



Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP
Escola de Minas
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
Campus Morro do Cruzeiro
Ouro Preto – Minas Gerais – Brasil



MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA METALÚRGICA

**“ANÁLISE DE DEFEITOS DE FUNDIÇÃO EM MANTOS E
REVESTIMENTOS FABRICADOS EM AÇO CARBONO E AÇO
LIGADO PARA BRITADORES: ESTUDO DE CASO”**

Danilo Rodrigues de Oliveira

Ouro Preto, Outubro de 2022

Danilo Rodrigues de Oliveira

“Análise de defeitos de fundição em mantos e revestimentos fabricados em aço carbono e aço ligado para britadores: estudo de caso”

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Metalurgista.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Maria Aparecida Pinto

Ouro Preto, Outubro de 2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

O48a Oliveira, Danilo Rodrigues De.
ANÁLISE DE DEFEITOS DE FUNDIÇÃO EM MANTOS E REVESTIMENTOS
FABRICADOS EM AÇO CARBONO E AÇO LIGADO PARA BRITADORES:
ESTUDO DE CASO. [manuscrito] / Danilo Rodrigues De Oliveira. - 2022.
39 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientadora: Profa. Dra. Maria Aparecida Pinto.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola
de Minas. Graduação em Engenharia Metalúrgica .

1. Fundição. 2. Aço - Aço Manganês. 3. Moldagem (Fundição). I. Pinto,
Maria Aparecida. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 669.01

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Danilo Rodrigues de Oliveira

Análise de defeitos de fundição em mantos e revestimentos fabricados em aço carbono e aço ligado para britadores: estudo de caso

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Metalurgista

Aprovada em 20 de outubro de 2022

Membros da banca

Dr.^a Maria Aparecida Pinto - Orientadora - Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr.^a Paula Cibely Alves Flausino) - Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Daniel Fraga Pinto - Instituto Federal de Minas Gerais - Campus Ouro Preto

Maria Aparecida Pinto, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 20/11/2022



Documento assinado eletronicamente por **Maria Aparecida Pinto, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 08/11/2022, às 18:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0424229** e o código CRC **A7757880**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais por todo apoio durante a minha formação, por nunca terem medido esforços para garantirem as melhores condições durante todo o período de graduação.

Aos meus irmãos, demais familiares e amigos, por sempre incentivarem.

A Tátima, por estar comigo desde o início da minha caminhada dando todo suporte necessário, e todos de sua família que contribuíram para esse momento.

Aos professores da Escola de Minas, em especial a professora Maria Aparecida, pela sua orientação durante esse projeto, por ter depositado confiança em mim e por sempre estar presente, tornando possível a realização desse trabalho.

A UFOP, a Escola de Minas, o departamento de metalurgia e a Fundação Gorceix, por darem apoio necessário para a formação acadêmica de qualidade.

A Siderúrgica Itabirito, pela oportunidade de realizar estágio na empresa e desenvolver esse trabalho. Aos funcionários que convive durante o período de estágio, em especial Isabel, Nilder, Phelippe e Olcimar, por todo apoio e ensinamentos.

RESUMO

A fundição está presente na sociedade há milhares de anos. Nos dias atuais é responsável pela produção de diferentes tipos de peças, com diferentes tamanhos e complexidades. A base da fundição consiste em vaziar um metal líquido em um molde, sendo a mesma desde as primeiras peças fundidas a milhares de anos. As grandes diferenças são na utilização de novas tecnologias e materiais empregados no processo. Esse trabalho visa estudar os defeitos em peças produzidas por fundição, com o objetivo de identificar as possíveis causas. O material utilizado é o aço manganês, também chamado Hadfield. Com esse propósito realizou-se nesse trabalho uma análise de amostras de areia, que são utilizadas no processo de moldagem, a análise de peças manto e revestimento quanto à presença de defeitos e uma simulação computacional do processo de enchimento do molde no processo de fundição. Os principais defeitos identificados nas peças são bolhas de gases, porosidade, microrrechupes e erosão de areia. Verificou-se que as possíveis causas dos defeitos estão relacionadas com o sistema de alimentação das peças, sendo necessária uma revisão do projeto de fundição.

Palavras chaves: Aço manganês. Fundição. Defeitos. Moldagem

ABSTRACT

Foundry has been present in society for thousands of years. Nowadays it's responsible for the production of different types of parts, with different sizes and complexities. The basis of foundry consists of pouring a liquid metal into a mold, which has been the same since the first castings thousands of years ago. The most differences are in the use of new technologies and materials used in the process. This work aims to study the appearance of defects in parts produced by the foundry, in order to identify the possible causes. The material used is manganese steel, also called Hadfield. For this purpose, this work realized an analysis of sand samples, which are used in the molding process, the analysis of mantle and coating parts for the presence of defects and a computer simulation of the mold filling process in the foundry process. The main defects identified in the pieces are gas bubbles, porosity, micro shrinkage and sand erosion. It was found that the possible causes of defects are related to the parts supply system, requiring a review of the casting project.

Keywords: Manganese steel. Foundry. Defects. Molding

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Manto fabricada na VDL Siderúrgica Itabirito.....	19
Figura 3.2 - Revestimento fabricado na VDL Siderúrgica Itabirito	19
Figura 3.3 - Modelos em madeira de Mantos e Revestimentos	21
Figura 3.4 - Forno de aquecimento.....	22
Figura 3.5 - Tanque de resfriamento	23
Figura 4.1 - Amostras de areia analisadas	24
Figura 5.1 – Distribuição granulométrica da areias: Peso Retido x Peneiras.....	26
Figura 5.2 – (a) Grãos de areia nova; (b) Composição química da areia nova – ponto 1	27
Figura 5.3– (a) Grãos de areia reutilizada; (b) composição química da areia reutilizada – ponto 1	28
Figura 5.4– (a) Grãos de areia de cromita; (b) Composição química da areia de cromita – ponto 1	29
Figura 5.5 – Microrrechupes encontrados no revestimento no processo de usinagem ..	30
Figura 5.6 – Trincas encontradas no revestimento	30
Figura 5.7 – Problemas na junção da peça com os massalotes nos revestimentos.....	31
Figura 5.8 – Rugosidade provocada por erosão na peça manto	31
Figura 5.9 – Análise de ponto quente para a peça manto	32
Figura 5.10 – Análise do critério de densidade para a peça manto	32
Figura 5.11 – Análise do critério de Niyama para a peça manto.....	33
Figura 5.12- Análise do tempo de solidificação para peça manto.....	33
Figura 5.13 – Análise de ponto quente no revestimento	34
Figura 5.14 – Análise da densidade do material no revestimento	34
Figura 5.15 – Análise do critério de Niyama do revestimento.....	35
Figura 5.16 – Análise do tempo de solidificação para o revestimento.....	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 3. 1 - Composição química do aço Hadfield.....	13
Tabela 3. 2 - Propriedades mecânicas do aço Hadfield.....	14
Tabela 3. 3 - Resinas de cura a frio	16
Tabela 3. 4 - Composição química do aço Hadfield.....	20
Tabela 3. 5 - Composição química Mantos e Revestimentos.....	20
Tabela 5.1 – Resultados das amostras de areia 100% reutilizadas.....	26
Tabela 5.2 – Resistência à tração das amostras de areia	27

LISTA DE SIGLAS

ASTM – American Society for Testing and Materials

MEV – Microscópio eletrônico de varredura

PPC – Perda por calcinação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	12
2.1	Objetivo Geral	12
2.2	Objetivos Específicos	12
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
3.1	Aços Manganês para Fundição.....	13
3.1.1	Composição química do aço Hadfield	13
3.1.2	Tratamento térmico do aço Hadfield	14
3.2	Moldagem em Areia	14
3.2.1	Moldagem em areia de cura a frio	15
3.3	Defeitos de Fundição Relacionados à Fundição de Peças em Aço Manganês....	16
3.3.1	Porosidade.....	17
3.3.2	Inclusões não metálicas	17
3.3.3	Oclusão de gases	17
3.3.4	Trincas	18
3.4	Fabricação dos Mantos e Revestimentos para Britadores na VDL Siderúrgica Itabirito	19
3.4.1	Composição Química dos Mantos de Revestimentos.....	20
3.4.2	Processo de Moldagem dos Mantos e Revestimentos	21
3.4.3	Tratamento Térmico dos Mantos e Revestimentos.....	22
4	MATERIAIS E MÉTODOS	24
4.1	Análise de Areias.....	24
4.2	Simulação Computacional.....	25
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
5.1	Análise das Areias	26
5.1.1	Análise granulométrica da areia	26

5.1.2	Resultados das análises das areias por microscopia eletrônica de varredura ..	27
5.2	Análise dos Defeitos das Peças Manto e Revestimento	29
5.3	Simulação Computacional	31
5.3.1	Simulação computacional – manto	31
5.3.2	Simulação computacional – revestimento	34
6	CONCLUSÃO	36
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37

1 INTRODUÇÃO

A fundição é um segmento da metalurgia presente há muito tempo na sociedade, produzindo desde pequenas a grandes peças. A fundição consiste basicamente em vaziar um metal líquido, podendo ser aço, ferro fundido, alumínio, etc., em um molde em que, após o resfriamento e desmoldagem gera a peça desejada. Acredita-se que as primeiras peças a serem produzidas datam de cerca de 5000 a.C. a 3000 a.C., e que foram trabalhos realizados com cobre em moldes de pedras lascadas (ROSSITTI, 1993).

O aço, amplamente utilizado no processo de fundição, pode variar as suas propriedades de acordo com a composição química. Um tipo comum, e que será usado nesse trabalho, é o chamado Hadfield, que é um aço manganês austenítico. Esse tipo de aço, caracterizado pela presença de Mn na sua composição, apresenta como característica principal boas propriedades mecânicas, como resistência ao impacto e à abrasão, o que o torna amplamente empregado na fabricação de peças utilizadas na mineração. Um exemplo de peças produzidas com o aço Hadfield por meio do processo de fundição são os mantos e revestimentos, componentes de britadores e que são analisados nesse trabalho.

É comum nos processos de fundição o aparecimento de defeitos nas peças durante ou após o processo, abrangendo também a etapa de usinagem. Nesse contexto foi elaborado um estudo de caso em parceria com a Siderúrgica Itabirito, pertencente ao grupo VDL, para analisar os principais defeitos encontrados nos mantos e revestimentos durante o processo de fundição, buscando-se as possíveis causas. De acordo com a empresa, os principais defeitos encontrados nessas peças são bolhas de gás, inclusões não metálicas e inclusões metálicas. A presença desses defeitos tem acarretado elevado índice de rebarbação e recuperação (retrabalho) das peças.

2 OBJETIVOS

São objetivos deste trabalho:

2.1 Objetivo Geral

Executar um estudo de caso, analisando defeitos das peças fundidas: mantos e revestimentos, para identificar as prováveis causas dos defeitos.

2.2 Objetivos Específicos

- Acompanhar a preparação e fusão da carga metálica para as peças;
- Acompanhar o processo de moldagem das peças;
- Acompanhar o processo de vazamento, desmontagem, limpeza, acabamento e usinagem das peças;
- Analisar as peças quanto aos defeitos presentes;
- Correlacionar os defeitos ao processo produtivo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica envolvendo os principais tópicos relacionados ao material e ao processo de fundição das peças mantos e revestimentos.

3.1 Aços Manganês para Fundição

O aço manganês, também chamado de Hadfield, foi inventado por Robert Abbott Hadfield. No ano de 1882, Hadfield constatou que variando a porcentagem de manganês no aço acima de 10% e mantendo o carbono próximo de 1,5% havia uma considerável melhora na resistência mecânica. Com a continuidade dos trabalhos de pesquisa, chegou-se a um valor de composição química que consiste em aproximados 1,2% de carbono e 12,5% de Manganês, dando origem ao aço Hadfield (HAVEL, 2017).

3.1.1 Composição química do aço Hadfield

Além do carbono e do manganês presentes, o aço Hadfield pode apresentar em sua composição elementos como cromo, silício, molibdênio e uma pequena porcentagem de fósforo. De acordo com Focuo e Holanda (2017 *apud* VENTURELLI, 2018), as ligas comerciais de aço manganês apresentam o teor de Mn acima de 14%. Outros elementos de liga,, presentes na composição química seguem a norma ASTM A128 (2012), apresentados na Tabela 3.1. Nessa norma, o aço Hadfield é dividido em graus, de acordo com as porcentagens dos elementos presentes.

Tabela 3. 1 - Composição química do aço Hadfield

Grau	%C	%Mn	%Cr	%Mo	%Ni	%Si*	%P*
A	1,05-1,35	11 mínimo	-	-	-	1	0,07
B-1	0,9-1,05	11,5-14	-	-	-	1	0,07
B-2	1,05-1,2	11,5-14	-	-	-	1	0,07
B-3	1,12-1,28	11,5-14	-	-	-	1	0,07
B-4	1,2-1,35	11,5-14	-	-	-	1	0,07
C	1,05-1,35	11,5-14	1,5-2,5	-	-	1	0,07
D	0,7-1,3	11,5-14	-	-	3-4	1	0,07
E-1	0,7-1,3	11,5-14	-	0,9-1,2	-	1	0,07
E-2	1,05-1,45	11,5-14	-	1,8-2,1	-	1	0,07
F	1,05-1,35	6-8	-	0,9-1,2	-	1	0,07

Fonte: (ASTM A128, 2012)

3.1.2 Tratamento térmico do aço Hadfield

Ao final do processo de fundição, o aço Hadfield, após solidificar, pode conter carbonetos em sua estrutura, podendo causar fragilização. Dessa forma, a fim de evitar a presença destes carbonetos, buscando uma estrutura mais homogênea e melhorando as propriedades mecânicas, é comum a realização de tratamento térmico após a solidificação do metal fundido (CHIAVERINI, 1988).

Como o aço Hadfield tem grande aplicação em indústrias que exigem elevado grau de resistência mecânica das peças, como em indústrias de mineração, o tratamento térmico passa a ser fundamental para obtenção de boas propriedades, garantindo maior durabilidade e eficiência (CHIAVERINI, 1988). A Tabela 3.2 apresenta algumas propriedades mecânicas do aço Hadfield antes e após o tratamento térmico.

Tabela 3. 2 - Propriedades mecânicas do aço Hadfield

Estado	Composição			Propriedades						
	C	Mn	Si	Limite convencional <i>n</i>		Limite de resistência à tração		Alongamento, %	Estricção, %	Dureza Brinell
				kgf/mm ²	MPa	kgf/mm ²	MPa			
Fundido	1,11	12,7	0,54	36,4	354	45,5	445	4	***	***
Fundido*	1,0/1,4	10/14	0,2/1,0	35,0/39,9	340/389	70/101,5	690/995	30/65	30/40	185/210
Laminado*	1,1/1,4	11/14	0,2/06	30,1/46,9	291/459	91,7/110,6	897/1086	40/63	35/50	170/200

* Tratado termicamente

Fonte: (CHIAVERINI, 1988)

Uma opção de tratamento térmico utilizado é a têmpera. Nesse processo ocorre a elevação da temperatura do material, até próximo do ponto de fusão seguido de um rápido resfriamento. A elevação da temperatura normalmente acontece de forma lenta, para garantir a dissolução de possíveis carbonetos presentes na estrutura. A taxa de resfriamento ao contrário, deve ocorrer em uma taxa mais elevada para que não ocorra a precipitação dos carbonetos, e se possa garantir uma boa resistência mecânica do aço (HAVEL, 2017).

3.2 Moldagem em Areia

O processo de moldagem envolve a compactação de areias manualmente ou em um sistema automatizado, em um molde com o formato da peça que se deseja produzir. Nesse processo, o tipo mais comum de areia utilizada é a areia verde. Porém, utilizam-se também areias aglomeradas com cimento, com resina de cura a quente ou a frio, entre outras (MORO, 2007).

O processo de moldagem em areia a ser utilizados depende de vários fatores, como tipo de aço a ser usado, temperatura do metal, quantidade de peças que serão produzidas, grau de complexidade, acabamento das peças, etc.

3.2.1 Moldagem em areia de cura a frio

A areia de cura a frio, largamente utilizada nos processos de moldagem pelas indústrias, é composta por uma mistura de areia com resina e catalizador, que atuam como aglomerantes para as partículas de areia. A reação de polimerização da resina, acelerada pelo catalizador, acontece em temperatura ambiente, proporcionando alta resistência mecânica à areia preparada (MARIOTTO, 2011).

As resinas estão sendo mais estudadas e desenvolvidas, a fim de se obter uma melhor qualidade e eficiência no processo. A Tabela 3.3 apresenta os tipos de resinas mais comuns utilizadas bem como suas características e composições (MARIOTTO, 2011).

Na moldagem em areia de cura a frio, são utilizadas normalmente resinas furânicas, fenólicas e combinações entre elas. É importante buscar a utilização de resinas livres de odor e que seguem as exigências das fundições, principalmente em relação à liberação de nitrogênio, que deve ser mínima, se possível isentas, para evitar problemas como gases nas peças fundidas (MARIOTTO, 2011).

Segundo Tesla (2016), a utilização de moldes com areia de cura a frio não necessita de elevado grau de compactação, fornece moldes ou machos de elevada resistência e colapsibilidade. O processo também apresenta vantagens como excelente precisão dimensional e podem ser aplicados para produção de peças com grandes dimensões e, além disso, as areias utilizadas são recuperáveis.

Tabela 3. 3 - Resinas de cura a frio

SISTEMA LIGANTE	ADEQUAD O PARA	COMPOSIÇÕES USUAIS	PINTURA À BASE DE	RECUPE- RAÇÃO	OBSERVAÇÕES
Resina de Cura-a-frio					
a) à base de resina furânica / ácido	fofo cinzento, aço, ligas leves, ligas de cobre	100 areia quartzo 0,3-0,5 PTS, H ₃ PO ₄ 0,8-1,2 resina furânica	álcool ou água	mecânica ou térmica	Processo universal, especialmente para peças grandes; tempos de cura curtos com endurecedores especiais
b) à base de resina fenólica	fofo cinzento, fofo nodular e aço	100 areia quartzo 0,3-0,6 ácido 0,8-1,2 resina fenólica	álcool ou água	mecânica ou térmica	Processo universal, especialmente para peças grandes
Resina poliuretânica					
a) com acelerador	fofo cinzento, fofo nodular e aço.	100 areia quartzo 0,5-0,8 poliisocianato 0,5-0,6 resina fenólica 0,5-2 catalisador	álcool; água sob certas circunstâncias	?	É uma variante do processo de resina de cura rápida; bom acabamento em aço
b) sem acelerador	Ligas leves	100 areia de Quartzo 0,6-0,8% poliisocianato 0,6-0,8 aminopoliol	álcool	?	Bom acabamento e boa colapsibilidade com ligas leves
Resol-éster	fofo cinzento, fofo nodular, aço, ligas leves, ligas de cobre	100 areia de Quartzo 0,2-0,5% éster 1,2-1,4 resina resólica	álcool	?	Sem odores na produção de moldes e machos; ótimo acabamento superficial, boa colapsibilidade em peças de ligas leves
Resina alquídica-uretânica	fofo cinzento, nodular, aço, ligas de cobre	100 areia de Quartzo 0,2-0,2% poliisocianato 1,5-1,8 ligante	álcool	mecânica ou térmica	Apropriado particularmente para aço devido a atmosfera redutora durante vazamento
Silicato de sódio/éster		100 areia de Quartzo 0,2-0,3% éster 2,5-3,0 silicato de sódio	álcool	?	Sensibilidade à temperatura; baixa colapsibilidade

Fonte: (BENZ; KÄLBERER, 1985 *apud* MARIOTTO, 2011).

3.3 Defeitos de Fundição Relacionados à Fundição de Peças em Aço Manganês

Os processos de fundição, tanto para aço manganês quanto para outros tipos de aços e ligas, podem acarretar o aparecimento de diversos tipos de defeitos. Eles afetam a qualidade do material tanto física quanto estruturalmente, podendo torná-lo inutilizável ou necessitando de uma eventual recuperação.

Os defeitos provenientes do processo de fundição podem ter origem em várias etapas do processo como, por exemplo, na preparação do molde; na moldagem; da pintura; na preparação do metal no forno; na etapa de vazamento do metal (preenchimento do molde); no sistema de alimentação da peça (sistema de enchimento e massalotes); e decorrente da solidificação do metal. Os defeitos mais comuns gerados a partir dessas etapas são porosidade, inclusões, oclusão de gases, erosão do molde, rechupe, segregação e trincas (MARQUES, 2008 *apud* FIGUEREDO, 2019).

3.3.1 Porosidade

A porosidade é caracterizada pela presença de vazios no material solidificado que, de acordo com Garcia (2007), são do tipo microporosidade ou macroporosidade ou rechupe, e seu aparecimento pode ocorrer durante a solidificação.

A macroporosidade ocorre durante a solidificação da peça causada pela falta de alimentação de metal líquido para compensar a contração do metal durante a solidificação, que pode ser causada por um erro de projeto, ou outros motivos como temperatura inadequada do metal. Isso faz com que a peça não seja preenchida completamente, durante a solidificação, formando um vazio chamado de rechupe (ANSELMANT, 2005). Uma forma de evitar o aparecimento do rechupe é a partir da utilização de massalotes, que são reservatórios de metal, ligados à peça a ser produzida, que têm a função de fornecer metal à peça durante a solidificação para compensar a contração de solidificação.

Já as microporosidades são pequenos vazios internos na peça, sendo causadas devido à contração volumétrica do metal aprisionado entre os braços dendríticos durante a solidificação (MOREIRA, 2016).

3.3.2 Inclusões não metálicas

As inclusões não metálicas normalmente são classificadas como endógenas e exógenas, e destacam-se por causar perda de propriedades no material solidificado.

As inclusões endógenas aparecerem no metal em forma de precipitados como óxidos, silicatos, sulfetos e aluminatos e podem ocorrer durante a solidificação (CHIAVERINI, 1988). São formadas no metal que está solidificando, ou seja, elas não aparecem a partir de contato com o meio externo.

As inclusões exógenas são devidas a fontes externas e uma das principais causas é a escória presente no metal. As inclusões também ocorrem por contaminação a partir da areia vinda da preparação do molde, bem como refratários, entrando em contato com o metal líquido (BALDAM; VIEIRA, 2013 *apud* SANTANA, 2016).

3.3.3 Oclusão de gases

A oclusão de gases é responsável pelo aparecimento de bolhas na superfície ou no interior do metal durante a solidificação. Quando as bolhas aparecem no interior do metal

solidificado, destacam-se pelo seu formato mais arredondado, o que as diferencia dos defeitos gerados por vazios de contração (TESLA, 2016).

Para evitar problemas com oclusão de gases é comum à realização do processo de desgaseificação no metal líquido, etapa que é realizada antes do vazamento do metal no molde. O processo de desgaseificação pode envolver a adição de elementos químicos no metal líquido, que reagirão com os gases tornando-os possíveis de serem eliminados. Pode ser também por meio da injeção de gás inerte no metal líquido como, por exemplo, o argônio (CIMM, 2010).

A geração de gases nas peças de fundição pode ser proveniente de etapas de moldagem, preparação do molde e pintura. Um dos fatores responsável pelo aparecimento de gases nas peças é a elevada umidade nos moldes e machos. As bolhas de gases podem ocorrer também devido ao uso de aglomerantes com fortes tendências de liberar gases, devido à baixa permeabilidade da areia, insuficiência na saída de gases, arraste de gases pelos canais (FERREIRA, 2011).

Para evitar esses problemas, é necessário controle da umidade da areia no processo, desde a preparação do molde até a pintura, respeitando o tempo ideal de secagem. Outras ações podem também ser tomadas, como melhorar a saída de gases, utilizando-se respiros, controlar a permeabilidade da areia de moldes e machos, realizar a secagem dos moldes entre outras (FERREIRA 2011).

3.3.4 Trincas

As trincas são descontinuidades que podem estar presentes nas peças e podem ser classificadas como trincas a frio e a quente. Basicamente a diferença entre elas se dá no aspecto da sua fratura. As trincas a frio não apresentam oxidação em seu aspecto e têm superfície mais lisa, enquanto nas trincas a quente é comum o aparecimento de oxidação e superfícies rugosa. As trincas podem ser evitadas tomando-se os devidos cuidados no processo de fundição, como respeitar o tempo de desmoldagem, evitar excesso de força e movimentos bruscos durante a desmoldagem, rebarbação e usinagem (FERREIRA, 2011).

3.4 Fabricação dos Mantos e Revestimentos para Britadores na VDL Siderúrgica Itabirito

Os mantos e revestimentos são peças de grande porte, como pode ser observado na Figura 3.1 e na Figura 3.2, respectivamente, produzidas em aço manganês e utilizadas em britadores na mineração. Devido ao elevado grau de exigência na sua aplicação, necessitam de boas propriedades, como alta resistência mecânica e ao desgaste (VDL, 2022).



Figura 3.1 - Manto fabricada na VDL Siderúrgica Itabirito (VDL, 2022)



Figura 3.2 - Revestimento fabricado na VDL Siderúrgica Itabirito (VDL, 2022)

3.4.1 Composição Química dos Mantos de Revestimentos

Os mantos e os revestimentos são fabricados em aço manganês, tipo Hadfield, que, além do Mn em sua composição, possui também elementos como o Si, Cr, Mo e Ni. O silício é adicionado com o objetivo de desoxidar o metal, raramente ultrapassando 1%; entretanto, às vezes pode ser utilizado em teores até 2%, para produzir um certo aumento do limite de escoamento e certa resistência à deformação plástica sob choques repetidos. O cromo, molibdênio e níquel são adicionados com o objetivo de melhorar o limite de escoamento e a usinabilidade (INFOMET, 2022). A composição química típica do aço Hadfield é apresentada na Tabela 3.4.

Tabela 3. 4 - Composição química do aço Hadfield

ASTM A128	% em Peso						
	C	Mn	Cr	Mo	Ni	Si	P
A	1.05-1.35	Min 11	-	-	-	Max 1.0	Max 0.07
B-1	0.9-1.05	11.5-14.0	-	-	-	Max 1.0	Max 0.07
B-2	1.05-1.2	11.5-14.0	-	-	-	Max 1.0	Max 0.07
B-3	1.12-1.28	11.5-14.0	-	-	-	Max 1.0	Max 0.07
B-4	1.2-1.35	11.5-14.0	-	-	-	Max 1.0	Max 0.07
C	1.05-1.35	11.5-14.0	1.5-2.5	-		Max 1.0	Max 0.07
D	0.7-1.3	11.5-14.0	-		3.0-4.0	Max 1.0	Max 0.07
E-1	0.7-1.3	11.5-14.0	-	0.9-1.2	-	Max 1.0	Max 0.07
E-2	1.05-1.45	11.5-14.0	-	1.8-2.1	-	Max 1.0	Max 0.07
F(J91340)	1.05-1.35	6.0-8.0	-	0.9-1.2	-	Max 1.0	Max 0.07

Fonte: Adaptado de Norma ASTM A128 (2017)

A composição química dessas peças baseia-se na norma padrão ASTM A128 Grau C, porém a empresa varia as porcentagens dos elementos químicos presentes de acordo com a necessidade de cada cliente. A Siderúrgica Itabirito fornece os mantos e os revestimentos para dois tipos de clientes, nomeados aqui por cliente 1 e cliente 2. As composições químicas exigidas por eles são apresentadas na Tabela 3.5 com valores máximos e mínimos.

Tabela 3. 5 - Composição química Mantos e Revestimentos

Nome da Liga	Clientes	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	P	S	Cu	Al	Ti	Fe
M1	CLIENTE 1	1,10	11,50	0,40	1,30	MAX	MAX	MAX	MAX				
		1,23	13,50	0,80	2,00	0,60	0,50	0,065	0,020				
M2	CLIENTE 1	1,35	17,00	0,40	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX				
		1,45	19,60	0,80	0,75	0,60	0,50	0,065	0,020				
XT 510	CLIENTE 2	1,10	11,50	0,40	MAX			MAX				-	Balance
		1,25	14,00	0,90	0,60			0,050				-	Balance
XT 610	CLIENTE 2	1,10	11,50	0,40	1,30			MAX				-	Balance
		1,25	14,00	0,90	1,70			0,055				-	Balance
XT 710	CLIENTE 2	1,15	17,00	0,40	1,75			MAX				-	Balance
		1,35	18,50	0,90	2,50			0,055				-	Balance
XT 720	CLIENTE 2	1,30	19,50	0,40	2,00			MAX				0,100	Balance
		1,50	22,50	0,90	3,00			0,055				0,200	Balance

Fonte: (VDL, 2022)

3.4.2 Processo de Moldagem dos Mantos e Revestimentos

No processo de produção dos mantos e revestimentos a temperatura do metal líquido é de aproximadamente 1600°C. Devido a essa alta temperatura e do peso da peça (aproximadamente 1390kg), há a necessidade que, no processo de moldagem, a areia apresente elevada resistência mecânica a quente e a frio, bom acabamento superficial e boa precisão dimensional (VDL, 2021). Nesse caso, o processo de moldagem adotado é o processo de moldagem em areia de cura a frio, com modelos de madeira, apresentados na Figura 3.3.



Figura 3.3 - Modelos em madeira de Mantos e Revestimentos (VDL, 2022)

O processo de areia utiliza o sistema LINO CURE™ AA constituído por 3 componentes: 1) uma resina alquídica de óleo modificado diluída em solvente alifático, chamada de resina LINO CURE™ AA; 2) um catalisador organo-metálico, chamado de LINO CURE™ BA-1; e 3) um correagente a base de isocianato polimérico, LINO CURE™ C (ASK CHEMICALS, 2021).

As quantidades de misturas de cada componente utilizados são determinadas pela empresa. Uma mistura típica, que pode ser utilizada, é apresentada na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Porcentagens de componentes na mistura de areia

Porcentagens dos componentes na mistura	
LINO CURE™ AA	1,5% baseado na massa de areia
LINO CURE™ BA-1	0,5% - 5% baseado na massa de LINO CURE™ AA
LINO CURE™ C	20% baseado na massa de LINO CURE™ AA

Fonte: (ASK CHEMICALS, 2021)

Além da areia de sílica para formação do molde, é utilizada a areia de cromita em pontos específicos do molde, onde a solitação térmica é muito alta, visto que sua temperatura de fusão que é da ordem de 2200°C, superior à temperatura de fusão da areia de sílica que é de 1725°C.

Em função da geometria da peça, há a necessidade da utilização de machos para formar suas partes internas. O processo de fabricação dos machos de areia é o mesmo utilizado na fabricação dos moldes, sendo empregada, também, a areia de cromita (VDL, 2021).

3.4.3 Tratamento Térmico dos Mantos e Revestimentos

Após o processo de fundição dos mantos e revestimentos é realizado um tratamento térmico de têmpera das peças, com intuito de melhorar as propriedades mecânicas. Nesse tratamento térmico, a temperatura da peça é elevada até aproximadamente 1100°C e, em seguida, resfriada rapidamente em água (VDL, 2021).

Tanto para os mantos quanto para os revestimentos, a Siderúrgica Itabirito realiza a têmpera em fornos com aquecimento a gás, como indicado na Figura 3.4. Ao atingir certa temperatura, as peças são mantidas por um tempo chamado tempo de encharque, em que a temperatura permanece constante durante um intervalo de tempo.



Figura 3.4 - Forno de aquecimento (VDL, 2022)

Após o processo de encharque, as peças são transferidas rapidamente para o tanque de resfriamento com água, Figura 3.5. O tempo de transferência não pode exceder setenta segundos, conforme exigência dos clientes.



Figura 3.5 - Tanque de resfriamento
(VDL, 2022)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Como o trabalho envolveu um estudo de caso, foi feito o acompanhamento da produção das peças, mantos e revestimentos, na Siderúrgica Itabirito, para identificação de defeitos de fundição e as possíveis causas.

O acompanhamento da produção com o levantamento dos dados envolveu as etapas de moldagem, preparação do metal, vazamento, desmoldagem, limpeza, rebarbação e usinagem. A análise das peças (análise química, microestrutural e defeitos) foi executada utilizando os recursos dos laboratórios da Siderúrgica Itabirito e dos laboratórios da Escola de Minas, a saber: Laboratório de Fundição, Laboratório de Tratamentos Térmicos e NanoLab.

4.1 Análise de Areias

A fim de avaliar a influência da areia no processo de fundição, a empresa realizou ensaios em duas amostras de areia 100% reutilizadas. Desses ensaios foram obtidos valores para o módulo de finura, umidade, perda por calcinação (PPC) e resistência à tração.

Além desses ensaios, foram analisadas mais três amostras: areia de faceamento, areia nova e areia reutilizada, como mostrado na Figura 4.1. Essas amostras foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) com o objetivo de analisar os grãos e a composição química.



Figura 4.1 - Amostras de areia analisadas

A areia de faceamento, que é a base de cromita, é utilizada para facear algumas partes do molde que entram em contato direto com o metal líquido, requerendo maior resistência térmica.

A areia nova, composta por sílica, é utilizada junto com a areia reutilizada para preenchimento do restante do molde. Já a areia reutilizada apresenta em sua composição, além da sílica e da cromita, outros elementos provenientes do processo.

Na análise por MEV, para identificação das areias nova, reutilizada e de faceamento elas foram nomeadas como amostras um, dois e três, respectivamente. Para cada uma delas foram analisados quatro pontos.

Essas análises permitiram avaliar se as areias, e os elementos que as compõem, estavam dentro das especificações de processo ou se apresentavam elementos capazes de causar defeitos nas peças fundidas.

4.2 Simulação Computacional

Foi realizada uma simulação computacional do processo de fundição das peças manto e o revestimento, com o objetivo de verificar as condições de enchimento do molde e solidificação das peças. O programa utilizado foi o MAGMA cuja licença é da Siderúrgica Itabirito.

A partir dessa simulação foi possível avaliar o processo de enchimento dos moldes e fazer a análise com base na formação de pontos quentes, densidade do material, tempo de solidificação e critério de Niyama.

O critério de densidade está relacionado com a influência da contração do metal e do escoamento do metal líquido durante a solidificação. Os outros critérios como Niyama e tempo de solidificação estão relacionados com o aparecimento de rechupes e porosidade por gases.

É importante considerar também a condição de descida do metal líquido nos canais para enchimento do molde, tendo em vista que o fluxo de metal, e principalmente a turbulência, podem provocar o aparecimento de porosidade por gases na peça. A velocidade com que o metal líquido escoar pelos canais e a temperatura são parâmetros que influenciam diretamente nas condições finais da peça.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, são apresentados os resultados das análises das amostras das areias, os principais defeitos encontrados nas peças e os dados obtidos da simulação computacional, seguindo a ordem proposta dentro do capítulo Materiais e Métodos.

5.1 Análise das Areias

Os resultados das análises das amostras de areias realizadas pela empresa, posteriormente, os resultados das amostras analisadas via MEV são apresentados a seguir.

5.1.1 Análise granulométrica da areia

Foram analisadas duas amostras de areia 100% reutilizadas pela empresa. Além da distribuição granulométrica, foram analisadas as seguintes características: teor de finos, módulo de finura, umidade e PPC, cujos valores são apresentados na Tabela 5.1. A distribuição granulométrica é apresentada na Figura 5.1. Verifica-se que as areias estão dentro dos padrões estabelecidos.

Tabela 5.1 – Resultados das amostras de areia 100% reutilizadas

Amostra	Finos (%)	Módulo de Finura	Umidade (%)	PPC (%)
Padrão VDL	Máx. 1%	40-50	0,00	2,80
Amostra 1	0,38	44	0,06	2,41
Amostra 2	0,46	50	0,10	2,60

Fonte: (VDL, 2022)

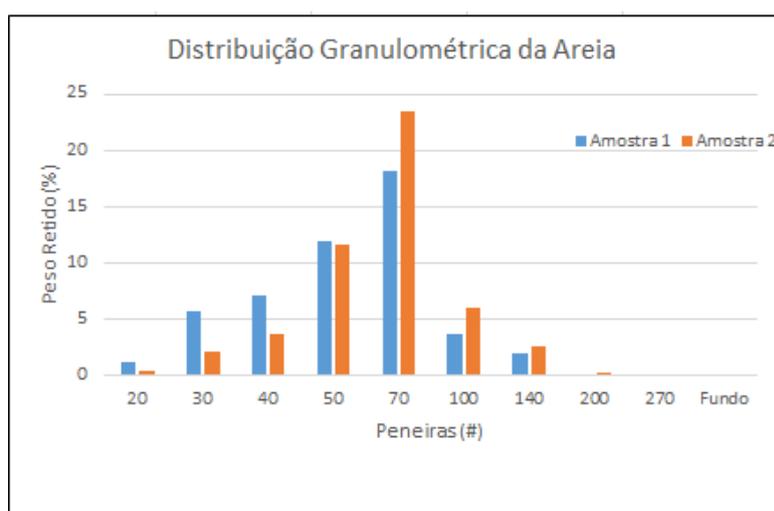


Figura 5.1 – Distribuição granulométrica da areias: Peso Retido x Peneiras (VDL, 2022)

Duas amostras de areia, uma de areia recuperada e outra de areia de cromita, foram submetidas a ensaios de tração. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 5.2. Os valores também estão de acordo com a especificação da empresa para a produção as peças manto e revestimento.

Tabela 5.2 – Resistência à tração das amostras de areia

Areia	Resistência à Tração Média (N/cm ²)	Desvio Padrão
Padrão VDL	55,0 - 60,0	-
Areia Recuperada	66,28	15,29
Areia de Cromita	54,30	18,92

Fonte: (VDL, 2022)

5.1.2 Resultados das análises das areias por microscopia eletrônica de varredura

São apresentados, a seguir, os resultados das análises, via MEV, das areias nova, recuperada e de cromita. Para cada uma das três amostras foi analisada a composição elementar em quatro pontos diferentes. Os resultados encontrados nas quatro análises foram iguais, por isso apresentou-se, aqui, o resultado de apenas um dos pontos para cada amostra.

5.1.2.1 Amostra 1 – areia nova

A areia nova é considerada aquela que ainda não passou pelo processo. O resultado da análise é apresentado na Figura 5.2.

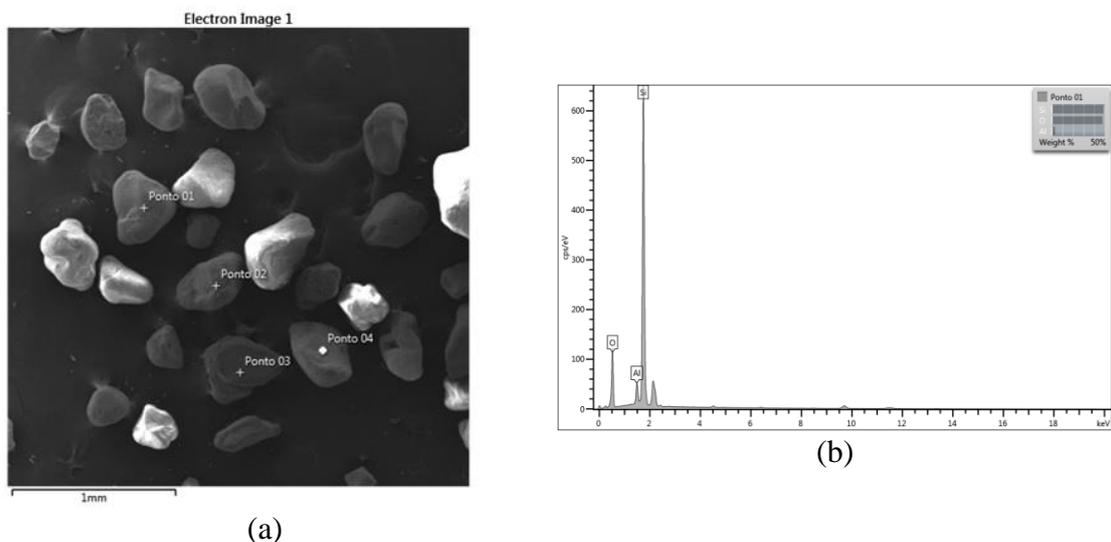


Figura 5.2 – (a) Grãos de areia nova; (b) Composição química da areia nova – ponto 1

Como pode ser observado na Figura 5.2a, os grãos da areia apresentam uma simetria em relação ao tamanho. Em relação à análise química dos quatro pontos analisados (Figura 5.2b), tem-se sílica e oxigênio em todos eles, comprovando ser realmente uma areia de sílica não utilizada anteriormente, com os grãos e a composição química referente a uma areia nova padrão.

5.1.2.2 Amostra 2 – areia reutilizada

A areia reutilizada é uma areia que já passou pelo menos uma vez no processo e é constituída da mistura de areia de sílica e cromita. Os dados da análise são apresentados na Figura 5.3.

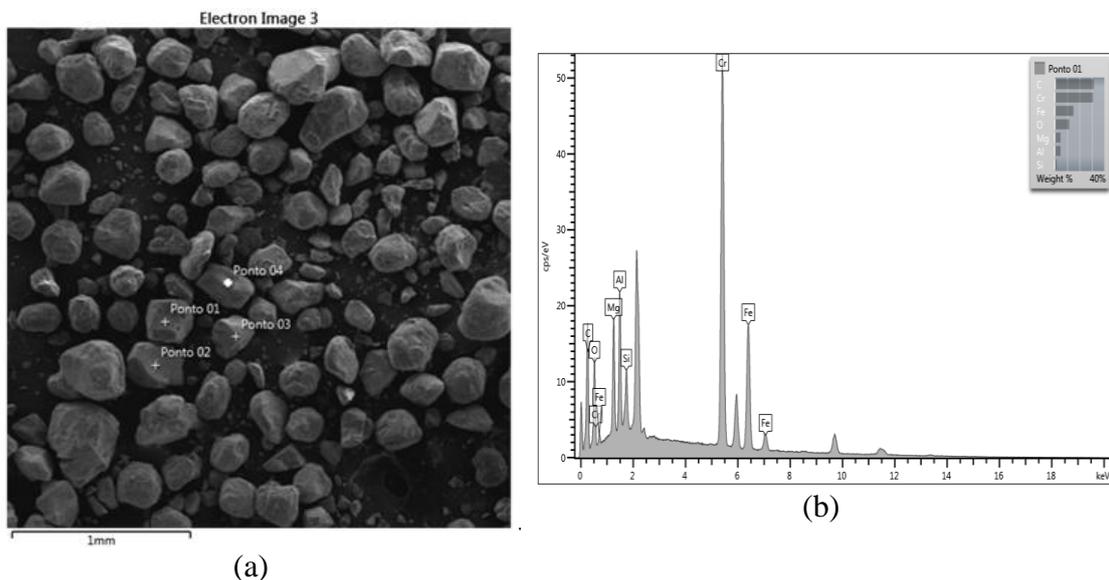


Figura 5.3– (a) Grãos de areia reutilizada; (b) composição química da areia reutilizada – ponto 1

Na análise dos grãos de areia reutilizada (Figura 5.3a) é possível notar que não há uma simetria se comprado com a areia nova, provavelmente, devido à fragmentação dos grãos nos processos de preparação da areia e desmoldagem da peça, dentro das etapas do processo de fundição. Outro fato a se notar é a presença de elementos químicos diferentes da sílica e do oxigênio, presentes na areia nova, encontrados nos quatro pontos analisados (Figura 5.3b). Esses elementos são provenientes da mistura da areia de sílica com a areia de cromita. Entretanto, a presença de carbono pode estar relacionada à resina polimérica utilizada como aglomerante.

5.1.2.3 Amostra 3 – areia de cromita

A areia de cromita, usada como areia de faceamento, é utilizada para facear partes do molde nas quais a solitação térmica, em função de maior volume de metal ou geometria da peça, é maior, exigindo maior estabilidade térmica da areia. Os resultados das amostras analisadas são apresentados na Figura 5.4.

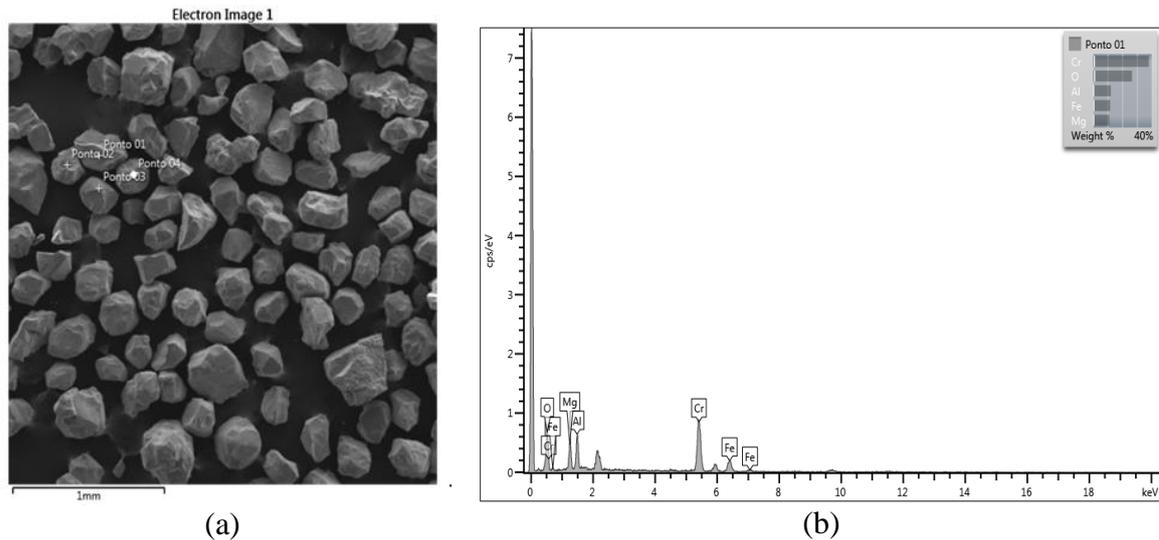


Figura 5.4– (a) Grãos de areia de cromita; (b) Composição química da areia de cromita – ponto 1

Na areia de cromita também é possível notar a simetria entre os grãos. Além disso, a areia apresentou, em sua composição, elementos característicos das areias de cromita. Esses resultados mostram que a areia está dentro dos padrões para o processo de fundição.

A partir dos resultados das análises das areias, pode-se concluir que as areias utilizadas no processo de moldagem não apresentam elementos que possam causar os defeitos verificados nas peças estudadas.

5.2 Análise dos Defeitos das Peças Manto e Revestimento

Durante o acompanhamento da produção das peças manto e revestimento na Siderúrgica Itabirito, verificou-se a presença de defeitos característicos nas peças, levando à necessidade de recuperação das peças por soldagem. A quantidade de peças recuperadas por lote fabricado era em média de 50%.

Os principais defeitos observados nas peças foram bolhas de gases, microrrechupe, trincas e erosão de areia na região da linha de partição do molde.

Nas análises das areias utilizadas no processo de moldagem, verificou-se que estas estão dentro dos padrões exigidos para produção das peças, não sendo identificados defeitos que possam ser relacionados com as características das areias.

Conforme pode ser observado nas Figuras 5.5, 5.6 e 5.7, referentes à peça revestimento, as bolhas de gases estão mais concentradas na parte inferior das peças, próximas à linha junção peça/massalote lateral. Já os microrrechupe estão concentrados na aba superior da peça. Além disso, observou-se a presença de bolhas de gases na superfície dos massalotes, tanto laterais quanto superiores, o que pode estar relacionada com umidade nas luvas que revestem os massalotes.

Na Figura 5.8, referente à peça manto, pode-se observar a rugosidade na superfície da peça provocada pela erosão de areia localizada na linha de junção dos massalotes laterais com a peça. A presença de bolhas de gases também foi verificada nestas peças.



Figura 5.5 – Microrrechupes encontrados no revestimento no processo de usinagem (VDL, 2022)



Figura 5.6 – Trincas encontradas no revestimento (VDL, 2022)



Figura 5.7 – Problemas na junção da peça com os massalotes nos revestimentos (VDL, 2022)

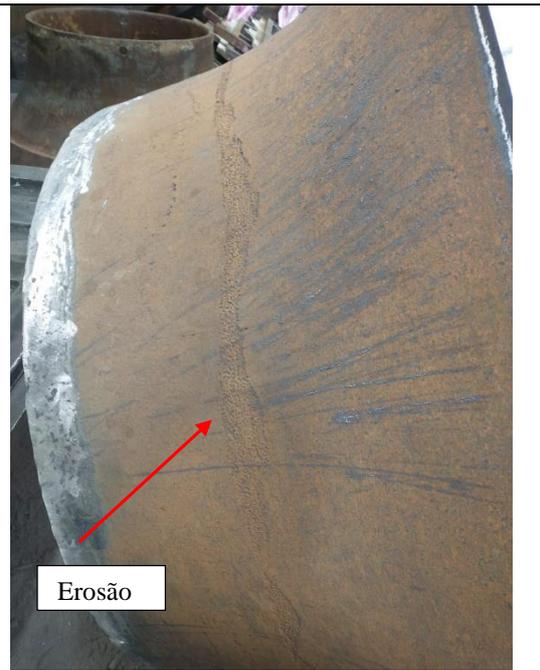


Figura 5.8 – Rugosidade provocada por erosão na peça manto (VDL, 2022)

5.3 Simulação Computacional

Neste item, são analisados os resultados obtidos a partir da simulação computacional realizada utilizando-se o programa Magma licenciado para a Siderúrgica Itabirito. A simulação foi realizada para as peças manto e o revestimento. Os critérios avaliados foram os mesmos para as duas.

5.3.1 Simulação computacional – manto

Foi possível obter resultados de análise quanto a ponto quente, densidade do material, critério de Niyama e tempo de solidificação. Os resultados são apresentados nos tópicos a seguir:

5.3.1.1 Ponto quente

A análise de ponto quente mostra a diferença de temperatura de um ponto para outro da peça com base na comparação do tempo de solidificação. O resultado encontrado é apresentado na Figura 5.9.

É possível notar, a partir das regiões em cor rosa na imagem, o aparecimento de pontos quentes na região central da peça, que são coerentes com a região onde ocorreu a erosão do molde e foi verificada a presença de porosidade.

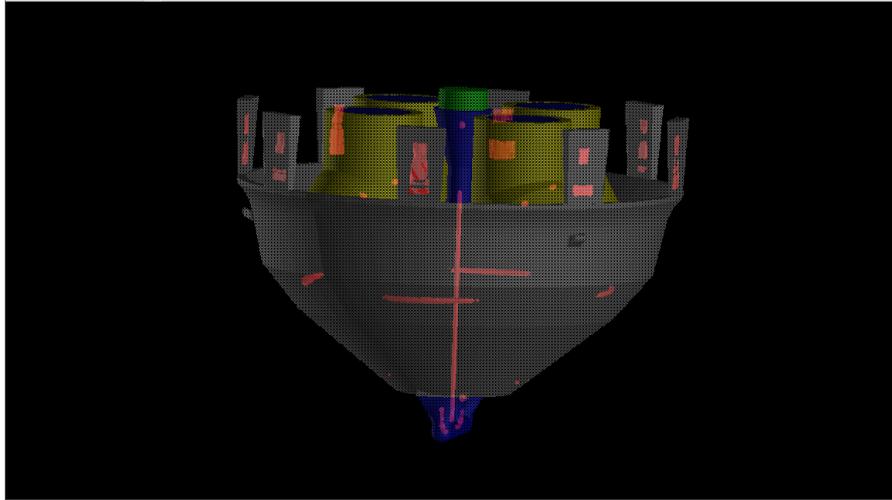


Figura 5.9 – Análise de ponto quente para a peça manto

5.3.1.2 Densidade do material

A partir da análise da densidade do material, é possível prever a influência da contração do metal, também o escoamento do metal líquido no molde durante a solidificação. Esse critério permite prever possíveis formações de macroporosidades ou rechupes. O resultado é apresentado na Figura 5.10 e pode-se observar que a região em amarelo na figura coincide com a região de pontos quentes, confirmando ser uma região crítica para a formação de defeito.

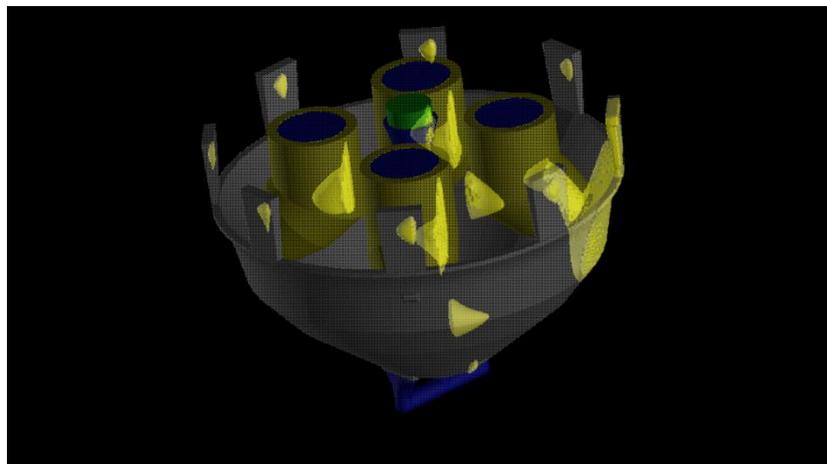


Figura 5.10 – Análise do critério de densidade para a peça manto

5.3.1.3 Critério de Nyiama

O critério de Nyiama é utilizado para localizar possíveis zonas de aparecimento de macroporosidades na peça analisada, sendo baseado na taxa de resfriamento e no gradiente térmico. O resultado da análise é apresentado na Figura 5.11. Os pontos em amarelo na figura corroboram as análises anteriores, mostrando que a região é propensa à formação de defeito.

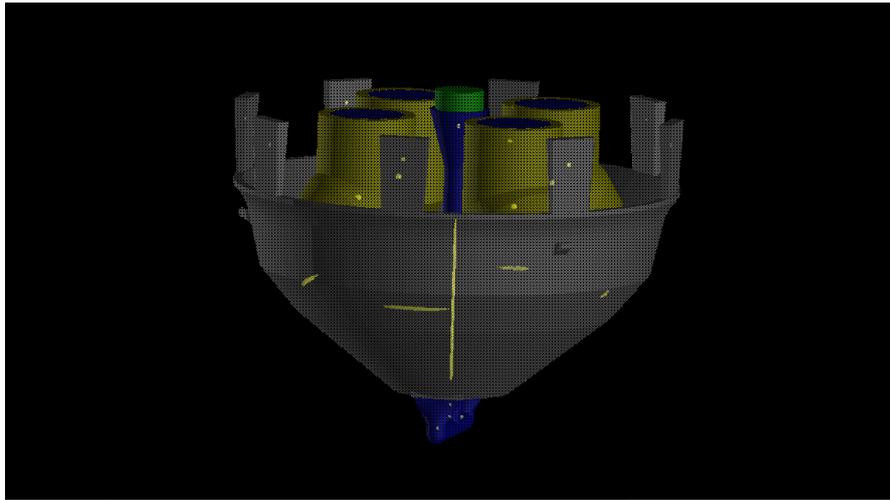


Figura 5.11 – Análise do critério de Niyama para a peça manto

5.3.1.4 Tempo de solidificação

O tempo de solidificação permite ter uma ideia do tempo que a peça analisada leva para solidificar. Esse critério também mostra possíveis locais onde pode ocorrer aprisionamento de metal líquido, causando defeitos de rechupes na peça. O resultado é apresentado pela Figura 5.12. Também, neste, tem-se a mesma região crítica para defeitos na peça.

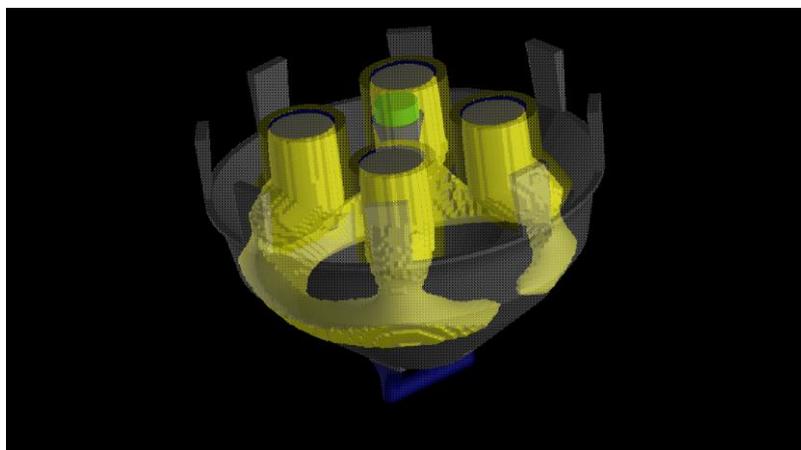


Figura 5.12- Análise do tempo de solidificação para peça manto.

5.3.2 Simulação computacional – revestimento

Do mesmo modo como feito para os mantos, foram realizadas análises de ponto quente, densidade do material, critério de Niyama e o tempo de solidificação.

5.3.2.1 Ponto quente

O resultado da análise, apresentado na Figura 5.13, mostra detalhes do aparecimento de diversos pontos quentes na região central da peça. Esses pontos quentes indicam possível formação de defeitos após solidificação completa do metal líquido como porosidade e rechupe. As regiões apresentadas na simulação correspondem às regiões da peça revestimento com a presença de porosidade, revelada por meio do ensaio de líquido penetrante, como apresentado na Figura 5.5.

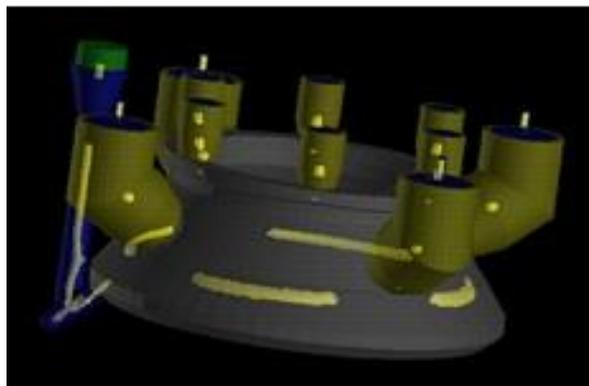


Figura 5.13 – Análise de ponto quente no revestimento

5.3.2.2 Densidade do material

O resultado da análise da densidade do material não previu nenhum tipo de formação de defeito, como pode ser observado na Figura 5.14. Nesse caso a indicação é que ocorreu o escoamento homogêneo do metal líquido no molde.

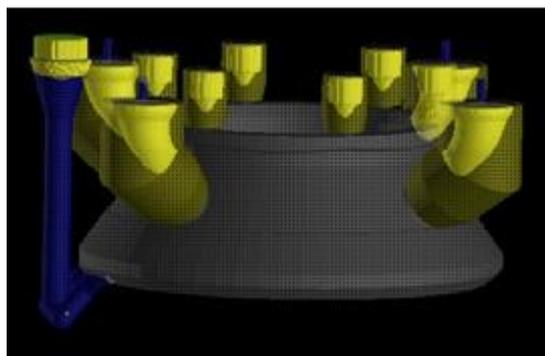


Figura 5.14 – Análise da densidade do material no revestimento

5.3.2.3 Critério de Niyama

Na avaliação da simulação da peça pelo critério de Niyama constatou-se a presença de várias regiões possíveis de formação de macroporosidades, como pode ser observado na Figura 5.15. As regiões destacadas em amarelo coincidem com as regiões da peça com alta concentração de porosidade externa.

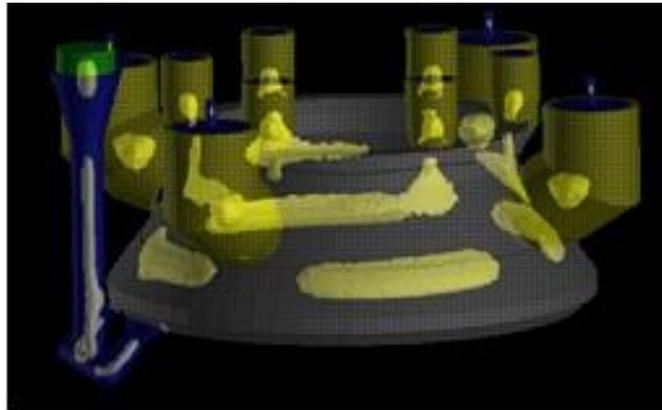


Figura 5.15 – Análise do critério de Niyama do revestimento

5.3.2.4 Tempo de solidificação

De acordo com a análise feita a partir do tempo de solidificação, apresentada na Figura 5.16, o revestimento solidificou de forma homogênea, ou seja, não houve aprisionamento de metal líquido, não indicando formação de rechupes.

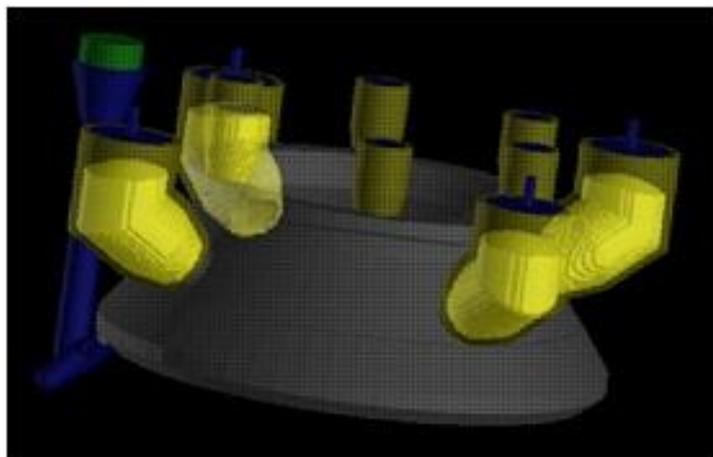


Figura 5.16 – Análise do tempo de solidificação para o revestimento

6 CONCLUSÕES

Nesse trabalho, foi realizado um estudo de caso em parceria com a VDL-Siderúrgica Itabirito, a fim de analisar o aparecimento de defeitos em peças fundidas para britadores. Os estudos do processo utilizado pela empresa, bem como a análise dos defeitos presentes nas peças, são importantes e necessários, para identificar as possíveis causas e ocorrências dos defeitos durante o processo de fundição.

A partir da análise das amostras de areia, tanto via microscopia eletrônica quanto a partir dos resultados de ensaios em laboratório, percebeu-se que não houve interferência das características das areias quanto à formação dos defeitos nas peças. Para a areia nova, a reutilizada e a de cromita, as características como composição química, tamanho de grão, simetria do grão, porcentagem de finos, umidade e resistência à tração, estão dentro do padrão esperado para uma fundição.

Com relação à simulação utilizando o Magma, verificou-se, a partir dos resultados, que as peças tendem a apresentar problemas quanto à porosidade, rechupe e gases. Todos os critérios avaliados apontam para a formação dos defeitos nas mesmas regiões onde os defeitos estão presentes nas peças.

Nesse sentido, sugere-se que seja feita uma revisão geral do sistema de alimentação das peças (canais e massalotes), primeiramente via simulação computacional, e depois em condições normais de produção. Pelos resultados obtidos nesse trabalho, fica claro que é preciso um estudo mais detalhado por parte da empresa para tentar ajustar o projeto das peças, com o objetivo de sanar esses defeitos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS. ASTM A128: Standard Specification for Steel Castings, Austenitic Manganese. ASM International. Ohio Metals Park, 2017. 3p.

ASK CHEMICAL. *Boletim Técnico, Sistema Lino CureTM AA de cura a frio*. Disponível em: <https://www.yumpu.com/pt/document/view/40070706/lino-curea-aa-ask-chemicals>. Acessado em: 02/08/2021.

ANSELMONT, R. E. *Estudo do critério Niyama na formação de porosidade em fundidos de aço com distintos intervalos de solidificação*. 2005, 116p. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

BALDAM R. L.; VIEIRA, E.A. *Fundição: Processos e tecnologias correlatas*. 1. ed. São Paulo: Érica, 2013. 824p./

BENZ, N. e KÄLBERER, T. *Sistemas ligantes de cura a frio e autocura para materiais de moldagem nas fundições modernas*. Casting Plant and Technology, nº 4, p. 13,1985.

CHIAVERINI, V. *Aços para fundição*. In. CHIAVERINI, V. *Aços e Ferros Fundidos*. 6. ed. São Paulo: ABM, 1988.

CIMM. *Defeitos de solidificação*. 2010. Disponível em: <https://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/6751-defeitos-de-solidificacao>. Acesso em: 02/08/21.

FERREIRA, A. *Defeitos em peças fabricadas pelo processo de fundição*. In: WORKSHOP LABMAT DA ÁREA DA FUNDIÇÃO, 2. 2011, Piracicaba, SP.

FUOCO, R.; HOLANDA, A. *Processo de Produção de componentes em aço ao manganês austeníticos do tipo hadfield*. In: 17ª Feira Latino-Americana de Fundição – FENAF e 17º Congresso Latino-Americano de Fundição - CONAF, 17., 2017, São Paulo. Anais...São Paulo: Expo Center Norte, 2017, 17p.

FIGUEREDO, L. S. *Análise de defeito de fundição em componente de ferro fundido nodular obtido por moldagem cold box*. 2019, 59p. Monografia (Trabalho de Conclusão

do Curso de Engenharia de Materiais). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2019. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/12251>. Acessado em: 02/08/2021.

GARCIA, A. *Solidificação: Fundamentos e Aplicações*. 2 ed. Campinas: Editora da Unicamp, 2007. p. 399.

HAVEL, D. *Austenitic Manganese Steel: A Complete Overview*. Columbia Steel Casting Co., Inc, p. 1-19, September, 2017. Disponível em: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiajtzuwcyjAhVwqJUCHeR7DH4QFnoECDIQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.sfsa.org%2Fdoc%2F2017-4.1%2520Columbia%2520%2520Havel.pdf&usg=AOvVaw1-JL6obWxEIzQLXBNrvpYH>. Acessado em: 04/08/2021.

INFOMET. Aços & Ligas/Aços e Ferros Fundidos/ Aços Resistentes ao Desgaste. Disponível em: <https://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=100>. Acessado em: 07/04/2022.

MARIOTTO, C. L. *Areias ligadas quimicamente*. Scribd. 2011. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/59679567/APOSTILA-Areia-Ligada-Quimicamente>. Acessado em: 02/08/2021.

MARQUES, A. I. G. C. *Diagnóstico de um defeito de fundição Aplicabilidade da simulação numérica em FLOWCast para previsão e resolução de defeitos*. 2008. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008.

MORO, N. *Processo de Fabricação: fundição*. Apostila do curso técnico de mecânica industrial do CEFET/SC, 2007. Disponível em: www.norbertocefetsc.pro.br. Acessado em 02/08/2021.

MOREIRA, L. M. *A influência da temperatura de vazamento na geração de defeitos de solidificação em aço fundido*. 2016, 64 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Metalúrgica). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016

ROSSITTI, S. M. *Processos e variáveis de fundição*. Grupo Metal, 1993. Disponível em: <https://docplayer.com.br/7533963-Processos-e-variaveis-de-fundicao.html>. Acessado em 02/08/2021

SANTANA, A. S. *Identificação dos principais defeitos de fundição através da aplicação de ferramentas da qualidade: estudo de caso em uma fundição de peças metálicas*. 2016, 96 p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia de Produção). Centro Universitário Católico de Vitória, Vitória, 2016.

TESLA. *Apostila de Fundição*. Disponível em: <<https://teslaconcursos.com.br/wp-content/uploads/2016/03/Fundicao.pdf>>. Acessado em: 17/08/2021.

VENTURELLI, B. N. *Efeito do refino do tamanho de grão pela adição de Hf nas propriedades mecânicas de tração e impacto do aço Hadfield*. 2019, 151p. Dissertação (Mestrado em Ciência: Área de concentração: Engenharia Metalúrgica e de Materiais). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

VDL. Disponível em: < <http://www.siderurgicaitabirito.com.br/produtos> >. Acessado em: 02/08/2021.

VDL. Relatório VDL 04/02/2022 (Arquivos Internos).