

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

LARISSA DE SOUZA FIGUEREDO

**ANÁLISE DE DEFEITO DE FUNDIÇÃO EM COMPONENTE DE
FERRO FUNDIDO NODULAR OBTIDO POR MOLDAGEM *COLD BOX***

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA
2019

LARISSA DE SOUZA FIGUEREDO

**ANÁLISE DE DEFEITO DE FUNDIÇÃO EM COMPONENTE DE
FERRO FUNDIDO NODULAR OBTIDO POR MOLDAGEM *COLD BOX***

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Silvia Midori Higa

Coorientador: João Baptista Filho

LONDRINA
2019



TERMO DE APROVAÇÃO

LARISSA DE SOUZA FIGUEREDO

ANÁLISE DE DEFEITO DE FUNDIÇÃO EM COMPONENTE DE FERRO FUNDIDO NODULAR OBTIDO POR MOLDAGEM *COLD BOX*

Trabalho de conclusão de curso apresentado no dia 10 de junho de 2019 como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof^a Dr. Amadeu Lombardi Neto
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia Mecânica)

Prof^o. Diego Ruben Martin
(Editora e Distribuidora Educacional S/A)

Prof^a. Dr^a. Silvia Midori Higa
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)

Prof^a. Dr^a. Silvia Midori Higa
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)
Coordenadora do Curso de Engenharia de Materiais

“A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.”

AGRADECIMENTOS

Primeiramente e com todo meu carinho agradeço aos meus pais, Aparecido e Maria, por tornarem possível a conclusão de mais essa etapa da minha vida. Sei o quanto vocês se doaram para a realização desse sonho.

Agradeço ao meu amigo e namorado João Vitor, que esteve ao meu lado me apoiando e incentivando.

Agradeço aos amigos que estiveram comigo, tornando esta etapa mais fácil.

Agradeço aos que contribuíram diretamente para o desenvolvimento deste trabalho, em especial:

A orientadora Prof^a. Dr^a. Silvia Midori Higa por todo o seu tempo dedicado, por seu comprometimento durante todo o trabalho e por me ajudar sempre que foi preciso.

Aos professores membros da banca, Prof^a Dr. Amadeu Lombardi Neto e Prof^o. Diego Ruben Martin, por todas as contribuições feitas para a melhoria deste trabalho.

Aos funcionários da empresa Tiger, em especial ao meu coorientador João Baptista e ao seu filho Tomás Baptista que tanto me auxiliou nesta etapa.

E agradeço a Deus, por ter colocado todas essas pessoas no meu caminho e por me permitir chegar até aqui.

RESUMO

FIGUEREDO, L. de S. **Análise de defeito de fundição em componente de ferro fundido nodular obtido por moldagem *Cold Box***. 2019. 58p. Exame de qualificação do trabalho de conclusão de curso. (Bacharelado em Engenharia de Materiais) – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2019.

A presença de defeitos é um problema frequente no processo de fabricação de produtos metálicos por fundição, pois dependendo do tipo e quantidade, inviabilizam a aplicação final da peça e, na maioria das vezes, causa prejuízo aos fabricantes. Quando os defeitos aparecem, o profissional desta área deve ser capaz de identificar e compreender sua causa, para atuar de forma corretiva sob este. Um defeito muito comum dos fundidos são os poros ou vazios, e sua origem pode ser consequência da contração do metal durante a solidificação ou decorrente de gases. Neste trabalho foi estudado um defeito ocorrido em uma peça de ferro fundido nodular classe FE42012 da empresa Fundição e Metalúrgica Tiger, obtida pelo processo *Cold Box*, nomeada de Gaiola, a fim de colaborar com a identificação do tipo, a causa e possível solução para este. Para isso, a solidificação da peça foi estudada por meio do software de fundição Click2Cast, utilizado para simular o modo de solidificação das peças e análise de defeitos, juntamente com cálculos dos módulos e da contração para avaliação dos canais de alimentação e dimensionamento dos massalotes, e em conjunto foram realizadas análises visuais macroscópica e microscópica para identificação do defeito. Com o desenvolvimento do trabalho, foi possível identificar que o defeito foi originado durante o processo de solidificação do ferro fundido, devido à contração deste, causado por uma alimentação ineficiente em razão de uma falha no projeto de modelagem. Através dos cálculos realizados em paralelo com a análise no software foi possível prever a necessidade de modificar o diâmetro e altura do massalote e realizar modificações na região onde ocorria a transferência do metal do massalote à peça, a fim de prolongar o tempo de solidificação nesta região. Um novo modelo foi testado, analisado pelo software Click2Cast, o qual indicou uma diminuição nas chances de porosidade de 100% para menos que 3% em comparação com o modelo original.

Palavras-chave: Porosidade. Ferro fundido nodular. Solidificação. Click2Cast.

ABSTRACT

FIGUEREDO, L. de S. **Analysis of foundry defect in nodular cast iron component obtained by Cold Box Molding**. 2019. 58p. Qualification exam of the completion of course work. (Bachelor of Materials Engineering) – Academic Department of Materials Engineering. Federal Technological University of Paraná. Londrina, 2019.

The presence of defects is a frequent problem in the manufacturing process of metal products by foundry, because depending on the type and quantity, they make the final application of the workpiece unfeasible and, most of the time, it causes financial loss to the manufacturers. When defects appear, the professional in this area should be able to identify and understand their cause, to act in a corrective manner under this. A very common defect of the castings is the pores or voids, and its origin may be a consequence of the contraction of the metal during solidification or resulting from gases. In this study a defect occurred in a nodular cast iron piece FE42012 class of the company Fundação e Metalúrgica Tiger, obtained by the Cold Box process, named Cage, in order to collaborate with the identification of the type, the cause and possible solution for this. For this, the solidification of the part was studied by means of the foundry software Click2Cast, used to simulate the solidification mode of the parts and analysis of defects, together with calculations of the modules and contraction for evaluation of the feed channels and sizing of the risers, and together with macroscopic and microscopic visual analyses to identify the defect. With the development of the work, it was possible to identify that the defect originated during the solidification process of the cast iron, due to its contraction, caused by an inefficient feeder specified in the mold design. Through the calculations performed in parallel with the analysis in the software it was possible to predict the need to modify the diameter and height of the riser and make modifications in the region where the metal from the riser transfers to the part, in order to prolong the time solidification in this region. A new model was tested, analyzed by the Click2Cast software, which indicated a decrease in the porosity probability of 100% to less than 3% compared to the original model.

Keywords: Porosity. Nodular cast iron. Solidification. Click2Cast.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Microestrutura de ferro fundido nodular, de matriz ferrítica. Ataque: Nital	15
Figura 2 – Diagrama Fe-C. Sistema metaestável em linhas sólidas e sistema estável em linhas tracejadas	18
Figura 3 – Esquema do crescimento da grafita em veios e em nódulos	19
Figura 4 – Estágio de crescimento da grafita esférica e austenita	20
Figura 5 – Crescimento da austenita e grafita no ferro nodular.....	20
Figura 6 – Variação do volume específico em função da temperatura, na solidificação dos ferros fundidos	21
Figura 7 – Vazamento do metal líquido no molde	23
Figura 8 – Modelo e molde do processo <i>Cold Box</i>	24
Figura 9 – Estrutura molecular dos aglomerantes do sistema <i>Cold Box</i>	25
Figura 10 – Macrorrechupes, microrrechupes e distorções dimensionais.....	29
Figura 11 – Interface sólido/ líquido na solidificação do metal	30
Figura 12 – Microporosidade em ferro fundido nodular. Sem ataque.....	30
Figura 13 – Microporosidade (em preto) em ferro fundido nodular. Onde em A e B apresenta microporosidade por contração, C e D microporosidade de gás ...	32
Figura 14 – Geometria de peça onde foi definido a malha.....	33
Figura 15 – Modo de solidificação. Última região a solidificar em vermelho	34
Figura 16 – Peça semi-usinada: (a) vista frontal; (b) vista superior; (c) vista superior da peça semi-usinada e peça já usinada cortada ao meio à direita	35
Figura 17 – Desenho da peça em 3D. Sistema de alimentação (indicado em (a), em azul) e massalote (indicado em vermelho em (a) e (b)). Onde a) vista superior, b) vista frontal, c) vista lateral e d) visão mais ampla da peça (superior/frontal)	36

Figura 18 – Fluxograma de atividades	37
Figura 19 – Amostra 1 retirada da peça após a localização do defeito	38
Figura 20 – a) Região onde houve o corte da peça; b) defeito encontrado circulado em vermelho; c) aproximação do defeito	39
Figura 21 – Amostra 2	39
Figura 22 – Microestrutura da amostra 1. Aumento 50x. Ataque Nital	42
Figura 23 – Microestrutura da amostra 2. Aumento 50x. Ataque Nital	43
Figura 24 – Microestrutura da amostra 2. Aumento 500x. Ataque Nital	44
Figura 25 – Módulos de solidificação representados por valor e gradiente de cores, onde cor vermelha corresponde ao maior módulo e a azul ao menor módulo. Onde (a) vista inclinada (superior/frontal) (3D), (b) vista superior e (c) vista inferior	47
Figura 26 – Simulação da solidificação no final do processo. Vista superior	47
Figura 27 – Simulação da solidificação um pouco antes do final do processo. Vista superior levemente inclinada	48
Figura 28 – Resultado da análise de porosidade: (a) vista superior; (b) vista inclinada (superior/frontal) (3D)	49
Figura 29 – Resultado da análise de porosidade. Probabilidade em 100%	49
Figura 30 – Simulação da solidificação um pouco antes do final para o segundo massalote: (a) vista superior e (b) vista superior capturada após (a)	50
Figura 31 – Resultado da análise de porosidade para o segundo massalote: (a) vista superior; (b) vista inclinada (superior/frontal) (3D)	51
Figura 32 – Resultado da análise de porosidade para o segundo massalote: (a) probabilidade 1% e (b) probabilidade 3%	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades mecânicas do ferro fundido nodular segundo ABNT NBR 6916:2017.....	16
Tabela 2 – Composições de porcentagem em peso para diferentes tipos de ferros fundidos nodulares de acordo com a ABNT NBR 8650:2015	17
Tabela 3 – Valores do coeficiente k , e do coeficiente de eficiência k' do massalote.....	26
Tabela 4 – Valores para coeficiente de contração volumétrica (r) do ferro fundido nodular.....	27
Tabela 5 – Densidade dos ferros fundidos.....	27
Tabela 6 – Valores de área superficial e volume, da peça e massalote e seus respectivos módulos calculados.....	44
Tabela 7 – Módulo e volume do massalote original do projeto e do exigido de acordo com as equações 3 e 7	45
Tabela 8 – Dimensões originais e dimensões recomendadas para o massalote do projeto	46

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	13
2.1 OBJETIVO GERAL	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3 JUSTIFICATIVA	14
4 REFERENCIAL TEÓRICO	15
4.1 FERRO FUNDIDO NODULAR	15
4.2 SOLIDIFICAÇÃO DO FERRO FUNDIDO NODULAR	17
4.3 FUNDIÇÃO	22
4.3.1 Fundição por processo de moldagem <i>Cold Box</i>	24
4.3.2 Defeitos de fundição	28
4.4 CLICK2CAST	32
5 MATERIAIS E MÉTODOS	35
5.1 MATERIAIS	35
5.2 MÉTODOS	36
5.2.1 Fluxograma	36
5.2.2 Análise macroscópica	37
5.2.3 Caracterização da microestrutura	40
5.2.4 Regra dos módulos e de contração	40
5.2.5 Análise de solidificação	40
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
6.1 Análise macroscópica	41
6.2 Caracterização da microestrutura	42
6.3 Regra dos módulos e de contração	44
6.4 Análise de solidificação	46
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	53

8 CRONOGRAMA	55
REFERÊNCIAS.....	56

1 INTRODUÇÃO

A fundição é um dos métodos mais antigos de fabricação de objetos metálicos. O processo consiste em se verter um metal a uma temperatura acima da sua temperatura de fusão na cavidade de um molde e após a sua solidificação, esse assume formato e dimensões muito próximas do produto final. O processo possui diversas variáveis, tais como temperatura de vazamento do metal, escolha do molde utilizado, modo de solidificação do metal, que se não devidamente controladas podem originar defeitos.

A fundição por *Cold Box* consiste em um processo de moldagem em que se utiliza areia para a fabricação do molde. Para obtenção do molde, a areia é misturada com duas partes de resina e um catalisador na forma de gás para acelerar o processo de cura destas. Este processo é usado para obtenção de moldes e macho utilizados na fabricação de peças de metais ferrosos

Um tipo de defeito comum em fundição é denominado de vazios, que podem aparecer de forma concentrada, sendo estes os macrorrechupes ou macroporosidades, ou em pequenos tamanhos, como microrrechupes ou microporosidades, decorrentes da contração do metal durante a sua solidificação ou originado a partir de gases.

Visto que a presença de defeito pode comprometer as propriedades mecânicas do material, como por exemplo, sua vida em fadiga e resistência a impacto e, por conseguinte, a aplicação da peça, estes devem ser evitados ou corrigidos se originados durante o processo de fundição.

Atualmente, existe uma grande variedade de ferramentas que auxiliam na compreensão da solidificação de componentes, permitindo prever descontinuidades associadas aos processos de enchimento e solidificação do metal no molde. Com essas ferramentas é possível prever falhas e como consequência aumentar a produtividade, uma vez que ocorre a diminuição de refugos.

O Click2Cast é um software de fundição que simula o processo desde o enchimento do molde pelo metal até a sua completa solidificação. A leitura dos resultados pode ser vista diretamente no software, onde a peça a ser analisada e a resposta dada pelo programa podem ser vistas em 3D. O referido software é

privado, contudo uma licença estudantil foi concedida para a realização deste trabalho.

Sendo assim, este trabalho tem por intuito estudar um defeito presente em uma peça de ferro fundido nodular FE42012 obtida pelo processo de fundição por moldagem *Cold Box*, nomeada de Gaiola, colaborando assim com a Empresa Fundição e Metalúrgica Tiger na possível resolução do problema, por meio do uso de software de fundição e cálculo dos módulos e contração para verificação dos canais de alimentação e massalote, juntamente com análise de sanidade da peça e de sua microestrutura.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo analisar o defeito de uma peça de ferro fundido nodular classe FE 42012, nomeada de Gaiola.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A partir do objetivo geral, são definidos os seguintes objetivos específicos:

- Observar a localização desses defeitos na peça de modo a mapear os pontos de ocorrência;
- Identificar o tipo de defeito por meio de análise macroscópica e microscópica;
- Analisar o modo de solidificação da peça por meio do uso de um software de simulação, o Click2Cast;
- Verificar se o sistema de alimentação e massalote do projeto de fundição está adequado por meio da Regra dos módulos e de contração;
- Levantar as possíveis causas desse defeito;
- Indicar possível solução ou forma de se evitar tal defeito.

3 JUSTIFICATIVA

A justificativa deste trabalho está baseada em um problema real ocorrido em uma empresa de fundição. O objeto de estudo trata-se de uma peça que constitui o sistema da caixa de câmbio de caminhão, sendo esta submetida a tensões cíclicas e impacto constantemente durante o seu trabalho. A peça é obtida por fundição pelo processo de moldagem *Cold Box* e então, segue para a etapa de usinagem, realizada diretamente pelos clientes da empresa. Durante essa etapa é que são visualizados os defeitos nos fundidos.

Assim, por não atender as especificações do projeto, devido à presença recorrente desse defeito e sem informações necessárias para atuar de forma corretiva sob tal, a peça em questão tem gerado uma grande quantidade de refugo, sendo prejudicial em quesitos lucrativos ao fabricante. Todo o refugo gerado pela peça em questão é causado por este defeito, chegando até 30% do total de peças fabricadas. De acordo com dados da empresa, no mês de maio de 2018, por exemplo, 62 peças foram refugadas de um total de 295 fundidas.

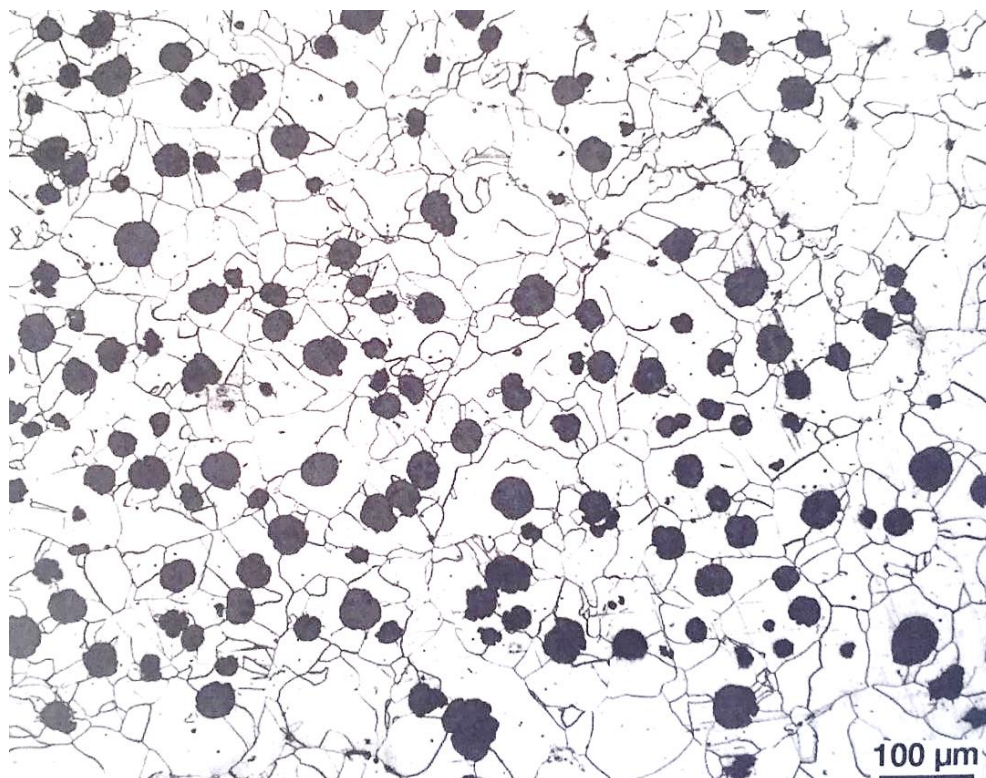
Desta forma, este trabalho tem por intuito colaborar com Empresa Fundição e Metalúrgica Tiger na resolução desse problema de modo a tentar responder o tipo e a causa da origem do defeito presente na peça em questão.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 FERRO FUNDIDO NODULAR

O ferro fundido nodular é uma classe dentre os materiais metálicos que tem como principal característica a presença do carbono livre na forma de grafita com formato esferoidal. Sua microestrutura típica pode ser vista na Figura 1, onde se tem a matriz ferrítica (região mais clara) e os nódulos de grafita (regiões escuras).

Figura 1 — Microestrutura de ferro fundido nodular, de matriz ferrítica. Ataque: Nital.



Fonte: Colpaert, 2008.

O formato da grafita do ferro fundido nodular é obtido quando na liga Fe – C no estado líquido são adicionados certos elementos de liga como cério e magnésio. A presença da grafita esferoidal garante as propriedades

de ductilidade, tenacidade e resistência mecânica dos ferros nodulares (CHIAVERINI, 1988).

As propriedades mecânicas do ferro fundido nodular variam conforme o controle da sua microestrutura, que é composta por uma matriz ferrítica, perlítica ou ferrítica-perlítica, com grafita em diferentes tamanhos e quantidade.

A classificação dos ferros fundidos nodulares pode ser vista na Tabela 1, conforme a ABNT NBR 6916:2017, em função de suas propriedades mecânicas e estrutura metalográfica predominante. Nota-se que com a predominância da matriz ferrítica há um ganho na ductilidade (alongamento) do material, entretanto à custa de uma diminuição da resistência a tração.

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

Classe	Limite mínimo de resistência a tração (Mpa)	Limite mínimo de escoamento (0,2%) - LE (Mpa)	Alongamento mínimo em (%)	Faixa aproximada da dureza Brinell	Estrutura metalográfica predominante
FE 38017	380	240	17	140-180	Ferrítica
FE 42012	420	280	12	150-200	Ferrítica
FE 50007	500	350	7	170-240	Ferrítica e Perlítica
FE 60003	600	400	3	210-280	Perlítica
FE 70002	700	450	2	230-300	Perlítica
FE 80002	800	550	2	240-312	Perlítica
FE 38017	380	240	17	140-180	Ferrítica
– RI *					

– RI* Classe com requisito de impacto

Fonte: ABNT, 2017.

A forma mais usual de classificar os ferros fundidos nodulares é através do limite de resistência a tração (em MPa), e conforme o alongamento mínimo (%) obtido neste ensaio (COLPAERT, 2008).

Em termos de composição química, alguns valores são pré-estabelecidos, como os teores de carbono em torno de 3,7 % e de silício de 2,5% (em peso). Contudo, a maior parte das especificações, o limite de teor de fósforo é inferior a 0,8%. No geral, os ferros nodulares possuem teores de fósforo e enxofre muito mais baixo do que outros ferros fundidos (COLPAERT, 2008).

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

Tabela 2 – Composições de porcentagem em peso para diferentes tipos de ferros fundidos nodulares de acordo com a ABNT NBR 8650:2015.

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

Fonte: ABNT, 2015.

4.2 SOLIDIFICAÇÃO DO FERRO FUNDIDO NODULAR

Para entender a solidificação do ferro fundido nodular é necessário compreender a influência de alguns elementos químicos que o compõe.

Sabe-se que os ferros fundidos são constituídos principalmente de ferro e carbono. A definição convencional dita que os ferros fundidos são ferros com carbono acima de 2% em sua composição. Nos ferros fundidos também estão presentes altos teores de silício, sendo por isso considerados como uma liga ternária de Fe – C – Si, cuja composição é expressa em função do carbono equivalente (Ceq), de acordo com a equação 1.

$$Ceq = \% Ct + (\%Si + \%P)/3 \quad (1)$$

Onde: Ct é o carbono total.

Essa equação indica que na base de porcentagem em peso, os teores de silício e fósforo do ferro fundido afetam as propriedades mecânicas, do mesmo modo que o carbono total, porém, somente em um terço (CHIAVERINI, 1988).

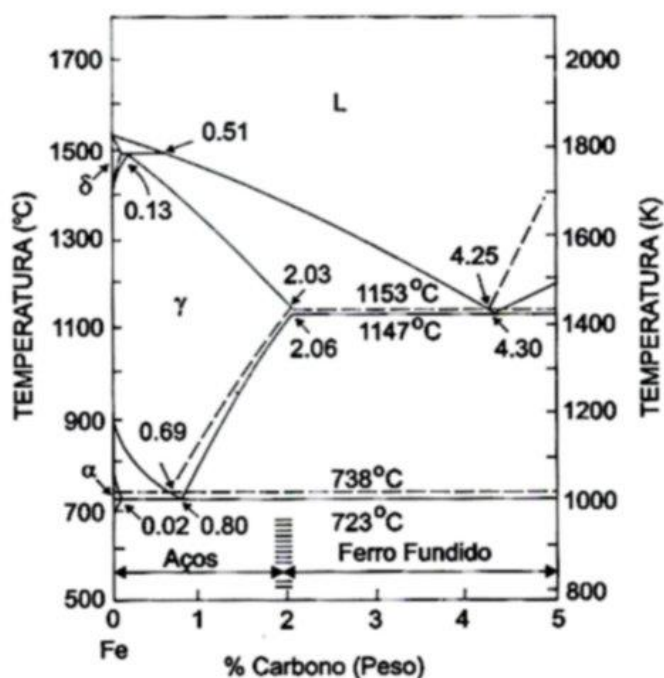
O silício dificulta a precipitação da cementita facilitando a formação da grafita. Quando adicionado no ferro, ele provoca alteração das distâncias entre os patamares eutéticos de equilíbrio estável e metaestável do diagrama Fe – C, aumentando a distância entre eles. No diagrama metaestável o ponto eutético corresponde a 4,3% de carbono em peso, na temperatura de 1147°C (GARCIA, 2007).

Normalmente, a distância entre os patamares de equilíbrio metaestável e estável é de 7°C, e com a adição de 2% de silício é possível aumentar esta distância para 35°C. Quando isto ocorre, o eutético estável cresce de forma preferencial ao metaestável, ou seja, neste caso a grafita crescerá no ferro de forma preferencial a cementita (GARCIA, 2007).

A diferença desses patamares pode ser vista no diagrama Fe – C ilustrado na Figura 2, onde o sistema metaestável está representado em linhas sólidas e sistema estável em linhas tracejadas.

O fósforo como foi visto é usado em porcentagem muito pequena, por isso não será discutida a sua influência neste trabalho.

Figura 2 — Diagrama Fe-C. Sistema metaestável em linhas sólidas e sistema estável em linhas tracejadas.



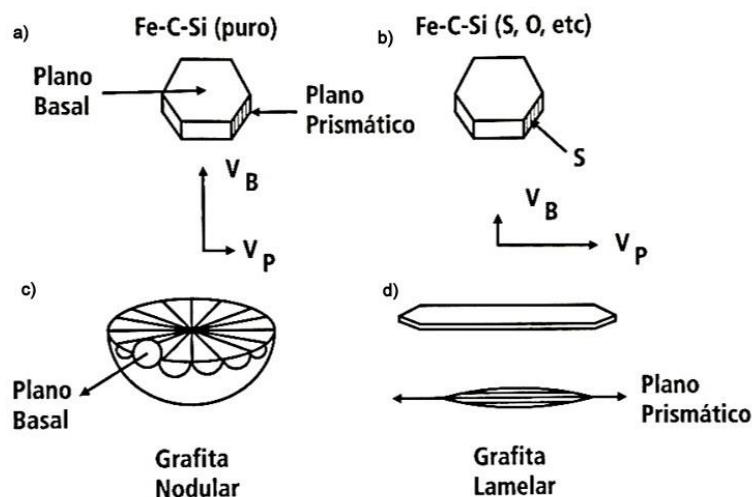
Fonte: Garcia, 2007.

O magnésio e o cério são outros importantes elementos de liga, como já foi dito, eles agem como modificadores da grafita, fazendo com que ela cresça na forma esferoidal. O mecanismo ocorre da seguinte forma: A grafita tem estrutura hexagonal e durante a sua solidificação o seu crescimento pode ocorrer na direção dos planos basais ou prismáticos. Esse processo pode ser melhor compreendido ao se analisar a Figura 3, onde em (a) pode-se observar a forma hexagonal da grafita.

Os elementos enxofre e oxigênio, que são elementos sempre presentes nos ferros fundidos comerciais, tendem a ser adsorvidos pelos planos prismáticos (Figura 3b), reduzindo a energia interfacial destes planos, que atingem valores menores que o plano basal, neste caso a grafita cresce preferencialmente no plano prismático (Figura 3d) (GUESSER,2009).

Ao adicionar o magnésio ou cério eles agem como fortes desoxidantes e dessulfurantes, removendo assim o oxigênio e enxofre da solução, favorecendo o crescimento da grafita no plano basal (Figura 3c) (GUESSER,2009).

Figura 3 — Esquema do crescimento da grafita em veios e em nódulos.



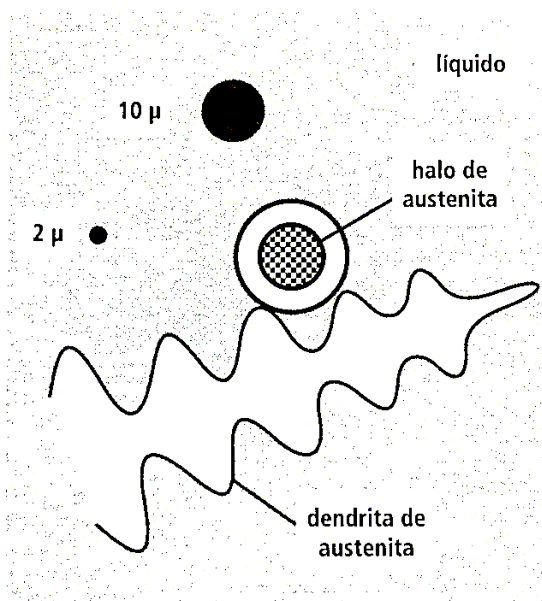
Fonte: Adaptado de Guesser,2009 apud Mcswain; Bates 1974.

No processo de solidificação do ferro fundido nodular há nucleação de duas fases sólidas, a grafita como foi visto anteriormente, e a austenita, pode-se dizer que sua solidificação é do tipo eutético divorciado (ASM, 1998). Isto significa que existe uma primeira etapa na qual a grafita cresce em contato com o líquido, logo após ela

é envolvida por um halo (círculo) de austenita e o crescimento se dará pela difusão deste halo de austenita. Isto só acontece pelo fato da velocidade de crescimento da austenita ser superior à da grafita. (GUESSER,2009; TEIXEIRA, 2014)

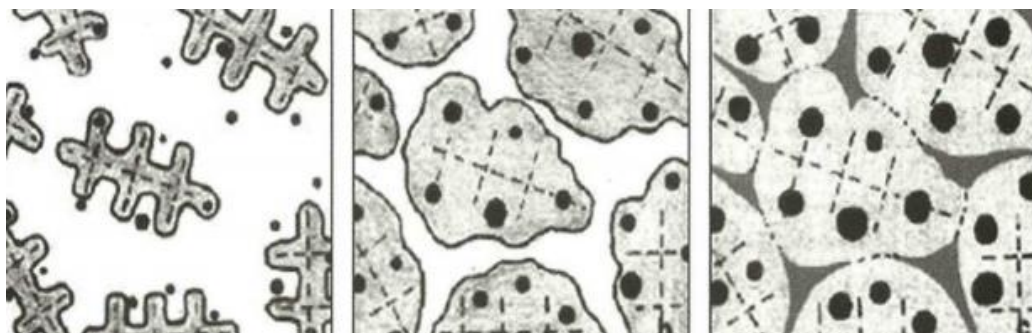
Observando as Figuras 4 e 5 tem-se uma melhor compreensão do estágio de crescimento da grafita (parte mais escura) e austenita (parte mais clara) durante a solidificação do ferro fundido nodular. Na Figura 4 ocorre a primeira etapa da formação da grafita envolvida pelo halo de austenita, e na Figura 5, o avanço de solidificação com o crescimento destas.

Figura 4 — Estágio de crescimento da grafita esférica e austenita.



Fonte: Guessser,2009 apud Lux et al,1974.

Figura 5 — Crescimento da austenita e grafita no ferro nodular.



Fonte: Guessser 2009 apud Rivera et al., 2003.

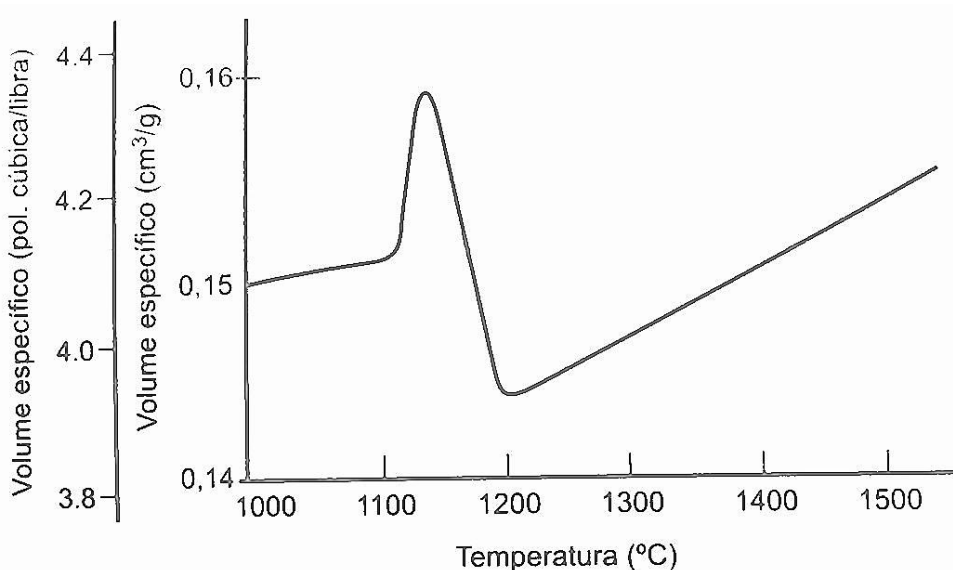
Ainda é possível observar na Figura 4 que a austenita se solidifica com formato dendrítico. Este fato é um problema na indústria de fundição e o motivo será discutido posteriormente.

Em todas as ligas fundidas ocorre contração durante o resfriamento do líquido no molde e durante a passagem líquido/sólido. Nos ferros fundidos, contudo, pode ocorrer uma etapa de expansão durante a solidificação, devido a precipitação da grafita da reação eutética (GUESSER,2009).

A expansão volumétrica ocorre devido a menor densidade da grafita, sendo que a densidade desta é cerca de três vezes menor que a do ferro. A variação típica do volume dos ferros fundidos durante a solidificação pode ser vista na Figura 6. Durante o resfriamento, numa primeira etapa tem-se a contração do líquido, até uma temperatura de aproximadamente 1200°C, seguido de uma expansão devido a reação eutética com a precipitação da grafita até aproximadamente 1140°C, e logo após uma contração devido a solidificação (BALDAM,2014).

Desse modo, a expansão pode ser aproveitada para compensar a contração de solidificação da austenita do eutético, diminuindo a tendência à formação de rechupe nas peças produzidas por ferro fundido (BALDAM,2014).

Figura 6 — Variação do volume específico em função da temperatura, na solidificação dos ferros fundidos.



Fonte: Adaptado de Baldam,2014.

Em ferros fundidos de composição hipoeutética, a solidificação se inicia com a precipitação da austenita pró-eutética, ocorrendo posteriormente a precipitação da grafita e austenita da reação eutética. Neste caso, a precipitação da grafita geralmente não é suficiente para compensar as contrações líquidas e de solidificação da austenita pró-eutética (BALDAM,2014).

Ainda vale lembrar que no ferro fundido nodular, a grafita cresce pela difusão de um halo de austenita, e dessa forma a expansão da grafita durante o avanço da solidificação se transmite primeiro a este halo, de modo que esta expansão não compense a contração do líquido e da solidificação da austenita tão significativamente quanto os ferros fundidos cinzentos, que transmitem sua expansão diretamente no líquido (GUESSER,2009).

Durante o resfriamento a difusão do carbono da austenita para a grafita deve ocorrer até se atingir a linha eutetóide, que corresponde a temperatura de 723°C do diagrama ferro-carbono metaestável, Figura 2, posteriormente a austenita sofrerá transformação de fase dando lugar as fases ferrita (fase com baixa concentração de carbono) e/ou perlita (fase com maior concentração de carbono constituída de ferrita e cementita dispostas alternadamente em forma de lâminas) (CALLISTER, 2008; COMIN, 2013).

4.3 FUNDIÇÃO

A fundição é um método de fabricação que consiste no derramamento do metal, ou liga metálica no seu estado líquido (fundido) em um molde com as dimensões (negativo) da peça desejada. Na Figura 7 é possível observar uma ilustração deste processo, onde o metal preenche a cavidade do molde durante o vazamento (BALDAM; VIEIRA,2014).

Figura 7 — Vazamento do metal líquido no molde.



Fonte: IPT, 2015.

O processo de fabricação por fundição é um dos mais antigos métodos de obtenção de peças metálicas, muito usado para a produção de peças pesadas ou de geometria complexa, difícil de ser obtidas por outro método de fabricação. Por este método geralmente peças mais frágeis e de acabamento de menor qualidade são obtidos. Todavia é possível se obter peças de alta precisão, na qual posterior usinagem não é necessária, através de práticas que requerem maior investimento, sendo possíveis por exemplo através da escolha adequada do processo de moldagem (NUNES, KREISCHER, 2010; CASOTTI, BEL FILHO, CASTRO, 2019).

Os moldes usados em fundição podem ser: molde de areia, metálico ou cerâmico e molde com modelo de material fusível (cera perdida ou poliestireno expandido - isopor) (BALDAM,2014; NUNES, KREISCHER, 2010).

O molde mais tradicional usado é confeccionado em areia, que consiste em modelar a areia com um aglomerante em um modelo permanente, de madeira, plástico ou metal com as mesmas características das peças. Quando se deseja melhor acabamento e estabilidade dimensional pode ser utilizada areia com aditivos orgânicos (NUNES; KREISCHER, 2010).

4.3.1 Fundição por processo de moldagem *Cold Box*

O processo *Cold Box* ou caixa fria é um sistema que utiliza areia aglomerada com ligantes orgânicos e um catalisador na forma de gás. Este sistema incorpora uma variedade de resinas e catalisadores (TUTTLE, 2012).

O sistema de caixa fria original que utiliza aglomerante orgânico é o sistema de caixa fria Fenólico Uretano, e foi introduzido na fundição no final do ano de 1960. Este sistema é constituído de três componentes, sendo eles:

Parte I: Uma resina de fenol-formaldeído

Parte II: Um isocianato polimérico (poliisocianato)

Parte III: Um catalisador de amina.

O processo basicamente consiste em combinar a parte I e parte II com a areia em um misturador e homogeneizar, e introduzir a parte III sob a forma de vapor através da areia aglomerada e consolidada, já dentro do modelo permanente (FERREIRA, 2010).

As caixas (modelo) onde se confeccionam os moldes são projetadas para soprar o gás catalisador. Ao final da reação do fenol com poliisocianato uma rede de polímero de uretano (poliuretano) é formada unindo os grãos de areia (FERREIRA,2010; TUTTLE,2012).

Na Figura 8 é possível visualizar um molde (1) obtido pelo processo *Cold Box*, confeccionado em uma caixa ou modelo de alumínio (2), e a abertura onde se dá a entrada do gás catalisador (3).

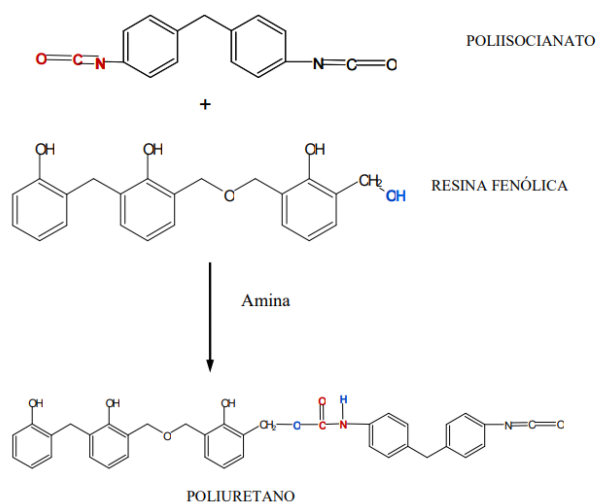
Figura 8 — Modelo e molde do processo *Cold Box*.



Fonte: Fundição Tiger, 2018.

A estrutura molecular dos compostos da resina fenólica, do poliisocianato e a estrutura do polímero uretano formado ao fim da reação é possível ser visualizada Figura 9.

Figura 9 — Estrutura molecular dos aglomerantes do sistema *Cold Box*.



Fonte: Joaquim, 2012.

Uma atenção especial deve ser dada com a formulação destas resinas, pois há indícios de que o excesso da parte II (poliisocianato), pode ocasionar bolhas no metal fundido (JOAQUIM, 2012).

A estocagem por mais de 24 horas dos moldes produzidos com excesso da parte II pode reagir com a umidade presente na atmosfera, ou ainda, o excesso do poliisocianato pode reagir com a umidade presente na areia (se houver), formando ureia, um composto de baixa estabilidade em que na sua decomposição térmica resultará em amônia, que por sua vez, libera hidrogênio e nitrogênio. Contudo, geralmente as peças obtidas por este processo possuem um acabamento de excelente qualidade (JOAQUIM, 2012; VILHENA, 2009).

Para a confecção do modelo utilizado neste processo, deve ser considerado o sistema de alimentação (canais e massalotes), contração do metal, saída de gases formados durante o vazamento e tamanho da peça a ser produzida (TREVISAN, 2010).

Considerando o sistema de alimentação e contração do metal, deve-se projetar o massalote direcionando para que este se solidifique após a peça e que este seja capaz de conter metal líquido suficiente para compensar a contração volumétrica da peça durante o resfriamento. Dessa forma, o tempo de resfriamento de uma peça é calculado em função de seu módulo parcial de resfriamento M , segundo a equação 2 (BALDAM,2014):

$$M = V/S \quad (2)$$

Onde M é o módulo de resfriamento em cm, V o volume da peça em cm^3 e S a superfície da peça que contribui com o resfriamento em cm^2 .

Para que o massalote se solidifique depois da peça, deve-se seguir a “Regra dos módulos”, ou seja, é necessário que ele possua módulo (M_m) superior ao da peça (M_p), conforme a equação 3 (BALDAM,2014):

$$M_m \geq k \cdot M_p \quad (3)$$

Onde k , é um coeficiente que depende das condições de funcionamento do massalote (se é aberto, se é usado pó isolante ou luvas exotérmicas...), este valor pode ser consultado na Tabela 3 (BALDAM,2014).

Tabela 3 – Valores do coeficiente k , e do coeficiente de eficiência k' do massalote.

Coeficientes (Para o massalote)	Caso geral	Aquecido pelo ataque
k	1,2	1,1
k'	6	5

Fonte: Adaptado de Freitas, 2011.

Para garantir que o rechupe não penetre a peça, as dimensões (diâmetro e altura) devem ser adequadas. Para massalotes laterais e cegos por exemplo, a relação entre suas dimensões; diâmetro (D_m), altura (H_m) e volume (V_m) podem ser relacionadas pela equação 4, equação 5 e equação 6 respectivamente:

$$D_m = 4,56 \cdot M_m \quad (4)$$

$$H_m = 1,5 \cdot D_m \quad (5)$$

$$V_m = 1,309 \cdot D_m^3 \quad (6)$$

Após se ter a certeza que o massalote resfriará depois da peça, verifica-se a “Regra de contração”. A regra da contração é expressa pela equação 7:

$$V_m = k' \cdot r \cdot V_c \quad (7)$$

Em que V_m é o volume do massalote, V_c o volume da cavidade ou do metal líquido da peça que vai ser alimentada, r o coeficiente de contração volumétrica do metal e k' o coeficiente de eficiência do massalote, que depende das condições de funcionamento deste. Os valores de k' e r podem ser obtidos nas Tabelas 3 e Tabela 4 respectivamente.

Tabela 4 – Valores para coeficiente de contração volumétrica (r) do ferro fundido nodular

Para ferro fundido nodular com $C_{eq} > 4,3$ % em peso						
Coeficiente de contração (Para a peça)	Sobreaquecimento acima do líquido					
	50 °C		50 °C		150 °C	
	Molde rígido	Molde não rígido	Molde não rígido	Molde rígido	Molde não rígido	Molde não rígido
r	0,025	0,06 a 0,08		0,03	0,08 a 0,10	

Fonte: Adaptado de Freitas, 2011.

O volume da cavidade (V_c) é calculado por meio da equação 8 (BALDAM,2014):

$$V_c = V_p \cdot (\rho_s / \rho_q) = P / \rho_q \quad (8)$$

Onde V_p é o volume da peça sólida fria ρ_s e ρ_q são respectivamente as densidades do metal sólido e líquido, e P é o peso da peça. Os valores de ρ_s e ρ_q para ferros fundidos pode ser consultado na Tabela 5.

Tabela 5 – Densidade dos ferros fundidos.

Densidades		
ρ_s	(kg/dm ³)	7,3
ρ_q	(kg/dm ³)	6,9
ρ_s / ρ_q		1,058

Fonte: Adaptado de Freitas, 2011.

Após calculados os módulos pela Regra dos módulos e pela Regra da contração, será usado no projeto o maior valor obtido para a construção do massalote, pois este atenderá as duas requisições (BALDAM,2014).

Já a quantidade de peças a ser produzida por molde é dependente do equipamento empregado e da dimensão da peça a ser fabricada. O equipamento utilizado para confecção dos moldes no processo *Cold Box* é chamado de sopradora e de acordo com sua capacidade de sopro, podem ser produzidos moldes por exemplo, pesando 15 kg, 25 kg, 75 kg, etc (GEVITEC, 2018).

4.3.2 Defeitos de fundição

Defeitos de fundição podem ser definidos como sendo qualquer descontinuidade em relação à qualidade especificada para a peça fundida. Devido ao número de variáveis envolvidas, é muito comum a ocorrência de defeitos advindo deste processo (NUNES,2013).

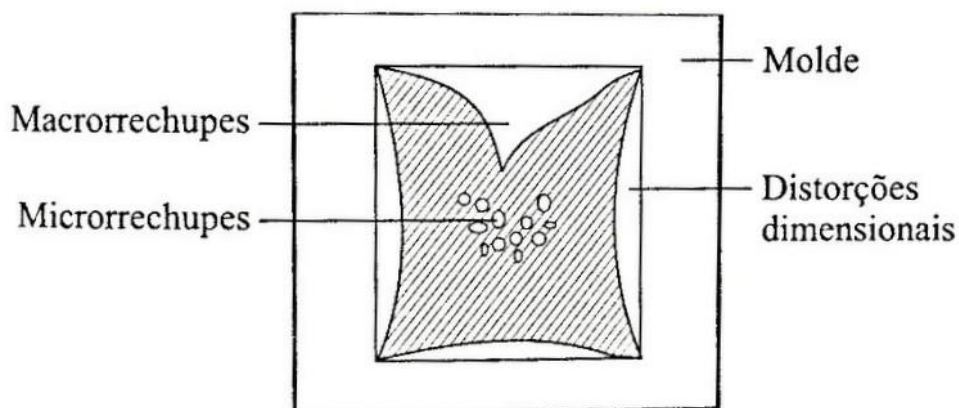
Os defeitos podem ser originados no banho metálico; ou durante o derramamento do metal, como por exemplo, defeitos de erosões ao usar molde de areia quando há turbulência no escoamento do metal líquido; ou ainda podem ser decorrentes do modo de solidificação, como porosidades, inclusões, trincas de contração e outros, ou seja, podem ser originados em qualquer parte do processo e por diversas razões (MARQUES, 2008).

4.3.2.1 Porosidade

As porosidades podem surgir devido à contração durante a solidificação na forma de macroporosidades ou microporosidades, que também podem ser entendidos como macrorrechupes ou microrrechupes, a primeira pode ser resultado de uma alimentação inadequada (GARCIA, 2007; MÜLLER, 2002).

Por exemplo, na Figura 10 é possível observar a diferença desses dois defeitos, no caso de macroporosidade ou macrorrechupes, os vazios são concentrados e são situados normalmente nos centros geométricos de peças regulares, ou em vértices de ângulos e concordâncias (MÜLLER,2002).

Figura 10 — Macrorrechupes, microrrechupes e distorções dimensionais.



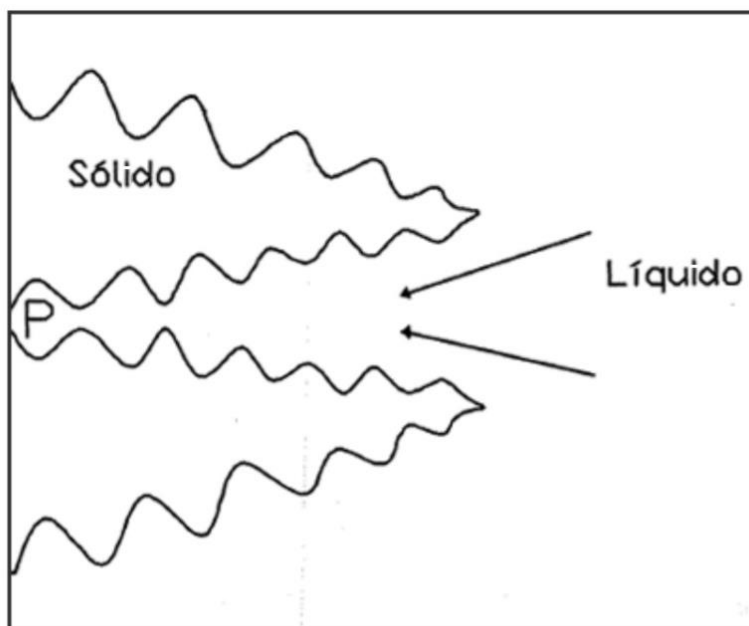
Fonte: Müller, 2002.

Os microrrechupes ou microporosidades de contração são defeitos de pequenos tamanhos, que são normalmente encontrados nos pontos quentes (últimas regiões a se solidificar) da peça (MÜLLER,2002).

Como foi visto, o ferro fundido nodular ao se solidificar forma dendritas de austenita na interface sólido/líquido, acompanhado de contração volumétrica. O líquido da interface líquido/sólido deve ser suficiente para preencher os espaços interdendríticos formados, contudo, o líquido pode não ser capaz de fluir entre as ramificações da dendrita, originando microporosidades nessas regiões onde este não foi capaz de atingir (GARCIA, 2007).

As falhas de alimentação podem ocorrer, por exemplo, devido ao aumento da viscosidade do líquido durante a solidificação (região pastosa), o que dificulta sua passagem entre as dendritas e/ou devido à falta de metal líquido adicional da alimentação para preencher os vazios de contração. Na Figura 11 tem-se uma ilustração que representa a interface de formação das dendritas em meio ao metal líquido com a formação de microporosidades.

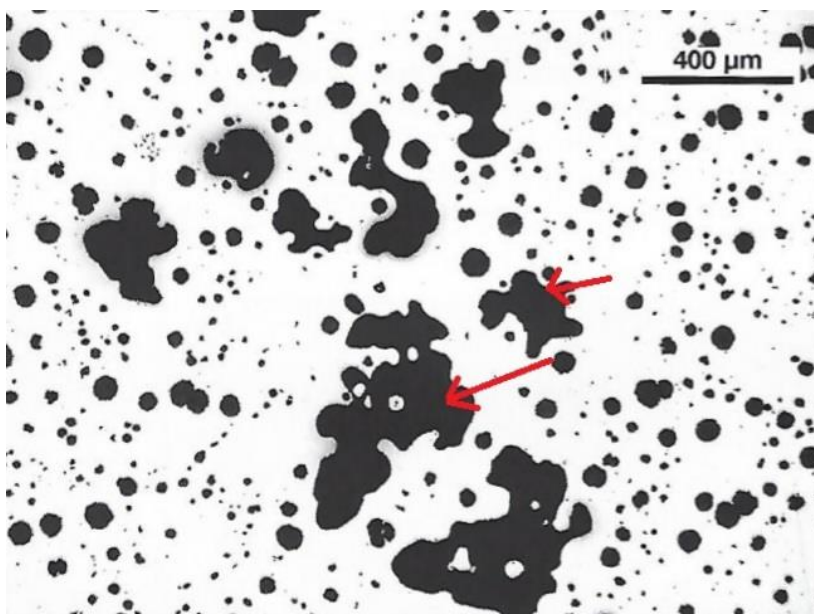
Figura 11 — Interface sólido/ líquido na solidificação do metal.



Fonte: Colpaert, 2008.

Na Figura 12 é possível observar uma imagem obtida através de análise metalográfica, onde o ferro fundido nodular apresenta microporosidades. Alguns poros estão indicados por setas.

Figura 12 — Microporosidade em ferro fundido nodular. Sem ataque.



Fonte: Adaptado de Colpaert, 2008.

As porosidades também podem ser ocasionadas por presença de gases no metal líquido, que podem estar ou não dissolvidos neste. Quando um metal ou uma liga metálica contendo um gás, como por exemplo, oxigênio, nitrogênio ou hidrogênio em solução, solidifica, o gás será rejeitado na interface líquido/sólido se este não estiver solubilizado no metal (BALDAM, 2014; GARCIA, 2007).

Para o caso de gases dissolvidos no metal líquido, pode-se dizer que ficam nesta condição pois são solúveis neste estado, contudo à medida que o metal vai se solidificando, a solubilidade desses gases tende a diminuir e serão rejeitados neste processo (BALDAM, 2014).

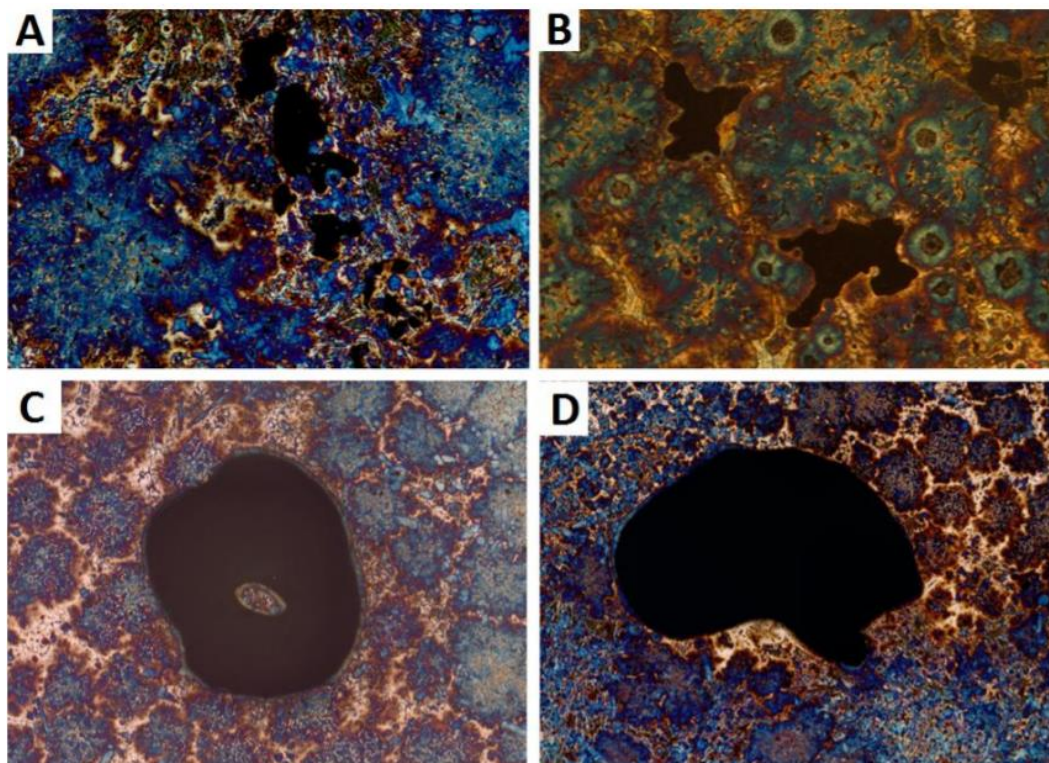
Em ambos os casos, o gás não solubilizado (supersaturado) poderá ser eliminado através da superfície livre do metal líquido, desde que a difusão do líquido permita, ou pela nucleação de bolhas de gás. Por vezes, essas bolhas não conseguem escapar pela superfície e ficam oclusas no metal sólido, causando defeitos de porosidade nas peças fundidas (GARCIA, 2007).

Em uma análise macroscópica é possível observar que as porosidades originadas por gás possuem um formato esférico, com paredes internas dos poros levemente lisas e brilhantes em relação às paredes internas de porosidades de contração (ASM, 1998 apud JORSTAD 1986).

Microscopicamente os poros de alimentação podem ser distinguidos dos poros de gás por sua localização em relação a outros poros, de modo que o poro de contração pode se apresentar com um agrupamento de pequenos poros, enquanto os poros de gases, são geralmente equiaxiais com formato regular, com formas muitas vezes arredondas (ASM, 1998 apud JORSTAD 1986).

Na Figura 13 pode ser visto poros em ferro fundido nodular originados pela contração do metal (A e B) e poros originados por gases (C e D).

Figura 13 — Microporosidade (em preto) em ferro fundido nodular. Onde em A e B apresenta microporosidade por contração , C e D microporosidade de gás.



Fonte: Fonseca; 2017.

4.4 CLICK2CAST

O Click2Cast é um software CAE (Engenharia Assistida por Computador) usado em fundição que calcula numericamente o comportamento do material durante a etapa do preenchimento e da solidificação, usando para isso a Análise de Elementos Finitos (MACHADO, 2014).

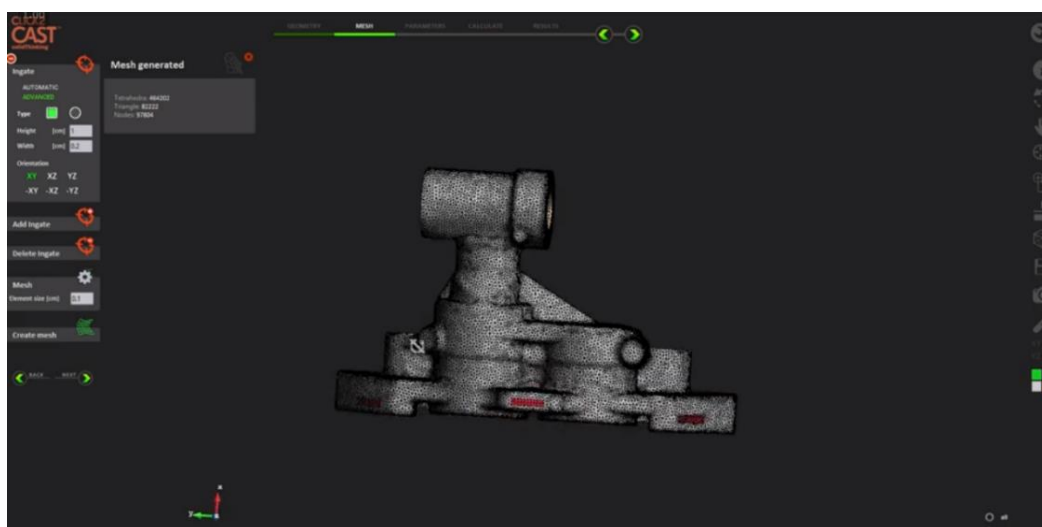
Foi desenvolvido pela QUANTECH ATZ em parceria com CIMNE (Centro Internacional de Métodos Numéricos em Engenharia) e é comercializado hoje pelo grupo Altair (ALTAIR, 2015; MACHADO, 2014).

Este software identifica defeitos de fundição e permite que os usuários visualizem frente de fluxo, fração sólida, módulo de solidificação, perfis de temperatura e de velocidade. O programa funciona essencialmente da seguinte forma:

Primeiramente é necessário obter a geometria da peça a ser analisada por um modelamento com uso de software de projeto, como o CAD 3D, para depois ser importada no formato STL para o Click2Cast (MACHADO, 2014).

A segunda etapa é criação da malha, ou seja, a geometria da peça será dividida em pequenos elementos que serão conectados entre si por pontos, denominados de nós ou pontos nodais. Esta etapa é a mais importante, pois as análises matemáticas se darão em função dessas subdivisões da geometria. A Figura 14, corresponde a representação de uma peça, onde a malha já foi criada (MACHADO, 2014; SORIANO, 2003).

Figura 14 — Geometria de peça onde foi definido a malha.



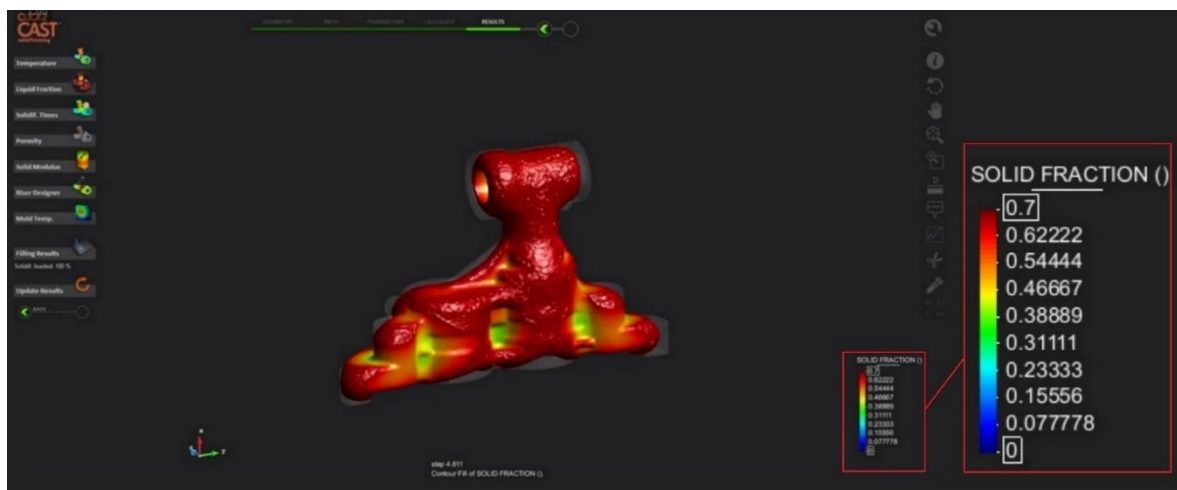
Fonte: Solidthinking, 2018.

As equações matemáticas não serão resolvidas de maneira exata, mas de forma aproximada por este método numérico. Desta forma, quanto menor for o tamanho e maior for o número de elementos em uma determinada malha, maior a precisão nos resultados da análise, contudo maior será o tempo de cálculo total (SORIANO, 2003).

Depois da criação da malha, é necessário definir os parâmetros do processo, ou seja, fornecer ao software informações como o material a ser fundido, a temperatura de vazamento do metal bem como o tipo de molde utilizado (MACHADO, 2014).

A última etapa consiste na análise dos resultados, que permitirá observar o comportamento do material durante o processo de solidificação. Na Figura 15, é possível observar um exemplo da etapa de análise de resultado, a qual corresponde à simulação do processo de solidificação.

Figura 15 — Modo de solidificação. Última região a solidificar em vermelho.



Fonte: Solidthinking, 2018.

Na Figura 15 à direita é possível notar uma escala de cores que variam do azul ao vermelho representando o processo de solidificação, onde a região de maior porcentagem de líquido está representada na cor azul enquanto à medida que avança a solidificação tende para coloração vermelha. Quando a solidificação se completa e a fração sólida é igual a 1 (totalmente completa) as cores da escala não são mais observadas na peça.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir será apresentada a peça a ser estudada e descritos os métodos que foram utilizados para alcançar os objetivos propostos neste trabalho.

5.1 MATERIAIS

A peça a ser estudada é nomeada pelos fabricantes como Gaiola e faz parte do sistema da caixa de câmbio de caminhão, sendo confeccionada a partir de ferro fundido nodular classe FE 42012, de acordo ABNT NBR 6916. A peça foi cedida pela empresa Fundição e Metalúrgica Tiger, localizada na cidade de Primeiro de Maio no norte do Paraná, sendo fornecida na condição semi-usinada, conforme pode ser visto na Figura 16, em (a) vista frontal, em (b) vista superior, em (c) vista superior da peça semi-usinada e peça já usinada cortada ao meio à direita.

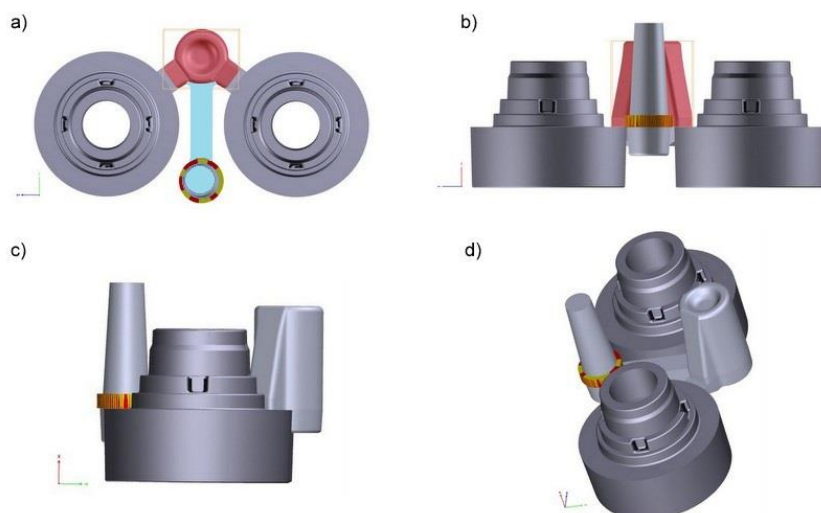
Figura 16 — Peça semi-usinada: (a) vista frontal; (b) vista superior; (c) vista superior da peça semi-usinada e peça já usinada cortada ao meio à direita.



Fonte: Autoria própria.

A peça foi fabricada utilizando-se molde e macho de areia aglomerada com poliuretano obtidos pelo processo *Cold Box* e modelo confeccionado em alumínio, projetado para produzir duas peças por caixa. A disposição das peças, bem como o canal de alimentação, pode ser observada na Figura 17, onde em (a) tem-se a vista superior, em (b) a vista frontal, em (c) a vista lateral e em (d) a visão mais ampla da peça (vistas superior/frontal). O canal de alimentação está representado na cor azul-claro em (a), enquanto o massalote está indicado em vermelho em (a) e em (b). Em (c) e em (d) o massalote não foi destacado, mas pode ser visto à direita das figuras, enquanto à esquerda pode ser visto o canal de descida do metal.

Figura 17 — Desenho da peça em 3D. Sistema de alimentação (indicado em (a), em azul) e massalote (indicado em vermelho em (a) e em (b)). Onde a) vista superior, b) vista frontal, c) vista lateral e d) visão mais ampla da peça (superior/frontal).



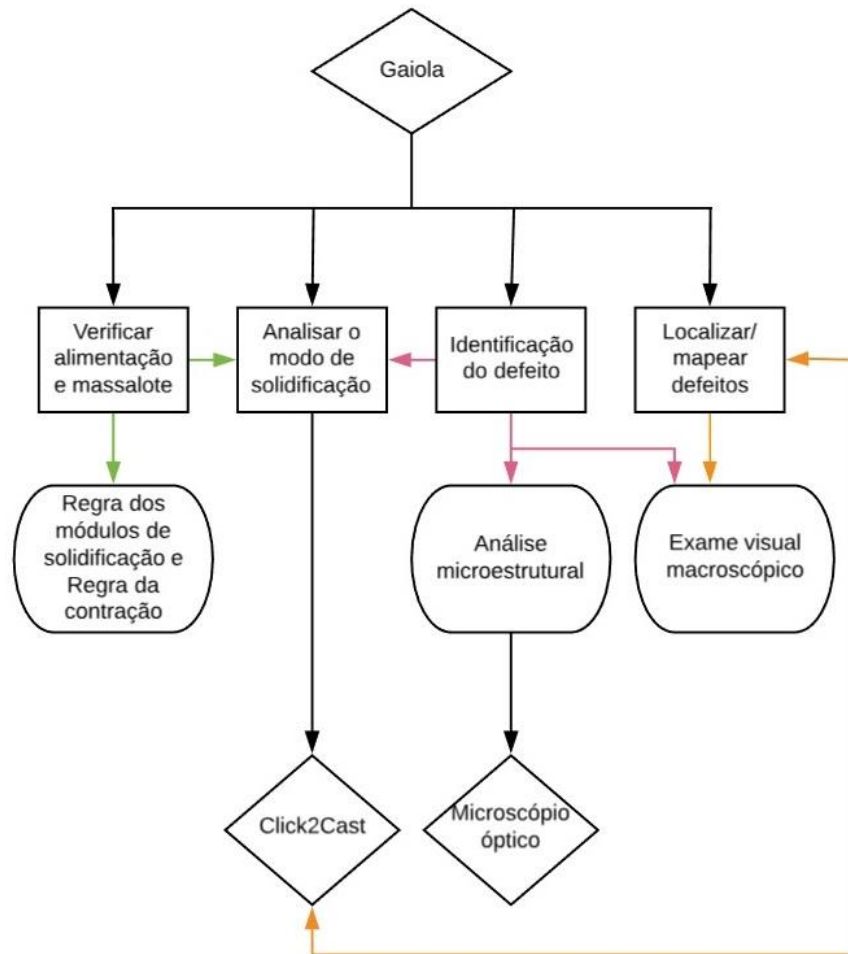
Fonte: Autoria própria.

5.2 MÉTODOS

5.2.1 Fluxograma

Na Figura 18 está exposto um fluxograma das atividades que foram realizadas para a execução deste trabalho. A seguir, cada uma das etapas será detalhada.

Figura 18 — Fluxograma de atividades.



Fonte: Autoria própria.

5.2.2 Análise macroscópica

A fim de localizar e identificar inicialmente o defeito na peça, esta foi cortada e um exame visual foi realizado. O procedimento é considerado simples, não a necessidade de preparação da amostra por meio de lixamento, ataque químico ou auxílio de microscópio óptico, pois a princípio, o defeito pode ser identificado a olho nu.

Contudo, para diagnóstico do defeito foi necessário o auxílio de um paquímetro, visto que se procurava avaliar as características desses defeitos de acordo com os critérios estabelecidos pelo cliente:

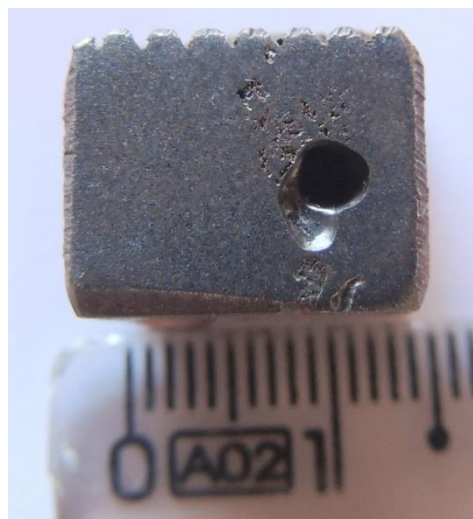
- Tamanho máximo de porosidade é \varnothing 2,0 mm;
- Distância mínima entre cada porosidade deve ser 30 mm;
- Porosidades menores ou iguais a 1,0 mm não devem ser consideradas;
- Exceção permitida se a superfície usinada uniforme for maior que 50

mm:

- Acúmulo de até 3 poros, com mínimo de distância permitido 2,0 mm;
- É permitido um único defeito na extensão até 3,0 mm.

Para a elaboração dos cortes foi utilizada uma serra fita vertical de bancada da Empresa Fundição e Metalúrgica Tiger. A etapa de corte foi realizada pela própria empresa, onde uma peça foi seccionada transversalmente ao meio dividindo-se em duas partes. O corte foi realizado próximo à seção usinada da peça, onde originalmente o defeito tinha sido encontrado pelo cliente. Esta parte da investigação não foi registrada por foto, entretanto um defeito foi diagnosticado e uma amostra foi retirada para análise de sua microestrutura. A amostra retirada pode ser vista na Figura 19, sendo esta intitulada como amostra 1. Outro corte foi realizado dividindo-se as duas metades em mais duas partes, entretanto mais defeitos não foram observados.

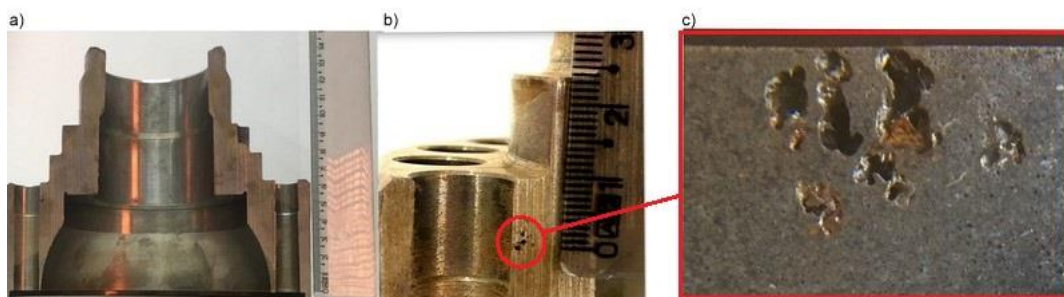
Figura 19 — Amostra 1 retirada da peça após a localização do defeito.



Fonte: Autoria própria.

Uma segunda peça foi seccionada em duas partes seguindo o mesmo procedimento realizado para a primeira peça. Ao se identificar a presença de defeito mais cortes não foram realizados. A peça seccionada foi cedida para análise da forma como pode ser vista na Figura 20, onde em (a) é possível visualizar a peça seccionada em duas partes, notando-se em (b) a presença de defeito (circulado em vermelho), encontrado próximo a região usinada.

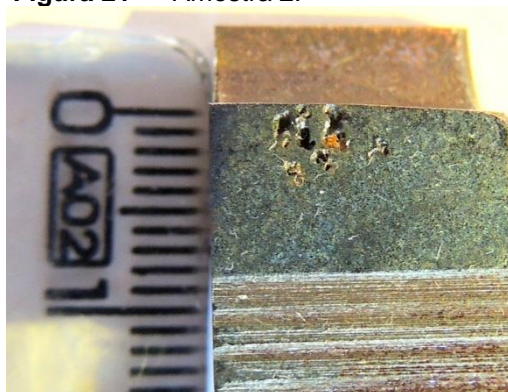
Figura 20 — a) Região onde houve o corte da peça; b) defeito encontrado circulado em vermelho; c) aproximação do defeito.



Fonte: Autoria própria.

Uma segunda amostra foi retirada da seção destacada na Figura 20b, para análise de sua microestrutura e esta foi intitulada como amostra 2. A amostra 2 pode ser vista na Figura 21.

Figura 21 — Amostra 2.



Fonte: Autoria própria.

5.2.3 Caracterização da microestrutura

Após a etapa de localização dos defeitos e retirada das amostras, estas foram lixadas em lixas d'água de granulometria 220, 600, 1200 respectivamente, e polidas com suspensão de alumina de 1 μ m.

Após o polimento das amostras, o ataque químico foi realizado com solução Nital 2%, e foram analisadas em microscópio óptico para a identificação do tipo de defeito, especificamente quanto à forma e à distribuição deste pela amostra e também para observação da microestrutura do ferro fundido nodular.

O microscópio óptico utilizado foi o Zeiss-Axio Scope.A1, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Londrina.

5.2.4 Regra dos módulos e de contração

O sistema de alimentação e massalote do projeto foram analisados por meio da Regra dos módulos e de contração, utilizando-se para isso as equações 2, 3, 5, 6 e 7 descritas anteriormente.

5.2.5 Análise de solidificação

Para análise do modo de solidificação da peça e do sistema de alimentação do molde, realizou-se uma simulação por meio do software Click2Cast, versão estudantil.

O desenho 3D da peça foi fornecido pela empresa e foi importado no formato STL para análise no programa.

Para a análise no software, a malha escolhida foi de 3 mm e a temperatura de vazamento informada foi de 1400°C. O material como previsto foi o ferro fundido nodular 42012 e o molde, de areia com aglomerante obtido pelo processo de moldagem *Cold Box*.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Análise macroscópica

A partir da análise macroscópica, observou-se que o maior poro da amostra 1, Figura 19, possui 4,30 mm de diâmetro equivalente (considerando seu comprimento máximo), os poros menores possuíam tamanho inferior a 1,00 mm. A distância média observada entre cada poro foi de 0,65mm e a extensão máxima do defeito (considerando todos os poros) foi de 9 mm.

Os poros da amostra 2 possuem aproximadamente o mesmo tamanho, como observado na Figura 21, um dos poros medido possui 2,10 mm de diâmetro equivalente (comprimento máximo). A distância média registrada entre os poros também foi de 0,65mm e a extensão total do defeito foi de 5,25 mm.

Dessa forma, foi possível constatar que ambas amostras estavam fora dos critérios estabelecidos pelo cliente, visto que ambas possuíam poros de dimensões superiores a máxima permitida, ou seja, maior que o diâmetro de 2,00 mm, além de haver acúmulo de mais de 3 poros com distância inferiores 2,0 mm permitidos. Mesmo havendo poros com tamanho inferior a 1,00 mm, estes foram considerados devido ao critério de apenas um defeito ser permitido na extensão de 3,00 mm. Por essa razão, de acordo com a empresa não houve a necessidade de buscar por mais defeitos na peça. Contudo, pode se observar que os poros encontrados estavam situados próximos a seção usinada identificada previamente com o defeito, como pode ser visto na Figura 20b.

Durante essa etapa, observou-se também que as superfícies dos poros presentes eram irregulares e rugosas, indicando que essas porosidades são originadas no processo de solidificação do metal. Contudo as paredes internas do maior poro observado na amostra 1 eram ligeiramente lisas em comparação com a superfície dos demais poros, não descartando a possibilidade de o defeito também ter sido gerado por gases aprisionados no sistema (ASM, 1998 apud JORSTAD 1986).

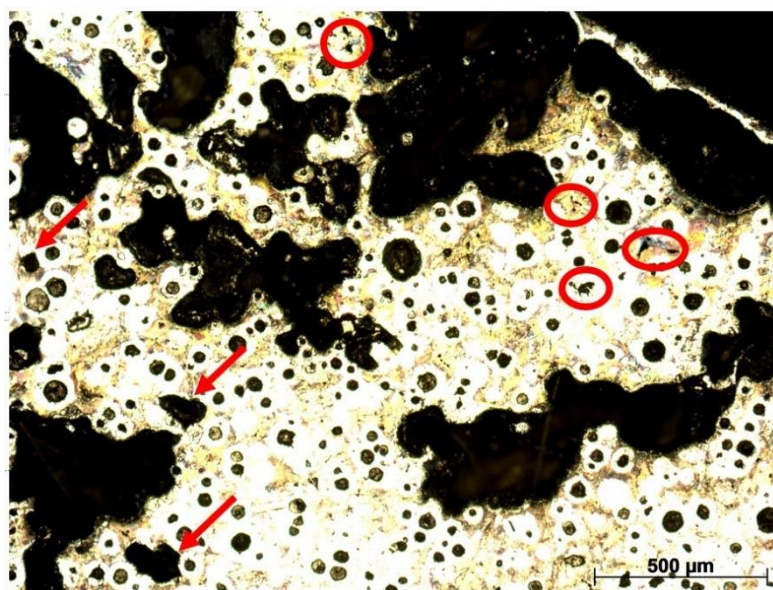
6.2 Caracterização da microestrutura

Ao se investigar a microestrutura das amostras pode-se notar a presença de poros de diversos tamanhos distribuídos por toda área analisada. Analisando a microestrutura da amostra 1, Figura 22, é possível notar que alguns poros (região mais escura) são facilmente identificados pelo seu tamanho, forma e disposição, de modo que se destacam pelo seu formato irregular e tamanho superior às demais fases que compõe a microestrutura do ferro fundido nodular.

A análise dos poros menores deve ser realizada com cautela, pois esses podem ser facilmente confundidos com a grafita nodular, visto que tanto os poros quanto a grafita são escuros. Entretanto, é possível notar analisando a Figura 22, que os nódulos de grafita do ferro fundido nodular aparecem circundados pela fase ferrita (região mais clara) tornando possível sua distinção. Pela presença de poros de diversos tamanhos, alguns poros menores foram apontados por setas vermelhas, enquanto poros muito pequenos, quase imperceptíveis pela imagem obtida em um aumento de 50x no microscópio óptico foram circundados.

Ainda sobre a disposição do defeito, é possível notar que tanto os poros maiores, quanto os poros menores se apresentam como um agrupamento, típico de poros originados devido à contração do metal (ASM, 1998 apud JORSTAD 1986).

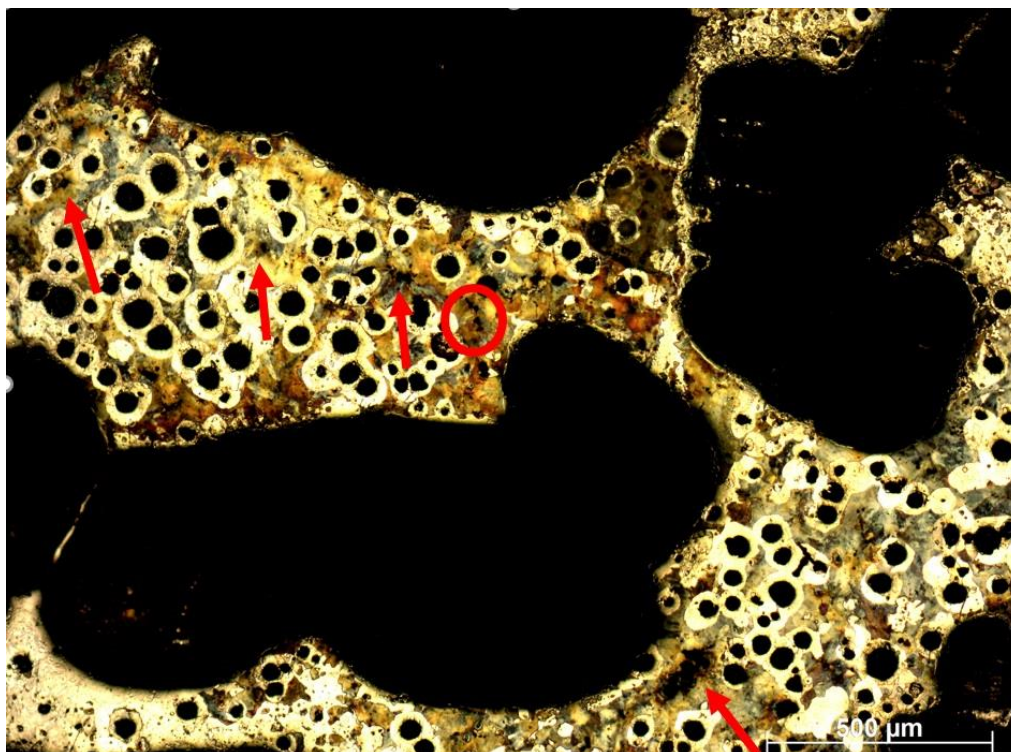
Figura 22 — Microestrutura da amostra 1. Aumento 50x. Ataque Nital.



Fonte: Autoria própria.

Assim como na amostra 1, alguns poros presentes na amostra 2 podem ser facilmente identificados. Na Figura 23 é possível visualizar um agrupamento de pelo menos 3 poros maiores de formato irregular e poros menores distribuídos por toda amostra, onde alguns destes foram indicados por setas vermelhas e/ou circulos.

Figura 23 — Microestrutura da amostra 2. Aumento 50x. Ataque Nital.



Fonte: Autoria própria.

Os poros menores podem ser melhor visualizados ampliando-se a imagem, como feito na Figura 24, com um aumento de 500x. Um microporo isolado (apontado pela seta vermelha) pode ser melhor observado, tendo este formato irregular assim como os maiores.

O aumento de 500x permitiu distinguir melhor as fases constituintes, sendo a ferrita (região mais clara) predominantemente ao redor dos nódulos de grafita; a perlita, que aparece em algumas regiões em tons de azul devido ao ataque químico mais acentuado da solução nital com a fase perlita.

Figura 24 — Microestrutura da amostra 2. Aumento 500x. Ataque Nital.



Fonte: Autoria própria.

6.3 Regra dos módulos e de contração

Para verificar se o sistema de alimentação e massalote do projeto estavam adequados por meio das Regras dos módulos e da contração, primeiramente obtiveram-se os dados de área e volume da peça e massalote determinados no projeto. Os dados estão fornecidos na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores de área superficial e volume, da peça e massalote e seus respectivos módulos calculados.

	Peça	Massalote
Área (S) [cm ²]	1146,62	304,38
Volume (V) [cm ³]	1127,63	363,71
Módulo (M) [cm]	0,98	1,19

Fonte: Autoria própria.

Para o cálculo dos módulos da peça (M_p) e do massalote (M_m) foi utilizada a Equação 2, e os valores obtidos estão disponíveis na Tabela 6.

A partir da equação 3, utilizando o coeficiente referente à condição de funcionamento do massalote (k) de 1,2, para caso geral, dado que o massalote não utiliza luva ou pós exotérmicos e é confeccionado em areia; determinou-se que o módulo do massole (M_m) deveria ser igual ou maior que 1,18. Pelos cálculos verifica-se que o massalote cumpre o requisito de se solidificar após a peça, visto que valor obtido foi pouco maior que o exigido.

Para a determinação do volume de metal necessário à alimentação da peça, ou seja, do volume do massalote (V_m), foi utilizada a equação 7. Para o cálculo, adotou-se o coeficiente de eficiência do massalote (k') igual a 6 (caso geral) e o coeficiente de contração volumétrica (r) igual a 0,08 (molde não rígido). Para adoção do coeficiente de contração volumétrica (r) como molde não rígido, levou-se em consideração a expansão sofrida pela sílica, devido as suas mudanças de fases (PETERS, 2007).

Vale ressaltar que na construção do modelo, o projeto estabelecia a alimentação de duas peças pelo mesmo massalote, e, portanto, para o cálculo o volume da cavidade do molde (V_c) foi multiplicado por 2.

A partir da Regra de contração, determinou-se que o massalote deveria possuir um volume (V_m) mínimo de 1082,50 cm³, entretanto, na construção do modelo original este possuía um volume de 363,70 cm³, não cumprindo o requisito exigido.

Para melhor visualização do resultado, os dados obtidos para o massalote bem como os pré-requisitos determinados foram dispostos na Tabela 7.

Tabela 7 – Módulo e volume do massalote original do projeto e do exigido de acordo com as equações 3 e 7.

	Massalote Original	Massalote Exigido
Módulo (M_m) [cm]	1,19	1,18
Volume (V_m) [cm ³]	363,71	1082,51

Fonte: Autoria própria.

Diante dos requisitos estabelecidos uma nova configuração ao massalote deve ser proposta partindo do volume V_m exigido pela regra da contração. Os valores foram calculados pelas equações 6 e 5, respectivamente, e estes bem como as dimensões originais do massalote podem ser vistos na Tabela 8.

Tabela 8 – Dimensões originais e dimensões recomendadas para o massalote do projeto.

	Dimensões Originais	Dimensões Recomendadas
Diâmetro [cm]	6,00	9,39
Altura [cm]	9,00	14,08

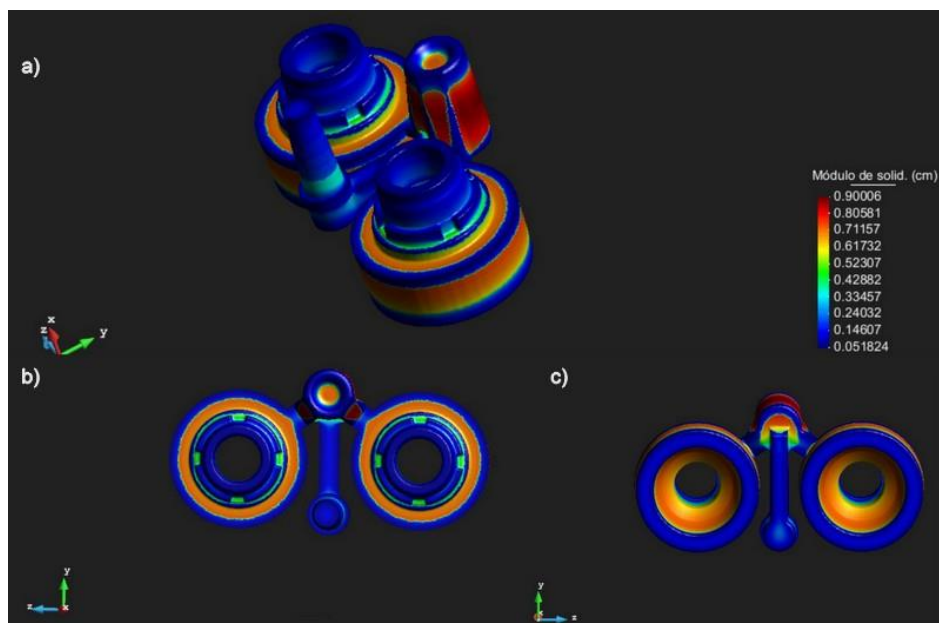
Fonte: Autoria própria.

Com essas novas dimensões calculadas uma nova configuração para o massalote pode ser pensada.

6.4 Análise de solidificação

A análise no software permitiu verificar os módulos de solidificação da peça e do massalote, com um valor de módulo de solidificação predominantemente maior para o massalote em relação a peça, como esperado. A análise fornece os diferentes módulos de solidificação calculados para a peça na forma de um gradiente de solidificação. Observando a Figura 25, é possível notar que nos tons mais escuros de laranja são as regiões onde a peça apresenta maior módulo de solidificação, sendo esta conhecida como região de “pontos quentes”, local onde há maior probabilidade de ocorrer porosidade devido à contração na peça, que coincide com a região onde o defeito foi encontrado. As regiões em azul referem-se aos menores valores do módulo, isto é, que realizam elevada troca térmica e conseqüentemente, solidificam mais rapidamente. Observa-se também que o massalote é a região de coloração vermelha, por ser a última a se solidificar no conjunto total.

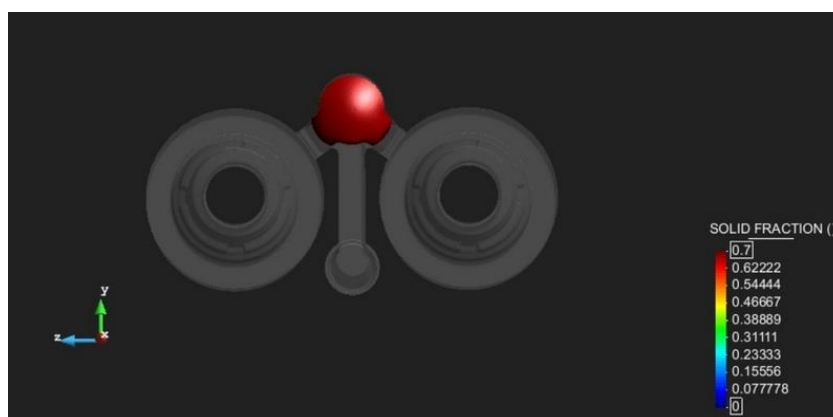
Figura 25 — Módulos de solidificação representados por valor e gradiente de cores, onde cor vermelha corresponde ao maior módulo e a azul ao menor módulo. Onde (a) vista inclinada (superior/frontal) (3D), (b) vista superior e (c) vista inferior.



Fonte: Autoria própria.

Imagens capturadas da etapa de simulação da solidificação (Figura 26 e Figura 27) ilustram a solidificação total do massalote, como previsto, ocorrendo após a solidificação final das peças. Ao analisar a Figura 26 é possível observar que ambas as peças já estão solidificadas enquanto o massalote não.

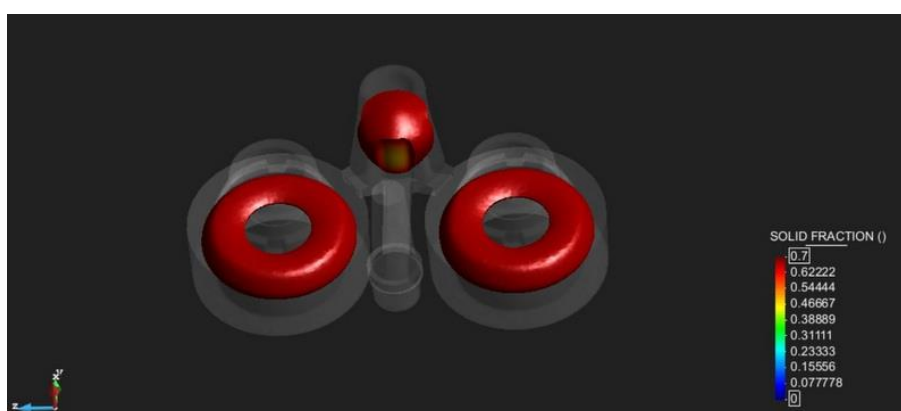
Figura 26 — Simulação da solidificação no final do processo. Vista superior.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 27 foi tirada um pouco antes da solidificação final das peças e nesta é possível notar que apesar de ainda haver metal líquido no massalote, este não pode ser transferido às peças, pois a região onde ocorre a transferência do metal se solidifica antes. Portanto não é garantida a alimentação adequada até o final da solidificação das peças e a contração sofrida durante o processo não é compensada.

Figura 27 — Simulação da solidificação um pouco antes do final do processo. Vista superior levemente inclinada.

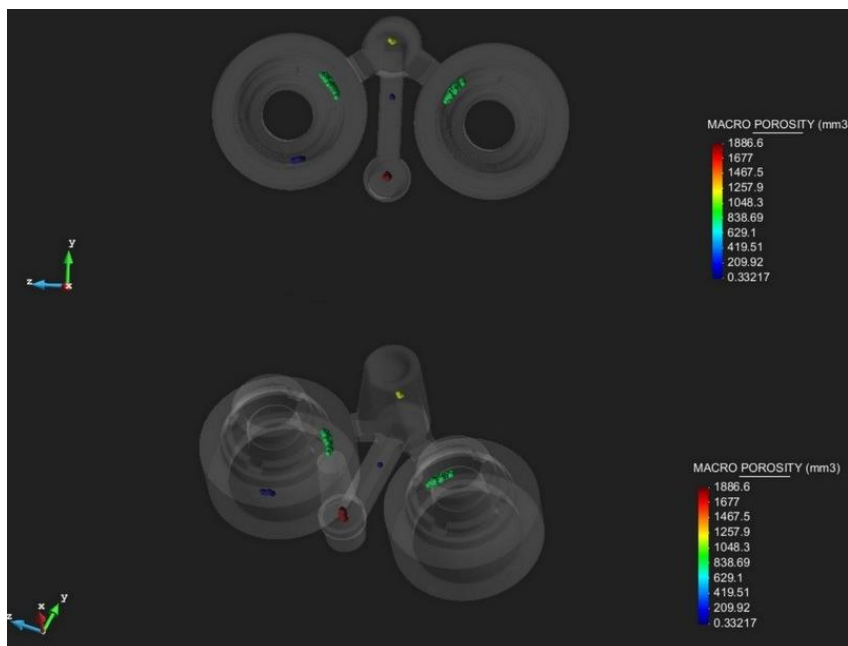


Fonte: Autoria própria.

Além das modificações na altura e diâmetro do massalote, previsto pela Regra da contração, a análise do software sugere que a região de transferência do metal à peça deveria ser aumentada para prolongar o tempo de solidificação nesta região (aumento do módulo).

Analisando a Figura 28 é possível notar que o software indica presença de uma concentração de poros na região de ponto quente vista anteriormente, que como visto, coincide com o local onde o defeito foi encontrado. Contudo, uma melhor precisão da localização desses poros foi realizada, demonstrando que os poros aparecem próximos da região de alimentação pelo massalote. Ainda, o tamanho dos poros presentes pode ser obtido a partir dessa análise. A leitura da legenda à direita indica que estes poros (isoladamente) podem ter em volume aproximadamente 1 cm³. Se considerado um poro de formato esférico este teria 1,24 cm de diâmetro ou 12,4 mm.

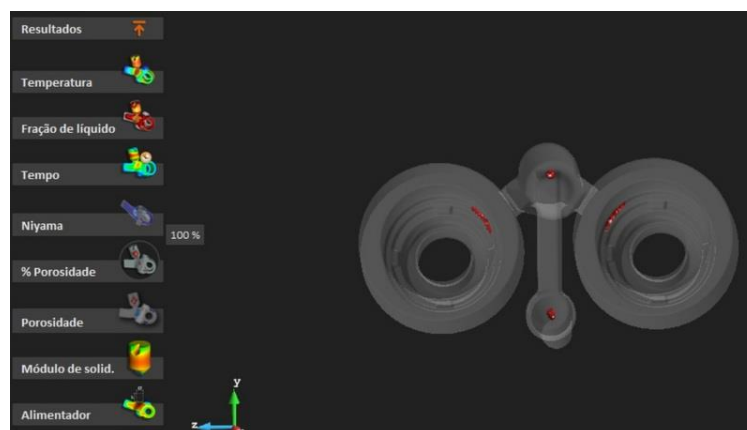
Figura 28 — Resultado da análise de porosidade: (a) vista superior; (b) vista inclinada (superior/frontal) (3D).



Fonte: Autoria própria.

O programa ainda aponta que a possibilidade de ocorrer porosidades devido a contração a partir desse modelo é de 100%. Na Figura 29, à esquerda estão os resultados que podem ser lidos pelo programa. Em % Porosidade foi estabelecida uma probabilidade de 100% e é possível notar os pontos em vermelho na peça, que indicam a porosidade que pode ocorrer com a probabilidade determinada.

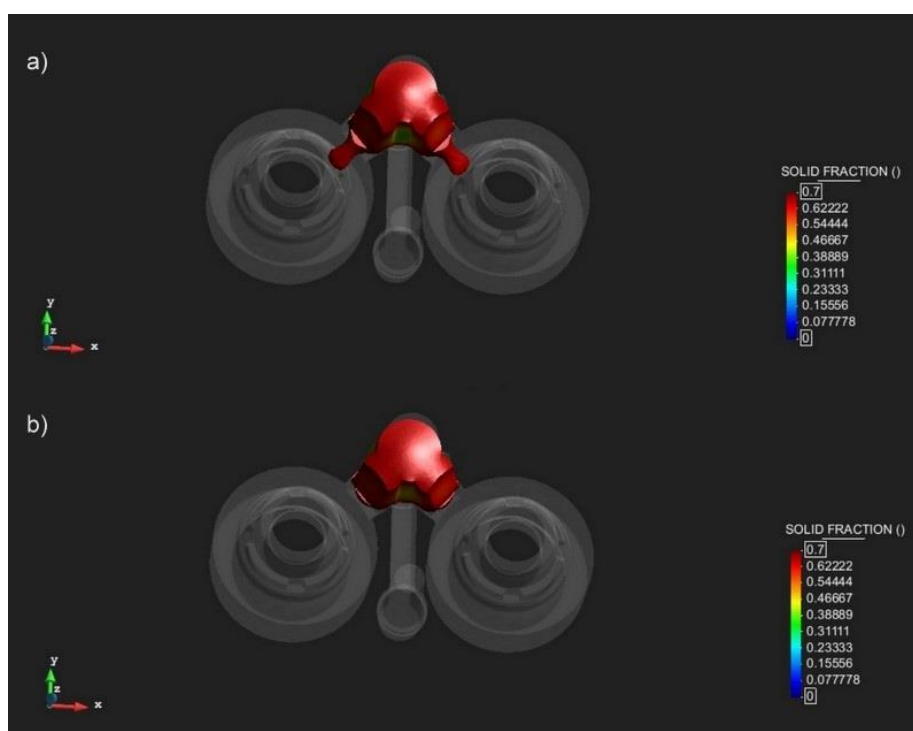
Figura 29 — Resultado da análise de porosidade. Probabilidade em 100%.



Fonte: Autoria própria.

Um novo modelo foi construído modificando a configuração do massalote, aumentando-se suas dimensões como previsto pelos cálculos, assim como o volume da região de transferência do metal. O novo modelo projeto foi analisado pelo software, onde se observou a etapa de simulação do processo de solidificação e se avaliou as possíveis porosidades. A análise de solidificação pode ser vista na Figura 30, onde (a) foi capturada pouco antes de (b).

Figura 30 — Simulação da solidificação um pouco antes do final para o segundo massalote: (a) vista superior e (b) vista superior capturada após (a).



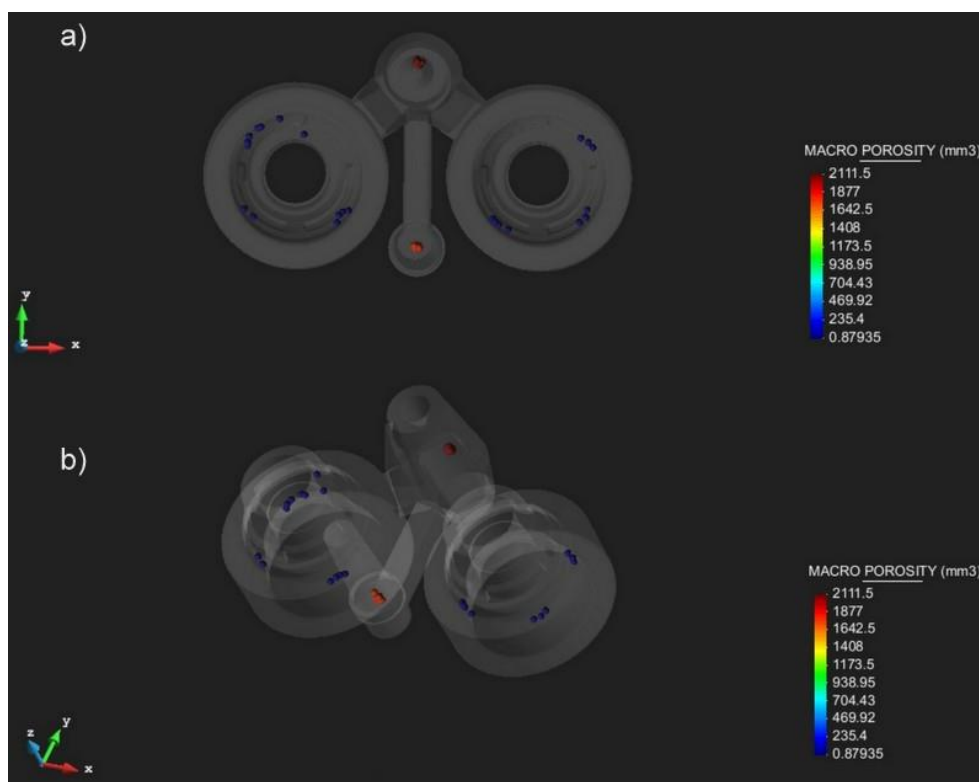
Fonte: Autoria própria.

A análise da etapa de solidificação apontou que a nova configuração alimentava as peças até o final do processo. Pela Figura 30 (a), observa-se que a peça já teria solidificado quase totalmente, faltando somente a região por onde estava sendo alimentada, e em (b), a peça se solidifica totalmente restando somente o massalote.

Em relação à porosidade foi possível constatar, observando a Figura 31, que os poros concentrados na região próxima à alimentação da peça não foram mais

apontados, entretanto a análise do software não descartou possíveis porosidades espalhadas por outras regiões da peça.

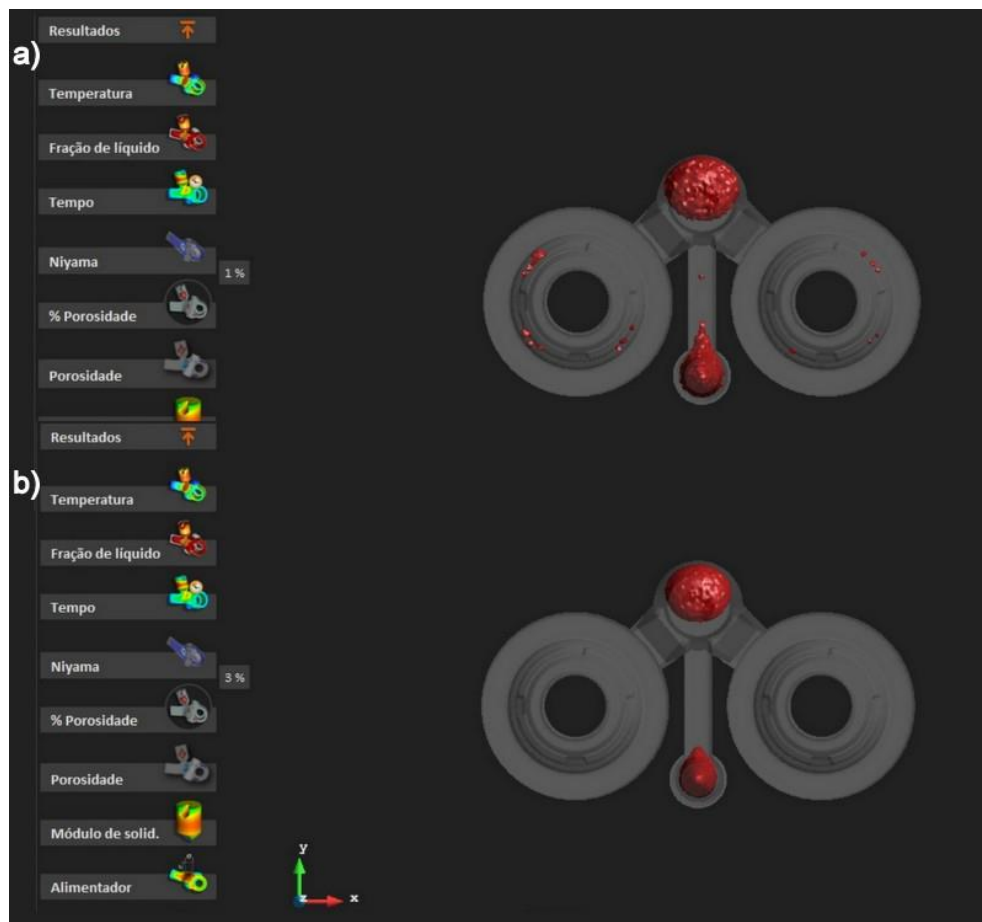
Figura 31 — Resultado da análise de porosidade para o segundo massalote: (a) vista superior; (b) vista inclinada (superior/frontal) (3D).



Fonte: Autoria própria.

Os poros apontados em azul, segundo o software, podem ter em volume aproximadamente $0,88 \text{ mm}^3$. Se considerado um poro de formato esférico este teria $1,18 \text{ mm}$ de diâmetro. Note que os poros apontados pela segunda análise são bem menores do que os indicados para a primeira configuração. Contudo a probabilidade desses poros aparecerem é menor que 3%. Na Figura 32 (a), a probabilidade de se encontrar poros é de 1% e em (b) com uma probabilidade em 3%, os poros não são mais indicados. Vale ressaltar ainda, que conforme a análise anterior (Figura 31), se forem encontrados distribuídos isoladamente, estariam dentro do critério estabelecido pelo cliente.

Figura 32 — Resultado da análise de porosidade para o segundo massalote: (a) probabilidade 1% e (b) probabilidade 3%.



Fonte: Autoria própria.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir das análises realizadas para compreensão do defeito pode-se chegar as seguintes considerações:

- Os defeitos encontrados se localizavam concentrados próximos à região usinada, onde o defeito tinha sido encontrado originalmente. Pela análise do software Click2Cast, a região de concentração de poros se dava próximo à região de alimentação das peças.

- Macroscopicamente foi possível identificar que poros presentes possuíam superfícies rugosas e irregulares, exceto a do poro maior observado.

- Microscopicamente foi possível observar poros de diversos tamanhos distribuídos pelas amostras. Ambas as amostras continham poros de formatos irregulares, característicos de poros originados devido à contração durante o processo de solidificação do ferro fundido.

- A análise do software mostrou com detalhes os módulos de solidificação para cada região da peça. Foi possível observar a simulação da etapa de solidificação e averiguar que o massalote não estava trabalhando eficientemente, não transferindo metal até o final do processo. A análise ainda ajudou a prever porosidades devido a contração, sua localização e volume, tendo estes volumes de aproximadamente 1 cm³.

- Através dos cálculos realizados foi possível identificar que o sistema de alimentação/massalote estava inadequado, mesmo cumprindo o requisito do módulo de solidificação, não cumpria o requisito da regra da contração que indicava um volume mínimo de 1082,51cm³ enquanto o projeto original possuía um volume de 363,71cm³, ou seja, um volume de metal menor que o necessário.

- As análises feitas indicam que a origem do defeito foi devido à contração do metal, causados por uma alimentação ineficiente, devido a falha no projeto de modelagem.

- Para correção do defeito, a fim de eliminá-lo, um novo projeto de modelagem pode ser repensado levando em consideração uma nova configuração para o massalote, modificando inicialmente seu diâmetro e altura como previsto para aproximadamente 9,39cm e 14,08cm. Também foi feitas modificações na região onde ocorre a transferência do metal do massalote à peça a fim de prolongar o tempo de

solidificação nesta região (aumento do módulo de solidificação). Pela análise do software o novo modelo proposto diminui as chances de porosidade de 100% para menos que 3%.

8 CRONOGRAMA

No Quadro 1 está exposto o cronograma das principais atividades realizadas neste trabalho de acordo com os períodos de execução de cada etapa.

Quadro 1 – Cronograma das atividades.

ATIVIDADE	Jun/ 2018	Jul/ 2018	Ago/ 2018	Set/ 2018	Out/ 2018	Nov/ 2018	Dez/ 2018	Jan/ 2019	Fev/ 2019	Mar/ 2019	Abril/ 2019	Mai/ 2019	Jun/ 2019
Revisão do referencial teórico													
Retirada e preparo das amostras													
Análise pelo Software													
Cálculo dos módulos													
Análise dos dados													
Resultados e Discussões													
Considerações Finais													
Revisão e conclusão													
Apresentação do TCC 2													

Fonte: Autoria própria.

REFERÊNCIAS

ALTAIR. **Altair Acquires Click2Cast for Casting Simulation**. 2015. Disponível em: <https://www.altair.com/NewsDetail.aspx?news_id=11175>. Acesso em: 30 maio 2018.

ASM International, **Metals Handbook**; Casting; Volume 15; 1998

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6916**: Ferro Fundido Nodular ou Ferro Fundido com Grafita Esferoidal - Especificação. 2 ed. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8650**: Emprego de ferro fundido nodular para produtos automotivos - Procedimentos. 2 ed. Rio de Janeiro, 2015.

BALDAM, Roquemar de Lima; VIEIRA, Estéfano Aparecido. **Fundição**: processos e tecnologias correlatas. 2.ed. São Paulo, SP: Érica, 2014. 380 p.

CALLISTER, William D. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 7. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2008. xx, 705 p.

CASOTTI, Bruna Pretti; BEL FILHO, Egmar del; CASTRO, Paulo Castor de. **Indústria de fundição**: Situação atual e perspectivas. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/1721/2/A%20BS%2033%20Ind%C3%BAstria%20de%20fundição%20atual%20e%20perspectivas_P.pdf>. Acesso em: 02 abr. 2019.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos**: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos. 6. ed. São Paulo, SP: ABM, 1988. 576p.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo, SP: E. Blücher, 2008. xx, 652 p.

COMIN, Guilherme Schroder. **Estudo do efeito do cobre e do estanho na formação da perlita e nas propriedades mecânicas do ferro fundido nodular**. 2013. 49 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2013. Disponível em: <<https://repositorio.ucs.br/xmlui/bitstream/handle/11338/1821/TCC%20Guilherme%20Schroder%20Comi.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 01 maio 2019.

FERREIRA, José M. G. de Carvalho. **Tecnologia da fundição**. 3. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2010. 544 p

FREITAS, Alênio Wagner de. **Determinação de sistema de alimentação e enchimento**. Itauna: SENAI/ CETEF, 2011.

FONSECA, Francisco Cabral Viana da. **Porosity analysis on compacted graphite iron**. 2017. 58 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2017. Disponível em: <https://sigarra.up.pt/feup/en/pub_geral.show_file?pi_gdoc_id=1062328>. Acesso em: 30 jun. 2018.

FUNDIÇÃO TIGER. Especialistas em peças fundidas. **Fundição Tiger**. Disponível em: <<http://www.fundicaotiger.com.br/>>. Acesso em 28 mar. 2018

GARCIA, Amauri. **Solidificação: fundamentos e aplicações**. Campinas, SP: UNICAMP, 2007. 399 p.

GEVITEC. **Catálogo: Tecnologia em sopradoras**. Disponível em: <<http://www.gevitec.com.br/site/catalogos/8-CATALOGO-GERAL.pdf>>. Acesso em: 30 maio 2018.

GUESSER, Wilson Luiz. **Propriedades mecânicas dos ferros fundidos**. São Paulo, SP: Blucher, 2009. viii, 336 p.

IPT, Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Parceria em metalurgia: Projeto busca superar desafios na produção de peças de ferro fundido com maior aproximação de equipes do IPT e da Tupy. 2015. Disponível em: <http://www.ipt.br/noticias_interna.php?id_noticia=899>. Acesso em: 1 jun. 2018.

JOAQUIM, Rinaldo Geronimo. **Aglomerantes de base Poliuretano para Aplicação em Areias de Fundição**. 2012. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Licenciatura em Química, Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/85039/000900114.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 4 maio 2018.

MACHADO, Eduardo Faria de Souza. **Modelagem computacional do processo de fundição de componente automobilístico**. 2014. 105 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10012191.pdf>> Acesso em: 10 abril 2018.

MARQUES, Andreia Isabel Granadeiro Cercas. **Diagnóstico 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, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008.

MÜLLER, Arno. **Solidificação e análise térmica dos metais**. Porto Alegre, RS: Editora da UFRGS, 2002. 278 p.

NUNES, Laerce de Paula; KREISCHER, Anderson de Paula. **Introdução à metalurgia e aos materiais metálicos**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 350 p. I

NUNES, Mayron Saminez Araújo. **Análise de falha da grelha dupla de descarga do moinho semi-autógeno (sag) da mina do sossego**. 2013. 59 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará, Marabá, 2013.

PETERS, F. et al. Effect of mould expansion on pattern allowances in sand casting of steel. **International Journal Of Cast Metals Research**, [s.l.], v. 20, n. 5, p.275-287, out. 2007. Maney Publishing. <http://dx.doi.org/10.1179/136404607x268247>.

SENAI, Departamento Regional de Minas Gerais. **Iniciação a Fundição**. Belo Horizonte: DFP/DAT, 1990, 87p

SOLIDTHINKING Project for Click2Cast. Version 4.1: solidThinking ,2018. Disponível em: < https://solidthinking.com/click2cast_land.html>. Acesso em: 01 maio 2018.

SORIANO, Humberto Lima. **Método de Elementos Finitos em Análise de Estruturas**. São Paulo: Edusp, 2003.

TEIXEIRA, João Pedro Fernandes. **Estudo da estrutura de solidificação de ferros fundidos nodulares, com técnicas de metalografia com ataque colorido**. 2014. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2014. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/74207/2/31652.pdf>>. Acesso em: 05 maio 2018.

TREVISAN, Marcel Pittol. **Relatório de estágio curricular I**. Florianópolis, 2010. 30p. Disponível em: < www.emc.ufsc.br/control/arquivos/estagio/relatorio/relatorio_2143_1405_1.pdf>. Acesso em: 30 maio 2018.

TUTTLE, Robert B. **Foundry engineering: the metallurgy and design of castings**. s.l.: s.n., c2012. 331 p

VILHENA, Pedro Miguel Cirurgião Leite de. **Resinas de caixa-fria modificadas estruturalmente com propriedades técnicas e meio ambientais melhoradas – Sistema BioDiesel**. 2009. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2009. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/57778/1/000136150.pdf>>. Acesso em: 29 abr. 2018.