

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

MANUELLA GOBBO DE CASTRO MUNHOZ

**IDENTIFICAÇÃO E ANÁLISE DE DEFEITO DE FUNDIÇÃO EM COLETOR
DE FREIO MOTOR**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA

2017

MANUELLA GOBBO DE CASTRO MUNHOZ

**IDENTIFICAÇÃO E ANÁLISE DE DEFEITO DE FUNDIÇÃO EM COLETOR
DE FREIO MOTOR**

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

Orientador: Prof^a. Dr^a. Silvia Midori Higa.
Co-orientador: João Marcelo Correia da Silva.

LONDRINA

2017



TERMO DE APROVAÇÃO

MANUELLA GOBBO DE CASTRO MUNHOZ

IDENTIFICAÇÃO E ANÁLISE DE DEFEITO DE FUNDIÇÃO EM COLETOR DE FREIO

Trabalho de conclusão de curso apresentado no dia 24 de novembro de 2017 como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. M.e Diego Ruben Martin
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)

Prof. Dr. Marcio Andreato Batista Mendes
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)

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

Prof. Dr. Fabiano Moreno Peres
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)
Coordenador do Curso de Engenharia de Materiais

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

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por tudo e principalmente pela vida dos meus pais. Agradeço aos meus pais por todo tempo dedicado, por guiarem e darem força a cada um dos meus passos.

Agradeço à Prof^a. Dr^a. Silvia Midori Higa pelos conhecimentos e experiência transmitidos, por ir além da orientação, pela paciência e pela dedicação, pelo aporte imensurável.

Agradeço à MGL Mecânica de Precisão e à Multimetal Indústria Metalúrgica LTDA. pela oportunidade que garantiu a realização desse projeto, em especial ao João Marcelo Correia da Silva pela co-orientação e ao Deidson Otoni pela colaboração e pelo suporte.

Agradeço também aos Prof. Dr. Marcio Andreato Batista Mendes e Prof. M.e Diego Ruben Martin pela contribuição durante esse processo e pelo apoio para concretização deste trabalho.

Agradeço ao meu noivo pelo carinho e compreensão, à Pamella Machado pela ajuda nesse processo e à compreensão de todos que de diversas maneiras contribuíram para o desenvolvimento deste projeto.

“Entregue suas preocupações ao Senhor, e Ele o sustentará”.

(SALMO 55, 22)

RESUMO

MUNHOZ, M. G. C. **Identificação e análise de defeito de fundição em coletor de freio motor**. 2017. 72 f. Trabalho de conclusão de curso – Departamento de Engenharia de Materiais. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2017.

A fundição é um processo de transformação que consiste no derramamento de uma carga fundida em um molde. Nesse processo, durante a etapa de solidificação, ocorre a transformação de fases do metal e a redução no volume por unidade de massa, que deve ser considerada no projeto dos moldes pela possibilidade de causar defeitos associados à contração durante o resfriamento. Para os ferros fundidos cinzentos, os efeitos da contração são minimizados pela presença de grafita, menos densa que as demais fases. No entanto, a composição química tem efeito sobre a reação eutetóide de formação da grafita. Logo, defeitos no produto como rechupes e microrechupes provocados quando o metal líquido tem dificuldade em penetrar entre as dendritas formadas na interface sólido-líquido, o que interrompe a ação da pressão atmosférica, exigem controle dos parâmetros do processo de fundição, principalmente em relação ao sistema de alimentação, temperatura de vazamento e inoculação, para garantir a eficiência na obtenção de peças livres de defeitos de contração nos fundidos. Neste trabalho, o defeito rechupe de um coletor de freio motor foi identificado e analisado com corte da seção defeituosa, registro fotográfico, estereoscopia e micrografia. Foram elencadas as prováveis causas da contração que causou a porosidade. Com a plotagem 3D da peça foi realizado o dimensionamento do massalote pela regra dos módulos e foi realizada a simulação da solidificação por meio do software Click2Cast, possibilitando a previsão e a avaliação de um melhor dimensionamento para o sistema de alimentação do coletor. O correto dimensionamento do massalote pode representar ganho de rendimento metálico de pelo menos 7%. Com o desenvolvimento do trabalho, foi observado que apenas um conjunto de ações podem evitar o aparecimento do defeito identificado no componente fundido, devido à grande variabilidade do processo. Formas de impedir a causa do refugo foram recomendadas, a fim de evitar a ocorrência do rechupe em lotes afetados por desvios do processo.

Palavras-chave: Fundição. Ferro Fundido Cinzento. Contração. Rechupe.

ABSTRACT

MUNHOZ, M. G. C. **Identification and analysis of casting defect in motor brake collector**. 2017. 72 p. Course completion work - Department of Materials Engineering. Federal University Technological of Paraná. Londrina, 2017.

Casting is a process of transformation consisting in pouring of a fused charge into a mold. In this process, during the solidification step, metal phase transformation occurs and then reduction in volume per unit mass to be considered in the design of moldes by the possibility of causing defects associated with contraction during the cooling. For gray cast iron, the effects of contraction are minimized by presence of graphite, less dense than the other phases. However, chemical composition has an effect on the eutectoid reaction graphite formation. Therefore, product defects such as shrinkage and micro shrink hole caused when liquid metal has difficulty penetrating between dendrites formed in the solid-liquid interface, that stops the action of atmospheric pressure, require control parameters of the casting process, mainly in relation to feeding system, casting temperature and inoculation, to guarantee the efficiency to obtaining parts free from casting contraction defects. In this work, the shrinkage defect of an engine brake collector was identified and analyzed with defective section cut, photographic record, stereoscopy and micrography. Were listed probable causes of contraction that caused the porosity. With 3D plotting of part, was done riser sizing by modules rule, and the solidification simulation was carried out using Click2Cast software, making possible predict and evaluate a better design for collector feed system. With the development work, it was observed that only one set of actions can prevent the appearance of defects identified in cast component, due to the large variability of the process. Ways to prevent the cause of scrap were recommended in order to avoid the occurrence of shrinkage in batches affected by process deviations.

Keywords: Casting. Gray Cast Iron. Contraction. Shrinkage.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Classificação dos principais processos de fundição.....	15
Figura 2 – Representação da sequência de operações na fundição em areia compactada em caixa.	17
Figura 3 – Elementos básicos sistema de alimentação.....	19
Figura 4 – Massalote direto e lateral (a) aberto e direto e lateral (b) cego.	20
Figura 5 – Diagrama de equilíbrio Ferro-Carbono.....	22
Figura 6 – Seção diagrama de fase Fe-C, apresentando intervalo entre a temperatura eutética estável e metaestável.....	23
Figura 7 – Efeito do Si sobre as temperaturas do eutético estável (TEE) e metaestável (TEM).....	23
Figura 8 – Ferro fundido cinzento, com veios de grafita relativamente grandes. Sem ataque.....	25
Figura 9 – Distribuição da grafita em ferro fundido cinzento.	26
Figura 10 – Representação do padrão de tamanhos de grafita em ferro fundido cinzento com magnificação de 100x.	26
Figura 11 – Curvas de análise térmica de ferros fundidos cinzentos com e sem inoculação.	27
Figura 12 – Curvas de resfriamento típicas para os tipos de grafita.	28
Figura 13 – Microscopia Eletrônica de Varredura de Ferro fundido cinzento, apresentando rechupe.	29
Figura 14 – (a) Modelo simplificado de uma célula em crescimento na solidificação de um ferro fundido cinzento. (b) Representação esquemática de uma célula ou colônia de austenita e grafita crescendo na solidificação de ferro fundido.	30
Figura 15 – Variação do volume específico dos ferros fundidos em função da temperatura durante a solidificação.	31
Figura 16 – Variações de volume do metal líquido durante processo de solidificação e resfriamento no molde.	32
Figura 17 – Massalote com aspecto típico de rechupe primário, apresentando superfície lisa na parte superior e aspecto rugoso na parte inferior.	34
Figura 18 – (a) Micrografia da região superior lisa do massalote, aumento 100x. (b) e (c) Micrografia região inferior rugosa do massalote, aumento 32x.	34
Figura 19 – Micrografia eletrônica de varredura da região inferior rugosa do massalote, onde predomina a formação de células eutéticas com formato dendrítico em ferros fundidos cinzentos. (a) aumento 75x. (b) aumento 150x.	34
Figura 20 – Corte apresentando gota de exsudação em corpo de prova.....	35
Figura 21 – Visualização dos resultados de simulação de fundição com software, (a) e (b) simulação de temperatura, (c) velocidade, (d) ar aprisionado, (e) porosidade e (f) módulo de solidificação.	40
Figura 22 – Registro Fotográfico da peça em análise.....	41
Figura 23 – Modelo em Alumínio do PB Coletor C/ Flange.....	42
Figura 24 – Fluxograma dos procedimentos utilizados na metodologia.....	43
Figura 25 – Equipamento de análise térmica CARBOMAX II (a) e cápsulas com termopar acoplado (b).	44

Figura 26 – Desenho tridimensional da peça em análise com dimensões brutas de fundição.....	45
Figura 27 – Esquema representativo dos cortes realizados na peça em análise.	46
Figura 28 – Registro fotográfico do defeito apresentado pela peça.	48
Figura 29 – Divisão dos sólidos geométricos e módulos de solidificação das áreas da peça.	51
Figura 30 – Simulação sistema de alimentação para temperatura de vazamento 1390°C, avanço do material em (a), evolução de temperatura em (b), fração de líquido em (c), porosidade em (d) e módulo de solidificação em (e).	53
Figura 31 – Simulação sistema de alimentação para temperatura de vazamento 1395°C, avanço do material em (a), evolução de temperatura (b), fração de líquido em (c), porosidade em (d) e módulo de solidificação em (e).	54
Figura 32 – Simulação sistema de alimentação para temperatura de vazamento 1400°C, avanço do material em (a), evolução de temperatura em (b), fração de líquido (c), porosidade em (d) e módulo de solidificação em (e).	55
Figura 33 – Simulação sistema de alimentação para temperatura de vazamento 1405°C, avanço do material em (a), evolução de temperatura em (b), fração de líquido em (c), porosidade em (d) e módulo de solidificação em (e).	56
Figura 34 – Simulação sistema de alimentação para temperatura de vazamento 1380°C, avanço do material em (a), evolução de temperatura em (b), fração de líquido em (c), porosidade em (d) e módulo de solidificação em (e).	58
Figura 35 – Simulação sistema de alimentação para temperatura de vazamento 1415°C, avanço do material em (a), evolução de temperatura em (b), fração de líquido em (c), porosidade em (d) e módulo de solidificação em (e).	59
Figura 36 – Registro fotográfico da análise de sanidade da peça.....	60
Figura 37 – Registro fotográfico da análise de sanidade do sistema de alimentação. Massalotes (a) e canais de alimentação (b).....	61
Figura 38 – Estereoscopia realizada na região (a) e na seção defeituosa após o corte e lixamento (b), com maior aproximação, observando a gota de exsudação em (c), após última etapa do lixamento, sem a gota de exsudação (d).	62
Figura 39 – Microscopia realizada na seção defeituosa após polimento aumento de 40x (a) aumento de 100x (b).	62
Figura 40 – Microscopia da seção da peça A após polimento, aumento de 100x.	63
Figura 41 – Microscopia da seção da peça B após polimento, aumento de 100x. Grafitas grosseiras indicadas em vermelho.	64
Figura 42 – Microscopias da seção da peça C após polimento, aumento de 100x.	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Influencia dos elementos químicos na porcentagem de carbono para reação eutética, no diagrama de equilíbrio estável.	24
Tabela 2 - Módulos para geometrias frequentemente utilizadas.	36
Tabela 3 - Fórmulas específicas para cada tipo de massalote.....	37
Tabela 4 - Teor dos constituintes do ferro fundido utilizado para fabricação do PB Coletor C/ Flange.	42
Tabela 5 - Ferramenta de resolução de problemas.....	44
Tabela 6 - Alteração no teor dos constituintes do ferro fundido utilizado para fabricação do PB Coletor C/ Flange.	47
Tabela 7 – Composição da liga vazada para fabricação da peça em análise..	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ρ_q	Densidade do metal líquido
ρ_s	Densidade do metal sólido
μm	Micrômetros
a	Aresta do cubo
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> (em português: Sociedade Americana de Testes e Materiais)
Ceq	Carbono equivalente
cm	Centímetros
D	Diâmetro da esfera ou cilindro
DAEMA	Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais
DBL	<i>Daimler-Benz Liefervorschrift</i> (em português: Instruções de entrega Daimler-Benz)
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i> (em português: Instituto Alemão para Normatização)
Dm	Diâmetro do massalote
DTE	Intervalo entre as temperaturas TEE e TEM
e	Espessura da placa infinita
g	Gramas
Hm	Altura do massalote
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (em português: Organização Internacional para Padronização)
k	Coeficiente dependente das condições de funcionamento do massalote
k'	Coeficiente de eficiência do massalote de acordo com o tipo
Kg	Quilograma
Kgf	Quilograma-força
lb	Libra
Lm	Seção de ligação do massalote
M	Módulo de Solidificação
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
mm	Milímetros
Mm	Módulo de resfriamento do massalote
Mp	Módulo da peça
P	Peso da peça
pol	Polegada
r	Taxa de contração volumétrica para as diversas ligas
rpm	Rotação por minuto
s	Segundo
S	Superfície de resfriamento
TEE	Temperatura do eutético estável
TEM	Temperatura do eutético metaestável
TSE	Temperatura de super-resfriamento do eutético
V	Volume
Vc	Volume da cavidade do molde
Vm	Volume do massalote
Vp	Volume da peça sólida e fria

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivos	13
1.1.1	Objetivo Geral	13
1.1.2	Objetivos Específicos	13
1.2	Justificativa	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
2.1	Fundição.....	14
2.1.1	Moldagem em Areia	15
2.1.2	Sistema de Enchimento e Alimentação	18
2.2	Ferro Fundido.....	20
2.2.1	Ferro Fundido Cinzento.....	24
2.3	Solidificação dos Ferros Fundidos Cinzentos.....	27
2.4	Defeitos na solidificação.....	29
2.4.1	Rechupe	31
2.5	Métodos para controle de parâmetros da fundição	35
2.5.1	Dimensionamento de Massalotes	36
2.5.2	Posicionamento de Massalotes.....	38
2.5.3	Resfriadores, Materiais Isolantes e Exotérmicos.....	38
2.5.4	Software Simulação de Fundição.....	39
3	MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1	Materiais.....	41
3.2	Métodos.....	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	66
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	68
	REFERÊNCIAS.....	69
	ANEXO 1.....	72

1 INTRODUÇÃO

A produção brasileira de fundidos teve início por volta de 1580 com o ouro, acompanhou depois a necessidade ferroviária e se fortaleceu, juntamente com o desenvolvimento industrial, com o crescimento da indústria automobilística e com a construção de Brasília. O Brasil é o sétimo maior produtor global tendo uma produção de fundidos de 2 milhões de toneladas em 2015, gerando aproximadamente 50 mil empregos diretos. Cerca de 59% dos fundidos destinam-se a indústria automotiva, já que o país possui 27 montadoras abastecidas por mais de 130 empresas de autopeças (CASOTTI, BEL FILHO, CASTRO, 2011; CARMELIO, 2015).

Para fabricação de bens intermediários, a fundição é um processo que representa um caminho curto entre a matéria-prima e produto final. Essa redução do tempo pode ser favorecida agregando tecnologia e qualidade aos fundidos, atendendo também a necessidade de redução de custos, que pode estar relacionada, muitas vezes, ao elevado índice de refugo devido à influência do controle dos parâmetros do processo. O principal recurso utilizado para o projeto e controle dos parâmetros nas fundições é o emprego da tecnologia associada à moldagem, fusão, vazamento e solidificação que possibilitam melhoria no rendimento.

Com isso, algumas considerações sobre os parâmetros do projeto, como a dimensão e posicionamento dos canais de alimentação, geometria da peça, angulação e espessuras das seções, machos, material do molde e sua granulometria, acabamento superficial, tolerância para usinagem, velocidade e temperatura de vazamento, permitem facilitar a produção. Além disso, podem evitar defeitos mais comuns dos fundidos em areia, como bolhas, microporosidade, erosão por lavagem, crosta de erosão, penetração, deslocamento do molde ou do macho, e trincas. Entretanto, por serem defeitos internos, acabam sendo visualizados somente na etapa de usinagem quando não há uma detecção previa, tornando as peças com defeitos refugo do processo de produção.

Neste trabalho, um defeito apresentado em um coletor de freio foi analisado no sentido da identificação e análise do defeito, utilizando software para simulação da solidificação na busca de possibilidades para evitar o aparecimento do defeito observado e para evitar o refugo causado pelo defeito revelado após a etapa de usinagem.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Identificar e analisar a provável causa de um defeito em um coletor de freio motor obtido por fundição em molde de areia verde.

1.1.2 Objetivos Específicos

A partir do objetivo geral, foram estabelecidos dois objetivos específicos:

- Prever como ocorre a solidificação da peça fundida, utilizando para isso software apropriado;
- Levantar as possíveis formas de se evitar o aparecimento do defeito identificado em componentes fundidos.

1.2 Justificativa

O presente trabalho se justifica pelos parâmetros do sistema de alimentação garantem a eficiência na obtenção de peças livres de defeitos de fundição que são descobertos muitas vezes somente na etapa de usinagem e acabamento. Defeitos presentes em regiões específicas em um coletor de freio motor podem influenciar nas propriedades mecânicas e na qualidade do produto, exigindo em muitos casos o descarte da peça. Dessa forma, o correto dimensionamento, disposição dos massalotes, bem como a identificação e determinação da provável solução de defeitos por meio de métodos de análise anteriores à usinagem, como pela simulação da solidificação por meio de software, assumem grande importância ao processo de fundição garantindo maior rendimento.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

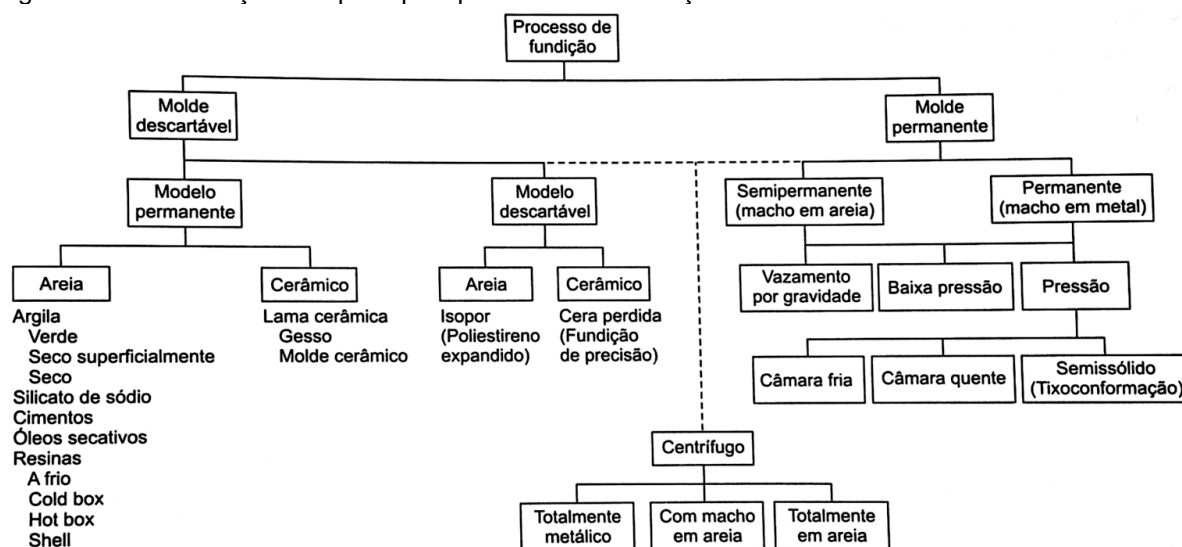
Nesta seção serão apresentados os principais conceitos relacionados ao tema deste trabalho. Inicialmente será abordado o processo de fundição e moldagem em areia, a técnica utilizada para produção do ferro fundido cinzento, seguido de uma revisão dos conceitos desse material e considerações sobre a solidificação durante o processo. Por fim, serão apresentados alguns métodos para avaliação dos parâmetros de solidificação.

2.1 Fundição

A fundição é um dos processos de transformação de metais e ligas metálicas em estado líquido ou fundido para fabricação de peças com grande variedade de formas e tamanhos, principalmente para indústria mecânica e automobilística. O processo é flexível para obtenção de uma ou mais peças, e consiste no derramamento de uma carga fundida com composição adequada em uma cavidade conformada de acordo com o negativo da peça desejada, também chamada de molde (BALDAM, 2014; CHIAVERINI, 1986; SOARES, 2000).

Os métodos de fundição são diferenciados pela velocidade de produção, pela forma de preenchimento, pelo tipo de molde e/ou modelo. A classificação é apresentada na Figura 1. Nela se destacam os principais processos: fundição por gravidade, sob pressão, por centrifugação e de precisão. Para cada procedimento, são consideradas etapas de obtenção como: desenho da peça, projeto do modelo, confecção do modelo e do molde, fusão do metal, vazamento no molde, limpeza e rebarbação e controle de qualidade para expedição (CHIAVERINI, 1986; GROOVER, 2016; KIMINAMI, CASTRO, OLIVEIRA, 2013).

Figura 1 – Classificação dos principais processos de fundição.



Fonte: BALDAM, 2014.

A escolha do processo adequado depende do tamanho e da geometria da peça, do tipo de liga a ser fundida, do número de peças a ser produzido e da qualidade superficial desejada, entre outros parâmetros. Os processos se diferenciam na fase da moldagem, de acordo com a classificação, e essencialmente podem ser destacados os materiais para confecção de moldes como metálicos, em areia verde, areia seca, areia-cimento, areia de macho, cera perdida, entre outros (BALDAM, 2014; CHIAVERINI, 1986; KIMINAMI, CASTRO, OLIVEIRA, 2013).

2.1.1 Moldagem em Areia

O método mais tradicional de fundição de metais ferrosos no Brasil envolve o uso de moldes confeccionados em areia e tem grande aplicação industrial, por possuir um custo baixo aliado a simplicidade e recuperação fácil da areia, contrapondo baixo acabamento superficial em relação aos outros processos, risco de erosão do molde para grandes peças, e risco de heterogeneidade da areia (CASOTTI, BEL FILHO, CASTRO, 2011; KIMINAMI, CASTRO, OLIVEIRA, 2013).

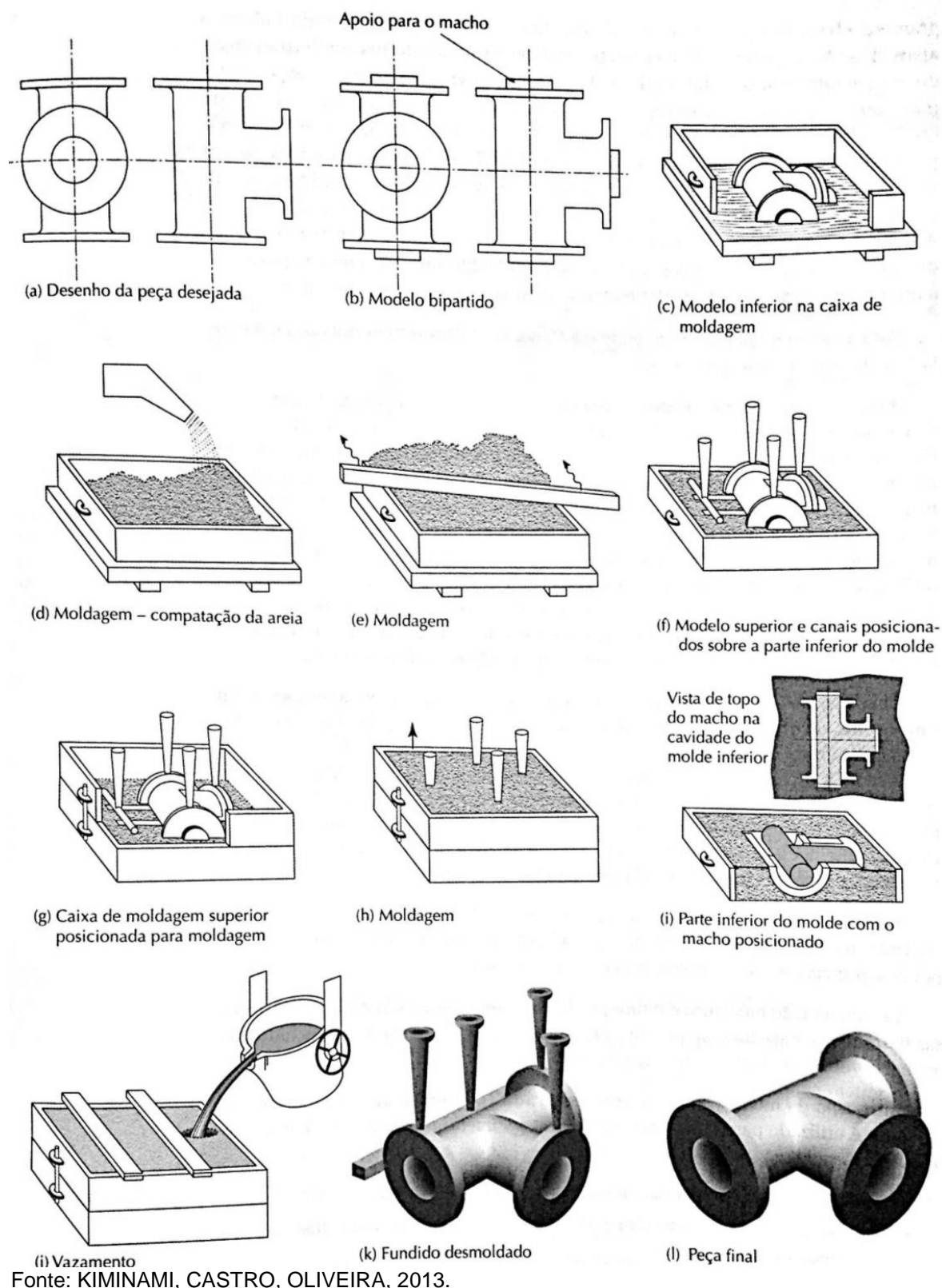
Dessa forma, algumas condições devem ser toleradas pelo molde para realização da fundição, como resistir ao peso do metal líquido e a sua ação erosiva durante o vazamento, ter permeabilidade a fuga de gases e/ou reduzida sua geração evitando a contaminação do metal e a erosão do molde. Com isso, a mistura refratária plástica empregada possui variáveis como a granulometria, umidade e composição,

que influenciam diretamente na qualidade do molde e conseqüentemente da peça (CASOTTI, BEL FILHO, CASTRO, 2011; CHIAVERINI, 1986; KIMINAMI, CASTRO, OLIVEIRA, 2013).

No caso do processo em areia verde, o molde é composto de uma areia-base, argila e resina, que funciona como um aglomerante capaz de aumentar a resistência mecânica do molde. A maior constituinte das areias de fundição é a areia base, que contém basicamente sílica, argila e água, sendo comuns a areia de quartzo (SiO_2), de zirconita ($\text{ZrO}_2, \text{SiO}_2$), de cromita ($\text{FeO Cr}_2\text{O}_3$) e de olivina ($2\text{MgO}, \text{SiO}_2$). As argilas utilizadas são as bentonitas, fundamentalmente por seu mecanismo de ligação, aglomeram a areia base, devido ao envolvimento dos grãos de areia por lamelas argilosas umedecidas na forma de camadas ou filmes, constituindo uma massa argilosa, que confere maior resistência mecânica aos moldes. As características coesivas e refratárias são mantidas com a reposição de bentonita, sendo utilizados misturadores especiais para preparo (BALDAM, 2014; CASOTTI, BEL FILHO, CASTRO, 2011; D'ELBOUX, 2000).

As etapas do processo de fundição em areia a verde estão apresentadas na Figura 2, que devem considerar o modelo, as características da areia, a taxa de contração do metal durante a solidificação e o posicionamento dos canais de alimentação. Normalmente são utilizados modelos bipartidos com o formato da peça. A primeira metade é fixada a uma placa metálica, que é então aquecida e revestida com desmoldante. A placa junto ao modelo é posta no fundo de uma caixa, que é então preenchida com areia de moldagem. O conjunto é rodado em torno do seu eixo horizontal em 180° , de modo que a placa e o modelo passam para a superfície, sendo facilmente retirados. Ao fim desse processo, tem-se uma caixa com a areia no formato externo da metade da peça que se pretende fabricar. Esse é o meio-molde da peça. O mesmo deve ser feito com a outra metade. Também fazem parte da fundição em areia verde o estudo para adequada localização dos machos, pois algumas peças necessitam de vazios. No entanto, esses elementos do processo devem ficar completamente envoltos de metal fundido durante a fundição, assim devem ser planejados apoios externos ao modelo que assegurem sua colocação no molde (CASOTTI, BEL FILHO, CASTRO, 2011; KIMINAMI, CASTRO, OLIVEIRA, 2013).

Figura 2 – Representação da sequência de operações na fundição em areia compactada em caixa.



Nesse processo de fabricação, para que ocorra o escoamento de metal no molde e sua conformação adequada é imprescindível a fusão do metal. A etapa é dependente do equipamento ou forno de fusão e também do preparo das ligas. Os

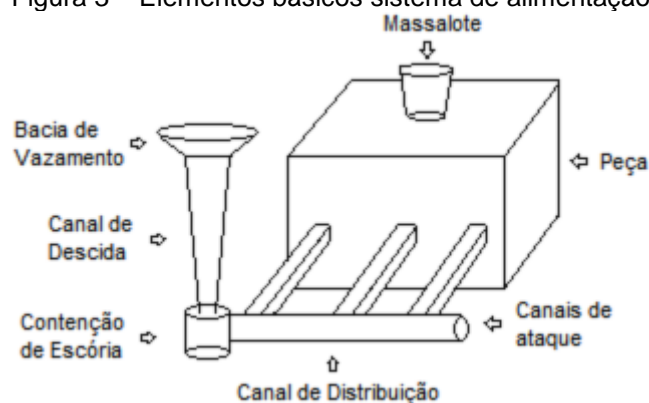
fornos são normalmente classificados de acordo com a fonte de energia, ou então pelo operacional. Normalmente, são utilizados fornos apropriados para as ligas fundidas, sendo mais empregados os fornos cubilô, cadinho, elétricos a arco e fornos de indução por possuir custo reduzido e elevada eficiência térmica. Após a fusão, o metal é transferido do forno para as placas de vazamento, as quais despejam o metal no molde. As placas, na maioria das vezes, possuem revestimento interno refratário, sendo necessárias limpezas, controle de temperatura e da velocidade de vazamento (BALDAM, 2014; CHIAVERINI, 1986; GROOVER, 2016).

Na etapa da desmoldagem da peça, o choque térmico deve ser evitado para não provocar trincas na peça. A recuperação e reutilização da areia de fundição são atrativos para a questão ambiental atrelada a indústria, bem como a revalorização desse material, que proporciona outro destino à areia descartada de fundição. Atualmente, existem processos capazes de recuperar 98% da areia, que é então utilizada em novos moldes. São realizados cortes para remoção do metal excedente dos canais e massalotes, e então a rebarbação e limpeza nas áreas cortadas que precisam de acabamento superficial com jatos abrasivos. Para inspeção das peças podem ser empregadas técnicas de inspeção visual, líquido penetrante, ultrassom, entre outras (CASOTTI, BEL FILHO, CASTRO, 2011; FAGUNDES, VAZ, DE OLIVEIRA, 2009; GROOVER, 2016).

2.1.2 Sistema de Enchimento e Alimentação

Antes do fechamento do molde, são necessários canais de vazamento e respiros adjacentes a peça, para saída de gases e escoamento do metal fundido até a cavidade do modelo, como apresenta a Figura 3. O sistema de enchimento compreende o funil, o canal de descida, de distribuição e de ataque, e as funções desses canais de enchimento são: preencher a cavidade do molde, evitar a turbulência, regiões de baixa pressão, altas velocidades no fluxo metálico e estabelecer gradientes térmicos, a fim de facilitar a alimentação, encher a quantidade necessária de metal líquido em um tempo pré-determinado e evitar arraste de escória, inclusões, gases, aspiração de ar e a erosão de moldes e machos (BALDAM, 2014; CHIAVERINI, 1986; FREITAS, 2011).

Figura 3 – Elementos básicos sistema de alimentação.

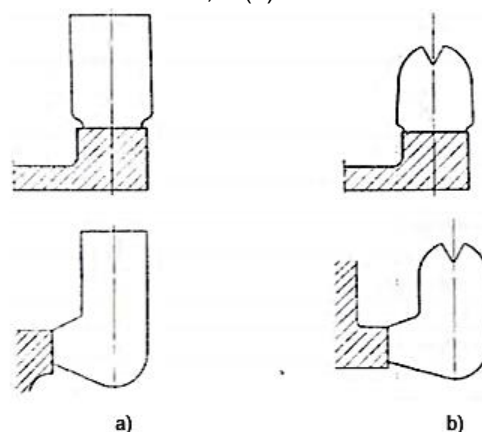


Fonte: Autoria própria.

Devem ser considerados também no projeto de fundição os fenômenos que ocorrem na solidificação do metal líquido no interior do molde, pois influenciam na qualidade da peça fundida. Essas reservas de metal líquido são chamadas de massalotes, e seu projeto tem por finalidade promover uma alimentação durante a solidificação, compensando as contrações líquidas. No entanto, a prevenção de defeitos não é corrigida com a colocação de um massalote, é preciso um sistema de alimentação com alguns artifícios como: solidificação dirigida, utilização de resfriadores e produtos exotérmicos, e a garantia da pressão atmosférica atuando nos massalotes. Para que os massalotes tenham desempenho adequado devem estar posicionados no ponto quente (última região de solidificação da peça), após a região de alimentação, possuir volume suficiente de metal que compense a contração volumétrica da peça, atuar com pressão máxima e economizar material com mínimo peso relacionado a peça (BALDAM, 2014; CHIAVERINI, 1986; FREITAS, 2011).

Devido à seção de ligação superior ou lateral na peça existem os massalotes diretos ou laterais, e abertos ou cegos/fechados, como esta apresentado na Figura 4, representando cavidades abertas para a atmosfera ou cavidades que não chegam a superfície da caixa superior.

Figura 4 – Massalote (a) direto e lateral aberto, e (b) direto e lateral cego.



Fonte: SENAI, 1990.

2.2 Ferro Fundido

Os ferros fundidos representam cerca de 80% dos materiais fundidos do Brasil, segundo a Associação Brasileira de Fundição (ABIFA), que se deve a características com grande aproveitamento. São considerados ferros fundidos as ligas ferro-carbono (Fe-C) com teor de carbono superior a 2%. O elevado teor de carbono dessas ligas e a presença sempre obrigatória do elemento silício (Si) tornam, entretanto, necessário considerá-las como ligas ternárias Fe-C-Si. Os fenômenos de transformação da austenita, no resfriamento lento, são mais complexos, originando estruturas em que um novo constituinte se apresenta - carbono livre ou grafita - cuja forma, disposição e quantidade alteram profundamente as propriedades desses materiais (CHIAVERINI, 1986; GROOVER, 2016).

Quando o carbono se combina diretamente ao ferro, tem-se a cementita, ou carboneto de ferro (Fe_3C), que apresenta elevada dureza, resistência mecânica e baixa tenacidade, caracterizando um material duro e frágil. Já, quando o C se encontra em estado livre, tem-se a grafita, um alótropo natural do carbono, com baixa resistência mecânica, boa condutividade térmica, e boa usinabilidade. O formato da grafita influencia as propriedades mecânicas do fundido: quando em veios, apresenta alta concentração de tensões, maior condutividade térmica, amortecimento e usinabilidade comparado a grafita nodular (CASOTTI, BEL FILHO, CASTRO, 2011; CHIAVERINI, 1986; GUESSER, 2009).

A matriz metálica pode ser constituída de ferrita, que possui elevada ductilidade e tenacidade, e pode apresentar uma matriz de perlita, com melhores

valores de resistência mecânica, porém com baixos valores de ductilidade. Sendo que a mistura das matrizes determina os diferentes tipos de ferros fundidos, com a combinação das propriedades das matrizes, no entanto, a ductilidade dos ferros fundidos não é suficiente para fabricações diferentes da fundição. E para o entendimento das propriedades mecânicas dos ferros fundidos é necessário que se compreenda a formação da microestrutura nestes materiais, e de como as variáveis de processo e de composição química afetam tais propriedades (BALDAM, 2014; GUESSER, 2009).

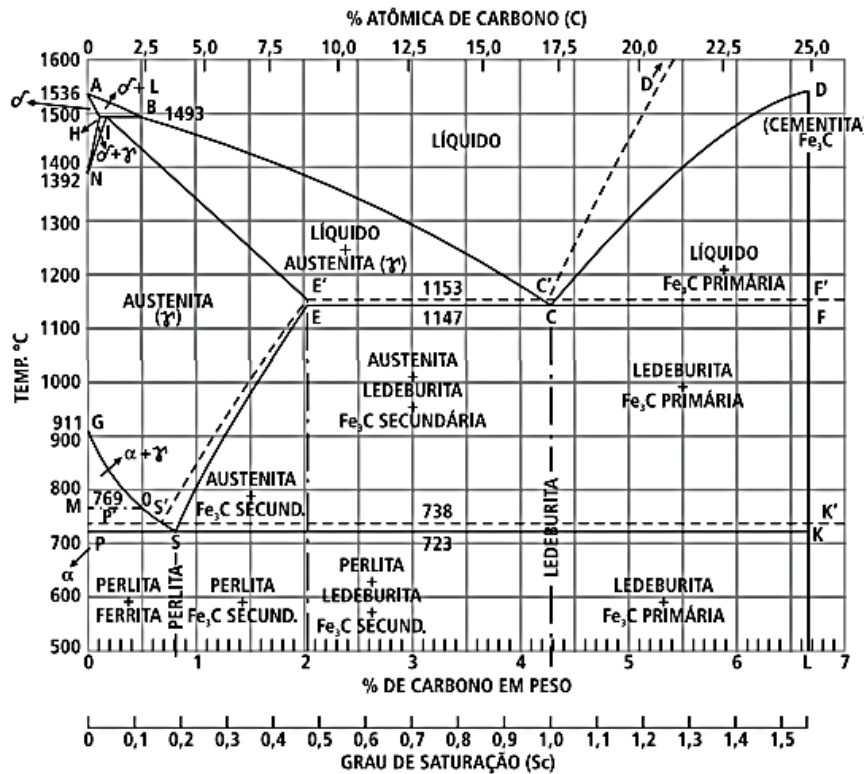
As principais famílias de ferros fundidos são o ferro fundido cinzento, nodular, maleável, vermicular e o branco. Normalmente são obtidos a partir de um carregamento que consiste basicamente de ferro-gusa, retorno de fundição (ou sucata interna) e sucata de aço, devidamente balanceados para obtenção da composição desejada. Além disso, são adicionados ferro-ligas para correção de teores dos diversos elementos. Após a fusão, o metal é inoculado – normalmente com liga Fe-Si – em panela ou diretamente no molde, com intuito de garantir uma microestrutura de células eutéticas pequenas e homogêneas. Sendo assim, os fundidos são ligas complexas com vários elementos de liga e impurezas, entre eles o manganês (Mn), fósforo (P) e enxofre (S), e, com isso, para analisar os efeitos desses elementos sobre os pontos do diagrama de equilíbrio Fe-C são calculados os conceitos de Carbono Equivalente, conforme equação 1, que também representa a proximidade da composição eutética, sem que seja necessária a análise de diagramas ternários (CALLISTER, 2013; SOARES, 2000).

$$CE = \%pC + \%p Si / 3 + \%p P / 3 \quad (1)$$

A adição dos elementos Si e níquel (Ni) na liga alteram a microestrutura do fundido favorecendo a formação de grafita, já os elementos cromo (Cr), manganês (Mn), molibdênio (Mo) e vanádio (V) favorecem a formação de cementita, enquanto os elementos S e P são considerados como impurezas. Outros fatores que alteram a microestrutura e influenciam nas propriedades mecânicas dos ferros fundidos são a velocidade de resfriamento, que ao ser elevada favorece a formação de cementita, e a inoculação, a qual com a formação de núcleos torna as microestruturas mais homogêneas e promove a formação de grafita. Em geral, as ligas de ferro fundido possuem uma fase pró-eutética de austenita e grafita e uma fase eutética de austenita

grafita ou de austenita e carbonetos como pode ser observado no Diagrama de Equilíbrio Fe-C da Figura 5, apresentando as fases de equilíbrio e as transformações de fase associadas a temperatura (CASOTTI, BEL FILHO, CASTRO, 2011; GUESSER, 2009).

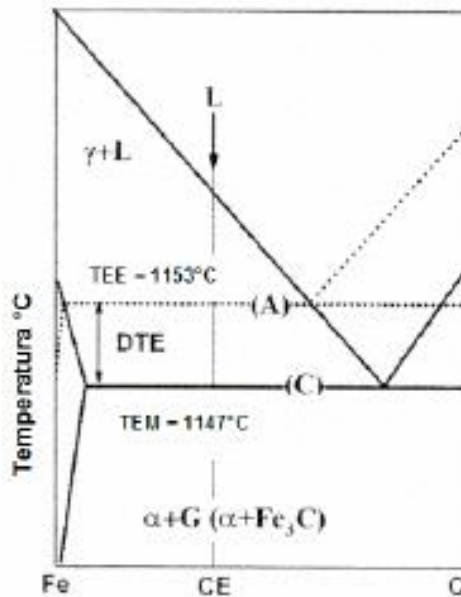
Figura 5 – Diagrama de equilíbrio Ferro-Carbono.



Fonte: PIESKE, CHAVES FILHO, REIMER, 1985.

A diferença entre as temperaturas eutéticas estável e metaestável são próximas, apenas 7°C para a condição de equilíbrio do diagrama Fe-C, Figura 6. Com a adição dos elementos de liga, há alterações dessa diferença de temperaturas entre os dois eutéticos. Com isso, para aumentar este intervalo entre os eutéticos (DTE), usualmente é empregado o silício, o qual em uma adição de 2%, altera de 7°C para 35°C o intervalo DTE, conforme apresenta a Figura 7, por reduzir a solubilidade do carbono na austenita, possibilitando a ocorrência de reação eutética e eutetóide em um intervalo de temperatura (STUEWE, 2008).

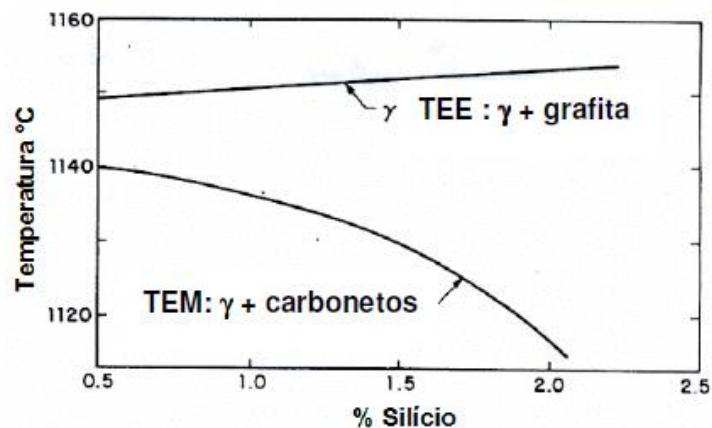
Figura 6 – Seção diagrama de fase Fe-C, apresentando intervalo entre a temperatura eutética estável e metaestável.



(a) Diagrama de fase

Fonte: KANNO, et al., 2005 apud STUEWE, 2008.

Figura 7 – Efeito do Si sobre as temperaturas do eutético estável (TEE) e metaestável (TEM).



Fonte: SANTOS, BRANCO, 1989 apud STUEWE, 2008.

A composição química influencia na velocidade de nucleação e de crescimento das células eutéticas, e alteram a estrutura de solidificação através de vários fenômenos cinéticos e termodinâmicos. Os elementos grafitizantes aumentam a atividade do carbono, deslocando o ponto eutético para a esquerda, por diminuir a porcentagem de carbono para reação eutética. Os elementos que reduzem a atividade do carbono são chamados de estabilizadores de carbonetos, pois aumentam a porcentagem de carbono para reação eutética favorecendo a formação de carbonetos

(BERNS; THEISEN, 2008). A alteração na porcentagem de carbono para a reação eutética influenciada pelos elementos de liga está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Influência dos elementos químicos na porcentagem de carbono para reação eutética, no diagrama de equilíbrio estável.

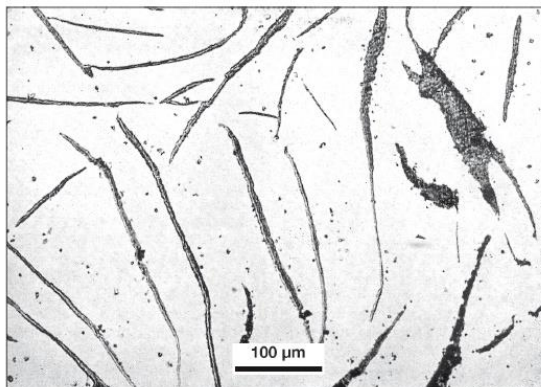
Elementos de liga	Alteração na porcentagem de carbono para a reação eutética com a adição de 1% em peso do elemento *
Ni	0,05
Cu	0,075
Sn	0,10
Al	0,215
Si	0,29
S	0,41
P	0,345
Mo	- 0,012
Mn	- 0,03
Cr	- 0,05
V	- 0,10
Ti	- 0,14

Fonte: JANOWAK; GUNDLACH, 1982 apud STUEWE, 2008.

2.2.1 Ferro Fundido Cinzento

Os ferros fundidos cinzentos apresentam um teor mais elevado de carbono na forma de grafita, em veios ou lamelas, em matriz de ferrita, perlita ou ambas, que confere sua coloração escura, boa resistência mecânica, elevado amortecimento a vibrações, boa usinabilidade e maior tenacidade relativa ao ferro fundido branco (COLPAERT, 2008; GUESSER, 2016). A microestrutura característica desses materiais está apresentada na Figura 8, a seguir:

Figura 8 – Ferro fundido cinzento, com veios de grafita relativamente grandes. Sem ataque.



Fonte: COLPAERT, 2008.

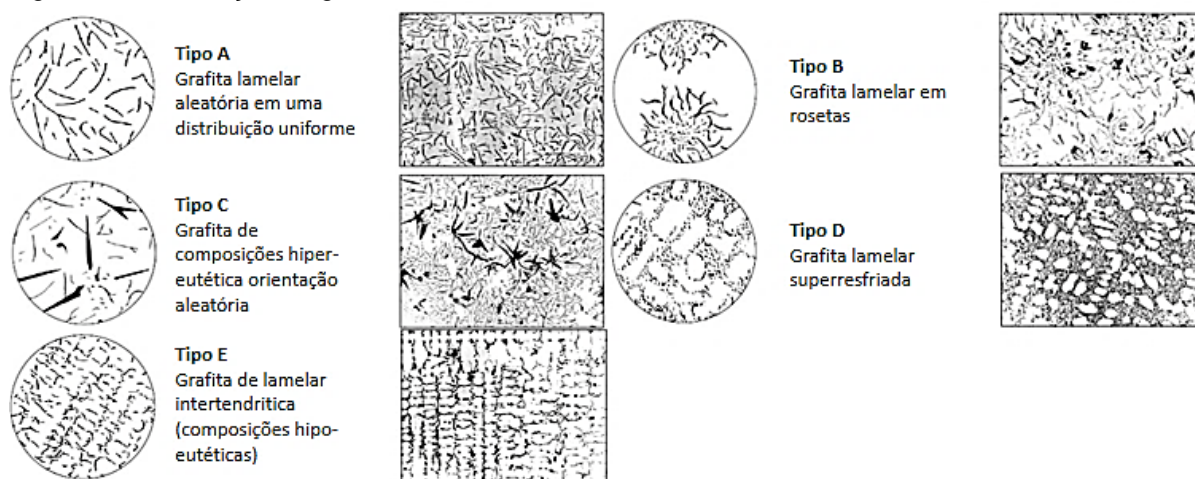
Para possuir essas propriedades mecânicas, a composição geralmente é hipoeutética com o carbono equivalente inferior a 4,3%, representando menor intervalo de solidificação. Com o resfriamento, a solidificação tem início pela formação de dendritas de austenita, variando a temperatura de acordo com a composição química, quando atinge a temperatura eutética ocorre a formação de austenita e grafita até o fim do resfriamento no estado líquido, com variações de composição por precipitação de carbono na grafita. Com o resfriamento, ocorre a transformação eutetóide da austenita em grafita e ferrita em reação estável, ou em reação metaestável da austenita em ferrita e cementita, constituindo a perlita, ambas podem ser favorecidas de acordo com os elementos de liga adicionados. A concentração de tensões causada pela grafita possibilita micro trincas nas extremidades, que podem resultar em fratura. No entanto, quando em matriz perlítica, confere maior resistência mecânica, a qual também é influenciada pelo tamanho das partículas de grafita, maiores à medida que é aumentado o teor de carbono equivalente (GUESSER, 2009).

A classificação dos ferros fundidos segundo a ASTM e a norma alemã DIN relaciona o limite de resistência a tração (lb/pol^2) e (kgf/mm^2), respectivamente, à classe correspondente. Já pelo sistema ABNT, os ferros fundidos cinzentos são denominados FC acompanhado do limite mínimo de resistência à tração (kgf/mm^2) (CHIAVERINI, 1986).

A morfologia da grafita em ferros fundidos cinzentos é dividida em cinco classes conforme norma EN ISO 945:1994 e também é classificada por seu tamanho, como mostra a Figura 9 e 10, respectivamente. Os tipos de grafita advêm do processo de solidificação quando ocorre a variação de composição química, nucleação e

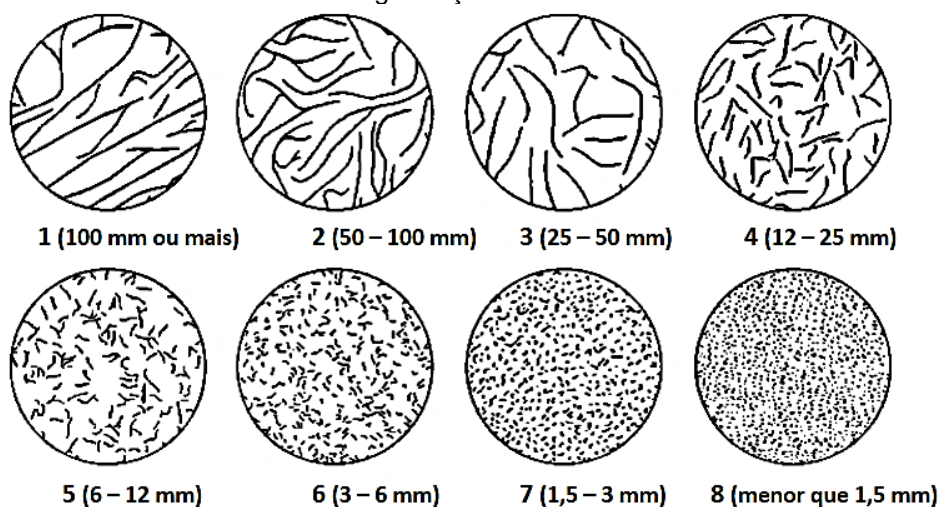
velocidade de extração de calor. Será apresentado mais adiante a cinética de formação para cada tipo de grafita (ELKEM, 2017).

Figura 9 – Distribuição da grafita em ferro fundido cinzento.



Fonte: ELKEM, 2017.

Figura 10 – Representação do padrão de tamanhos de grafita em ferro fundido cinzento com magnificação de 100x.



Fonte: ELKEM, 2017.

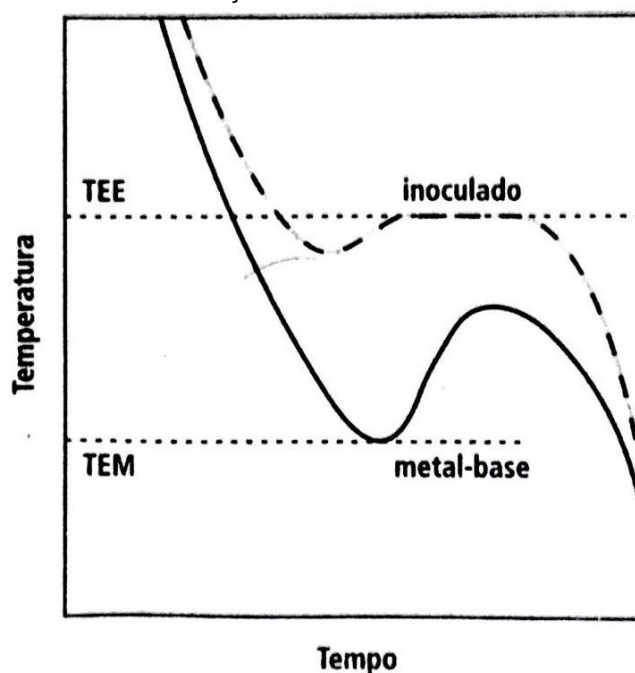
Os ferros fundidos cinzentos têm ampla aplicação. Devido a sua alta capacidade de amortecimento, alta resistência à compressão, são adequados para bases de máquinas e armações. São indicados para aplicações em locomotivas e combustão interna, por sua boa usinabilidade, e elevada resistência ao desgaste, bem como em anéis de pistões, blocos e cabeças de cilindros de ignição. A facilidade do processo de fundição e o baixo custo os tornam adequados para componentes para elevadores, portas de fornos industriais, protetores e armações em torno de máquinas

perigosas, caixas de engrenagens, caixas de turbinas a vapor, armações de motor, caixas de esgoto, e de equipamentos elétricos (GUESSER, 2009).

2.3 Solidificação dos Ferros Fundidos Cinzentos

O processo de solidificação dos ferros fundidos cinzentos ocorre por processos de nucleação e crescimento, monitorados através de curvas de análises térmicas, como na Figura 11, inicialmente com a solidificação da fase primária, seguida pela solidificação da fase eutética. Quando se deseja evitar a presença de cementita, a inoculação é uma ferramenta muito utilizada devido a redução do afastamento do equilíbrio (super-resfriamento), diminuindo o risco da temperatura do líquido situar-se abaixo da temperatura metaestável (GUESSER, 2009).

Figura 11 – Curvas de análise térmica de ferros fundidos cinzentos com e sem inoculação.

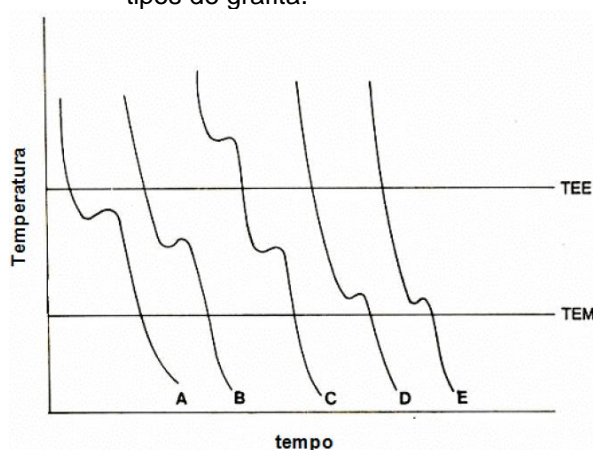


Fonte: KANNO, et al., 2006 apud GUESSER, 2009.

O grau de super-resfriamento envolvido é determinante para o tipo de grafita apresentado, como mostra a Figura 12. A solidificação em altas temperaturas representa baixo super-resfriamento, ocorrendo a formação de grafita do tipo A, lamelar uniformemente distribuída na estrutura com orientação aleatória. Para o super-resfriamento moderado, ocorre o crescimento da célula eutética com

espaçamento mais fino entre as grafitas e, a subsequente formação de lamelas de grafitas mais espessas, decorrente de uma temperatura maior de solidificação, o que caracteriza a grafita do tipo B, como uma roseta. As grafitas do tipo C são observadas para composições hipereutéticas, no qual há formação de grafitas primárias (SANTOS; BRANCO, 1989, apud STUEWE, 2008).

Figura 12 – Curvas de resfriamento típicas para os tipos de grafita.



Fonte: SANTOS; BRANCO, 1989, apud STUEWE, 2008.

As grafitas tipo D e E ocorrem em ferros fundidos com composição hipoeutética. No caso da grafita D, antes da nucleação do eutético ocorre a nucleação e crescimento das dendritas de austenita, com um maior super-resfriamento, apresentando grafitas finas e dispersas. Para ferros fundidos fortemente hipoeutéticos, ocorre a formação de maior teor de dendritas de austenita, logo, são formadas grafitas mais finas devido ao menor volume de solidificação eutética. Ambas as morfologias D e E, por apresentarem grafitas refinadas, reduzem o caminho de difusão do carbono aumentando a formação de ferrita (SANTOS; BRANCO, 1989, apud STUEWE, 2008).

A espessura e a velocidade de resfriamento também têm grande influência na solidificação, pois a mesma tem início nas áreas de maior transferência de calor, conseqüentemente, nas superfícies da cavidade do molde. Em seguida, as frentes de solidificação se dirigem às zonas mais finas até as zonas mais espessas no centro térmico do fundido, em uma solidificação progressiva. Sendo assim, deve-se evitar que o último metal a se solidificar esteja localizado em uma região geometricamente

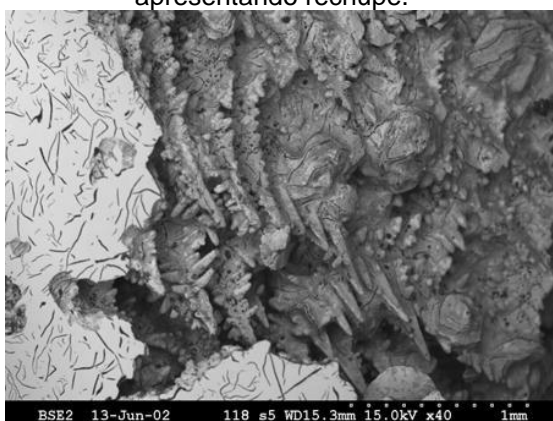
central do fundido, para impedir que sejam gerados defeitos relativos a contração (TEIXEIRA, 2013).

Para maior ganho de produtividade e redução no tempo de espera para correção do material durante a fusão no forno, são empregados dispositivos de análise térmica que apresentam parâmetros relacionados à solidificação do ferro fundido. O equipamento consiste em um circuito micro-controlado que realiza a análises da curva de resfriamento de uma amostra de metal colhida do forno, vazada em uma cápsula de análise com telúrio. Os resultados indicam as temperaturas dos patamares de *Líquidus* e *Solidus* (eutético metaestável), e ainda com excelente precisão, o teor de carbono equivalente, carbono total e silício presentes no banho fundido em pouco tempo (ITALTERM, 2017)

2.4 Defeitos na solidificação

A solidificação envolve a transformação do metal líquido para o estado sólido e com ela, ocorrem variações no volume que devem ser consideradas no projeto de peças, moldes e canais. Com isso, podem ser gerados defeitos associados à contração durante o resfriamento, como apresenta a Figura 13, pela redução no volume por unidade de massa do metal, sendo exceção os ferros fundidos cinzentos que possuem uma expansão que compensa a contração volumétrica associada a essa transformação de fase (GROOVER, 2016; KIMINAMI, CASTRO, OLIVEIRA, 2013).

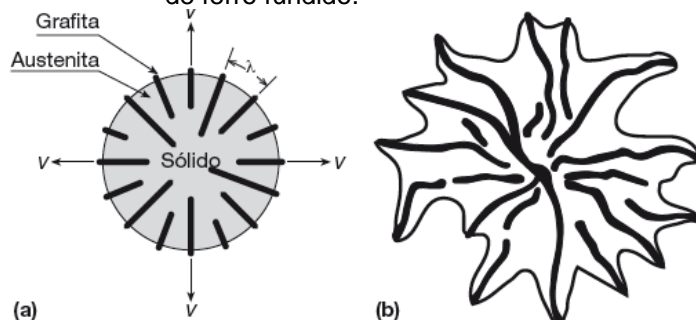
Figura 13 – Microscopia Eletrônica de Varredura de Ferro fundido cinzento, apresentando rechupe.



Fonte: ECOB, 2005.

Os ferros fundidos cinzentos exibem uma expansão devido à precipitação de grandes quantidades de grafita, que equilibra a contração de solidificação da austenita do eutético. A precipitação de grafita apresenta expansão volumétrica por possuir densidade cerca de três vezes menor do que a do ferro. Entretanto, somente com o confinamento dessa expansão à cavidade da peça e o aumento da pressão interior, pode ser considerada a compensação da contração. Se houver refluxo de metal pelos canais ou para o massalote, ou ainda, dilatação considerável da cavidade do molde (comum em areia a verde), o efeito da expansão será perdido. Mesmo nos casos em que se consiga aproveitar essa expansão devido à solidificação do eutético, há que compensar por outros meios à contração líquida, que pode ser reduzida com a utilização de baixas temperaturas de vazamento (BALDAN, 2014). A Figura 14 representa o crescimento de uma célula na solidificação de ferro fundido.

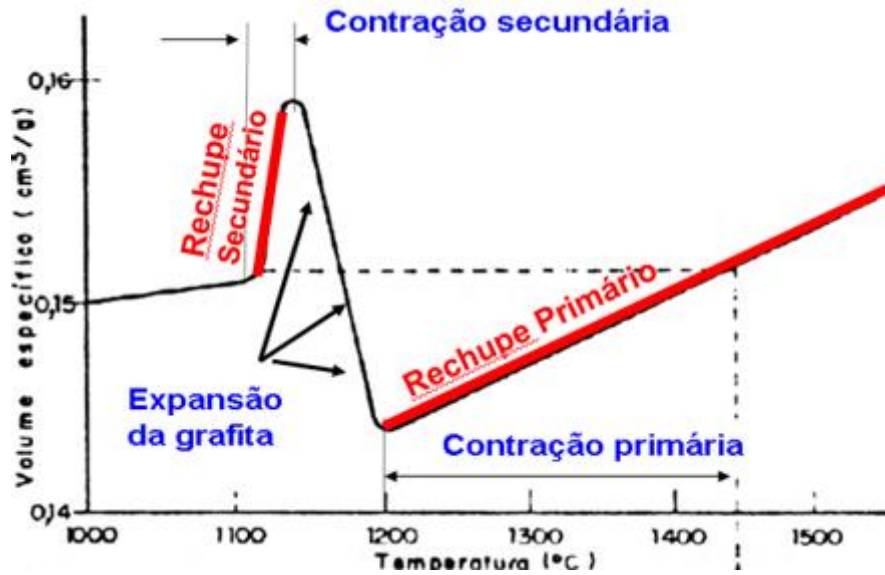
Figura 14 – (a) Modelo simplificado de uma célula em crescimento na solidificação de um ferro fundido cinzento. (b) Representação esquemática de uma célula ou colônia de austenita e grafita crescendo na solidificação de ferro fundido.



Fonte: COLPAERT, 2008.

Sendo assim, como mostra a Figura 15, se o vazamento ocorrer a temperaturas inferiores a 1440°C, não seriam observados defeitos de contração, porém, de fato, a contração está ligada às alterações de volume e pressão decorrentes de várias etapas de solidificação, e, com isso, esse processo sofre a influência das variáveis não só da temperatura de vazamento, mas da rigidez do molde e dimensionamento do canal de ataque (BALDAM, 2014; LARSEN, 2008).

Figura 15 – Variação do volume específico dos ferros fundidos em função da temperatura durante a solidificação.



Fonte: FUOCO, 2016.

A qualidade das peças de ferros fundidos cinzentos é definida com a seleção de sistemas de alimentação adequados para as condições para sua utilização. Já que para as ligas hipoeutéticas devem ser utilizados massalotes para compensar a contração líquida e de solidificação na fase pró-eutética, observando a importância da solidificação da ligação massalote-peça anterior ao início da reação eutética. Normalmente, os defeitos de peças vazadas podem ser classificados pela origem, que podem ser saliências, cavidades, descontinuidades, defeitos superficiais, peças incompletas e dimensões incorretas. A eliminação ou redução desses defeitos torna a fabricação mais onerosa, sendo os defeitos externos facilmente corrigidos na limpeza, rebarbação ou retificação, e ainda o controle antecedente dos parâmetros associados ao processo pode auxiliar no alcance da qualidade necessária (BALDAM, 2014; GROOVER, 2016).

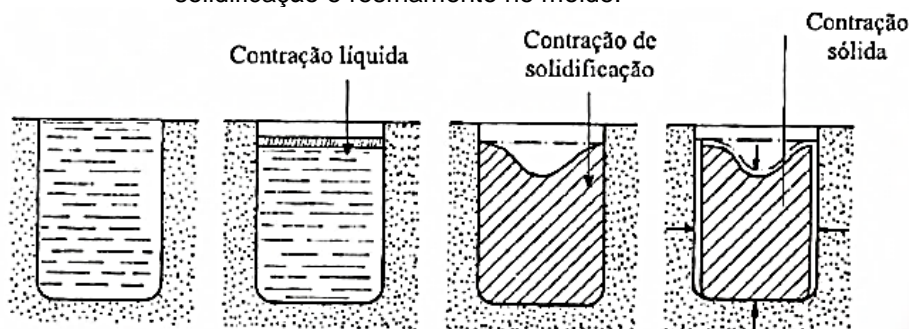
2.4.1 Rechupe

Um dos defeitos desenvolvidos pelo intervalo e modo de solidificação é o rechupe. É iniciado após o enchimento do molde com a solidificação do metal e formação de uma casca de metal sólido que tem acréscimo de espessura com o resfriamento, variável de acordo com a geometria. O isolamento de metal líquido no interior da peça, associado à sua contração sem alimentação que a compense

determina a existência desses vazios no interior da peça ou superficiais, concentrados ou dispersos, nos pontos quentes (BALDAM, 2014; FREITAS, 2011).

A variação volumétrica pode ser associada a tipos de contração: líquida, durante a solidificação e no estado sólido, como apresenta a Figura 16, contrabalanceadas com a continuidade na alimentação da peça pelo emprego de massalotes e acréscimo nas dimensões do modelo. Para determinadas ligas, como ferros fundidos cinzentos, pode-se observar aumento no volume devido à expansão gráfica durante a solidificação, sendo considerada apenas a contração líquida. Na solidificação, a contração e expansão volumétrica observadas pelo fundido cinzento podem provocar microrechupe devido ao crescimento da grafita, com a evolução na fração volumétrica dos microporos durante o resfriamento (BALDAM, 2014; FREITAS, 2011).

Figura 16 – Variações de volume do metal líquido durante processo de solidificação e resfriamento no molde.



Fonte: FREITAS, 2011.

O rechupe é caracterizado como porosidade interna nos ferros fundidos cinzento e nodular. São apresentados normalmente como cavidades que variam de tamanho e forma, de grandes e isoladas até pequenas e dispersas, apenas visíveis com microscópio. Muitas vezes, a característica revelada dentro das porosidades é uma estrutura dendrítica. O defeito ocorre normalmente devido à contração na última região que solidifica do metal, logo, está associado às seções de maior massa, em mudanças de espessura de seção ou em geometrias complexas (ELKEM, 2017).

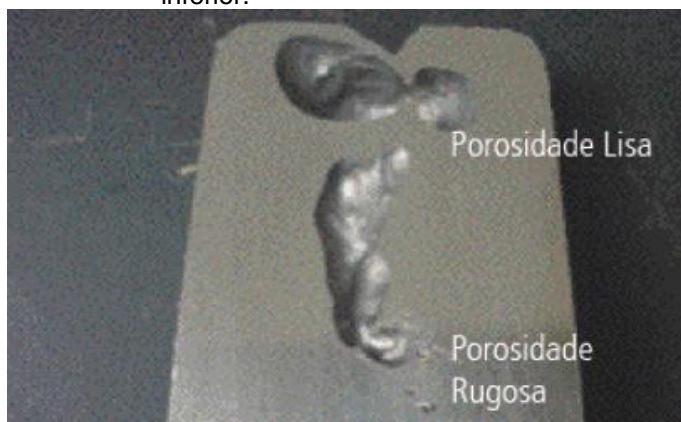
Observa-se que, nas peças vazadas com ligas que solidificam por camadas finas, os rechupes são concentrados com formas definidas pelas isotermais, as quais dependem da forma da peça devido à concentração ou não de calor. Nas peças vazadas com liga que solidifica por camadas espessas, os rechupes são dispersos, sem forma definida, porém localizados em regiões cuja forma da peça promove uma

concentração de calor. E nessas ligas que solidificam por camadas espessas, o metal líquido tem dificuldade de fluir entre as dendritas a partir do momento que se forma uma casca sólida, pois cessa a atuação da pressão atmosférica, que não é suficiente para fazer o metal líquido fluir entre as dendritas, provocando rechupes e microrechupes (FREITAS, 2011).

Entre as causas principais do rechupe estão a temperatura de vazamento excessiva, inoculação, teor de carbono inadequado, pontos quentes resultantes de sistemas de alimentação inadequados, entre outros. Com isso, devem ser evitadas temperaturas de vazamento desnecessariamente elevadas, inoculação excessiva ou insuficiente, e podem ser utilizados resfriadores para evitar pontos quentes. Também é empregada para redução da porosidade por contração, a inoculação tardia no fluxo de metal para o molde, já que evita a alta quantidade de células eutéticas que induzem a um maior encolhimento, resultam em uma menor taxa de adição de inoculante. Desta forma, apenas o metal que entra no molde é inoculado e ocorre menor adição de cálcio e alumínio, reduzindo a tendência para inclusões de escória (ECOB, 2005).

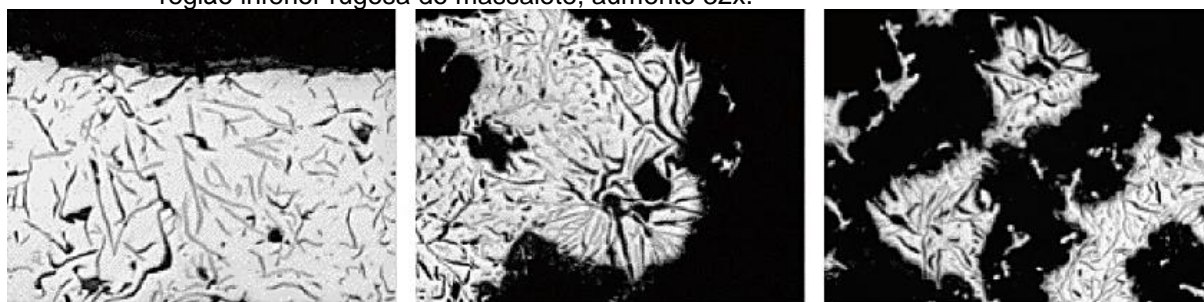
Em relação à caracterização de rechupes, os primários decorrentes da contração primária causada pela redução do volume do líquido entre a temperatura de vazamento ao início da solidificação, apresentam na maioria das vezes, uma depressão na superfície da peça, uma porosidade com superfície lisa e/ou rugosa como mostram as Figuras 17, 18, 19. Se o líquido for deslocado para alimentar outras regiões pela contração de solidificação, a porosidade resultante será lisa. O aspecto rugoso indica células eutéticas com formato externo dendrítico, com crescimento favorecido provavelmente devido à alteração da interface sólido-líquido na última fração de sólido. Nessas regiões, também podem ser notadas gotas de exsudação, na Figura 20, que ocorrem durante as últimas etapas de solidificação, pela pressão exercida pelo líquido preso entre as células eutéticas sobre as paredes do molde, devido à precipitação da grafita (FUOCO; CORRÊA; CAVALCANTI, 2007 apud STUEWE, 2008).

Figura 17 – Massalote com aspecto típico de rechupe primário, apresentando superfície lisa na parte superior e aspecto rugoso na parte inferior.



Fonte: FUOCO; CORRÊA; CAVALCANTI, 2007 apud STUEWE, 2008.

Figura 18 – (a) Micrografia da região superior lisa do massalote, aumento 100x; (b) e (c) Micrografia região inferior rugosa do massalote, aumento 32x.



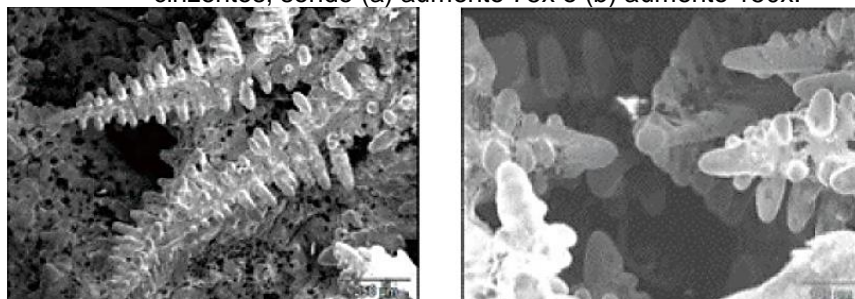
(a)

(b)

(c)

Fonte: FUOCO; CORRÊA; CAVALCANTI, 2007 apud STUEWE, 2008.

Figura 19 – Micrografia eletrônica de varredura da região inferior rugosa do massalote, onde predomina a formação de células eutéticas com formato dendrítico em ferros fundidos cinzentos, sendo (a) aumento 75x e (b) aumento 150x.

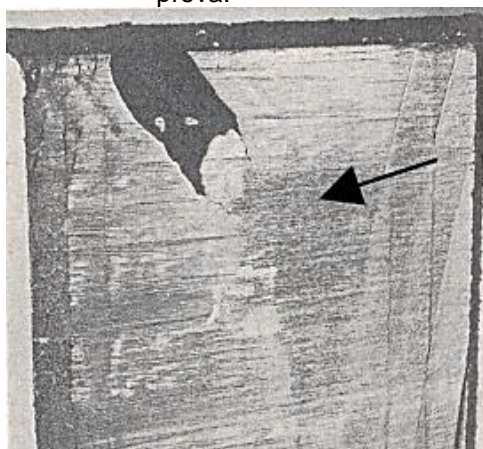


(a)

(b)

Fonte: FUOCO; CORRÊA; CAVALCANTI, 2007 apud STUEWE, 2008.

Figura 20 – Corte apresentando gota de exsudação em corpo de prova.



Fonte: FUOCO; CORRÊA; CAVALCANTI, 2007 apud STUEWE, 2008.

Os rechupes secundários, causados pela contração de solidificação do líquido e das fases intercelulares formadas, originam porosidades encontradas nos centros térmicos das peças, que apresentam superfície rugosa e/ou microporosidades intercelulares. Esses defeitos ocorrem pela impossibilidade de alimentação causada pelo isolamento do líquido intercelular, que formam poças de líquido isoladas. A ocorrência de rechupes secundários é evitada durante a expansão da grafita que causa um aumento de pressão contra a redução de pressão resultante da contração secundária (FUOCO; CORRÊA; CAVALCANTI, 2007 apud STUEWE, 2008).

2.5 Métodos para controle de parâmetros da fundição

Para avaliação das qualidades da peça são comumente utilizados ensaios visuais, controle de temperatura com pirômetros, análises químicas com espectrometria, e ensaios de dureza. Entretanto, os defeitos de fundição atuam como concentradores de tensão nos materiais e mesmo externos, são necessárias técnicas adicionais para reduzir ou eliminar os defeitos, evitando o descarte da peça. Sendo assim, a utilização de diferentes métodos para controle de parâmetros importantes do processo de fundição, como será aqui apresentado, pode conduzir a uma fundição mais eficiente.

2.5.1 Dimensionamento de Massalotes

No dimensionamento dos massalotes são empregadas a regra dos módulos, e a regra da contração. A regra dos módulos utiliza a divisão em sólidos geométricos, considerando efeitos de extremidades e junções. Assim, quanto maior o volume, menor a área de resfriamento, logo será maior o tempo de solidificação, que será indicado por um maior módulo (BALDAM, 2014; FREITAS, 2011), de acordo com a equação, a seguir:

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

No qual, M equivale ao módulo, V ao volume do metal líquido e S a superfície de troca de calor. Esse cálculo deve ser efetuado a partir da divisão da peça em sólidos geométricos, devendo ser feito para cada um dos sólidos, obtendo o módulo de resfriamento (BALDAM, 2014; FREITAS, 2011). Alguns elementos apresentam cálculo simplificado como está apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Módulos para geometrias frequentemente utilizadas.

Geometria	Relação para cálculo do Módulo
Esfera	$d/6$
Cubo	$a/6$
Placa Infinita	$e/2$
Sólido de revolução	$S/P = \frac{a \cdot b}{2 \cdot (a + b)}$
Cilindro Infinito	$d/4$

Fonte: FREITAS, 2011.

Notas: d =diâmetro da esfera ou cilindro, a =aresta do cubo, e =espessura da placa infinita, S =área de seção do anel e P =perímetro de seção do anel.

O dimensionamento do massalote considera que este deve se localizar na última parte de solidificação da peça, sendo assim, deve possuir maior módulo de solidificação. As fórmulas são específicas para cada tipo de massalote, assim o módulo de resfriamento do massalote (M_m) é dado por:

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

No qual, k é o coeficiente dependente das condições de funcionamento do massalote e M_p é o módulo da peça. Sendo os valores de k para casos gerais de 1,2; para massalote aquecido pelo ataque de 1,1; para massalotes com luva exotérmica de 0,9 a 0,8; para massalotes em ferro fundido cinzento usado de 0,6 e com luvas de 0,5.

Para dimensionamento segundo a regra dos módulos, são consideradas as relações apresentadas na Tabela 3, de acordo com o tipo de massalote selecionado.

Tabela 3 – Fórmulas específicas para cada tipo de massalote.

Massalote	Fórmula
Direto Aberto	$D_m = 4. M_m$ $H_m = 1,5 \text{ a } 2,0. D_m$ $L_m = 0,4 \text{ a } 0,7. D_m$ $V_m = \frac{\pi}{4} D_m^2 \cdot H_m$
Direto Cego	$D_m = 4,5. M_m$ $H_m = 1,5. D_m$ $L_m = 0,4 \text{ a } 0,7. D_m$ $V_m = 1,047. D_m^3$
Lateral Aberto	$D_m = 4. M_m$ $H_m = 1,5 \text{ a } 2,0. D_m$ $L_m = 0,314. D_m^2 \text{ (com ataque)}$ $L_m = 0,471. D_m^2 \text{ (sem ataque)}$ $V_m = \frac{\pi}{12} D_m^2 \cdot (D_m + 3H_m)$
Lateral Cego	$D_m = 4,56. M_m$ $H_m = 1,5. D_m$ $L_m = 0,314. D_m^2 \text{ (com ataque)}$ $L_m = 0,471. D_m^2 \text{ (sem ataque)}$ $V_m = 1,309 D_m^3$

Fonte: FREITAS, 2011.

Notas: M_m = módulo do massalote, D_m = diâmetro do massalote, H_m = altura do massalote, L_m = seção de ligação do massalote e V_m = volume do massalote.

Já de acordo com a regra da contração, o massalote deve possuir quantidade de metal que compense a contração no resfriamento. O volume do massalote V_m deve ser adequado à regra expressa pela relação:

$$\sum V_m \geq k'.r.V_c \quad (4)$$

No qual, V_C é o volume da cavidade do molde, r é a taxa de contração volumétrica para as diversas ligas e k' é o coeficiente de eficiência do massalote de acordo com o tipo. Para o cálculo do volume da cavidade, deve-se considerar a relação da equação 5, que leva em conta o volume da peça sólida e fria V_P , as densidades do metal sólido e líquido (respectivamente ρ_s e ρ_q), e o peso da peça P :

$$V_C = V_P \frac{\rho_s}{\rho_q} = \frac{P}{\rho_q} \quad (5)$$

As regras apresentadas dos módulos e da contração devem ser selecionadas para o dimensionamento utilizando sempre a de maior valor, assim serão atendidas sucessivamente ambas as regras.

2.5.2 Posicionamento de Massalotes

Para que seja obtida uma solidificação direcional, na qual são respeitados o processo de solidificação e os métodos pelos quais pode ser controlado, é necessário seguir as regras de dimensionamento para correto posicionamento no molde. A determinação da zona de ação de um massalote influencia a solidificação em regiões apropriadas da cavidade e evita a solidificação prematura em seções do molde próximas ao massalote. No entanto, existem limites da distância de alimentação para que o gradiente térmico longitudinal gerado pelos massalotes permita a solidificação dirigida, que pode ser representada pela circunferência concêntrica à distância L do perímetro do massalote. Com isso, devem ser considerados os alcances do massalote, observando as regiões de maior tendência à formação de rechupes, juntamente com o efeito das extremidades e resfriadores (BALDAM, 2014; FREITAS, 2011; GROOVER, 2016).

2.5.3 Resfriadores, Materiais Isolantes e Exotérmicos

Para aumentar a eficiência da fundição podem ser empregados elementos que elevam o rendimento dos massalotes, acelerando localmente a retirada de calor. Os resfriadores externos são exemplos, já que, tem por função acentuar o gradiente térmico local, favorecendo a alimentação pelo aumento da distância de alimentação,

seguindo apenas alguns critérios térmicos, podendo ser montados em diferentes configurações (BALDAM, 2014).

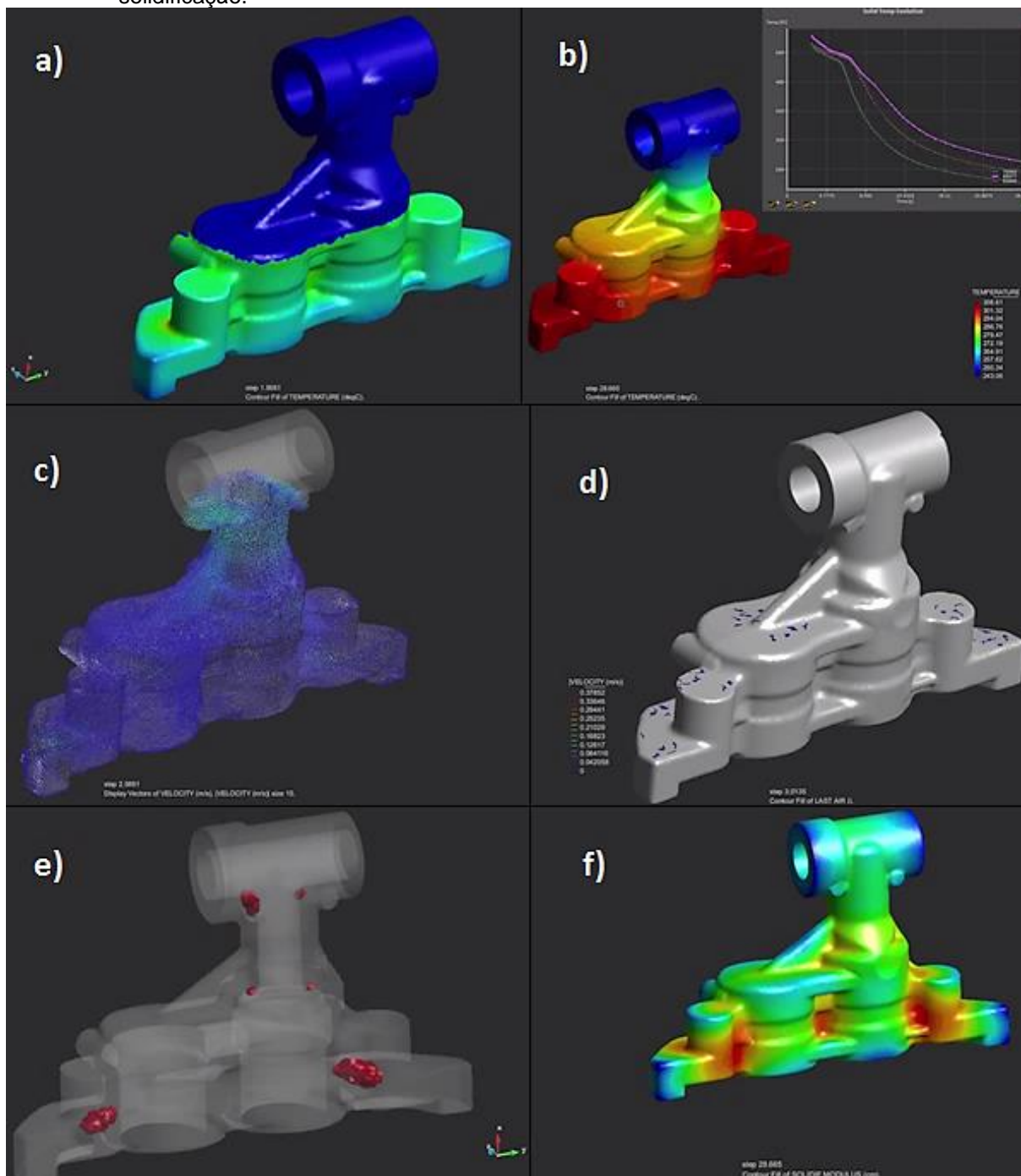
Outros elementos também são empregados como os materiais isolantes, com objetivo de aumentar o tempo de solidificação. Logo é de grande interesse o emprego de luvas isolantes e pó de cobertura nos massalotes, a fim de obter fatores de aumento aparente do módulo do massalote, podendo inclusive alterar o dimensionamento de massalotes (BALDAM, 2014).

O emprego de luvas exotérmicas mantém o metal do massalote líquido pelo tempo de solidificação da peça, quando de boa qualidade e dimensionamento. A reação exotérmica proporciona maior módulo do massalote e geralmente apresentam vantagens em relação às luvas isolantes para pequenos massalotes (BALDAM, 2014; GONÇALVES, STUEWE, 2014).

2.5.4 Software Simulação de Fundição

Programas de software modernos podem simular a solidificação para moldes de fundição, convertendo os dados resultantes em valores de módulo dos fundidos. Várias ações possibilitam otimização de alimentação com uso de projetos de simulação, como o uso de elementos finitos, que determinam a direção da solidificação, desenho e projeto de sistemas de alimentação (massalotes e canais) em softwares auxiliares, e simulação de solidificação que otimizam a previsão de cavidade de contração e com isso, defeitos como rechupe (BALDAM, 2014; GROOVER, 2011; GONÇALVES, STUEWE, 2014; KAPEL, 2015; SMILEY, 2014). Na Figura 21 estão representados exemplos de simulação com variação de cor indicando valores maiores em vermelho e valores menores em azul. A simulação de temperatura em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$), velocidade em metros por segundo (m/s) apresentada em vetores, ar aprisionado, porosidade e módulo de solidificação em centímetros (cm).

Figura 21 – Visualização dos resultados de simulação de fundição com software, (a) e (b) simulação de temperatura, (c) velocidade, (d) ar aprisionado, (e) porosidade e (f) módulo de solidificação.



Fonte: solidThinking.com/click2cast.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção é apresentada uma descrição sobre o material analisado e os métodos empregados para o desenvolvimento do trabalho.

3.1 Materiais

Para a realização desse trabalho foi utilizado um componente fundido, comumente chamado de coletor de freio motor¹ obtido por fundição em areia verde, denominado: PB Coletor c/ Flange, mostrado na Figura 22, cedido pela empresa MGL Mecânica de Precisão Eireli, uma empresa de usinagem, localizada na cidade de Cambé – PR.

Figura 22 – Registro Fotográfico da peça em análise.



Fonte: Autoria própria.

A peça em análise é obtida na terceira cavidade do molde, produzida conforme seu modelo apresentado na Figura 23 por processo de fundição em areia a verde e, posteriormente, acabada pelo processo de usinagem como especificado. Os requisitos de composição química do material são apresentados na Tabela 4. A temperatura de vazamento da peça, previamente estabelecida, deve permanecer entre 1390 a 1405°C.

¹ O componente faz parte dos equipamentos de segurança de veículos automotores de grande porte. Quando o sistema de freio motor é acionado, o coletor por possuir uma válvula, instalada juntamente ao escapamento, diminui a saídas de gases direcionando-os aos cilindros, criando uma contrapressão que causa a redução na rotação dos propulsores, nos veículos mais novos também há a redução da injeção de diesel, aumentando a força de frenagem.

Figura 23 – Modelo em Alumínio do PB Coletor C/ Flange.



Fonte: Ficha técnica Ferramental MGL.

Tabela 4 – Teor dos constituintes do ferro fundido utilizado para fabricação do PB Coletor C/ Flange.

Composição	(%peso)
Carbono	3,3 a 3,4
Silício	1,6 a 2,9
Manganês	0,4 a 0,6
Estanho	0,03 a 0,04
Fósforo	máximo 0,1
Enxofre	máximo 0,12
Cromo	máximo 0,05
Cobre	0,35 a 0,45

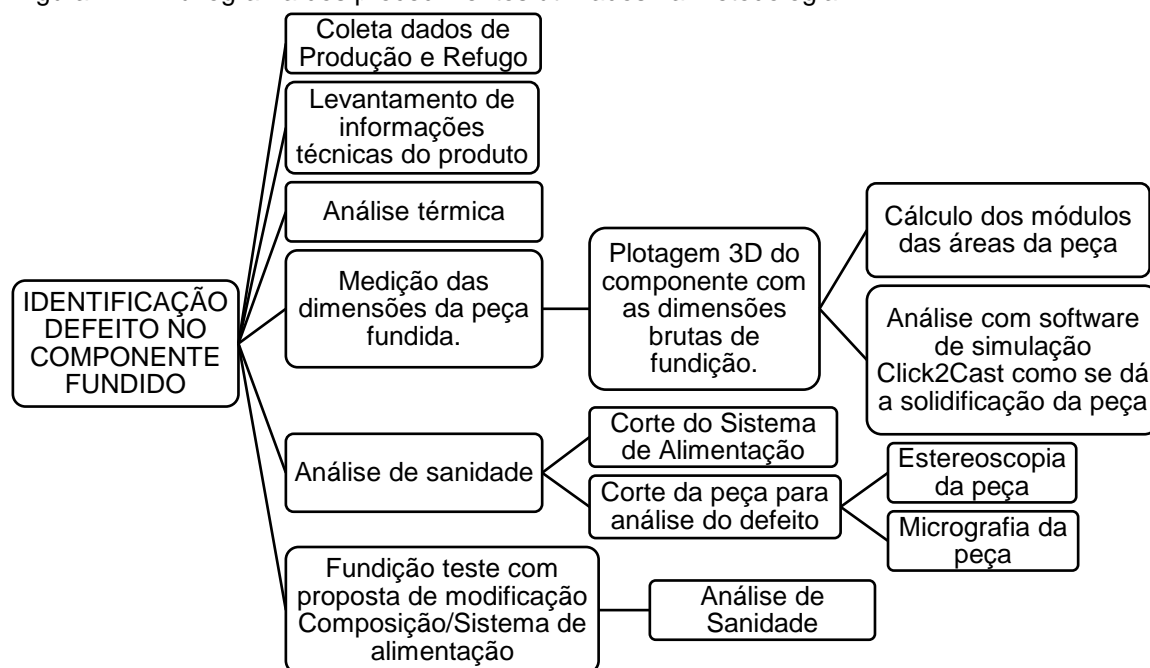
Fonte: Ficha Técnica de Fusão MGL.

3.2 Métodos

A proposta do trabalho consiste na identificação do defeito de uma peça fundida, fabricada por fundição molde de areia a verde e refugada após a primeira etapa de seu processo de usinagem. Todas as etapas descritas a seguir foram realizadas nos laboratórios do Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais (DAEMA) e no laboratório da empresa Multimetal Indústria Metalúrgica, parceira da empresa MGL. Sendo assim, em um primeiro estágio, foi realizada uma análise visual da superfície do componente fundido, sobretudo da área defeituosa, com o registro

dessa superfície utilizando uma câmera fotográfica semiprofissional Nikon D80. A partir dessa identificação visual, foi desenvolvido um fluxograma com as atividades que conduziram a identificação do defeito, como apresenta a Figura 24.

Figura 24 – Fluxograma dos procedimentos utilizados na metodologia.



Fonte: Autoria própria.

Seguindo a sequência de procedimentos, realizou-se um levantamento quantitativo de parte da produção, dos requisitos do cliente e dos parâmetros controlados na fabricação do componente fundido. Para esse levantamento, foram coletados os dados e informações do desenho técnico e da ficha técnica do produto, e então foi realizada uma estimativa do impacto do refugo e do rendimento da peça.

Também foi empregada a ferramenta de qualidade 5W2H para busca das possíveis causas do defeito, como mostra a Tabela 5.

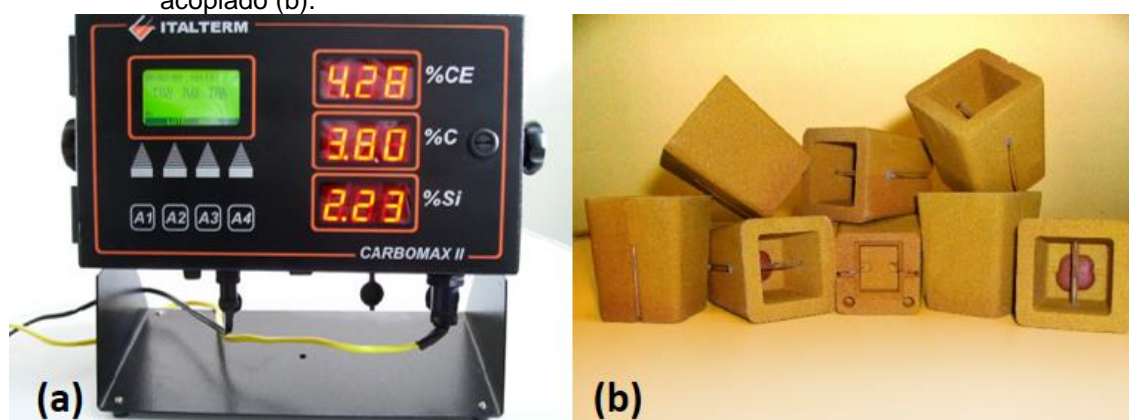
Tabela 5 – Ferramenta de resolução de problemas.

5W2H – Defeito de fundição	
O que fazer (What)	Analisar o posicionamento e dimensionamento dos canais de alimentação do modelo utilizados.
Por que fazer? (Why)	Para avaliação do posicionamento e dimensionamento atualmente usado, verificação da necessidade de modificações no sistema de alimentação.
Onde fazer? (Where)	Software de plotagem 3D.
Quem vai fazer? (Who)	Manuella Munhoz.
Quando fazer? (When)	Até agosto/2017.
Como fazer (How)	Calcular módulos de solidificação das áreas do fundido, e analisar a simulação de solidificação com software.
Quanto vai custar (How much)	Não estimado.

Fonte: Autoria própria.

A análise térmica foi realizada a partir de uma amostra fundida do material em análise, a fim de identificar os patamares das temperaturas do *líquidus* e *sólidus*, determinação do teor de C, Si e Ceq. Este procedimento foi realizado com auxílio do equipamento CARBOMAX II, apresentado na Figura 25, que tem método baseado na medida de temperatura ao longo da solidificação por meio de sensores descartáveis na cápsula de análise térmica ITALCARB, com medição única, também apresentado na Figura 25. O equipamento realiza a análise térmica a partir da coleta do forno com uma concha metálica revestida de material refratário. O material coletado é vazado na cápsula ITAUCARB, com termopar acoplado que permite a obtenção dos resultados do equipamento rapidamente.

Figura 25 – Equipamento de análise térmica CARBOMAX II (a) e cápsulas com termopar acoplado (b).

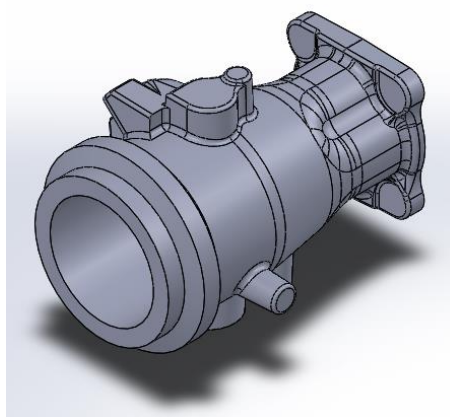


Fonte: ITALTERM, 2017.

A medição das dimensões da peça fundida foi realizada com auxílio de um Paquímetro Mitutoyo $300 \pm 0,05\text{mm}$. A partir dos valores obtidos, foi possível a plotagem tridimensional do produto bruto, com auxílio de software, Figura 26. Sendo

assim, realizou-se o cálculo dos módulos das áreas do componente utilizando a equação 2.

Figura 26 – Desenho tridimensional da peça em análise com dimensões brutas de fundição.



Fonte: Autoria própria.

Posteriormente, foi realizada a simulação, por meio de software Click2Cast v4.1, analisando os resultados de preenchimento relacionados ao avanço do material, e de solidificação relacionados à evolução de temperatura, à fração de líquido, à porosidade e ao módulo de solidificação. Consideraram-se como parâmetros de simulação de solidificação da peça as temperaturas de vazamento entre 1390 a 1405°C. Logo, para a análise da influência da temperatura foram simuladas quatro temperaturas dentro da faixa de vazamento 1390°C, 1395°C, 1400°C e 1405°C e, também, duas condições acima e abaixo da faixa proposta, simulando condições que podem ocorrer durante a produção.

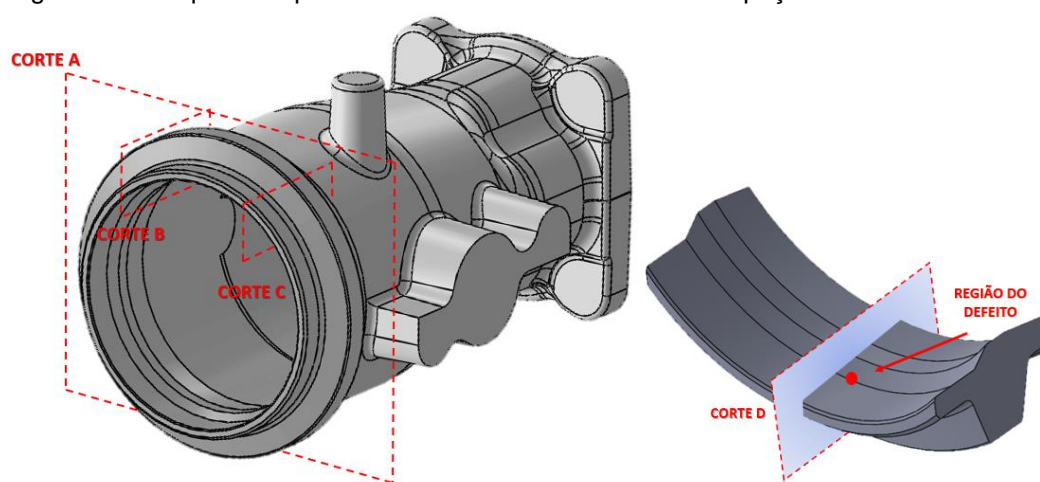
Inicialmente, a fim de verificar as condições já utilizadas e os resultados esperados da solidificação, a simulação foi realizada de acordo com o molde empregado no processo. Em seguida, foi simulada a peça em condições propostas com base na análise realizada das primeiras simulações, avaliando posicionamento e dimensionamento do sistema de alimentação do coletor, visto as limitações do processo.

A análise da sanidade² da peça foi realizada com o corte do sistema de alimentação e da peça em diferentes direções, observando se haviam outras

² Buscar a presença de descontinuidades internas como rechupes, trincas e porosidade com o corte da peça em diferentes direções.

descontinuidades internas. Em continuidade à caracterização do defeito, foi realizado o registro da superfície defeituosa, com o auxílio de um estereoscópio binocular com zoom da marca Coleman XTB-2B. Para melhor visualização do defeito, foram realizados cortes conforme esquema exposto na Figura 27. As três etapas de corte (A, B, C e D) foram realizadas com a MAKITA $\varnothing 180$ mm GA7020 com peça fixada na morsa.

Figura 27 – Esquema representativo dos cortes realizados na peça em análise.



Fonte: Autoria própria.

A seção do corte D foi então submetida ao desbaste em esmerilhadeira, lixamento com PLR II 600 rpm com a sequência das lixas 80, 220 e 400, finalizando com o polimento com alumina $1 \mu\text{m}$. Por conseguinte, a seção foi submetida a microscopia óptica da seção no Microscópio TOPCON, com registro das imagens obtidas.

Houve também a fundição de uma amostra com condição de temperatura, composição e sistema de alimentação similares da peça em análise, e com alteração na composição conforme a Tabela 6. Para esse último caso, foi realizada a fundição de duas peças com alteração na composição e modificação no sistema de alimentação. Ambas as peças foram submetidas à caracterização da mesma seção apresentada na Figura 27, com desbaste em esmerilhadeira, lixamento e polimento, além do registro das imagens obtidas por microscopia.

Tabela 6 – Alteração no teor dos constituintes do ferro fundido utilizado para fabricação do PB Coletor C/ Flange.

Composição	(%peso)
Carbono	3,3 a 3,4
Silício	1,6 a 2,9
Manganês	0,5 a 0,6
Estanho	0,03 a 0,04
Fósforo	máximo 0,1
Enxofre	máximo 0,12
Cromo	máximo 0,05
Cobre	0,25 a 0,35

Fonte: Ficha Técnica de Fusão MGL.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O defeito do componente fundido está localizado em uma zona da extremidade usinada da peça, como ilustra a Figura 28, e, devido às condições exigidas pelo cliente, a peça foi considerada refugo. Os dados coletados da produção de um lote da peça foram de 232 moldes, com 3 cavidades cada, resultando na fabricação de aproximadamente 696 peças por lote. Dessa produção, a ocorrência de defeitos encontrados após o processo de usinagem foi de 33 peças por apresentarem porosidade na região usinada onde 26 peças da cavidade 3 e 7 peças da cavidade 2. Portanto, para o lote analisado, a não conformidade causada por essa porosidade localizada, representa aproximadamente 4,7% da produção.

Figura 28 – Registro fotográfico do defeito apresentado pela peça.



O desenho técnico do produto (Anexo 1) indica as informações de fornecimento: isenção de impurezas, aberturas vedadas, apresentando especificação de fornecimento DBL 6992.20 para produtos anticorrosivos desaguadores para armazenamento intermediário mais longo. Além disso, apresenta como material EN GJL -250 DIN EN 1561, tolerância geral e geométrica para fundidos DIN 2768-m ISO

8062-3 – DCTG9, e ainda se refere a parâmetros dimensionais (ângulo de saída, espessura de paredes) que foram previamente considerados na condição bruta do modelo tridimensional. A norma indicada DIN EN 1561, se refere a propriedades de ferros fundidos cinzentos não ligados e de baixa liga, com manufatura em moldes de areia. E em geral a norma especifica as propriedades que caracterizam o ferro fundido cinzento, logo a EN-GJL-250 se refere ao material que apresenta resistência a tração entre 250 a 350 MPa.

Com o levantamento das informações da ficha técnica do material foi observada a composição química, já apresentada na Tabela 4. Também foram obtidas as informações pertinentes ao rendimento metálico de 62,73%; peso do conjunto e da peça, de 22,00 e 4,6 Kg, respectivamente; a faixa de temperatura de vazamento de 1390-1405°C; de liberação do forno de 1510-1525°C e, ainda, sugestões relativas aos principais cuidados para evitar o defeito frequente de inclusão de escória. Na data de produção da peça em análise foram realizadas 5 corridas, sendo que a composição da liga vazada está apresentada na Tabela 7. Pode ser observado que os teores de alguns elementos, como C, S, e Cu não estão na faixa especificada, excedendo cerca de 0,01 a 0,03%, sendo considerado pouco significativo para o processo. As temperaturas para o primeiro molde vazado de cada panela das corridas mantiveram-se dentro da faixa de vazamento para todas as panelas vazadas. Seguem as temperaturas conforme cada corrida:

- Corrida 1 – 32 moldes: 1402°C, 1393°C;
- Corrida 2 – 71 moldes: 1402°C, 1397°C, 1402°C, 1395°C;
- Corrida 3 – 54 moldes: 1401°C, 1397°C, 1402°C;
- Corrida 4 – 39 moldes: 1393°C, 1396°C, 1396°C;
- Corrida 5 – 85 moldes: 1397°C, 1404°C, 1401°C, 1396°C, 1393°C.

No entanto, deve ser considerada a perda de temperatura durante a transferência para os moldes seguintes.

Tabela 7 – Composição da liga vazada para fabricação da peça em análise.

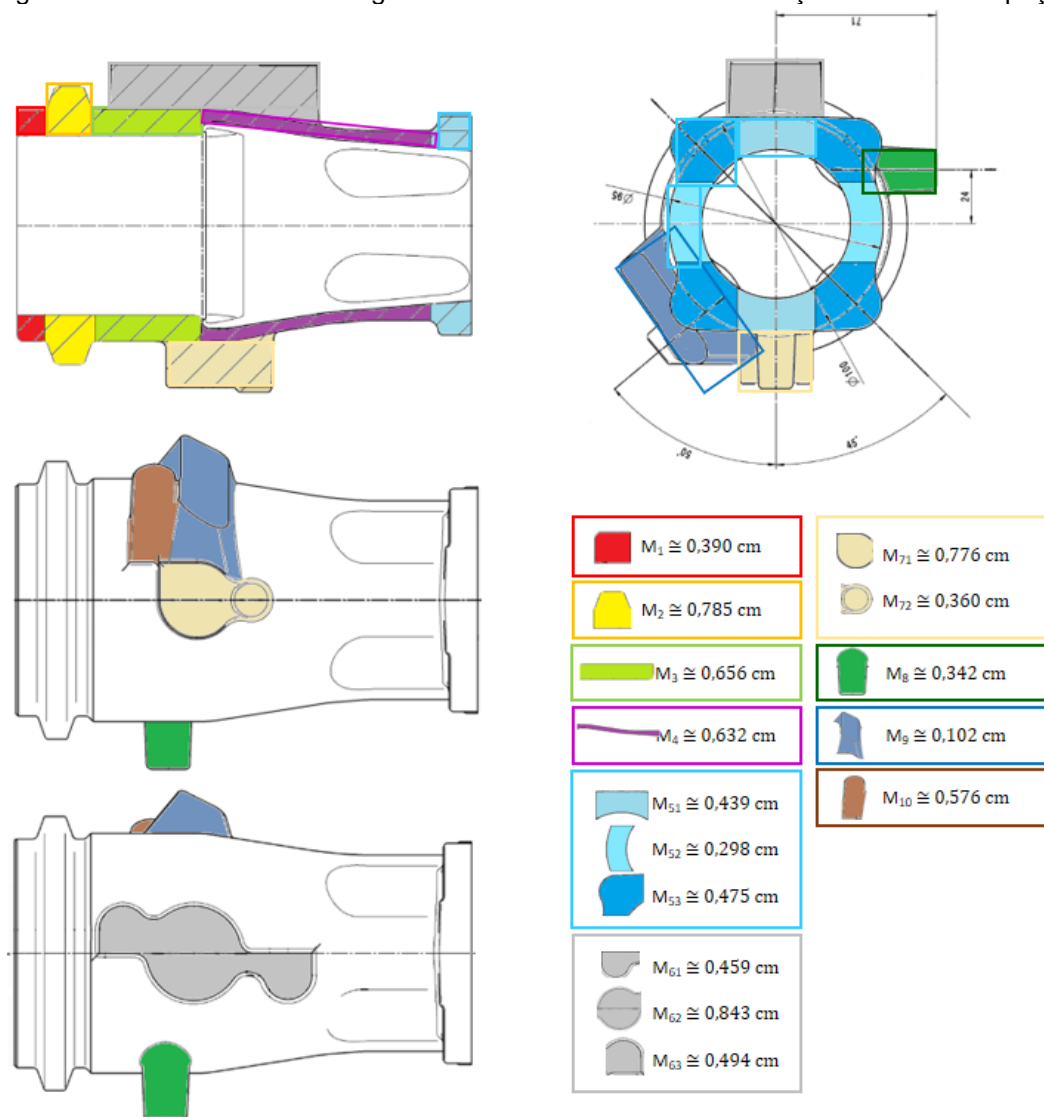
Elementos	Composição especificada (% peso)	Composição do processo (% peso)				
Carbono	3,3 a 3,4	3,26	3,27	3,26	3,27	3,37
Silício	1,6 a 2,9	1,93	1,99	1,9	1,63	2,08
Manganês	0,4 a 0,6	0,50	0,46	0,51	0,42	0,48
Enxofre	máx. 0,12	0,12	0,12	0,13	0,09	0,09
Cobre	0,35 a 0,45	0,47	0,39	0,38	0,29	0,36
Fósforo	máx. 0,1	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03
Cromo	máx. 0,05	0,03	0,024	0,023	0,033	0,033
Estanho	0,03 a 0,04	0,041	0,036	0,030	0,026	0,03

Fonte: Espectrômetro MGL.

O resultado da análise térmica, referente à peça B, indicou para o material a temperatura *liquidus* de 1193°C, a temperatura *solidus* de 1122°C e o teor de Ceq de 3,95%, C de 3,45% e Si de 1,49%. É possível observar o teor de C ligeiramente acima do especificado, por conseguinte, com a análise desses dados obtidos com o equipamento CARBOMAX II, pode-se inferir que a diferença em relação às temperaturas *liquidus* e *solidus* do diagrama Fe-C, Figura 5, é decorrente da influência dos elementos de liga empregados no material, pois a composição utilizada na liga apresenta, além de Fe e C, elementos como o Si, Mn, Cu, Mg, Sn, e traços de P, S e Cr. Observando a temperatura de fusão apresentada, pode-se notar que a faixa de temperatura de vazamento está acima cerca de 197 a 212°C, devido à perda de temperatura durante a transferência do metal.

O resultado do cálculo dos módulos de solidificação da peça está apresentado na Figura 29, realizado por meio da divisão da peça em sólidos geométricos conhecidos e do grau de participação das superfícies no processo de resfriamento. Com o conhecimento dos módulos pode ser realizada a análise observando as áreas de maior módulo, que serão as últimas a solidificarem e onde devem ser posicionados os massalotes. No entanto, a geometria da peça e a configuração do modelo não permitem que sejam posicionados os massalotes nessas áreas, logo, possivelmente a segunda área de maior módulo foi selecionada para alimentação.

Figura 29 – Divisão dos sólidos geométricos e módulos de solidificação das áreas da peça.



Sendo assim, calculou-se o dimensionamento do massalote pela regra dos módulos, com a equação 3, considerando k equivalente a 0,6 para ferros fundidos cinzentos.

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

$$M_m \geq 0,6 \cdot 0,785$$

$$M_m \cong 0,47 \text{ cm}$$

Com isso, pode ser calculado o diâmetro do massalote lateral aberto e suas equações específicas relacionadas na Tabela 2.

$$D_m = 4 \cdot M_m$$

$$D_m = 1,9 \text{ cm}$$

$$H_m = 2,0 \cdot D_m$$

$$H_m = 3,8 \text{ cm}$$

$$L_m = 0,314 \cdot D_m^2$$

$$L_m = 1,13 \text{ cm}^2$$

$$V_m = \frac{\pi}{12} D_m^2 \cdot (D_m + 3H_m)$$

$$V_m = 12,6 \text{ cm}^3$$

Sendo assim, o volume aproximado do massalote utilizado é de aproximadamente 82,8 cm³, encontrando-se com volume superior à regra dos módulos. Isso representa menor rendimento metálico quando comparado à projeção segundo o dimensionamento adequado. Por isso, evitando modificações da geometria, realizando alteração apenas na altura, pode ser considerado um massalote com altura menor, cerca de 3,5 cm. Assim, o volume do massalote seria reduzido quase pela metade e haveria um aumento no rendimento metálico.

Também foi realizada a análise de solidificação utilizando software Click2Cast, com 4 temperaturas dentro das condições vazamento atuais, 1390°C, 1395°C, 1400°C e 1405°C e, também, duas condições acima e abaixo da faixa proposta de temperatura de vazamento, simulando condições que podem ocorrer durante a produção. Foram analisados os resultados de preenchimento relacionados ao avanço do material (a), e de solidificação relacionados à evolução de temperatura (b), à fração de líquido (c), à porosidade (d) e ao módulo de solidificação (e), sendo exibidos nas Figuras 30, 31, 32 e 33.

Figura 30 – Simulação sistema de alimentação para temperatura de vazamento 1390°C, avanço do material em (a), evolução de temperatura em (b), fração de líquido em (c), porosidade em (d) e módulo de solidificação em (e).

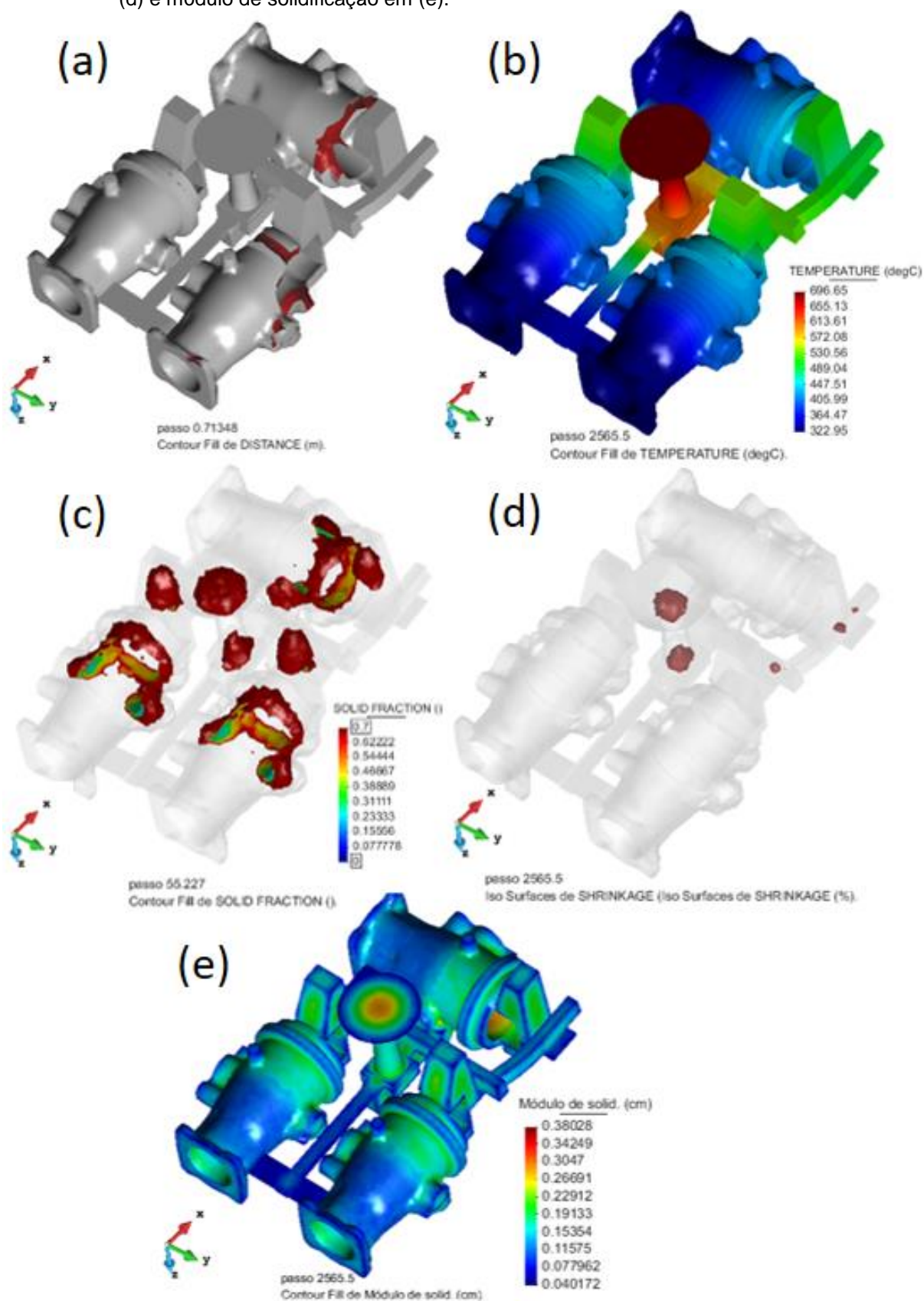


Figura 31 – Simulação sistema de alimentação para temperatura de vazamento 1395°C, avanço do material em (a), evolução de temperatura (b), fração de líquido em (c), porosidade em (d) e módulo de solidificação em (e).

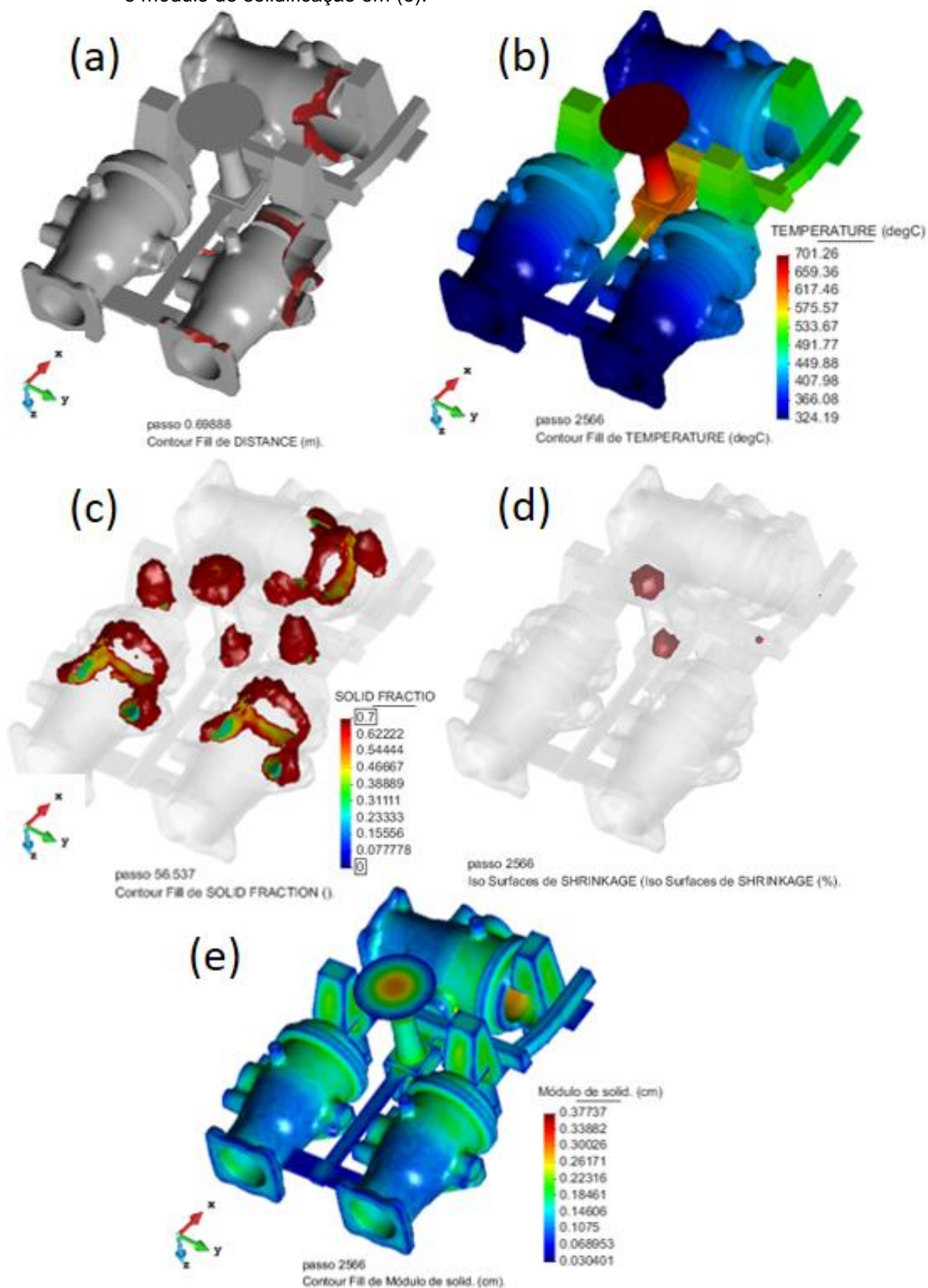


Figura 32 – Simulação sistema de alimentação para temperatura de vazamento 1400°C, avanço do material em (a), evolução de temperatura em (b), fração de líquido (c), porosidade em (d) e módulo de solidificação em (e).

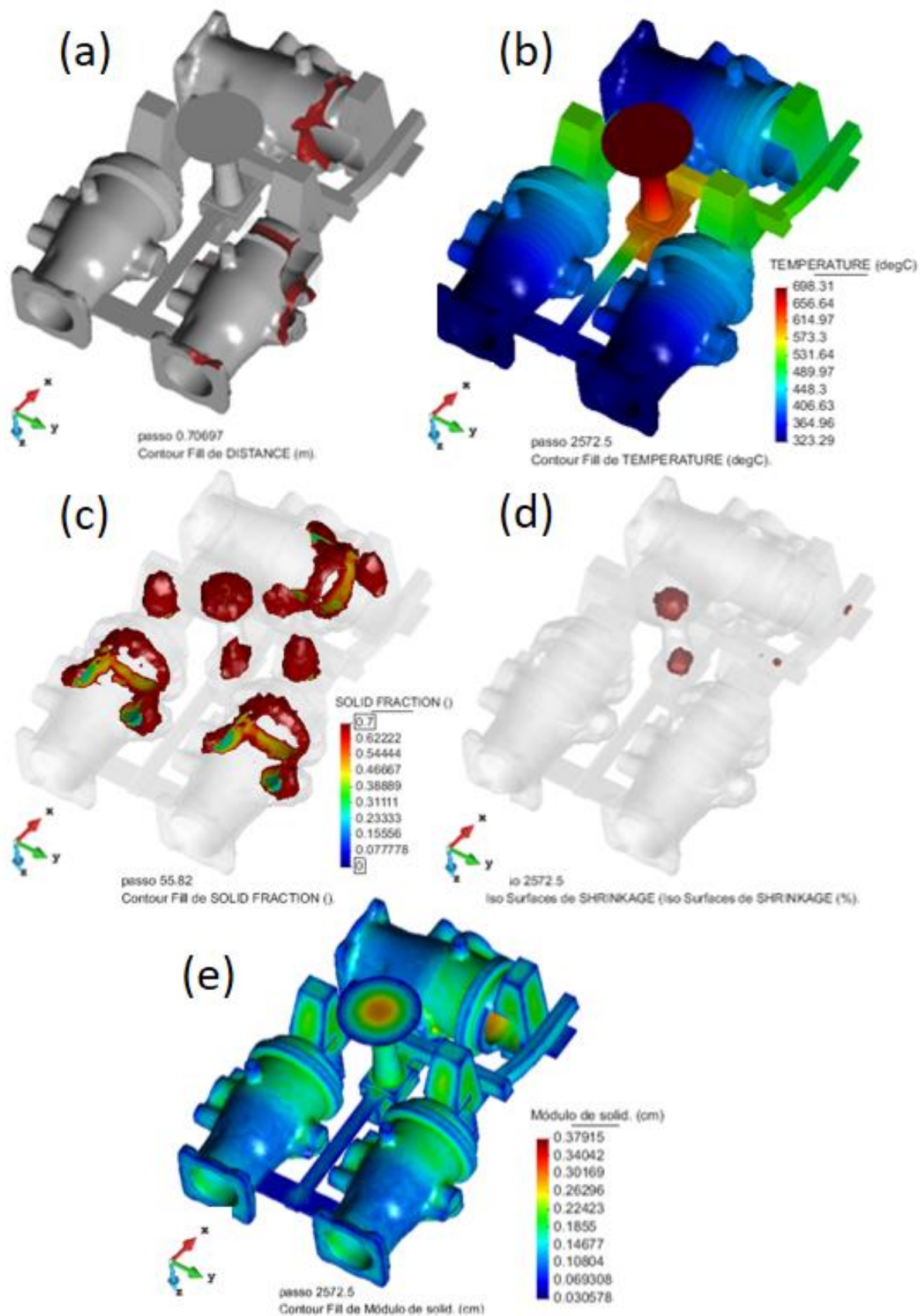
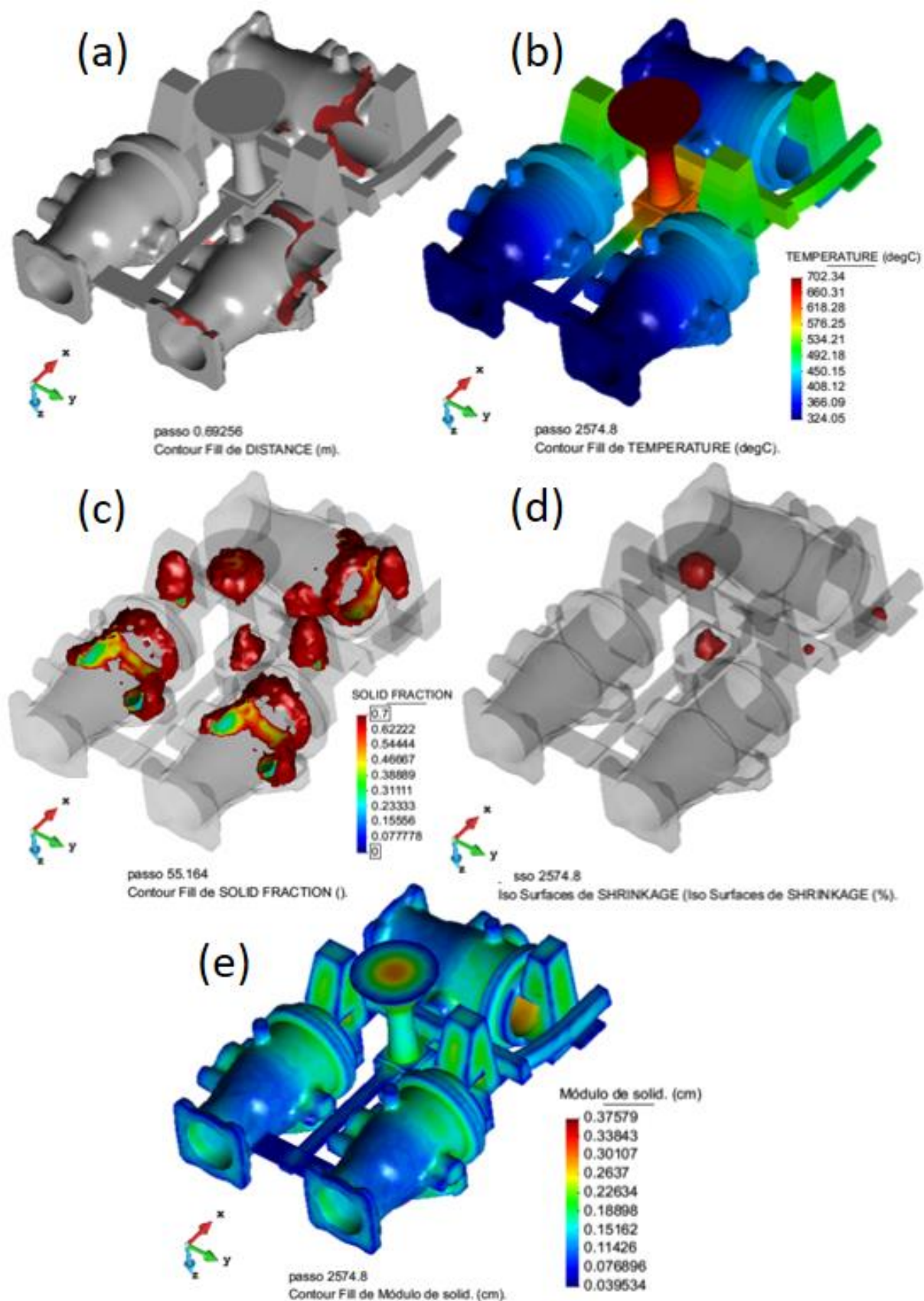


Figura 33 – Simulação sistema de alimentação para temperatura de vazamento 1405°C, avanço do material em (a), evolução de temperatura em (b), fração de líquido em (c), porosidade em (d) e módulo de solidificação em (e).



Deve-se considerar nesses resultados a limitação do software em sua versão educacional em relação ao refinamento da malha, à composição do material, à inoculação e também aos materiais do molde e do macho. Sendo assim, observou-se a partir dos resultados das simulações que não ocorre porosidade na região em que é observado o defeito do componente fundido. No entanto, como o defeito apresentado na peça em análise não ocorre em todos os lotes produzidos, a simulação com software por não considerar as condições de produção pode não indicar essa porosidade. Dessa forma, pode-se considerar a hipótese de que uma alteração de parâmetro desconhecida no processo de fundição do lote do componente desencadeou o aparecimento do defeito. Por isso é importante localizar as peças defeituosas na linha de produção.

Nesse sentido, foram extrapolados os valores de temperatura observando o comportamento da solidificação e a tendência à formação de porosidades internas, nas Figuras 34 e 35. Contudo, não foram evidenciados na simulação alterações significativas com a variação na temperatura.

Figura 34 – Simulação sistema de alimentação para temperatura de vazamento 1380°C, avanço do material em (a), evolução de temperatura em (b), fração de líquido em (c), porosidade em (d) e módulo de solidificação em (e).

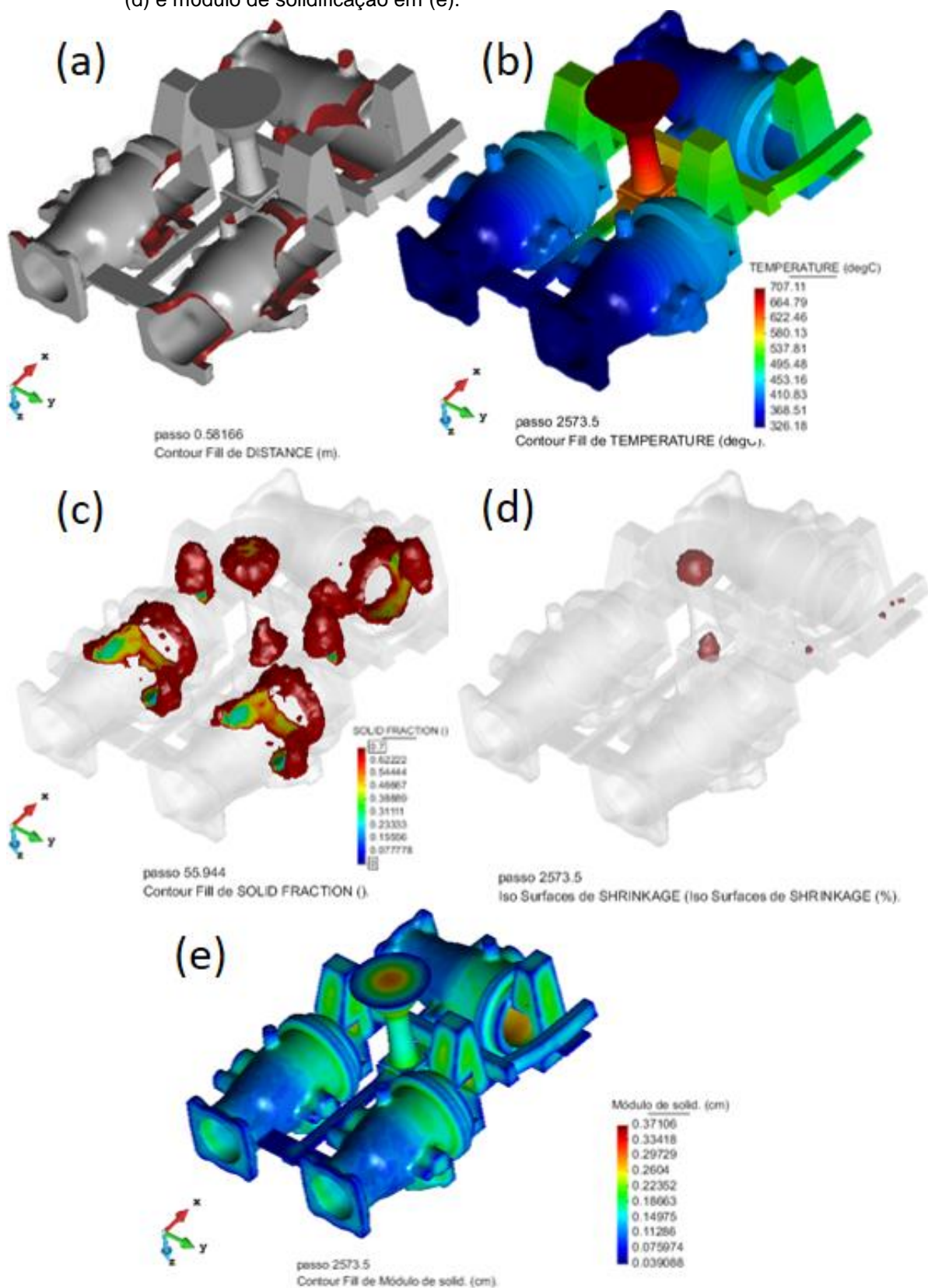
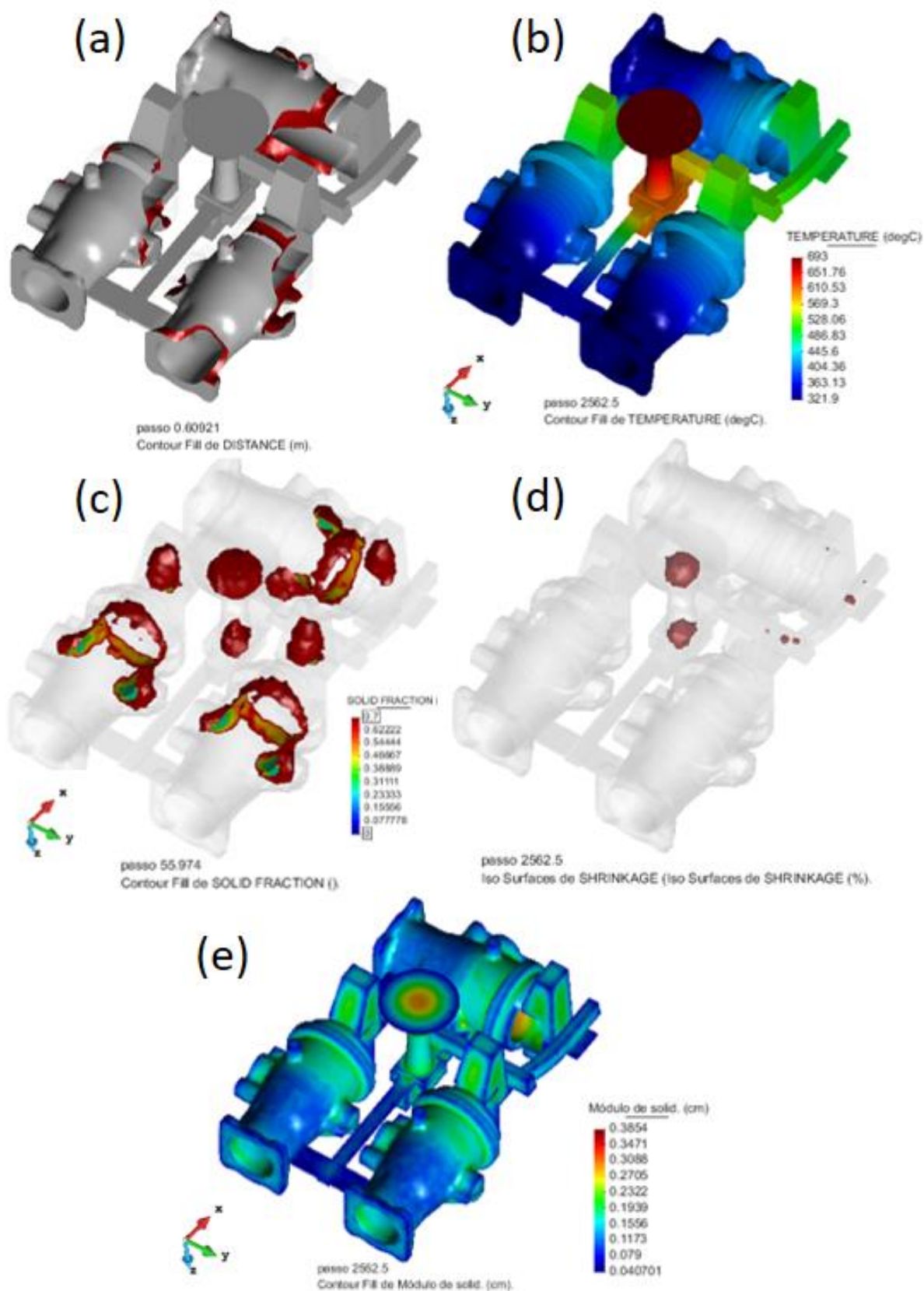


Figura 35 – Simulação sistema de alimentação para temperatura de vazamento 1415°C, avanço do material em (a), evolução de temperatura em (b), fração de líquido em (c), porosidade em (d) e módulo de solidificação em (e).



O registro fotográfico da análise de sanidade da peça está apresentado na Figura 36. Foi possível observar que não ocorreram porosidades nas regiões de maiores módulos de solidificação da peça, apesar de serem indicados tanto no cálculo dos módulos, quanto na simulação com software, como as últimas regiões de solidificação. Posteriormente, com o corte do sistema de alimentação, na Figura 37, pode-se observar que os massalotes apresentam baixo volume de rechupe, como já era esperado devido ao resultado indicado no software e com o cálculo para seu dimensionamento, indicando pouca alimentação da peça, relativa à contração. Além disso, também não foram observadas porosidades nos canais de alimentação da peça, conforme os resultados da simulação com software.

Figura 36 – Registro fotográfico da análise de sanidade da peça.

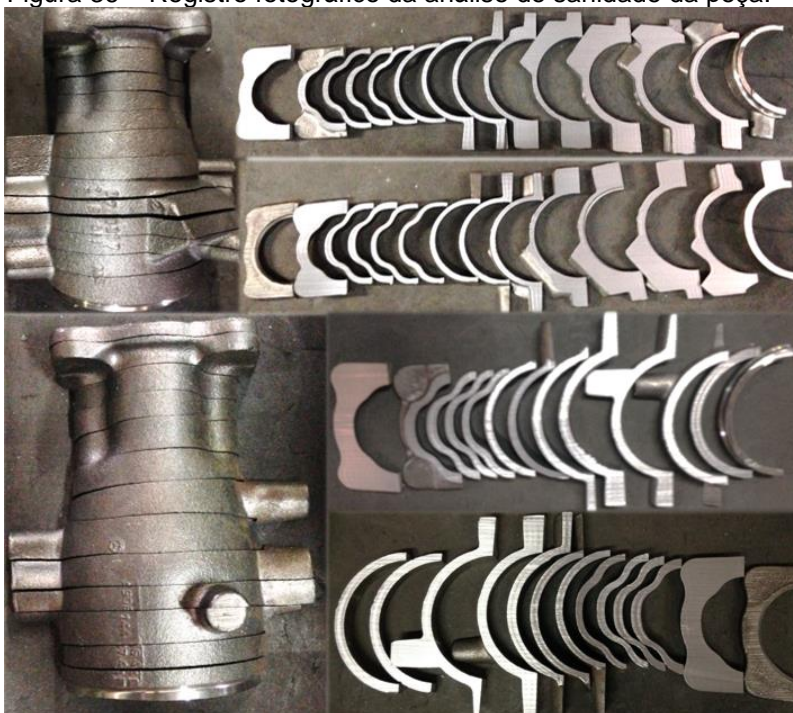
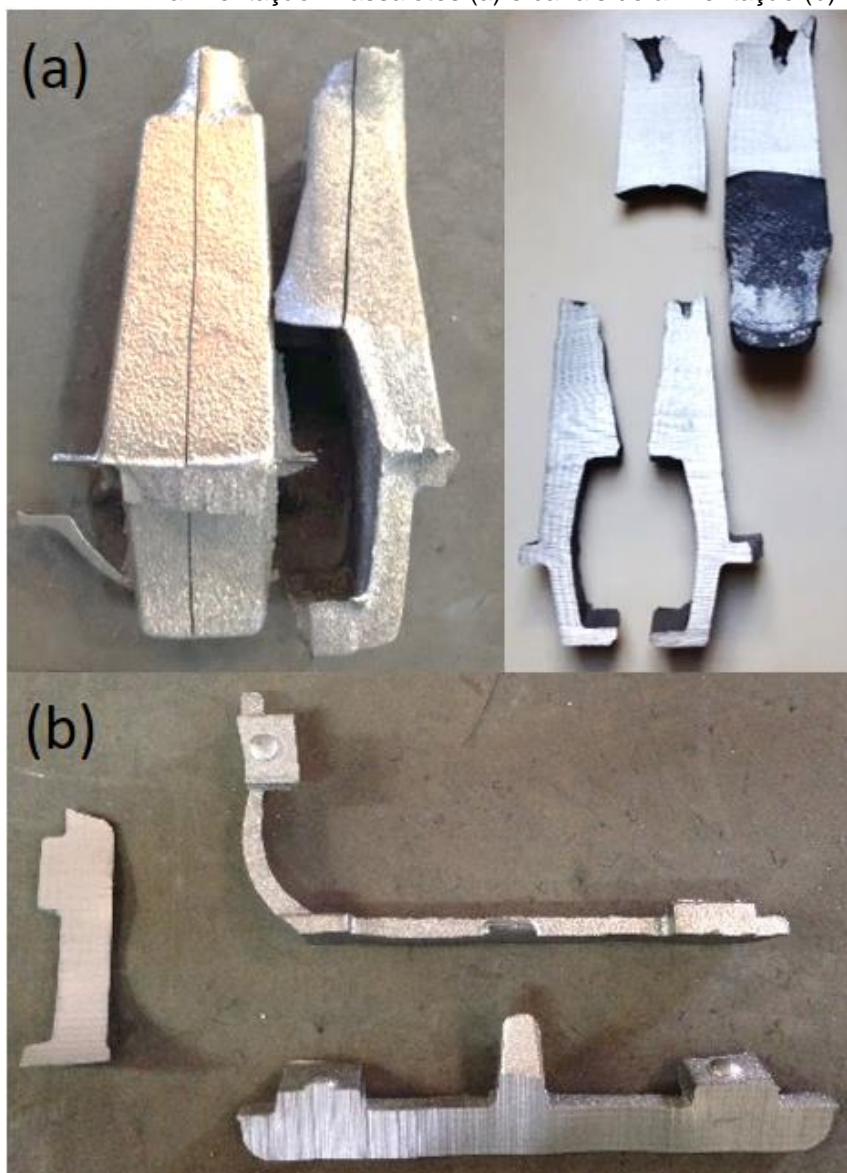


Figura 37 – Registro fotográfico da análise de sanidade do sistema de alimentação. Massalotes (a) e canais de alimentação (b).



A estereoscopia realizada da região defeituosa da peça em análise está apresentada na Figura 38. As características da porosidade apresentada após a usinagem da região são: a profundidade da cavidade formada, o aspecto superficial irregular e pode ser considerada a presença de uma gota de exsudação. Com as imagens obtidas a partir da microscopia da região defeituosa da peça em análise, na Figura 39, pôde-se perceber a presença de uma grafita com menor tamanho próxima à porosidade.

Figura 38 – Estereoscopia realizada na região (a) e na seção defeituosa após o corte e lixamento (b), com maior aproximação, observando a gota de exsudação em (c), após última etapa do lixamento, sem a gota de exsudação (d).

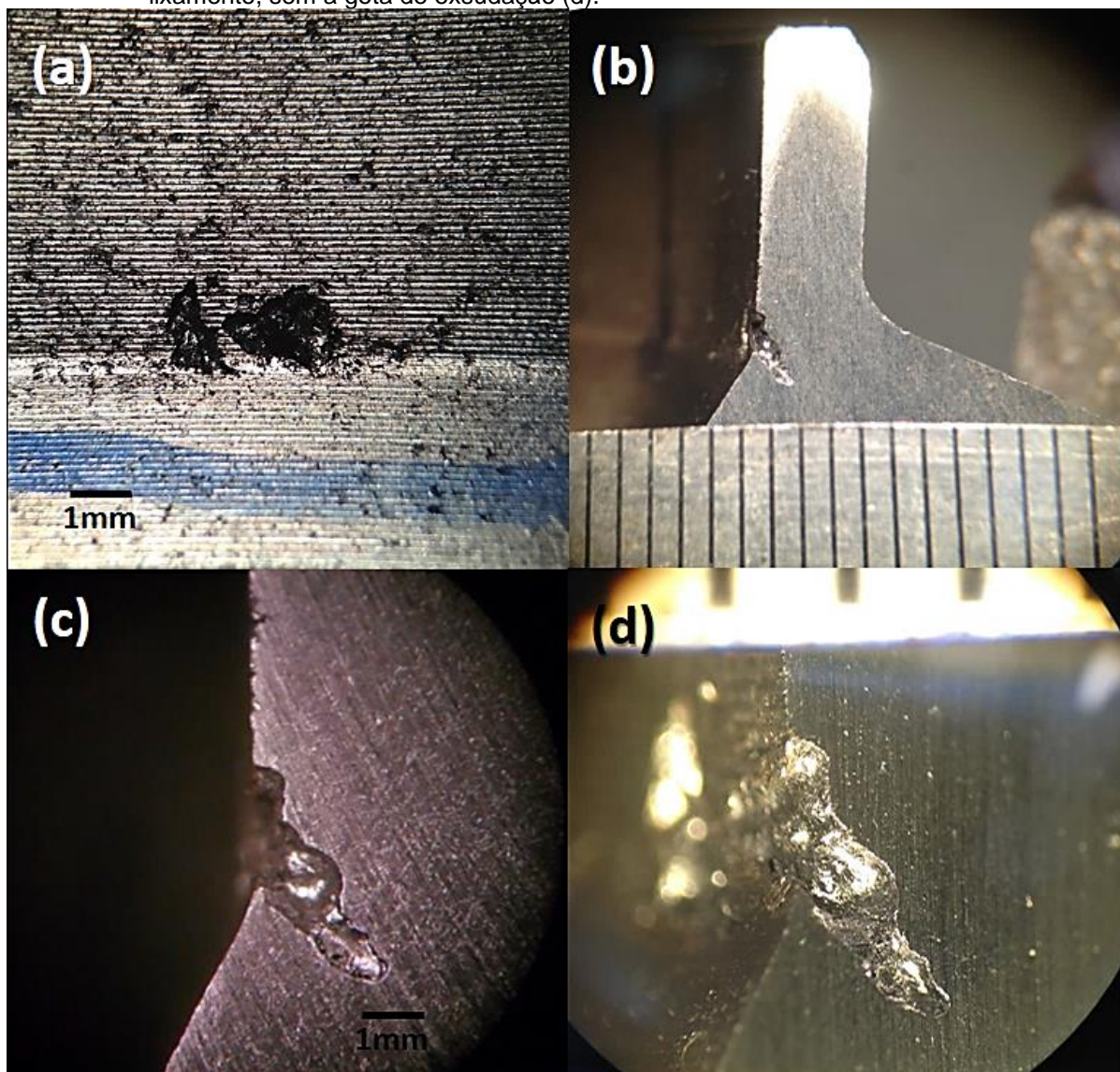
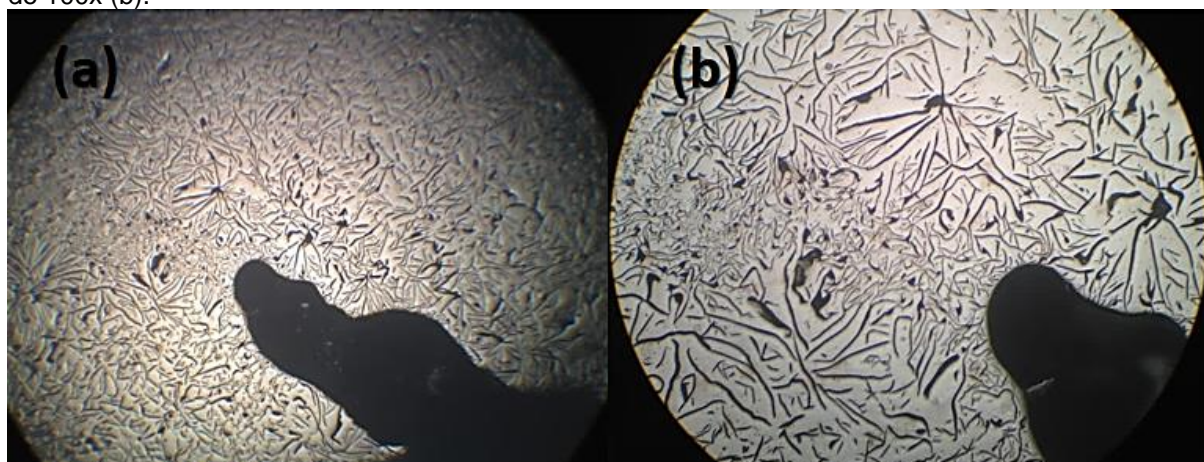


Figura 39 – Microscopia realizada na seção defeituosa após polimento e aumento de 40x (a) aumento de 100x (b).



Outras três seções foram investigadas, na região do defeito apresentado pelo componente em análise. A primeira seção, Figura 40, se refere à outra peça de mesma composição que apresentou defeito semelhante, denominada peça A; a segunda seção é referente à peça com alteração na composição apresentada na Tabela 6, denominada peça B, que também apresentou grafita com menor tamanho, como mostra a Figura 41, acompanhada por grafitas grosseiras, porém sem apresentar porosidade e a terceira seção, Figura 42, denominada peça C é referente ao teste com alteração na composição e sem utilização de massalote, que apresentou rendimento de 70%, cerca de 7% acima do rendimento atual.

Figura 40 – Microscopia da seção da peça A após polimento, aumento de 100x.

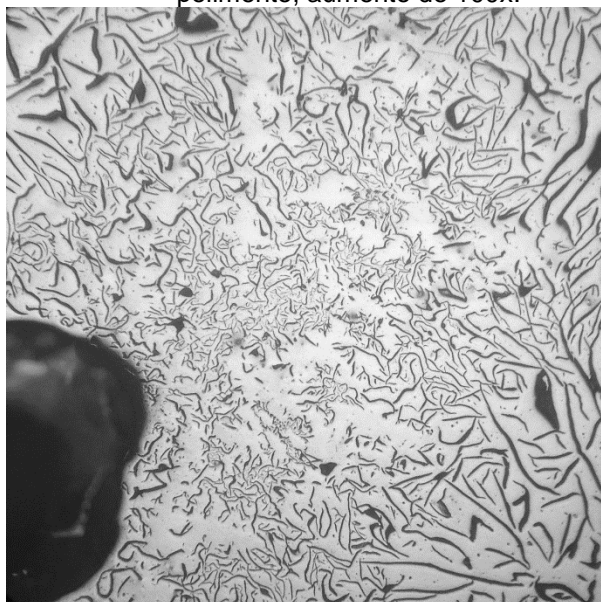


Figura 41 – Microscopia da seção da peça B após polimento, aumento de 100x. Grafitas grosseiras indicadas em vermelho.

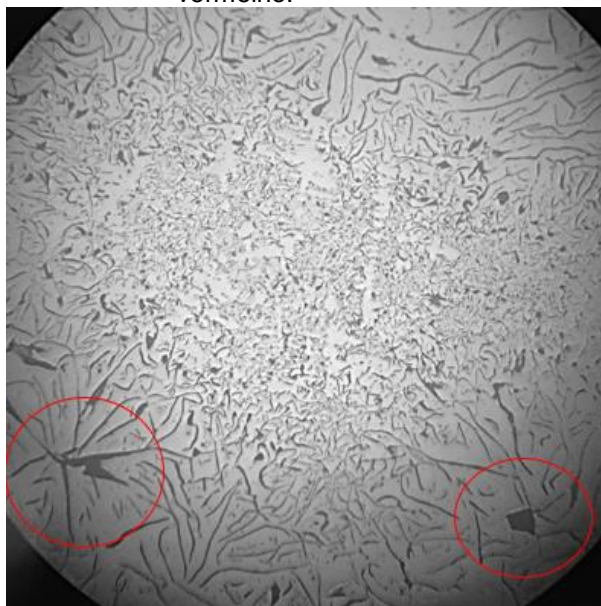
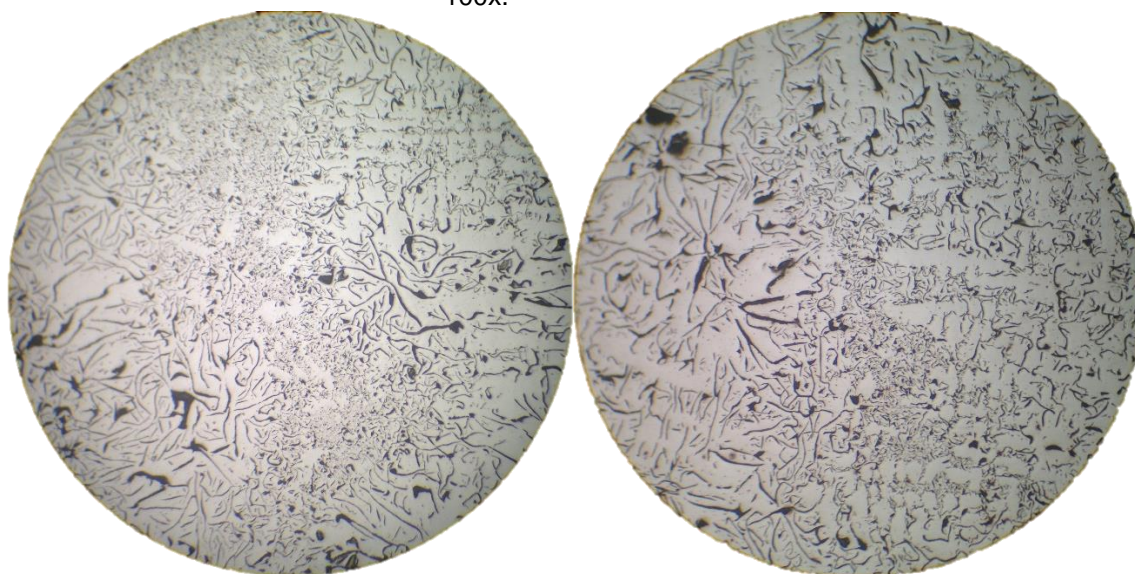


Figura 42 – Microscopias da seção da peça C após polimento, aumento de 100x.



A partir da análise realizada, verificou-se que a modificação da composição da peça A para B, além da redução do gasto com matéria prima, também pôde, com a redução do teor de Cu e Sn e elevação do teor de Mn, deslocar o C_{eq} , que influencia a distância entre a transformação eutética estável e a transformação eutética metaestável, possivelmente causando maior estabilização de carbonetos devido à

presença de grafita tipo D, que reduz a difusão do carbono, favorecendo a reação eutetóide estável.

Apesar da influência dos elementos de liga na atividade do carbono ser conhecida, não foram estimados os efeitos da alteração da composição, já que ainda não é conhecido a relação entre a adição ou redução em peso e o efeito dos elementos no caso de adições abaixo de 1%. Outros fatores que podem ter levado a presença do defeito foram: a temperatura de vazamento e a inoculação. A temperatura de vazamento é medida apenas para o primeiro molde vazado e, dessa forma, não se considera a perda de temperatura até a finalização do vazamento. Quanto à inoculação, esta diminui o afastamento do equilíbrio, reduzindo o risco de temperaturas abaixo da temperatura eutética metaestável. Esses fatores em conjunto podem ter conduzido à redução no tamanho da grafita e à redução da expansão da grafita que pudesse compensar a contração secundária.

Após a modificação da composição, nenhum lote dos componentes fundidos com alteração na composição apresentou esse defeito, que é geralmente observado durante a usinagem. No entanto, a variabilidade dos parâmetros do processo, como a composição preparada no forno, a inoculação e a temperatura de vazamento, pode conduzir novamente a peça a apresentar o defeito sem que ocorra modificação do sistema de alimentação, uma vez que, atualmente, o processo de produção conta com panelas para transferência do metal líquido, ocorrendo com isso, grande perda de temperatura no decorrer do vazamento.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O defeito em análise foi identificado como uma porosidade por meio da estereoscopia e da micrografia da região defeituosa. A porosidade apresentada foi identificada como rechupe pelas características confirmadas com a análise. Pode-se elencar como prováveis causas da contração que causou a porosidade:

- O alto módulo de solidificação da região defeituosa;
- Pequena seção de ligação entre a seção defeituosa e o massalote, impossibilitando a alimentação da região, devido à geometria do componente;
- Aquecimento da região, no qual é observado o defeito, devido ao dimensionamento inadequado do massalote, tornando a região com a última fração de líquido durante o resfriamento;
- Redução da formação da grafita decorrente da possível influência da temperatura e da inoculação insuficiente;
- A variabilidade dos parâmetros do processo: controle da inoculação, e temperatura de vazamento.

Com o auxílio do software de Click2Cast© foi previsto como ocorre a solidificação da peça fundida, considerando que o defeito não é observado para todos os lotes produzidos e no caso em análise ocorreu somente em 4,7% dos componentes. Logo, aparentemente os resultados da simulação apresentaram o que ocorre durante o resfriamento do componente, apesar de não considerarem as condições de composição real devido às limitações do software.

Com o dimensionamento do massalote, a simulação com software e a análise de sanidade dos massalotes, constatou-se que seu volume está acima do suficiente para alimentar a peça durante a solidificação. O que é confirmado com a simulação no software. O correto dimensionamento do massalote pode representar ganho de rendimento metálico de pelo menos 70%, comprovado a partir da fundição teste realizada com a retirada do massalote do sistema de alimentação, verificando a princípio que não ocorre formação de rechupe na região defeituosa em análise.

Com o desenvolvimento do trabalho, foi observado que apenas um conjunto de ações podem evitar o aparecimento do defeito identificado no componente fundido,

devido à grande variabilidade do processo. As possíveis formas de impedir a causa do refugo são:

- Utilização da inoculação em molde, ao invés da inoculação na panela;
- Controle da temperatura em todos os moldes vazados, evitando temperaturas fora da faixa de vazamento;
- Redução do módulo de solidificação da região defeituosa com a utilização de resfriadores;
- Modificação da geometria da peça para aumentar a seção de ligação entre a seção defeituosa e o massalote, e posterior correção na etapa de rebarbação.

O desenvolvimento desse trabalho possibilitou um maior entendimento do processo de fundição de peças automobilísticas de ferro fundido cinzento, associando a teoria dos fenômenos envolvidos na solidificação à realidade industrial, utilizando softwares de simulação. A redução de custo proporcionada com o aumento do rendimento decorrente do correto projeto de sistema de alimentação, e da alteração nos elementos de liga são exemplos dos benefícios dos projetos de fundição na fase de desenvolvimento e fabricação do produto.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em função da forma de coleta de dados durante o processo de fundição do componente fundido, sugere-se que em trabalhos futuros seja realizada a coleta da temperatura de vazamento para todos os moldes, e que seja realizado o levantamento da quantidade utilizada de inoculante para a panela de vazamento.

Também é recomendado para trabalhos futuros a realização de microscopia eletrônica de varredura (MEV) da região defeituosa que apresentou o defeito, bem como a realização da simulação da solidificação com a utilização de softwares no qual seja possível trabalhar com maior quantidade de parâmetros relativos ao processo.

REFERÊNCIAS

- BALDAM, R. L.; VIEIRA, E. A. **Fundição: Processos e tecnologias correlatas**. 2 ed. rev. – São Paulo: Érica, 2014.
- BERNS, H.; THEISEN, W. **Ferrous materials: steel and cast iron**. Springer Science & Business Media, 2008.
- CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- CARMELIO, J. S. et al. Guia ABIFA de Fundição: Anuário 2015. **Associação Brasileira de Fundição**. São Paulo: ABIFA, 2015.
- CASOTTI, B. P.i; BEL FILHO, E. Del; CASTRO, Paulo Castor de. Indústria de fundição: situação atual e perspectivas. **BNDES Setorial**, n. 33, p. 121-162, mar. 2011.
- CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica - Processos de Fabricação e Tratamento**. v.2. 2 ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.
- COLPAERT, H. Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns. 4ª ed. Editora Edgar Blücher. São Paulo – SP, Brasil, 2008.
- D'ELBOUX, F. A. **Minimização de descarte de areias de fundição**. Santa Bárbara d'oeste, 2000.
- ECOB, C. M. A review of common metallurgical defects in ductile cast iron. **Customer Services Manager, Elkem AS, Foundry Products Division**, 2005.
- ELKEM, Foundry Products. **Technical information sheets**. Disponível em: <<https://www.elkem.com/documents/foundry/technical-papers/technical-papers-elkem-foundry.pdf>>. Acesso: 29 de setembro de 2017.
- ELKEM, Foundry Products. **Technical Information 34: Internal Shrinkage Porosity**. Disponível em: <<http://www.foundry.elkem.com/dav/91fd9f9cb8.pdf>>. Acesso: 20 de setembro de 2017.
- FAGUNDES, A. B.; VAZ, C. R.; DE OLIVEIRA, I. L. O fortalecimento do setor de fundição através da aplicação de conceitos e metodologias ambientais: os excedentes de areia de fundição em foco. **Revista ADMpg Gestão Estratégica**, v. 2, n. 2, p. 27-34, 2009.
- FREITAS, A. W. **Determinação de sistema de alimentação e enchimento**. Itauna: SENAI/ CETEF, 2011.
- FUOCO, R.; CORRÊA, E. R.; CAVALCANTI, A. H. Caracterização de porosidades em ferros fundidos cinzentos e nodulares. In CONAF – 2007 – Congresso de Fundição. p.1-23, São Paulo: 2007 apud STUEWE, Luciana. **Avaliação da influência do cromo**

e molibdênio na solidificação e formação de rechupes em ferros fundidos cinzentos. 2008. 227 f. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

FUOCO, R. **Regras básicas para alimentação de peças em ferros fundidos cinzentos e nodulares.** 2016. Disponível em: <<https://pt.linkedin.com/pulse/regras-básicas-para-alimentação-de-peças-em-ferros-fundidos-fuoco>>. Acesso: 20 de setembro de 2017.

GONÇALVES, G. I. S.; STUEWE, L. Estudo da aplicação de diferentes massalotes com luvas térmicas para alimentação de ferro fundido nodular em relação à eficiência e custo de produção. **Revista da ABIFA: Fundição & Matérias-Primas**, ed. 170, 76-86, julho/2014.

GROOVER, M. P. **Introdução aos processos de fabricação.** 1 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

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

ITALTERM, Sistemas e Controles Industriais. CARBOMAX II. Disponível em: <<http://www.italterm.com/item.php?prod=1>>. Acesso: 20 de setembro de 2017.

JANOWAK, J. F.; GUNDLACH, R. B. A Modern Approach to Alloying Gray Iron. Transactions of the American Foundrymen's Society., v. 90, p. 847-863, 1982. apud STUEWE, Luciana. **Avaliação da influência do cromo e molibdênio na solidificação e formação de rechupes em ferros fundidos cinzentos.** 2008. 227 f. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

KANNO, T. et al. Effect of Alloying Elements on the Eutectic Temperatures in Cast Iron. Transactions of the American Foundry Society, Vol. 113, v. 113, p. 825-833, 2005. apud STUEWE, Luciana. **Avaliação da influência do cromo e molibdênio na solidificação e formação de rechupes em ferros fundidos cinzentos.** 2008. 227 f. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

KANNO, T. et al. Prediction of Chilling Tendency, Graphite Types and Mechanical Properties in Cast Iron, Using Three Cups Thermal Analysis. Transactions of the American Foundry Society, Vol. 114, v. 114, p. 515-524, 2006. apud GUESSER, Wilson Luiz. **Propriedades mecânicas dos ferros fundidos.** São Paulo: Edgard Blucher, 2009.

KAPEL, D. "Causas E Defeitos". **Revista da ABIFA: Fundição & Matérias-Primas**, ed. 179, 46-47, abril/2015.

KIMINAMI, C. S.; CASTRO, W. B.; OLIVEIRA, M. F. **Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos.** São Paulo: Blucher, 2013.

LARSEN, G. F. SCHULZ S.A. **Automotiva – Fundição e Usinagem.** Universidade Federal de Santa Catarina. Departamento de Engenharia Mecânica. Relatório de Estágio Curricular. Santa Catarina, 2008.

Metal Casting Simulation and Optimization Software. **SolidThinking**, Inc. Disponível em: <www.solidthinking.com/click2cast>. Acesso: 8 de maio de 2017.

PIESKE, A.; CHAVES FILHO, L. M.; REIMER, J. F. Ferros Fundidos Cinzentos de Alta Qualidade. SOCIESC, 1985.

SANTOS, A. B. S.; BRANCO, C. Metalurgia dos ferros fundidos cinzentos e nodulares. IPT, v. 100, p. 232-236, 1989. apud STUEWE, Luciana. **Avaliação da influência do cromo e molibdênio na solidificação e formação de rechupes em ferros fundidos cinzentos**. 2008. 227 f. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SENAI - DEPARTAMENTO REGIONAL DE MINAS GERAIS. **Iniciação à fundição**. Belo Horizonte: SENAI/MG, 73 p. 1990.

SMILEY, L.; SCHMIDT, D. Projetando ótimos sistemas de canais para fundidos de ferro. **Revista da ABIFA: Fundição & Matérias-Primas**, ed. 170, 68-71, julho/2014.

SOARES, G. A. **Fundição: mercado, processos e metalurgia**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Coppe/UFRJ, 2000.

SOLIDTHINKING, **Click2Cast 4.1.0.102st 2016 for Windows**. Disponível em: <http://www.solidthinking.com/click2cast_land.html>. Acesso em 5 de junho de 2017.

STUEWE, L. **Avaliação da influência do cromo e molibdênio na solidificação e formação de rechupes em ferros fundidos cinzentos**. 2008. 227 f. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

TEIXEIRA, R. M. M. **Estudo numérico do efeito dos principais parâmetros de fundição na formação de rechupes em peças fundidas**. 2013. Tese de Doutorado.

ANEXO 1

Desenho técnico da peça em análise

