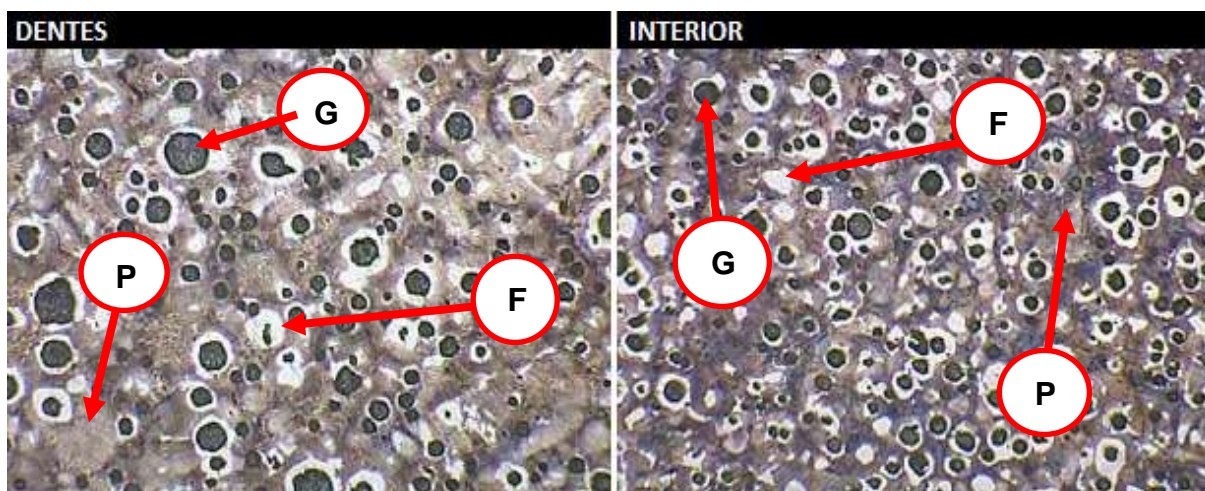
A contagem dos nódulos de grafita foi feito através de um software que analisa as imagens capturadas pelo microscópio, a forma de contagem é apresentada por mm<sup>2</sup>. É importante salientar que essa análise não é possível ser realizada pelo magma.

#### 4.1.3.1 Ensaio metalográfico quimicamente atacado

O processo de retirada das amostras para o ensaio de metalografia quimicamente atacado, corresponde ao mesmo utilizado na Figura 33, no entanto, posteriormente ao processo de lixamento e polimento as amostras foram atacadas quimicamente. Essa expressão quimicamente atacada corresponde pela utilização de um produto denominado de nital (2%), sendo que, esse produto proporciona uma análise quantitativa e qualitativa das amostras, da qual pode-se visualizar mais facilmente as fases presentes através utilização de um microscópio com resolução de 100X.

A reação desse reagente sobre a superfície polida das amostras, tornou possível a visualização de sua microestrutura, pois, através das imagens do microscópio pode-se observar os microconstituintes do material conforme Figura 35. A fim de facilitar a compreensão da microestrutura, os componentes da amostra podem ser identificados conforme as letras destacadas na figura como: nódulo de grafita (G), perlita (P) e ferrita (F).

Figura 35 - Ensaio metalográfico quimicamente atacado



Fonte: O autor (2017).

Ao analisarmos as imagens da amostra retirada do dente e compararmos com a amostra retirada do interior da peça, podemos visualizar claramente a diferença de sua microestrutura. Observa-se que a matriz perlítica da área do dente possui uma maior abrangência, porém, a matriz ferrítica apresenta maior concentração para a amostra do interior da peça. A concentração da matriz grafítica apresenta-se equilibrado para ambas as amostras. Conforme Tabela 10, podemos visualizar a concentração em percentual para cada amostragem.

Tabela 10 - Percentual de microconstituintes por amostragem

<b>MICROCONSTITUENTES NODULAR GGG60</b>			
	<b>Matriz Perlítica (%)</b>	<b>Matriz Ferrítica (%)</b>	<b>Matriz Grafítica (%)</b>
<b>DENTES</b>	70	20	10
<b>INTERIOR</b>	63	27	10

Fonte: O autor (2017).

De acordo com a Tabela 10, podemos visualizar em porcentagens a diferença dos microconstituintes apresentados em diferentes pontos de uma mesma peça conforme apresentado na Figura 35. É importante salientar que essa análise não é possível ser realizada pelo magma.

#### 4.1.4 Ensaio de dureza

Para a realização dos ensaios de dureza foi utilizado um equipamento denominado de durômetro conforme pode ser visualizado pela Figura 36, sendo que,

as amostras analisadas foram coletadas em dois pontos distintos da peça em estudo de igual forma conforme apresentado pela Figura 33.

Figura 36 - Equipamento para medida de dureza



Fonte: O autor (2017).

De acordo com a norma, a dureza para ferros fundidos nodulares GGG60 devem variar entre 217 à 269 HB (Brinell) conforme pode ser visualizado no Anexo A. As amostras foram cortadas e preparadas para o ensaio, sendo que os resultados foram iguais para ambas as amostras, atingindo uma dureza intermediária conforme Tabela 11

Tabela 11 - Correlação de dureza encontrada no item em estudo X dureza simulada pelo magma

<b>DUREZA BRINELL (HB) NODULAR GGG60</b>		
<b>Especificado</b>	<b>Encontrado Ensaio</b>	<b>Simulação Magma</b>
217 à 269	229	302,06

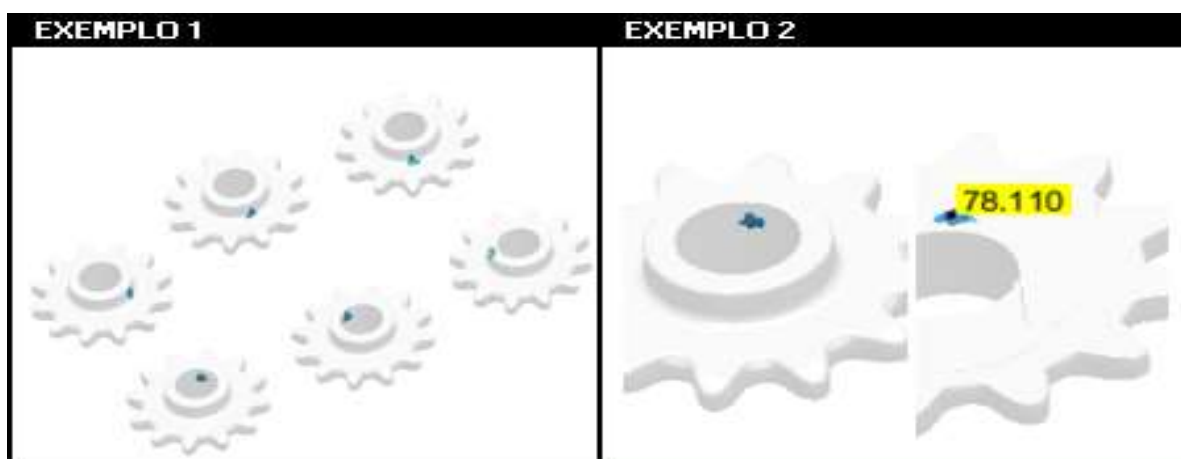
Fonte: O autor(2017).

De igual forma, foi utilizado o processo de simulação para a avaliação de dureza, utilizando os parâmetros originais do projeto. Conforme a Tabela 11, podemos correlacionar à dureza encontrada pelo ensaio em laboratório através da utilização de um durômetro ao valor encontrado pelo magma conforme pode ser visualizado no Apêndice H, sendo que, para essa correlação os resultados simulados apresentaram valores mais altos que os valores encontrados no ensaio e os especificados. Essa diferença pode estar relacionada a alguma falha durante o processo de fundição do item.

## 4.2 ANÁLISE DE PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE MICRO POROSIDADE PARA A COMPOSIÇÃO ORIGINAL

A partir da validação do software Magma através da correlação com ensaios de laboratório, o passo seguinte constituiu em simular a localização da micro porosidade na peça conforme demonstrado pela Figura 28, além disso, demonstrar a probabilidade em porcentagem (%) da ocorrência, sendo que, essa evidencia pode ser observada conforme a Figura 37. As características de alimentação, composição química e temperatura, condizem às mesmas utilizadas para a geração dos resultados apresentados pela Tabela 8 e Tabela 11.

Figura 37 - Localização e probabilidade em porcentagem (%) para o surgimento de micro porosidade



Fonte: Adaptado pelo autor (2017).

A partir do exemplo 1 da Figura 37, tornou possível visualizar os pontos mais críticos representados pela cor azul, sujeitos ao aparecimento de defeito, além disso, é possível observar que todas as peças correspondentes apresentaram concentração de micro porosidade, demonstrando que essa simulação confere ao defeito evidenciado nos ensaios conforme representado pela Figura 28. O exemplo 2 da Figura 37 comprova a forte tendência para a ocorrência de micro porosidade nas peças através da análise de probabilidade em porcentagem, alcançando 78,1%, para a ocorrência da falha. De acordo com dados do magma, percentuais acima de 10%, representam que o defeito vai ocorrer na peça.



#### 4.2.1 Simulação do magma com alteração na composição química do material

Para atendermos a proposta desse estudo de acordo com o ponto “C” dos objetivos específicos, foi elaborada uma alteração na composição química do material em três compostos, sendo eles o carbono (C); silício (Si) e o magnésio (Mg). O carbono e o silício correspondem aos componentes mais importantes para a estruturação de um ferro fundido, sendo o carbono responsável pela formação da grafita elemento que caracteriza o grau de dureza, já o silício é essencial para a grafitação do material, da qual é responsável pela formação da característica arredondada da grafita. A ação do manganês em uma liga de ferro fundido funciona de forma oposta ao silício, balanceando a grafitação, ou seja, tem a função de estabilizar a formação da cementita.

Para a realização desse estudo, foi alterado para mais (+) 0,30 a concentração de carbono (C); silício (Si) e magnésio (Mg) e para menos (-) na mesma proporção de 0,30 apenas o carbono (C) e o silício (Si), a fim de que o magnésio (Mg) não apresentasse padrões muito baixos, sendo que, essas alterações tiveram como base a composição original da peça e podem ser visualizadas conforme a Tabela 12.

Tabela 12 - Proposta de alteração da composição química para o C, Si e Mg

PROPOSTA DE ALTERAÇÃO NA COMPOSIÇÃO QUÍMICA										
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Al	Mg	Cr	Ni
<b>Alterado (+) 0,30</b>	3,88	3,05	mantido	mantido	mantido	mantido	mantido	0,062	mantido	mantido
<b>Valor Encontrado</b>	3,58	2,75	0,52	0,02	0,0032	0,54	0,0034	0,031	0,037	0,016
<b>Alterado (-) 0,30</b>	3,28	2,45	mantido	mantido	mantido	mantido	mantido	mantido	mantido	mantido

Fonte: O autor (2017).

Conforme pode ser visualizado na Tabela 12, as alterações foram feitas apenas no C, Si e Mg, sendo que os demais componentes da liga foram mantidos nos padrões originais da peças. Após definido os parâmetro da composição química do material, esses valores foram alimentados no software magma que após um tempo de 5 horas aproximadamente apresentou um resultado de 15 designs. Essa forma do magma apresentar designs representa que o software elaborou todas as

probabilidades possíveis com a composição que lhe foi estabelecido conforme podemos visualizar na Tabela 13.

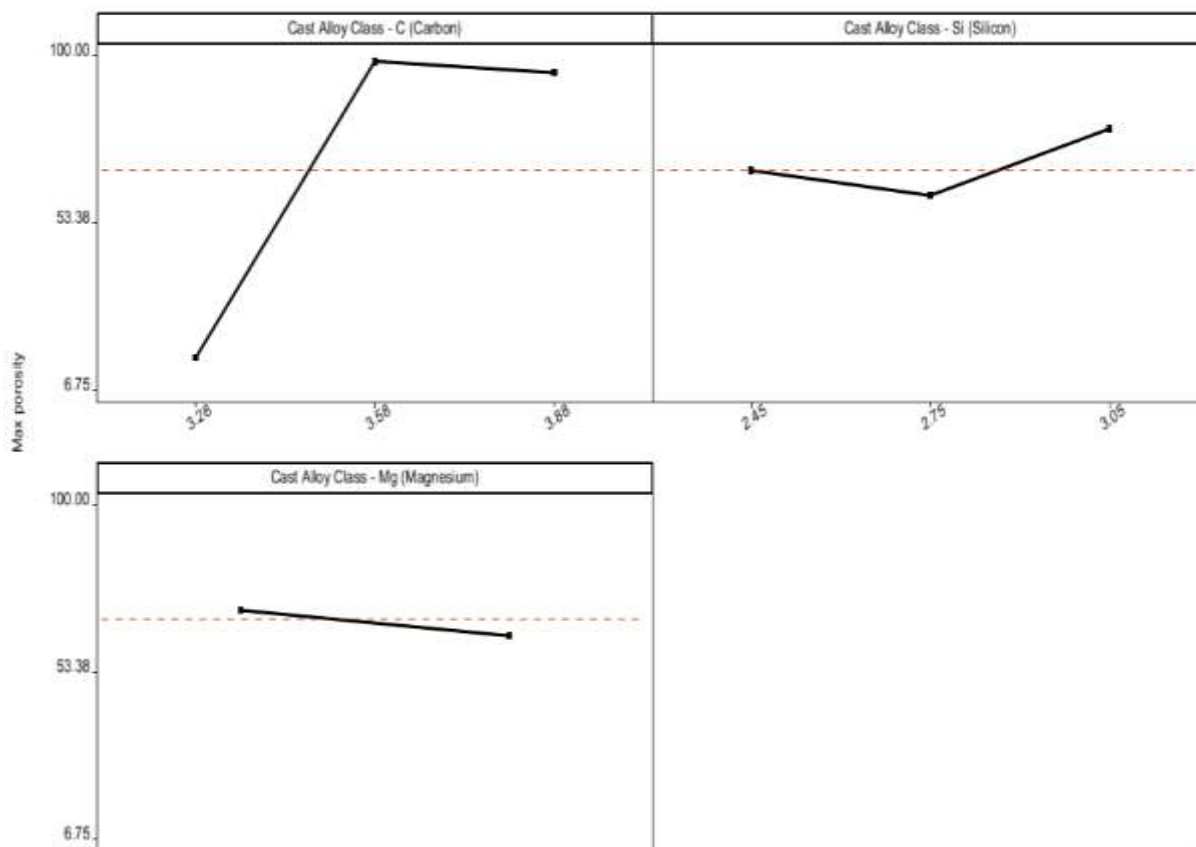
Tabela 13 - Designs possíveis para a composição proposta pelo magma

Rank	Design	Carbono % ( C )	Magnésio % (Mg)	Silício % (Si)	Porosidade %
Rank 1	Design 13	3,28	0,061	2,75	5,92
Rank 2	Design 4	3,28	0,031	2,75	6,85
Rank 3	Design 1	3,28	0,031	2,45	10,09
Rank 4	Design 10	3,28	0,061	2,45	10,48
Rank 5	Design 7	3,28	0,031	3,05	44,85
Rank 6	Design 3	3,88	0,031	2,45	93,42
Rank 7	Design 6	3,88	0,031	2,75	93,67
Rank 8	Design 9	3,88	0,031	3,05	94,1
Rank 9	Design 2	3,58	0,031	2,45	94,37
Rank 10	Design 5	3,58	0,031	2,75	98,01
Rank 11	Design 11	3,58	0,061	2,45	100
Rank 12	Design 12	3,88	0,061	2,45	100
Rank 13	Design 14	3,58	0,061	2,75	100
Rank 14	Design 8	3,88	0,061	2,75	100
Rank 15	Design 15	3,58	0,031	3,05	100

Fonte: O autor (2017).

Através da Tabela 13 é possível visualizarmos que o software magma organizou os 15 designs em ranques, sendo o rank 1 representado pelo design 13 foi o que apresentou o melhor resultado no que diz respeito a diminuição da micro porosidade com (5,92%) de chances de apresentar o defeito, porém o rank 11 ao rank 15 representaram os piores resultados, correspondendo a (100%) de probabilidade de apresentar defeito de micro porosidade nas peças. Fazendo uma correlação entre o melhor design (Rank 1) para o pior design (Rank 15), pode-se demonstrar que o carbono e o silício são os maiores responsáveis pelo aumento ou diminuição do defeito por micro porosidade na peça, sendo que, essa interferência também pode ser visualizado conforme a Figura 38.

Figura 38 - Gráfico de interferência do carbono e do silício para a ocorrência de micro porosidade

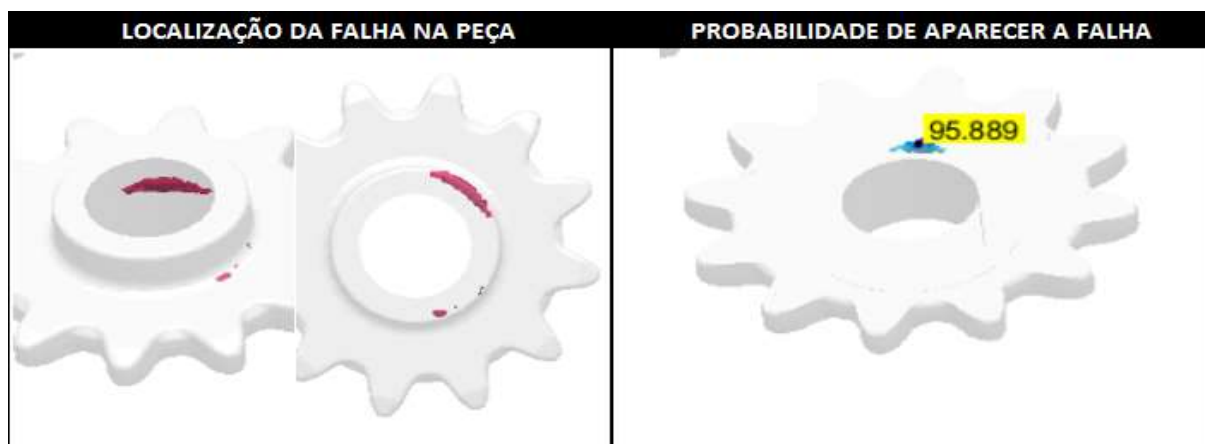


Fonte: Adaptado pelo autor (2017).

Pela representação da Figura 38, tornou possível visualizarmos que a melhor situação para a diminuição da micro porosidade ocorre quando o carbono encontra-se no mínimo para a situação proposta (3,28%), que o silício permaneça com a concentração original (2,75%) e o manganês presente a proporção máxima para a situação proposta (0,061%), porém, a pior situação ocorre quando o carbono está com o teor original de (3,58%); o silício com a concentração máxima estabelecida (3,05%) e o manganês permaneça com o percentual original (0,031%), validando com isso os resultados apresentados pela Tabela 13.

Para a pior situação conforme design 15 podemos visualizar na imagem produzida pelo magma representada pela Figura 39, o local na peça onde ocorre a formação do defeito por micro porosidade com maior intensidade, como também, a probabilidade em porcentagem (%) da formação da falha conforme já demonstrado pela Tabela 13.

Figura 39 - Visualização do defeito para a pior situação (Design 15)



Fonte: O autor (2017).

Através das imagens representadas pela Figura 39, torna possível evidenciarmos de uma forma visual o tamanho da falha, a sua localização na peça e a probabilidade de sua ocorrência, conforme demonstrado numericamente pelo design 15 da Tabela 13, além disso, é importante salientar que o percentual de (95,8%) apresentado pela Figura 39, representa para o software magma uma probabilidade de 100% para a ocorrência de micro porosidade na peça.

Conforme as imagens da Figura 40 é possível visualizarmos a melhor situação simulada pelo magma, representada pelo design 13.

Figura 40 - Melhor design simulado pelo magma para eliminação da micro porosidade



Fonte: O autor (2017).

Com as informações representadas pela Figura 40 e os dados numéricos correspondentes ao design 13 demonstrados na Tabela 13, tornou possível a eliminação quase que totalmente da micro porosidade presente na peça, sendo que, a probabilidade de que ocorra uma falha apresentou um percentual de (5,92%), que para o magma representa probabilidade “zero” para a formação de defeito, pois mesmo que ocorra o defeito, ele vai ser de uma proporção tão pequena possivelmente impossível de ser visualizado a olho nu.

## CONCLUSÃO

Conclui-se portanto que o trabalho teve grande importância pelo aprendizado que a pesquisa proporcionou e pelos resultados apresentados perante ao problema identificado.

O início deste estudo decorreu mediante a identificação de um defeito causado por micro porosidade constatados a partir da análise dos cortes realizados na peça da qual pode-se visualizar a falha. Em seguida, foram coletadas amostras para a realização dos ensaios químicos, metalográficos, tração e dureza, onde posteriormente seus resultados foram correlacionados com resultados de simulações através de um software (Magma) usando parâmetros idênticos aos encontrados nos ensaios de laboratório. Verificou-se que as variações encontrada nas simulações estavam em conformidade aos resultados encontrados pelos ensaios de laboratório, sendo assim, tornando confiável os resultados do software. Posteriormente foi simulado uma nova proposta para a composição química do material, alterando os percentuais do C, Si e Mg.

A partir dos resultados do magma, gerados mediante a alteração da composição química do material, constatou-se para o melhor design<sup>13</sup>, que percentuais de carbono (3,28%) e silício (2,75%) em níveis mais baixos proporcionam uma diminuição significativa para formação da micro porosidade, porém, para o pior design<sup>15</sup>, verificou-se que o carbono com seu percentual intermediário (3,58%) e o silício com seu percentual máximo (3,05%), apresentaram 100% de probabilidade a apresentar falha, sendo que, o manganês não apresentou interferência relevante nos resultados. Subtende-se então, que o carbono e silício exercem influência significativa para a ocorrência da micro porosidade no item.

Também foi possível constatar que a utilização de softwares Magma, teve grande relevância no estudo, pois, possibilitou a análise do comportamento do material mediante a alteração da composição química, não tendo a necessidade de prototipagem, proporcionando mais agilidade nos processos, confiabilidade nos resultados e conseqüente redução no custos de projeto.

## REFERÊNCIAS

- ABIFA: **Fundição e Matérias Primas**. Joinville -SC: Senior, v. 170, 03 jul. 2014. Disponível em: <<http://www.abifa.org.br/wp-content/uploads/2014/09/ABIFA-170-Julho.pdf>>. Acesso em: 02 nov. 2017.
- ADEGAS, Roseane Gonsalves. **Perfil Ambiental dos Processos de Fundição Ferrosa que Utiliza Areias no Estado do Rio Grande do Sul**. 2017. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/11199/000608285.pdf?1>>. Acesso em: 1 maio 2017.
- ASM International, **Handbook Volume 15 Casting**, Manual, EUA, 1998.
- BAYER, P. S. **Ensaaios dos Materiais**. 2013. Disponível em: <http://www.joinville.ifsc.sdu.br/~paulosergio/Ensaio%20dosMateriais/Apostila%20%de%20Ensaio%20dos%20Materiais.pdf>. Acesso em: 12 set. 2017.
- BRITO, Gonçalves de; GORDO, José Manuel. **Tecnologia Naval: Materiais Metálicos**. 2005. Disponível em: <<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779571247629/C3.pdf>>. Acesso em: 17 out. 2017.
- CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.
- CARNIN, Raquel Luísa Pereira. **Reaproveitamento do Resíduo de Areia Verde de Fundição como Agregado em Misuras Asfálticas**. 2008. 152 f. Tese (Doutorado) - Curso de Química, Setor de Ciências Exatas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba- PR, 2008. Disponível em: <[http://www.tupy.com.br/downloads/guesser/Tese\\_DoutoradoRaquelCarnin.pdf](http://www.tupy.com.br/downloads/guesser/Tese_DoutoradoRaquelCarnin.pdf)>. Acesso em: 4 maio 2017.
- CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**, 7º ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e materiais - ABM, 2002.
- CHIAVERINI, Vicente. **Processos de Fabricação e Tratamento**. 2. ed. São Paulo - SP: Mcgraw-hill Ltda, 1986. 315 p.
- CONCER, Dionei. **ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA POROSIDADE VIA SIMULAÇÃO NUMÉRICA PARA PRODUTOS INJETADOS EM ALUMÍNIO SOB PRESSÃO**. 2016. 128 f. Tese (Doutorado) - Curso de Eng Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba - Pr, 2016. Disponível em: <[http://www.prppg.ufpr.br/pgmec/wp-content/uploads/2016/05/tese\\_041\\_dionei\\_concer.pdf](http://www.prppg.ufpr.br/pgmec/wp-content/uploads/2016/05/tese_041_dionei_concer.pdf)>. Acesso em: 10 set. 2017.
- COSTA, Adilson Rodrigues da. **Contribuição aos estudos dos mecanismos de interação das partículas abrasivas com as microestruturas de ferros fundidos em processo de desgaste**. 2004. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Estadual de Minas Gerais (uemg), Ouro Preto, 2004. Disponível em: <[http://www.redemat.ufop.br/arquivos/dissertacoes/2004/contribuicao aos estudos.pdf](http://www.redemat.ufop.br/arquivos/dissertacoes/2004/contribuicao%20aos%20estudos.pdf)>. Acesso em: 25 nov. 2017
- COUTINHO NETO, Benedito. **Avaliação do reaproveitamento de areia de fundição agregado em mistura asfáltica densas**. 2004. 293 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia dos Transportes, Escola de Engenharia, Escola de Engenharia São Carlos -

- Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 2004. Disponível em: <file:///C:/Users/Marcelo/Downloads/BeneditoCoutinho.pdf>. Acesso em: 3 abr. 2017.
- COUTINHO, Leonardo de Souza et al. **Avaliação da microestrutura e da microdureza do ferro fundido cinzento**. 2015. Centro universitário da Volta Redonda. Disponível em: <http://web.unifoa.edu.br/cadernos/edicao/28/17-23.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2017.
- DALFOVO, Michael Samir, LANA, Rogério Adilson; SILVEIRA, Amélia. Métodos Quantitativos e Qualitativos: Um Resgate Teórico. In: Revista Interdisciplinar Científica Aplicada, 4. 208, Blumenau. **Artigo Científico**. Blumenau: Sem li, 2008. V. 2, p. 1 – 13.
- FREDEL, M. C.; ORTEGA, P.; BASTOS, E. Propriedades Mecânicas: ensaios fundamentais. 2011. Disponível em: <http://cermat.ufsc.br/wp-content/uploads/2015/03/APOSTILA-DO-LABORATORIO-DE-PROPRIEDADES-MEC-160315.PDF>. Acesso em: 26 set 2017.
- FURTADO, Maria Gabriela Stevanato. **Planejamento da Produção de Pedidos em Fundições de Pequeno Porte**. 2012. TESE DE MESTRADO. Disponível em: <file:///C:/Users/Marcelo/Downloads/gabrielarev.pdf>. Acesso em: 2 abr. 2017.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 7ª ed. São Paulo: Atlas, 2002.
- GIULIANO, José Antonio Schenini. **Os processos de fundição, como ferramenta na obtenção de esculturas em metal**. 2008. 150 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre RS, 2008. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/14297/000663453.pdf?1>>. Acesso em: 02 ago. 2017
- GUESSER, W L. **Propriedades mecânicas dos ferros fundidos**, 1º ed. São Paulo: Editora: Blucher, 2009.
- HABIBULLAH, Pervaiz. **Morphology of exogenous blowholes in steel castings: Sand moulds user for metal casting**. 2011. 133 f. These (Doctors) - Curso de Mechanical Engineering, University Of Bucharest, Islamic Republic Of Pakistan In Romania, 2011. Disponível em: <<http://drpervaiz-h.org/Books/morphology.pdf>>. Acesso em: 22 ago. 2017.
- KACH, Sirnei César. **ESTUDO DAS TENSÕES RESIDUAIS DO FERRO FUNDIDO EM UM COMPONENTE PANTOGRÁFICO DE SEMEADORA PARA AGRICULTURA DE PRECISÃO**. 2014. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pos-graduação em Agricultura de Precisão, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria - RS, 2014. Disponível em: <<http://w3.ufsm.br/ppgap/images/dissertacoes/2014/Sirnei-Csar-Kach.pdf>>. Acesso em: 11 set. 2017.
- KARSAY, SI. Ductile iron – **Productin and pratice**. American Foundry Society, USA, 1985.
- KESSLER, Sergio E. A. **Elaboração dos Ferros Fundidos Cinzento e Nodulares Fornos à Indução**. 2011. Técnicas de Fundição.
- KESSLER, Sergio E. A. **CONTROLE DO PROCESSO NAS FUNDIÇÕES DE FERRO FUNDIDO COM AUXILIO DO CARBOMAX II**. 2009. Fundição ferro fundido. Disponível em: <<http://slideplayer.com.br/slide/1262747/>>. Acesso em: 03 ago. 2017.
- KLINSKI, Luis Miguel Gutiérrez. **Avaliação do Reaproveitamento de Areia de Fundição Residual Em Camadas de Pavimentos**. 2013. 313 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia São Carlos - Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 2013. Disponível em: <file:///C:/Users/Marcelo/Downloads/LMKlinsky.pdf>. Acesso em: 1 maio 2017.
- KONDIC, V. Traduzido por: MARIOTTO, C. L., GOUVÊA, J. A., PAPAPIO, R., HABESH, R. **Princípios Metalúrgicos de Fundição**. São Paulo, Ed. Polígono, 1973.



- LOPES, Bruno; NOVAIS, Douglas; GERIOLI, Emerson. **Fornos de Indução: Fornos de Indução**. 2011. Faculdade de Tecnologia de Sorocaba. Disponível em: <<http://docslide.com.br/documents/fornos-de-inducao.html#>>. Acesso em: 14 maio 2017.
- MACHADO, I. **Processo de Fundição e Sinterização**. Introdução à Manutenção Mecânica, Escola Politécnica de USP, 2002.
- MAGALHÃES, Elton Franco. **Características e Proposição de Métodos Estimativos das Propriedades Monotônicas e Clínicas dos Ferros Fundidos Nodulares**. 2011. 166 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011. Disponível em: <[file:///C:/Users/Marcelo/Downloads/Dissertacao\\_Elton\\_vs15.pdf](file:///C:/Users/Marcelo/Downloads/Dissertacao_Elton_vs15.pdf)>. Acesso em: 10 set. 2017.
- MAGMA (Brasil). **MAGMA Committed to Casting Excellence**. 2017. Disponível em: <[http://www.magma.com.br/pt\\_BR/company/company-profile.html](http://www.magma.com.br/pt_BR/company/company-profile.html)>. Acesso em: 10 set. 2017.
- MAIS, Vanessa; GUESSER, Wilson Luis; MASIERO, Isaías. **Estudo de Fluxibilidade em Areia de Moldagem a Verde**. 2014. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1517-70762014000200094](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762014000200094)>. Acesso em: 15 maio 2017.
- MALAFAIA, Artur Mariano de Sousa. **Avaliação das propriedades mecânicas de tração e fadiga, com monitoramento de trincas, de juntas de AL AA2024-T3 soldadas a ponto por fricção-mistura**. 2009. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, 2009. Disponível em: <[file:///C:/Users/Marcelo/Downloads/Disser\\_Artur\\_Malafaia.pdf](file:///C:/Users/Marcelo/Downloads/Disser_Artur_Malafaia.pdf)>. Acesso em: 02 nov. 2017.
- MALUF, o. **Influência do roleteamento no comportamento em fadiga de um ferro fundido nodular perlítico**. 2002, Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- MARQUES, Andreia Isabel Granadeiro Cercas. **Diagnostico de um defeito de fundição aplicabilidade da simulação numérica em FLOWCast para previsão e resolução de defeitos**. 2008. 74 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade do Porto, Porto, 2008.
- MURTA, Maria Cecília Junqueira. **Análise de inclusões não metálicas em aço por espectrometria de emissão óptica associada ao sistema Spark-DAT**. 2013. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte Mg, 2013.
- OLIVEIRA, Bruno Ferraz de. **FUNDIÇÃO**: 2013. Disponível em: <[http://estudio01.proj.ufsm.br/cadernos/ifpa/tecnico\\_metalurgica/fundicao.pdf](http://estudio01.proj.ufsm.br/cadernos/ifpa/tecnico_metalurgica/fundicao.pdf)>. Acesso em: 28 mar. 2017.
- OLIVEIRA, Reinaldo José de; GALHARDI, Antonio César. **Simulação Numérica: e a fundição de metais do Brasil**. São Paulo: Centro Paulo Souza, 2016. 93 p.
- PEDRO, João Filomeno. **Elaboração de lingote para areia de macharia a partir de resíduo de tinta em pó, oriundo do processo de pintura eletrostática**. 2013. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós -graduação em Recursos Hídricos e Biológicos, Instituto de Ciências Exatas e Biológicas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013. Disponível em: <[http://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/3134/1/DISSERTAÇÃO\\_ElaboraçãoLiganteAreia.pdf](http://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/3134/1/DISSERTAÇÃO_ElaboraçãoLiganteAreia.pdf)>. Acesso em: 3 abr. 2017.
- RODRIGUES JÚNIOR, Adauto Silveira. **Avaliação do ferro fundido nodular austemperado aplicado a facas industriais para trabalho a frio**. 2013. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Fundação Oswaldo Aranha Centro Universitário, Volta Redonda - RJ, 2013. Disponível em:

<[http://web.unifoa.edu.br/portal\\_ensino/mestrado/memat/arquivos/dissertacao/11.pdf](http://web.unifoa.edu.br/portal_ensino/mestrado/memat/arquivos/dissertacao/11.pdf)>. Acesso em: 02 nov. 2017.

ROHDE, R. A. Metalografia preparação de amostras. 2010. Disponível em: <<http://www.manutencaoesuprimentos.com.br/conteudo/6331-inspecao-de-pecas-em-fundicao/>>. Acesso em: 25 mar. 2017.

ROLIN, Alessandro da Silva. **Avaliação do comportamento mecânico e tribológico de parafusos de classe 10.9 para emprego em guindaste off-shore**. 2014. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (uenf), Campo dos Goytacazes - Rj, 2014. Disponível em: <<http://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/wp-content/uploads/sites/2/2013/07/Tese-Mestrado.pdf>>. Acesso em: 02 nov. 2017

ROMUALDO, Gabriel. **Porosidade em Fundidos**. 2016. Disponível em: <<https://pt.linkedin.com/pulse/porosidade-em-fundidos-gabriel-romualdo>>. Acesso em: 09 set. 2017.

SOARES, Gloria de Almeida. **FUNDIÇÃO: Mercado, Processos e Metalurgia**. Rio de Janeiro: Coppe/UFRJ, 2000. 123 p. Disponível em: <<http://www.metalmat.ufrj.br/wp-content/uploads/2012/05/Fundicao-mercado-processos-e-metalurgia.pdf>>. Acesso em: 28 mar. 2017.

SOUZA, Ricardo Pires de. **Otimização de Parâmetros Mecânicos e Microestruturais dos Moldes em Areia de Sílica Ligados Quimicamente pelo Processo de Cura a Frio em Fundição de Aço**. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015. Disponível em: <[https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/20681/1/RicardoPiresDeSouza\\_TESE.pdf](https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/20681/1/RicardoPiresDeSouza_TESE.pdf)>. Acesso em: 1 maio 2017

SOUZA, Tânia Nogueira Fonseca. **Produção e Caracterização Física e Mecânica de Ferro Fundidos Nodulares e Ferros Fundidos Nodulares Austemperados com Adição de Nióbio**. 2012. 166 f. Tese (Doutorado) - Curso de Eng Mecânica, Escola de Engenharia da Ufmg, Belo Horizonte Mg, 2012. Disponível em: <[http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/BUOS-8ZSNTU/tese\\_\\_doutorado\\_t\\_nia\\_nogueira.pdf?sequence=1](http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/BUOS-8ZSNTU/tese__doutorado_t_nia_nogueira.pdf?sequence=1)>. Acesso em: 08 set. 2017

VERRAN, O. Guilherme. **Processo de Moldagem e Macharia em Areia Ligadas Quimicamente**. 2016. Fundição. (UDESC), departamento de engenharia.

VIDAL, Douglas Ferreira. **ANÁLISE DE ESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM FERRO FUNDIDO NODULAR EM PROCESSO DE FUNDIÇÃO PRODUZIDO PELA TÉCNICA DE IMERSÃO DE SINO**. 2013. 172 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais, Ciência e Tecnologia (cct), Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (uenf), Campos dos Goytacazes/rj, 2013. Disponível em: <<http://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais.pdf>>. Acesso em: 08 set. 2017.

WOBETO, Edson Inácio. **UM ABORDAGEM HEURÍSTICA PARA PROBLEMAS DE PLANEJAMENTO DA PRODUÇÃO EM FUNDIÇÃO - ESTUDO DE CASO: DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**. 2008. Disponível em: <<http://docplayer.com.br/32523071-Uma-abordagem-heuristica-para-o-problema-de-planejamento-da-producao-em-fundicoes-estudo-de-caso.html>>. Acesso em: 1 abr. 2017.



## APÊNDICES

**APÊNDICE A-** Propagação do oxigênio no mento em que metal líquido é vazado para o interior do molde

**APÊNDICE B-** Demonstração da fração líquida do material, ou seja, a direção de resfriamento do material.

**APÊNDICE C-** Perfil de temperatura da peça

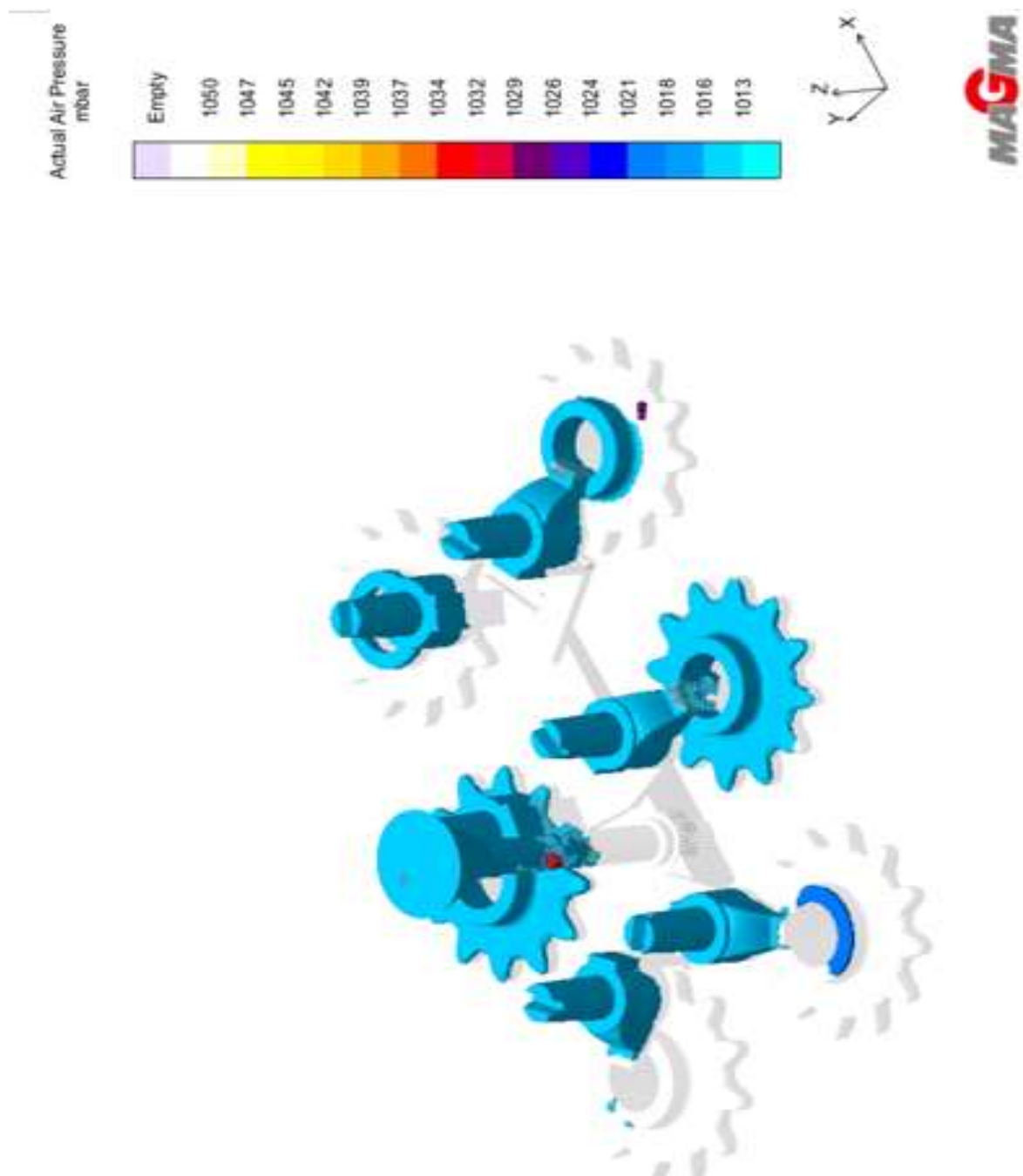
**APÊNDICE D-** Perfil do escoamento do metal líquido no interior do molde

**APÊNDICE E-** Representação do resultado de resistência a tração gerado pelo software magma

**APÊNDICE G-** Representação do resultado de limite de escoamento gerado pelo software magma

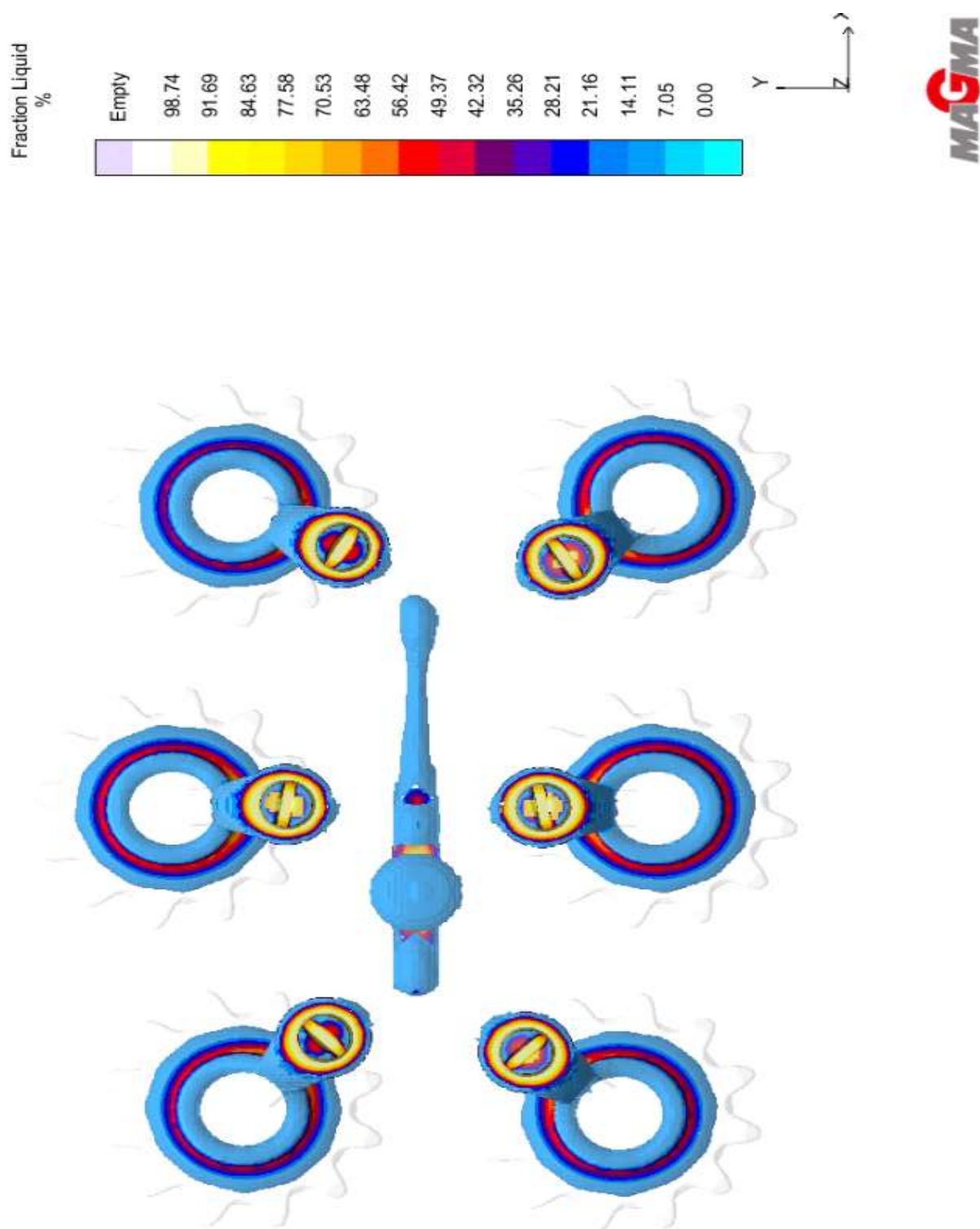
**APÊNDICE H-** Representação do resultado de dureza gerado pelo software magma

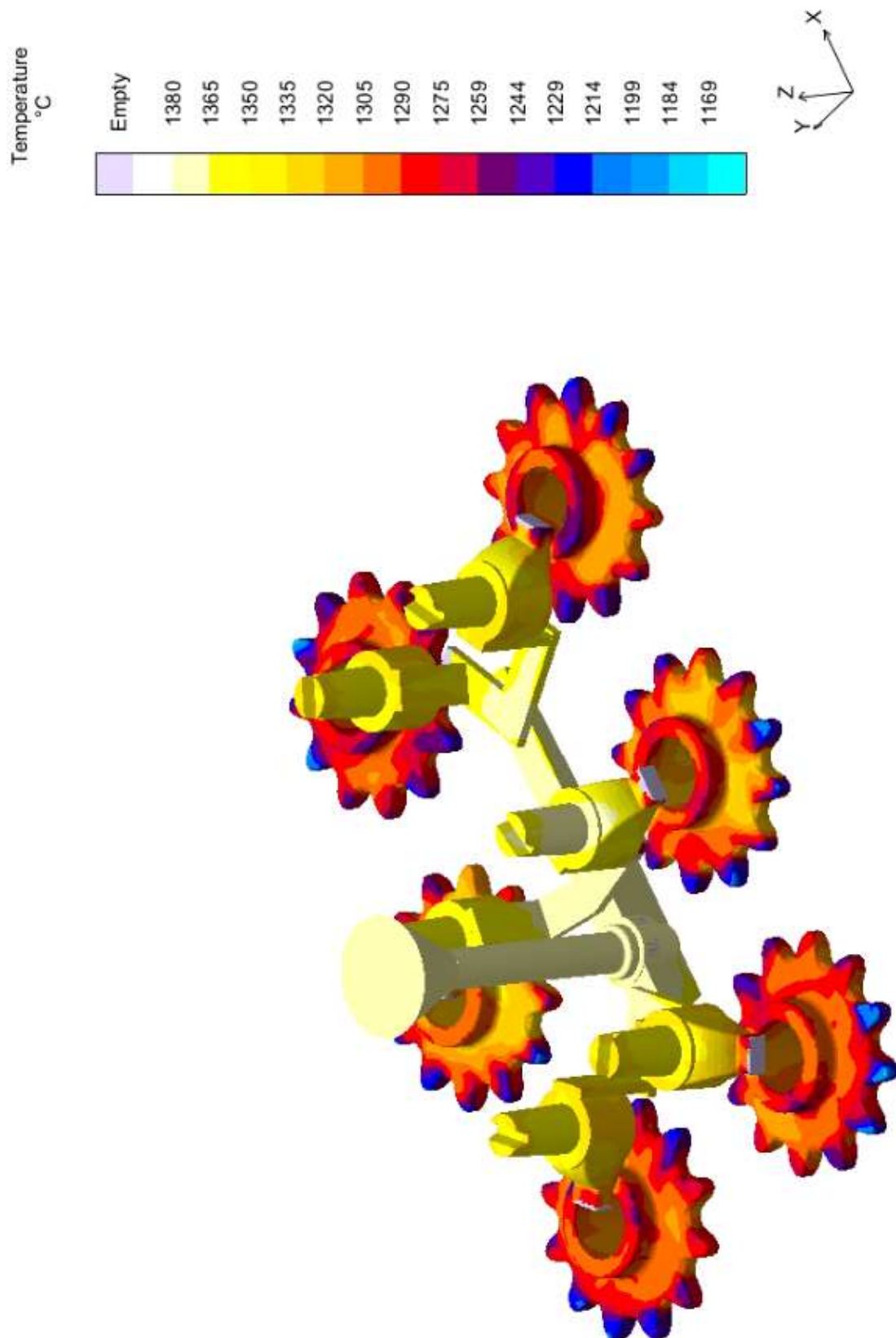
**APÊNDICE A-** Propagação do oxigênio no mento em que metal liquido é vazado para o interior do molde



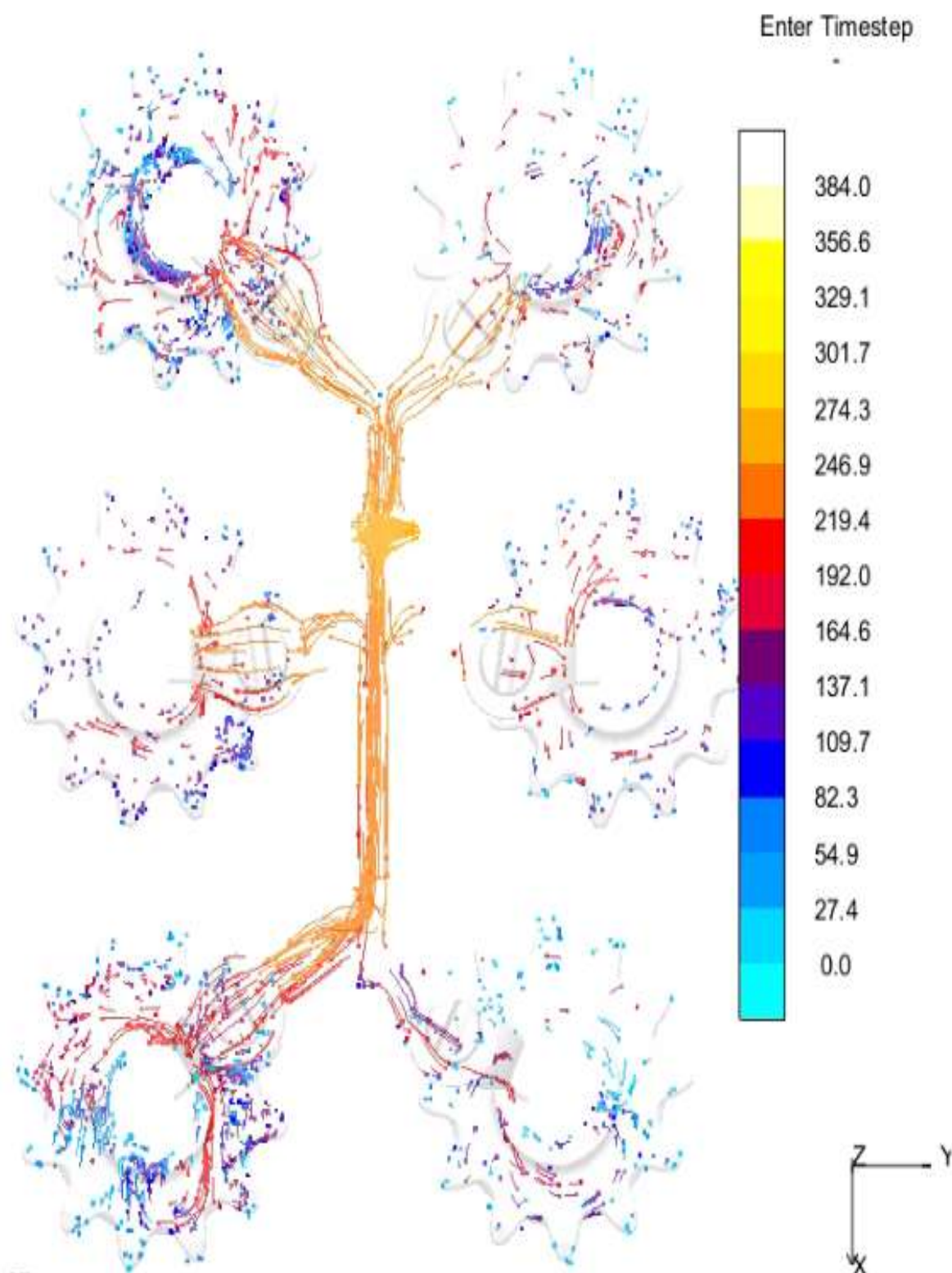
**Fonte:** Autor (2017).

**APÊNDICE B-** Demonstração da fração líquida do material, ou seja, a direção de resfriamento do material.



**APÊNDICE C-** Perfil de temperatura da peça

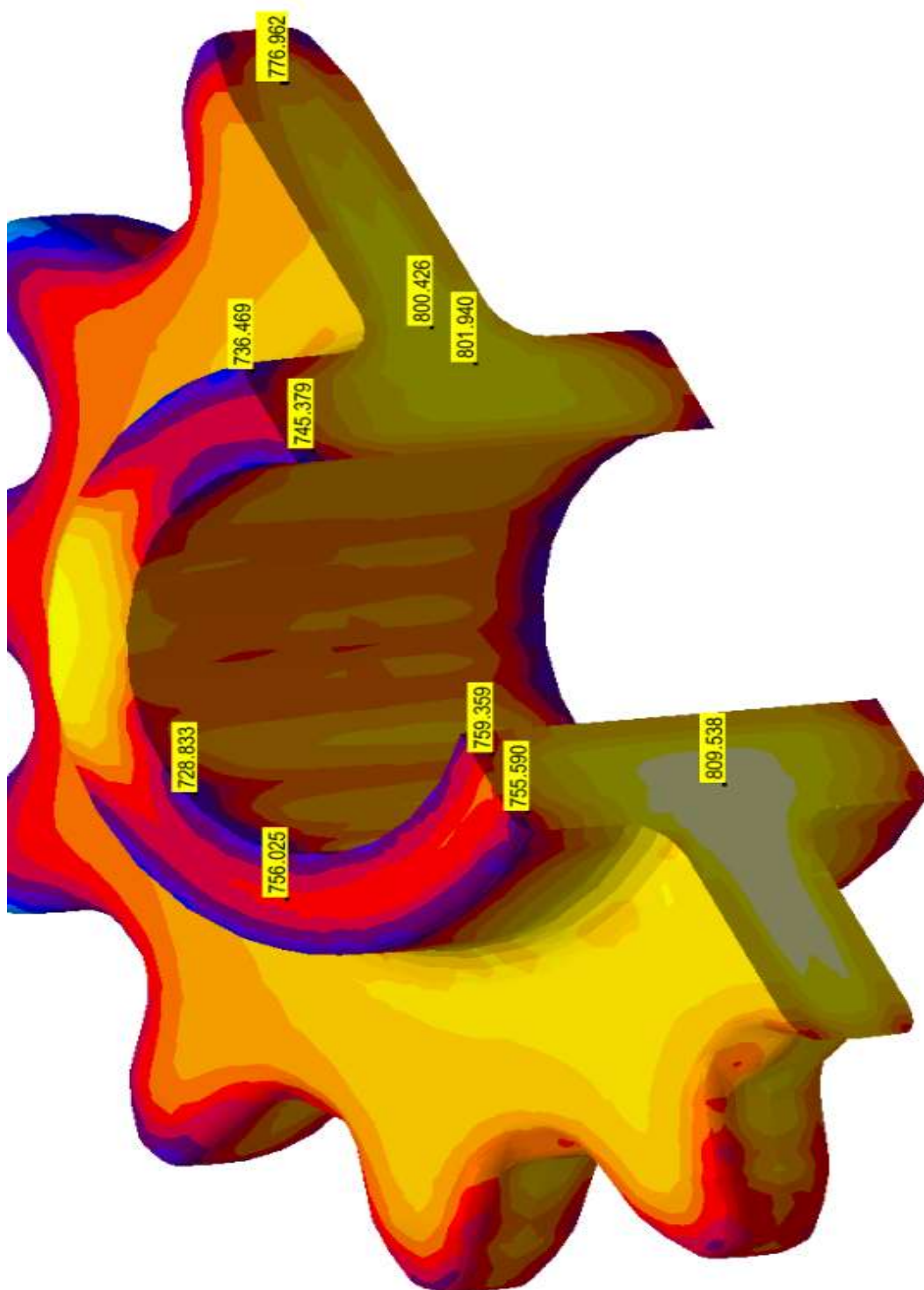
Fonte: Autor (2017).

**APÊNDICE D-** Perfil do escoamento do metal líquido no interior do molde

Fonte: Autor (2017).

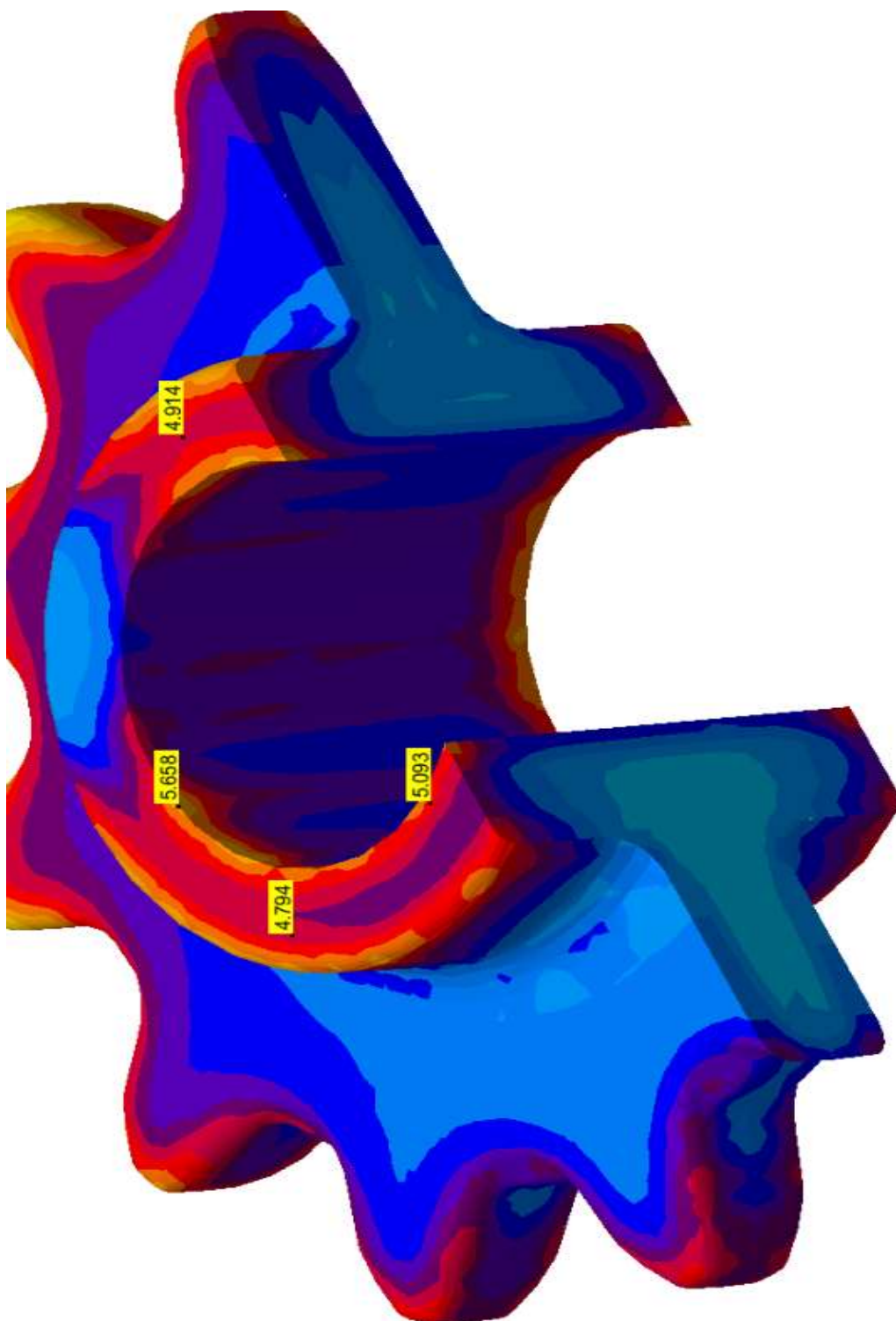


**APÊNDICE E-** Representação do resultado de resistência a tração gerado pelo software magma



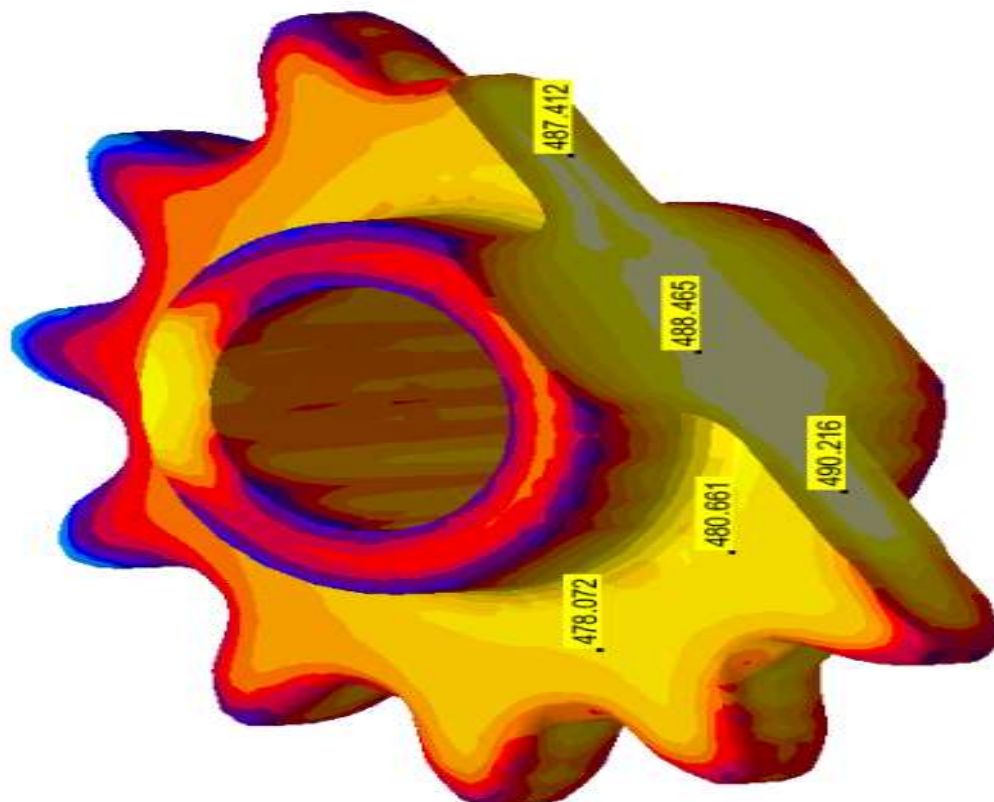
**Fonte:** Autor (2017).

**APÊNDICE F-** Representação do resultado de alongamento gerado pelo software magma

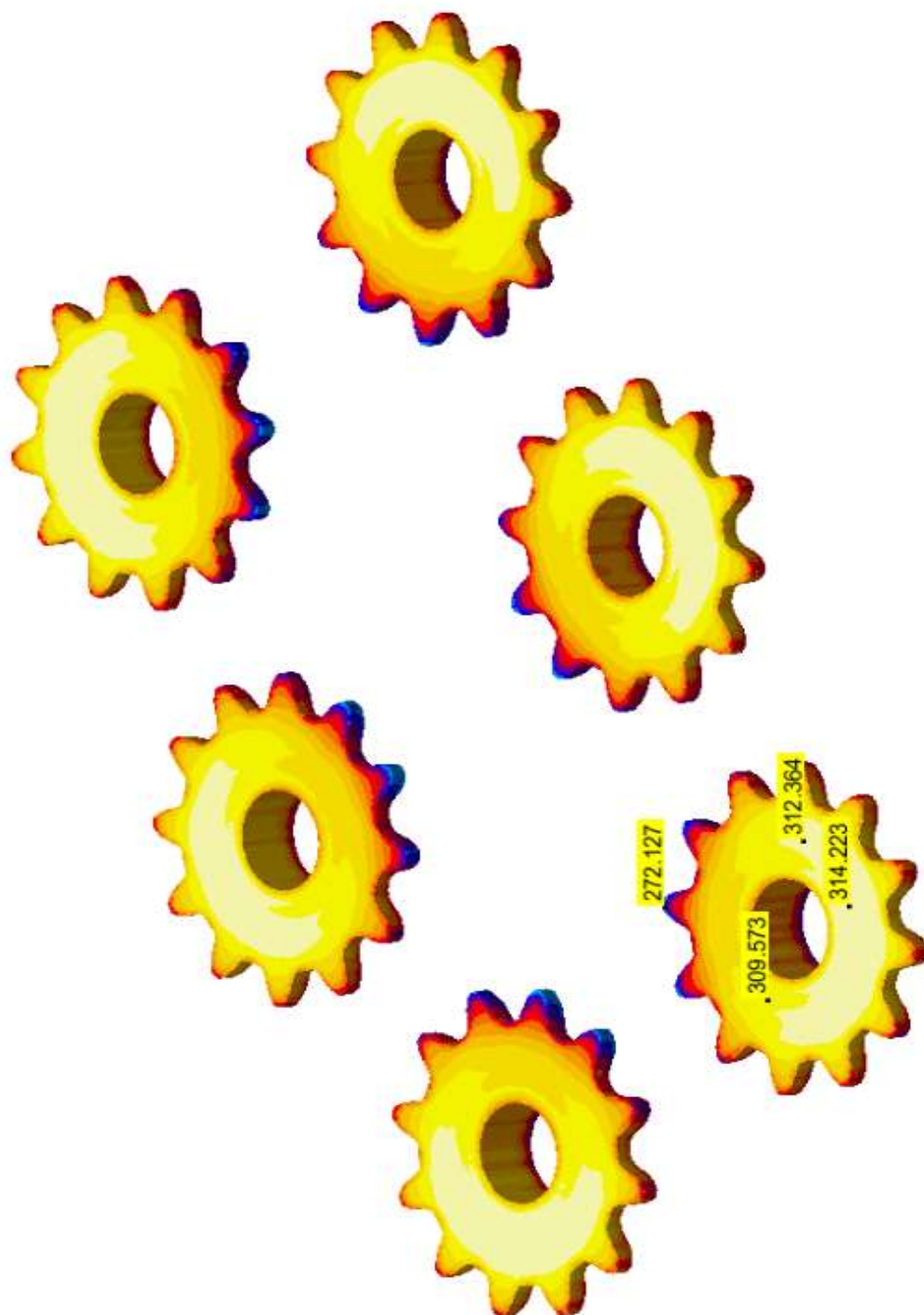


**Fonte:** Autor (2017).

**APÊNDICE G-** Representação do resultado de limite de escoamento gerado pelo software magma



**Fonte:** Autor (2017).

**APÊNDICE H-** Representação do resultado de dureza gerado pelo software magma

**Fonte:** Autor (2017).

## **ANEXOS**

ANEXO A - Disponibilização dos ensaios de tração, dureza e metalográfico.

ANEXO B - Planilhas do Excel para dimensionamento do sistema de alimentação

## ANEXO A - Disponibilização dos ensaios de tração, dureza e metalográfico.

		Pág. 1 de 3 <b>RELATÓRIO DE ENSAIOS</b> Laboratório de Materiais - Departamento da Qualidade Santa Rosa – RS - Brasil	
		N.º DO RELATÓRIO:	RASITABILIDADE: 12/04/2017
DE NOMINAÇÃO / CÓDIGO DO ITEM:	ACI02819940 RODA DENTADA DO EMBOCADOR	PROCEDÊNCIA DO ITEM:	DATA ÚLTIMA ALIBERAÇÃO DESENHO:
TAMANHO DE AMOSTRAGEM:		DATA DA SOLICITAÇÃO:	DATA DO ENSAIO:

**1 TIPO DE ENSAIO SOLICITADO**

Verificar se o item atende as Especificações de Desenho quanto ao Material, Dureza e Propriedades Mecânicas.

**2 ESPECIFICAÇÃO DE DESENHO X RESULTADOS ENCONTRADOS****2.1 MATERIAL****2.1.1 Especificado**

Ferro Fundido Nodular GGG 60- D420/DX420

C	Si	Mn	P	S	Cu	Al	Mg	Cr	Ni
3,40 – 3,65	2,50 – 2,90	0,50 – 0,55	MAX 0,030	MAX 0,025	0,50 – 0,55	MAX 0,025	0,03 – 0,05	MAX 0,155	MAX 0,100

**2.1.2 Encontrado (Valor médio)**

Ferro Fundido Nodular GGG 60- D420/DX420

C	Si	Mn	P	S	Cu	Al	Mg	Cr	Ni
3,58	2,75	0,52	0,020	0,0032	0,54	0,0034	0,031	0,037	0,016

**2.2 DUREZA****2.2.1 Especificado - Dureza de: 217 A 269 HB**

Cav.1
229 HB

**2.2.2 Encontrado****2.3 METALOGRAFIA**

As amostras analisadas apresentam matriz predominante Perlitica/Ferítica, com grafita em formato de nódulos, conforme figuras abaixo, características do Ferro Nodular GGG60, portanto OK.



Fig. 1

Figura 1 Micrografia mostrando a microestrutura presente no item analisado. Ataque Nital 4%. Ampl. 100X.

### 3 PROPRIEDADES MECÂNICAS

#### 3.1 ESPECIFICADO

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)	ALONGAMENTO (%)	LIMITE DE ESCOAMENTO (MPa)
Min 600 MPa	Mín. 3%	Min 380MPa

#### 3.2 ENCONTRADO

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)	ALONGAMENTO (%)	LIMITE DE ESCOAMENTO (MPa)
771,50	5,40	488,14

### 4 DADOS DO ENSAIO

#### 4.1 AMBIENTE DE ENSAIO

- Temperatura: 21 °C ± 3 °C
- Umidade relativa do ar: 65 % ± 20

#### 4.2 PADRÃO DE REFERÊNCIA

Descrição	Fabricante	TAG	Validade Calibração
Durômetro	DIGIMESS	LM - 07	AGOSTO 2017
Microscópio Óptico	TOPCON	LM - 05	Dezembro de 2020
Máquina universal de ensaios (tração)	EMIC	LM - 08	Maior de 2018

### 5 INSTRUÇÕES DE TRABALHO / NORMAS APLICADAS

- ASTM E3-2001: Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens.
- ISO 6506-1:2005: Metallic materials, Brinell hardness test.
- GMS0010002: Global Ductile Cast Iron Material Standard
- ASTM A 536: Standard Specification for Ductile iron Castings
- SAE J434: Automotive Ductile iron Castings
- DIN 1693: Cast iron with nodular graphite unalloyed and low alloy grades

### 6 DISPOSIÇÃO DOS RESULTADOS

Análise	Especificado	Encontrado	Resultado
Material	GGG80-D420/DX420	GGG80- D420/DX420	OK
Dureza	217 A 269 HB	229 HB	OK
Microestrutura	PERLITICA/FERRITICA	PERLITICA/FERRITICA	OK

Responsável pelo Ensaio Jonas Bielec – Auxiliar de Laboratório	Responsável pelo Relatório	Data de Emissão 13/04/2017
---	----------------------------	-------------------------------



R0256 REV00

O(s) resultado(s) é(são) válido(s) exclusivamente para a(s) amostra(s) analisada(s).  
Metalúrgica Candéia Ltda. Estrada para Candéia Km01, nº 380. CEP: 98900-000 – Santa Rosa / RS – Brasil  
Fone/Fax: 55 2512-3131 / 55 2511-1757 E-mail: [qualidade@metalcandea.com.br](mailto:qualidade@metalcandea.com.br) / [contato@metalcandea.com.br](mailto:contato@metalcandea.com.br)

Fonte: Metalúrgica Candéia (2017).

**ANEXO B- Planilhas do Excel para dimensionamento do sistema de alimentação**

**Cálculo para dimensionamento de massalotes**

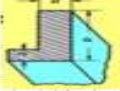
Legenda:

Entradas  

Saídas

Identificar o perfil da figura e determinar o módulo da peça (Mp)

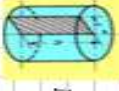
Barra com aba



$$M_p = \frac{a+b}{2 \times (a+b) - c}$$

a = 10 mm  
 b = 10 mm  
 c = 5 mm  
 Mp = 0,2857 cm


Cilindro



$$M_p = \frac{r+h}{2 \times (r+h)}$$

r = 10 mm  
 h = 10 mm  
 Mp = 0,25 cm

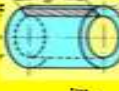
Cilindro inscrito



$$M_p = \frac{r+h}{2 \times (r+h)}$$

r = 10 mm  
 h = 10 mm  
 Mp = 0,25 cm

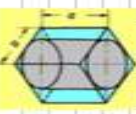
Anel



$$M_p = \frac{a+b}{2 \times (a+b)}$$

a = 66 mm  
 b = 18 mm  
 Mp = 0,3316 cm

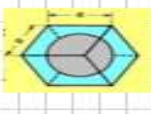
Cilindro inscrito no cubo



$$M_p = \frac{a}{6}$$

d = 10 mm  
 Mp = 0,1667 cm

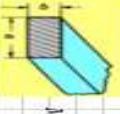
Esfera inscrita



$$M_p = \frac{a}{6}$$

d = 10 mm  
 Mp = 0,1667 cm

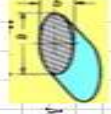
Barra



$$M_p = \frac{a+b}{2 \times (a+b)}$$

a = 10 mm  
 b = 10 mm  
 Mp = 0,25 cm

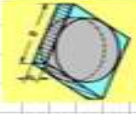
Seção elíptica



$$M_p = \frac{a+b}{2 \times (a+b)}$$

a = 10 mm  
 b = 10 mm  
 Mp = 0,25 cm

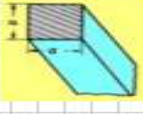
Disco/peça onde a ≥ 5d



$$M_p = \frac{d}{2}$$

d = 10 mm  
 Mp = 0,5 cm


Barra quadrada



$$M_p = \frac{a}{4}$$

a = 10 mm  
 Mp = 0,25 cm

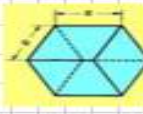
Cilindro infinito



$$M_p = \frac{d}{4}$$

d = 10 mm  
 Mp = 0,25 cm

Cubo



$$M_p = \frac{a}{6}$$

d = 10 mm  
 Mp = 0,1667 cm

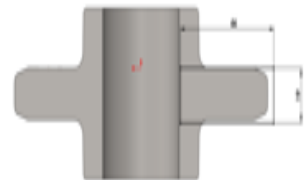
**Perda de temperatura durante o vazamento**

Tempo da peça (K)	Perda de temperatura (°C)
5	70
50	45
100	35
>1000	25

Carbono equivalente

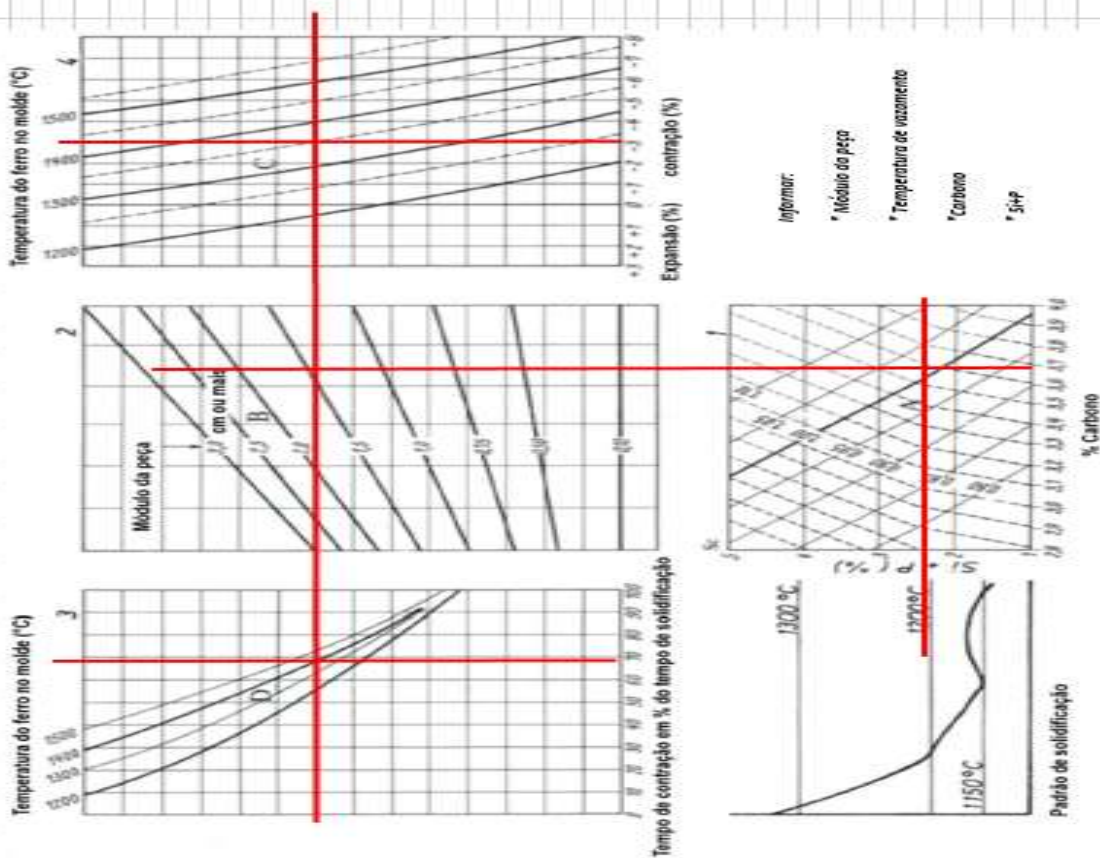
Si	=	2,71
C	=	3,68
P	=	0,02
Ceq	=	4,60333

$$C_{eq} = C + \frac{1}{3}Si + P$$





**Determinação do tempo de contração da peça durante a solidificação (Tc)**



Mova as linhas em vermelho de acordo com as informações solicitadas, tendo como ponto de partida o módulo da peça.

Exemplo:

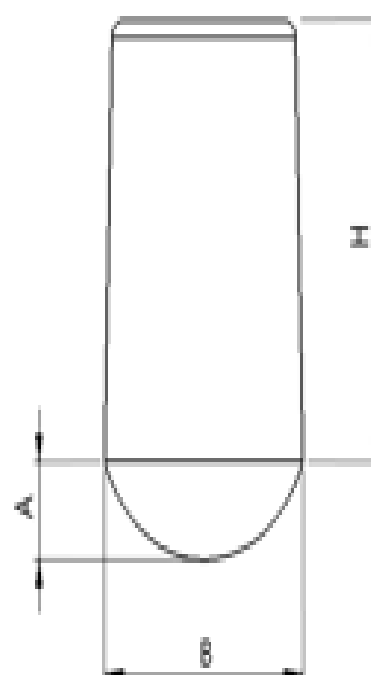
Para moldes pouco rígidos deve ser acrescentado uma expansão de 1,5%, ou seja, uma necessidade maior de metal líquido

**Determinação do módulo do massalote (Mm)**

Mp	=	0,74		Coent	=	1,5	
Tc	=	70	%				
$Mm = Mp * 1,2 * \sqrt{\frac{Tc}{100}}$				$Mm = 0,93 \text{ cm}$			

### Determinação das dimensões do massalote

Módulo	A (mm)	H (mm)	B (mm)	Peso (Kg)
0,50	21	42	32	0,18
0,60	26	52	39	0,34
0,70	30	60	45	0,51
0,80	34	68	51	0,72
0,90	38	76	57	0,73
1,00	43	86	65	1,48
1,10	47	94	71	1,93
1,20	51	102	77	2,48
1,30	55	110	83	2,77
1,40	59	118	89	2,45
1,50	61	122	92	4,34
1,60	68	136	102	5,88
1,70	72	144	108	7
1,80	76	152	114	7,14
1,90	80	160	120	9,8
2,00	85	170	128	10,78
2,20	95	190	143	14,7
2,40	102	204	153	19,6
2,60	110	220	165	23,1
2,80	118	236	177	30,8
3,00	127	254	191	37,1
3,20	133	266	200	45,5
3,40	145	290	218	53,2
3,60	152	304	228	66,5
3,80	160	320	240	77
4,00	169	338	254	91
4,25	180	360	270	112
4,50	190	380	285	126
7,75	200	400	300	147
5,00	212	424	318	175



## Determinação do número de massalotes necessários

r de distância de alimentação

Carbono equivalente

$$C_{eq} = C + \frac{1}{3}Si + P$$

$$Si = 2,71$$

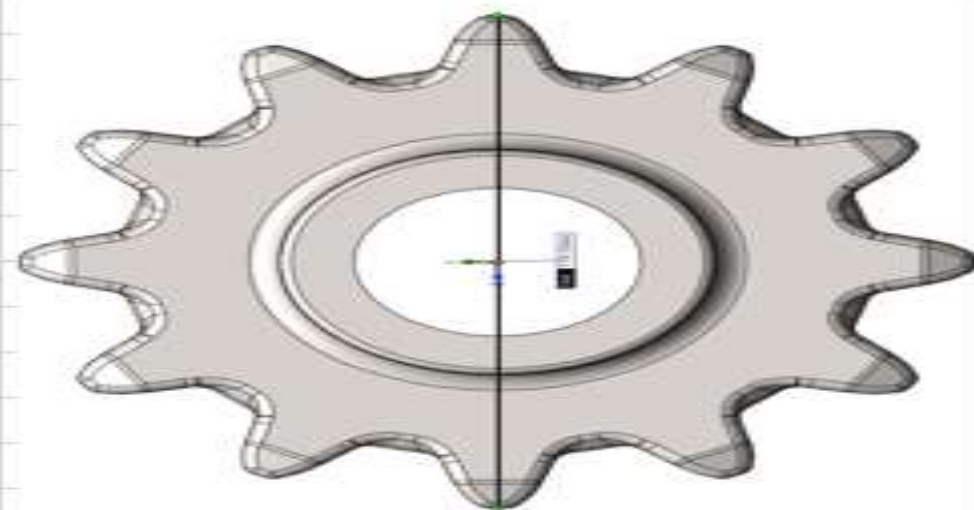
$$C = 3,68$$

$$P = 0,02$$

$$C_{eq} = 4,60003$$

Ferro fundido Modular	
C <sub>eq</sub> = 3,6	FD = 6
C <sub>eq</sub> = 4,2	FD = 6,5
C <sub>eq</sub> = 4,3	FD = 7
C <sub>eq</sub> = 4,4	FD = 9

Ferro fundido Cinzento	
C <sub>eq</sub> = 3	FD = 6,5
C <sub>eq</sub> = 3,4	FD = 7,7
C <sub>eq</sub> = 3,9	FD = 8,8
C <sub>eq</sub> = 4,3	FD = 10



Número de massalotes

N<sub>m</sub> = Número de massalotes

L = Comprimento ou Circunferência média da peça

d = Diâmetro do massalote

FD = Distância de alimentação

T = Menor seção através de qual procede a alimentação

$$N_m = \frac{L}{d + FD + T}$$

$$L = 179,33 \text{ mm}$$

$$d = 65 \text{ mm}$$

$$FD = 9 \text{ mm}$$

$$T = 17,96 \text{ mm}$$

$$N_m = 1,03683$$

### Determinação da demanda do metal da peça

$P_p$	=	Peso da peça
$P_m$	=	Peso do massalote
$C_p$	=	Contração da peça
$C_a$	=	Capacidade de alimentação dos massalotes

### Capacidade de alimentação dos massalotes

0,1	→	Massalotes naturais frios
0,2	→	Massalotes naturais aquecidos
0,4	→	Massalotes naturais exotérmicos (com luras)

$$P_p < C_a * \left( \frac{P_m * 100}{C_p} \right)$$

$P_p$	=	3,08	}	3,86667
$C_a$	=	0,2		
$P_m$	=	1,48		
$C_p$	=	3		

Status: **Ok**

Fonte: Metalúrgica Candeia (2017).