



REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – UEMG

Dissertação de Mestrado



“Rota Tecnológica para o Processamento de Rejeitos de Flotação de Minérios Itabiríticos para Produção de Areias Artificiais de Fundição”



Autor: Guilherme Francisco de Sales Silva

Orientador: Prof. Cláudio Batista Vieira, Dr.

Coorientadora: Prof^a. Maria Aparecida Pinto, Dr^a.

Maio de 2018



REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – UEMG

Guilherme Francisco de Sales Silva

“Rota Tecnológica para o Processamento de Rejeitos de Flotação de Minérios Itabiríticos para Produção de Areias Artificiais de Fundição”

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Cláudio Batista Vieira, Dr.

Coorientadora: Prof^a. Maria Aparecia Pinto, Dr^a.

Ouro Preto, Maio de 2018

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S586r Silva, Guilherme Francisco de Sales.
Rota tecnológica para o processamento de rejeitos de flotação de minérios itabiríticos para produção de areias artificiais de fundição. [manuscrito] / Guilherme Francisco de Sales Silva. - 2018.
89 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Batista Vieira.

Coorientadora: Profa. Dra. Maria Aparecida Pinto.

Dissertação (Mestrado Acadêmico). Universidade Federal de Ouro Preto. Rede Temática em Engenharia de Materiais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais.

Área de Concentração: Processos de Fabricação.

1. Barragens de rejeitos. 2. Areia de fundição. 3. Flotação. 4. Beneficiamento de minério. I. Pinto, Maria Aparecida. II. Vieira, Cláudio Batista. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 621.742.42:622.79

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS UFOP - UEMG



Pós-Graduação em Engenharia de Materiais

Rota Tecnológica para o Processamento de Rejeitos de Flotação de Minérios Itabiríticos para Produção de Areias Artificiais de Fundição

Autor: Guilherme Francisco de Sales Silva

Dissertação defendida e aprovada, em 24 de maio de 2018, pela banca examinadora constituída pelos professores:

Prof. Cláudio Batista Vieira (Doutor) - Orientador
Universidade Federal de Ouro Preto

Prof. Fernando Soares Lameiras (Doutor)
Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear

Prof. Ricardo Augusto Rabelo de Oliveira Morato (Doutor)
Universidade Federal de Ouro Preto

Profª Maria Aparecida Pinto (Doutora) - Coorientadora
Universidade Federal de Ouro Preto

AGRADECIMENTOS

A Deus por sempre me iluminar.

À minha família por sempre acreditar.

À minha esposa pelo amor e apoio.

Ao meu filho por me alegrar.

Aos meus amigos pelo companheirismo.

Ao Professor Cláudio Batista Vieira pela excelente orientação e por todas as oportunidades a mim concedidas.

À Professora Maria Aparecida Pinto pela confiança e apoio em todos os momentos.

Aos colegas do laboratório de caracterização de areias Ricardo Augusto Martins Figueiredo, Sávio José de Oliveira e Leandro Moreira Carneiro pelo auxílio em análises e desenvolvimento do trabalho.

Ao técnico Denílson Pereira de Melo pelos ensaios realizados no laboratório de Fundição.

Aos colegas Márcia Silveira Batista e Djalma Oliveira Santos pela ajuda nos ensaios de processamento.

Aos colegas Leticia Maria Cheloni e Henrique Carvalho Coelho pela ajuda nos ensaios de laboratório.

À colega Larissa Virgínia Queiroz Fagundes pela ajuda na preparação das amostras.

À REDEMAT pela oportunidade de participar do programa de mestrado.

À Haver & Boecker pelo apoio no projeto e por disponibilizar seus equipamentos.

À Samarco Mineração S.A. pelo apoio no projeto e por disponibilizar as amostras, em especial ao Sr. Gil Ribeiro Vilela Neto e a Srta. Alessandra Prata de Almeida.

À CAPES, pelo auxílio através das bolsas.

À FEOP pelo apoio no projeto.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS.....	3
2.1 Objetivo Geral	3
2.2 Objetivos Específicos	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1 Itabirito	4
3.2 Processamento do Minério de Ferro Itabirítico	5
3.3 Geração do Rejeito Arenoso no Processamento do Itabirito.....	8
3.4 Areia de Fundição.....	11
3.4.1 Areia base	12
3.4.2 Produção de areia base.....	15
3.4.3 Aglomerantes	16
3.5. Estudos Existentes Sobre o Aproveitamento do Rejeito Arenoso como Areia de Fundição	17
3.6 Processamento do Rejeito Arenoso para Utilização como Areia de Fundição	21
3.6.1 Desaguamento e deslamagem com hidrociclones	23
3.6.2 Classificação a úmido por peneiramento	24
3.6.3 Lavagem com <i>Hydro Clean</i>	26
3.6.4 Secagem com leito fluidizado.....	28
3.7 Ensaio de Areia de Fundição	30
3.7.1 Ensaio analítico.....	30
3.7.2 Ensaio tecnológico.....	32
3.7.2.1 <i>Compactabilidade</i>	32
3.7.2.2 <i>Resistência à compressão a verde</i>	32
3.7.2.3 <i>Resistência à tração</i>	32
3.7.2.4 <i>Resistência à flexão</i>	33

3.8 Tecnologia Haver & Boecker de uma Planta Móvel de Tratamento de Solos	33
4 METODOLOGIA	37
4.1 Materiais	39
4.2 Ensaio de Caracterização do Rejeito Arenoso Natural e dos seus Produtos.....	40
4.2.1 Análise química por espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX)	40
4.2.2 Análise mineralógica por difratometria de raios X (DRX).....	41
4.2.3 Perda por calcinação	41
4.2.4 Análise granulométrica	41
4.2.5 Análise granuloquímica	42
4.2.6 Umidade.....	42
4.2.7 Permeabilidade.....	43
4.3 Ensaio Piloto de Processamento do Rejeito Arenoso	43
4.3.1 Deslamagem e desaguamento com hidrociclones	43
4.3.2 Classificação a úmido por peneiramento	45
4.3.3 Lavagem com <i>Hydro Clean</i>	47
4.4 Ensaio Tecnológico de Areia de Fundição.....	49
4.4.1 Resistência à tração.....	50
4.4.2 Resistência à flexão	51
4.5 Definição da Rota Tecnológica e Proposição dos Sistemas de Processamento	52
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
5.1 Ensaio de Caracterização do Rejeito Arenoso Natural	53
5.2 Ensaio Piloto de Processamento do Rejeito Arenoso	61
5.2.1 Deslamagem e desaguamento com hidrociclones	61
5.2.2 Classificação a úmido por peneiramento	63
5.2.3 Lavagem com <i>Hydro Clean</i>	66
5.3 Ensaio de Caracterização dos Produtos do Processamento	67
5.4 Ensaio Tecnológico de Areia de Fundição.....	77

5.5 Rota Tecnológica e Sistema de Processamento do Rejeito Arenoso	80
6 CONCLUSÕES.....	83
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	85
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1- Itabirito	4
Figura 3.2- Fluxograma detalhado do processamento mineral do itabirito pela Samarco Mineração S.A.....	6
Figura 3.3- Esquema simplificado do processo de beneficiamento do minério de ferro itabirítico e a geração de rejeitos da Samarco Mineração S.A.	8
Figura 3.4- Curva granulométrica de uma amostra de rejeito arenoso global da Usina 2 da Samarco Mineração S.A.....	10
Figura 3.5- Curva granulométrica da amostra de areia base utilizada pela Siderúrgica Itabirito e da areia base padrão comercializada pela Mineração Jundu.....	14
Figura 3.6- Distribuição granulométrica da amostra de areia base utilizada pela Siderúrgica Itabirito e da areia base padrão comercializada pela Mineração Jundu.....	14
Figura 3.7- (a) Imagem do molde de areia fabricado com areia fina pelo processo resina de cura a frio. (b) Vista frontal da peça de alumínio obtida pelo molde de areia fina pelo processo de cura a frio	18
Figura 3.8- Curva granulométrica das amostras de rejeito arenoso natural, de rejeito arenoso classificado em 150 μ m (100#), de areia base nova da Siderúrgica Itabirito, de areia base de processo da Siderúrgica Itabirito e de areia base padrão da Mineração Jundu.....	20
Figura 3.9- Distribuição granulométrica das amostras de rejeito arenoso natural, de rejeito arenoso classificado em 150 μ m (100#), de areia base nova da Siderúrgica Itabirito, de areia base de processo da Siderúrgica Itabirito e de areia base padrão da Mineração Jundu.....	21
Figura 3.10- Desenho esquemático de um hidrociclone convencional.....	23
Figura 3.11- Peneira vibratória horizontal com movimento linear da Haver & Boecker.	25
Figura 3.12- Equipamento de lavagem <i>Hydro Clean</i> da Haver & Boecker.....	27
Figura 3.13- Visão geral da planta móvel de tratamento de solos da Haver & Boecker.....	34
Figura 3.14- Visão parcial da planta móvel de tratamento de solos da Haver & Boecker...	34
Figura 3.15- Equipamentos da planta móvel de tratamento de solos da Haver.....	35
Figura 3.16- Comparação do solo antes e depois do tratamento, removendo 98% da contaminação.....	35
Figura 4.1- Fluxograma da metodologia da primeira etapa do trabalho.....	37

Figura 4.2- Fluxograma da metodologia da segunda etapa do trabalho.....	38
Figura 4.3- Fluxograma da metodologia da terceira etapa do trabalho.....	38
Figura 4.4- Fluxograma da metodologia da quarta etapa do trabalho.....	39
Figura 4.5- Conjunto de hidrociclonação piloto modelo LBCBHL da marca FLSmidth Krebs.....	45
Figura 4.6- Peneira vibratória horizontal modelo UMD800x1500 fabricada pela empresa Haver & Boecker.....	47
Figura 4.7- <i>Hydro Clean</i> piloto fabricado pela empresa Haver & Boecker.....	49
Figura 4.8- Máquina universal para resistência de areia com acessório para ensaio de resistência à tração e caixa de macho para confecção dos corpos de prova.....	51
Figura 4.9- Máquina universal para resistência de areia com acessório para ensaio de resistência à flexão e caixa de macho para confecção dos corpos de prova.....	52
Figura 5.1- Análise mineralógica por difratometria de raios X da amostra de rejeito arenoso natural RA01.....	54
Figura 5.2- Análise mineralógica por difratometria de raios X da amostra de rejeito arenoso natural RA02.....	55
Figura 5.3- Curva granulométrica das amostras de rejeito arenoso natural RA01 e RA02.	56
Figura 5.4- Distribuição granulométrica das amostras de rejeito arenoso natural RA01 e RA02.....	56
Figura 5.5- Comparativo da curva granulométrica das amostras de rejeito arenoso natural RA01 e RA02, e da amostra de rejeito arenoso (AM01)	57
Figura 5.6- Comparativo da distribuição granulométrica das amostras de rejeito arenoso natural RA01 e RA02, e da amostra de rejeito arenoso (AM01)	58
Figura 5.7- Saídas de <i>underflow</i> e <i>overflow</i> do conjunto de hidrociclonação piloto modelo LBCBHL durante o ensaio de deslamagem e desaguamento do rejeito arenoso RA01.....	63
Figura 5.8- Visão superior da peneira vibratória durante a classificação do rejeito arenoso RA02.....	65
Figura 5.9- Visão da descarga da peneira com a areia classificada sendo depositada no <i>big bag</i>	65
Figura 5.10- Ensaio de lavagem do produto D no <i>Hydro Clean</i> piloto.....	66
Figura 5.11- Análise mineralógica por difratometria de raios X da amostra do produto D.....	69

Figura 5.12- Análise mineralógica por difratometria de raios X da amostra do produto E.....	69
Figura 5.13- Curva granulométrica das amostras dos produtos A e B.....	71
Figura 5.14- Distribuição granulométrica das amostras dos produtos A e B.....	71
Figura 5.15- Curva granulométrica das amostras dos produtos C, D e E.....	72
Figura 5.16- Distribuição granulométrica das amostras dos produtos C, D e E.....	72
Figura 5.17- Comparativo da curva granulométrica das amostras dos produtos D e E, e da amostra de rejeito arenoso processada (AM02)	74
Figura 5.18- Comparativo da distribuição granulométrica das amostras dos produtos D e E, e da amostra de rejeito arenoso processada (AM02)	74
Figura 5.19- Resistência à tração em função do tempo dos produtos D e E.....	78
Figura 5.20- Resistência à flexão em função do tempo dos produtos D e E.....	78
Figura 5.21- Comparativo da resistência à tração em função do tempo dos produtos D e E, e do rejeito arenoso processado AM02.....	79
Figura 5.22- Comparativo da resistência à flexão em função do tempo dos produtos D e E, e do rejeito arenoso processado AM02.....	79
Figura 5.23- Rota tecnológica para fabricação de areia de fundição por meio do processamento do rejeito arenoso.....	80
Figura 5.24- Sistema fixo de processamento com capacidade de produção de 20t/h de areia de fundição produzida a partir do rejeito arenosos natural.....	81
Figura 5.25- Sistema móvel de processamento com capacidade de produção de 10t/h de areia de fundição produzida a partir do rejeito arenosos natural.....	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1- Mineralogia dos diferentes tipos de composição dos itabiritos encontrados no Quadrilátero Ferrífero	5
Tabela 3.2 - Análise granulométrica de uma amostra de rejeito arenoso global da Usina 2 da Samarco Mineração S. A.....	9
Tabela 3.3 - Classificação da areia pelo módulo de finura.....	31
Tabela 4.1 – Planejamento experimental utilizado para definição da melhor curva de partição para separação em 400# com hidrociclone com diâmetro de 2”.....	44
Tabela 4.2 – Planejamento experimental utilizado para definição da melhor curva de partição para separação em 400# com hidrociclone com diâmetro de 4”.....	44
Tabela 4.3 – Planejamento experimental utilizado para definição da melhor aceleração para a separação em 150# com peneiras vibratórias.....	46
Tabela 4.4 – Planejamento experimental utilizado para definição da melhor taxa de alimentação da polpa de rejeito arenoso sobre a peneira.....	47
Tabela 4.5 – Planejamento experimental utilizado para definição da melhor taxa de alimentação da polpa de rejeito arenoso sobre a peneira.....	48
Tabela 4.6 – Planejamento experimental do ensaio de resistência à tração.....	50
Tabela 4.7 – Planejamento experimental do ensaio de resistência à tração.....	51
Tabela 5.1 – Análise química das amostras de rejeito arenoso por fluorescência de raios X.....	53
Tabela 5.2 – Resultados do ensaio de perda por calcinação dos rejeitos arenosos naturais RA01 e RA02.....	55
Tabela 5.3 – Módulo de finura, classificação da areia em relação ao módulo de finura e teor de finos dos rejeitos arenosos naturais RA01 e RA02.....	58
Tabela 5.4 – Análise granulométrica da amostra de rejeito arenoso RA01.....	59
Tabela 5.5 – Análise granulométrica da amostra de rejeito arenoso RA02.....	60
Tabela 5.6 – Resultados dos ensaios para definição da melhor curva de partição para separação em 400# com hidrociclone com diâmetro de 2”.....	61
Tabela 5.7 – Resultados dos ensaios para definição da melhor curva de partição para separação em 400# com hidrociclone com diâmetro de 4”.....	62
Tabela 5.8 – Resultados dos ensaios para definição da melhor aceleração para a separação em 150# com peneiras vibratórias.....	63

Tabela 5.9 - Resultados da qualidade de peneiramento em função da taxa de alimentação da polpa de rejeito arenoso sobre a peneira.....	64
Tabela 5.10 – Resultados dos ensaios para definição do tempo de lavagem no <i>Hydro Clean</i>	66
Tabela 5.11 – Análise química das amostras dos produtos A, B, C, D e E por fluorescência de raios X.....	67
Tabela 5.12 – Resultados do ensaio de perda por calcinação dos produtos A, B, C, D e E.....	70
Tabela 5.13 – Módulo de finura, classificação da areia em relação ao módulo de finura e teor de finos dos produtos A, B, C, D e E.....	75
Tabela 5.14 – Análise granuloquímica da amostra do produto A.....	76
Tabela 5.15 – Análise granuloquímica da amostra do produto B.....	76
Tabela 5.16 – Resultados dos ensaios de umidade e permeabilidade dos produtos D e E..	77

LISTA DE NOTAÇÕES

- **Siglas e abreviações:**

ABIFA	Associação Brasileira de Fundição
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFS	<i>American Foundry Society</i>
BIF	<i>Banded Iron Formation</i>
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CEMP	Comissão de Estudos de Matérias Primas
DRX	Difratometria de raios X
FEOP	Fundação Educativa de Rádio e Televisão Ouro Preto
FRX	Fluorescência de raios X
Nanolab	Laboratório de nanotecnologia
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PPC	Perda por calcinação
REDEMAT	Rede Temática em Engenharia de Materiais
ROM	<i>Run of mine</i>
UEMG	Universidade Estadual de Minas Gerais
UFOP	Universidade Federal de Ouro Preto
HC	Composto de hidrogênio e de carbono

- **Símbolos:**

θ	Ângulo de difração
----------	--------------------

RESUMO

Os rejeitos gerados no processamento do minério de ferro itabirítico silicoso e sua disposição em barragens de contenção constituem um dos principais problemas ambientais e econômicos das mineradoras brasileiras. Existem poucos trabalhos na literatura envolvendo estudos sobre o aproveitamento do rejeito de flotação de minérios itabiríticos silicosos como areia base de fundição. Nesse contexto, é realizado um estudo para definição de uma rota tecnológica para o processamento de rejeitos arenosos oriundos da flotação de minérios itabiríticos silicosos da Samarco Mineração S.A. para a produção de areia silicosa úmida para fundição. Foram realizados ensaios piloto de deslamagem, desaguamento, classificação via úmida com peneiras vibratórias e lavagem de alta pressão com água por meio de equipamento *Hydro Clean*. Os rejeitos arenosos utilizados no processamento e os produtos dos processamentos foram caracterizados química, física e granulometricamente. Como os produtos do peneiramento e da lavagem apresentaram as melhores características analíticas, foram realizados ensaios tecnológicos utilizando corpos de prova padronizados para areia de fundição. Foram realizados ensaios de resistência à tração e resistência à flexão utilizando o processo de areia de cura a frio com resina fenólica-uretânica para preparação dos corpos de prova. Os resultados dos ensaios de caracterização e de processamento em planta piloto mostraram que é tecnicamente viável o processamento do rejeito arenoso para a obtenção de areia base de fundição com boas características, utilizando as etapas de deslamagem, desaguamento, peneiramento e lavagem. Com os resultados definiu-se uma rota tecnológica para a produção de areia úmida de fundição por meio do beneficiamento do rejeito arenoso. Foram propostos dois sistemas de processamento para a produção da areia úmida de fundição, um fixo com capacidade de produção de 20t/h e um móvel com capacidade de produção de 10t/h.

Palavras chave: Rejeito arenoso, Areias de Fundição, Processamento, Hidrociclonagem, Peneiramento, Lavagem.

ABSTRACT

The tailings generated in the processing of itabirite iron ore and their disposal in containment dams are one of the main environmental and economic problems of Brazilian mining companies. There are few researches in the literature involving studies on the use of flotation tailing of itabirite ore as foundry sand. In this context, a study was carried out to define a technological route for processing of sandy tailings from flotation of itabirite minerals from Samarco Mineração S.A. for the production of wet siliceous foundry sand. Were performed pilot tests of desliming and dewatering, wet classification with vibrating screens, high pressure washing with water using Hydro Clean equipment. The sandy tailings used in processing and their products were characterized chemically, physically and granulometrically. As the sieving and washing products presented the best analytical characteristics were carried out technological tests using standard samples for foundry sand manufactured by them. Tensile strength and flexural strength tests were carried out with cold cure sand with phenolic-urethane resin. The results of the characterization and processing trials in the pilot plant showed that it is technically feasible the processing of the sandy tailings to obtain the foundry sand with good characteristics, using the steps of desliming, dewatering, sieving and washing. With the results were defined a technological route for the production of wet foundry sand by processing of the sandy tailings. Two processing systems were proposed for the production of wet foundry sand, one fixed with a production capacity of 20t/h and a mobile with a production capacity of 10t/h.

Key words: Sandy tailings, Foundry Sand, Processing, Hydrocycloning, Screening, Washing.

1 INTRODUÇÃO

No processo de beneficiamento do minério de ferro itabirítico silicoso da Samarco Mineração S.A., além do concentrado de ferro, são gerados dois tipos de rejeitos, o rejeito obtido na etapa de deslamagem, conhecido como rejeito argiloso ou lama, e o rejeito obtido na etapa de flotação, conhecido como rejeito arenoso. O rejeito argiloso apresenta granulometria muito fina, com 85% do material passante na peneira de 45 μ m (325#) e é composto basicamente por alumínio silicatos (caulinita e muscovita), óxidos de ferro (hematita, magnetita e goethita) e sílica. O rejeito arenoso apresenta granulometria fina com 90% do material passante na peneira de 150 μ m (100#) e é composto basicamente por sílica (75% a 85%) e óxidos de ferro (10% a 15% de Fe). Ao final do processo esses rejeitos são depositados separadamente em barragens de rejeito.

A disposição dos rejeitos em barragens de contenção de rejeitos configura situação de grande risco, podendo ocorrer o seu rompimento e causar vários impactos ambientais, além de requerer altos investimentos para sua construção e manutenção. Diante deste cenário surgiu a necessidade de desenvolvimento de novas formas de disposição e de aproveitamento dos rejeitos, visando maximizar a utilização dos mesmos e seguir os conceitos da economia circular.

Existem vários estudos e pesquisas realizados sobre o aproveitamento dos rejeitos argilosos e arenosos gerados no processamento do minério de ferro itabirítico como matéria-prima para outros setores industriais. Para o rejeito arenoso os estudos propõem seu aproveitamento nas indústrias de construção civil, cerâmicas, pavimentação, fundição, entre outros. O foco desse trabalho foi no aproveitamento do rejeito arenoso como areia base em processos de moldagem para fundição.

A areia base é o principal insumo utilizado no processo de confecção de machos e moldes de areia para a fundição de peças metálicas. Ela deve apresentar características refratárias, distribuição de forma e tamanho das partículas adequadas, composição química uniforme e ter compatibilidade com o aglomerante.

Oliveira (2016) e Figueiredo (2017) realizaram estudos de caracterização analítica e tecnológica aplicando o rejeito arenoso da Samarco Mineração S.A. como areia base em processos de moldagem para fundição. De acordo com os seus resultados, dificilmente será possível a utilização do rejeito arenoso *in natura* como areia base, mas o rejeito arenoso

processado demonstrou propriedades analíticas e tecnológicas que o qualificam para utilização como areia base em processos de moldagem para fundição.

O processamento do rejeito arenoso natural é realizado de acordo com as características necessárias para sua aplicação final, podendo envolver etapas como classificação granulométrica, lavagem, desaguamento, separação magnética, secagem, lixiviação entre outras. Para aplicação como areia base de fundição as características necessárias são a estreita distribuição granulométrica, alta permeabilidade, baixo teor de finos e alta porcentagem de sílica.

Os trabalhos envolvendo o estudo de técnicas do processamento do rejeito arenoso são escassos na literatura. Alguns autores como Tolentino (2010), que realizou as operações de separação magnética e lixiviação ácida do rejeito arenoso, e Martins (2016) que realizou as operações de deslamagem, separação magnética, lixiviação e fusão alcalina, estão entre os trabalhos que tratam esse assunto. Mas existem poucos estudos sobre a viabilidade técnica do processamento dos rejeitos e sobre possíveis rotas industriais para o processamento do mesmo.

Diante disso, essa pesquisa visa definir uma rota tecnológica para o processamento de rejeitos arenosos oriundos da flotação de minérios itabiríticos para produção de areia base para processos de moldagem para fundição, além de propor um sistema fixo e um sistema móvel de processamento do rejeito arenoso. Neste estudo não foi contemplada a etapa final de secagem da areia silicosa úmida.

2 OBJETIVOS

Neste capítulo serão apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho.

2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é definir uma rota tecnológica para o processamento de rejeitos de flotação de minérios itabiríticos silicosos para a produção de areias artificiais úmidas de fundição.

2.2 Objetivos Específicos

Enumeram-se os seguintes objetivos específicos deste trabalho:

- Realizar a caracterização química, física e granulométrica dos rejeitos arenosos naturais utilizados para os ensaios piloto de processamento;
- Realizar ensaios piloto de deslamagem e desaguamento do rejeito arenoso natural por meio de hidrociclones;
- Realizar ensaios piloto de separação granulométrica a úmido do rejeito arenoso natural por meio de peneiras vibratórias;
- Realizar ensaios piloto de lavagem de alta pressão com água do rejeito arenoso classificado por meio de equipamento chamado *Hydro Clean*;
- Realizar a caracterização química, física e granulométrica do rejeito arenoso deslamado e desaguado, do rejeito arenoso classificado e do rejeito arenoso classificado e lavado;
- Realizar ensaios tecnológicos para avaliar a resistência à tração e resistência à flexão em corpos de prova padronizados para areia de fundição fabricados a partir do rejeito arenoso classificado e seco, e do rejeito arenoso classificado, lavado e seco;
- Propor um sistema fixo e um sistema móvel de processamento para a produção de areias artificiais úmidas de fundição a partir do rejeito arenoso estudado.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentado uma revisão bibliográfica sobre o rejeito arenoso, as areias de fundição, as etapas de processamento que podem ser aplicadas para obtenção da areia de fundição e os ensaios tecnológicos para areias de fundição.

3.1 Itabirito

Os itabiritos são formações ferríferas metamórficas e fortemente oxidadas que apresentam descontinuamente corpos de minério de alto teor de ferro, de morfologia mais ou menos lenticular e dimensões variáveis, desde alguns decímetros até centenas de metros (ESCHWEGE, 1944). Este tipo de formação recebe o nome de itabirito apenas no Brasil e é conhecido internacionalmente como formação ferrífera bandada (*Banded Iron Formation - BIF*) (FREIRE, 2012).

O itabirito é uma rocha onde ocorrem intercalações de bandas constituídas por minerais óxidos de ferro (hematita, magnetita e goethita) e por outros minerais (quartzo, dolomita, tremolita, etc.) com teor máximo de ferro em torno de 64% (ROSIÈRE et al., 1993). A Figura 3.1 mostra um exemplo de itabirito caracterizado pela alternância de camadas constituídas por quartzo (bandas claras) e óxidos de ferro (bandas escuras).



Figura 3.1- Itabirito (MACHADO, 2017)

A sequência de itabiritos no Quadrilátero Ferrífero é relativamente monótona, diferentemente do que ocorre nas outras bacias, sendo hematita o óxido predominante sob diferentes formas (martita, hematita granoblástica e especularita) formadas em diferentes gerações e com clara relação com o grau de metamorfismo e deformação. O mineral de ganga predominante é o quartzo além de dolomita e anfibólios que permitem a definição dos três tipos

composicionais principais: quartzoitabirito, itabirito dolomítico e itabirito anfíbolítico (ROSIÈRE et al., 2001).

A Tabela 3.1 mostra a mineralogia dos diferentes tipos de composição dos itabiritos encontrados no Quadrilátero Ferrífero.

Tabela 3.1 - Mineralogia dos diferentes tipos de composição dos itabiritos encontrados no Quadrilátero Ferrífero.

Tipo do Itabirito	Principais componentes mineralógicos
Itabirito Comum	Hematita, martita, kenomagnetita, quartzo
Itabirito Dolomítico	Martita, hematita, kenomagnetita dolomita ferroana
Itabirito Anfíbolítico	Martita, hematita, kenomagnetita, maghemita, grunerita-cumingtonita, tremolita, actinolita, quartzo

Fonte: ROSIÈRE & CHEMALE (2000)

3.2 Processamento do Minério de Ferro Itabirítico

O beneficiamento do minério de ferro visa separar a parte útil (concentrado de ferro) do que não é utilizado (quartzo). Nesse processo são modificadas a granulometria, a concentração relativa das espécies minerais presentes e a forma, contudo, sem modificar a identidade química ou física dos minerais (LUZ et al., 2010).

O processo de concentração mineral exige três condições básicas: a liberação das fases constituintes do minério, a existência de uma propriedade diferenciadora dos minerais e a separabilidade dinâmica (GAUDIN, 1939).

Pelo fato de apresentar o minério de ferro combinado com o quartzo, o itabirito requer exploração em várias etapas, visando a concentração do mineral de interesse. Após a lavra, inicia-se o processo de beneficiamento do minério, que consiste nas seguintes etapas (DUTRA, 2008):

- Fragmentação ou cominuição - Processo que visa reduzir o tamanho de partícula do minério, dividida em duas etapas: britagem e moagem;
- Classificação - Processo de separação das partículas com base em suas características físicas, como tamanho e densidade. Esse processo é usualmente dividido em peneiramento, ciclonagem e classificação por espirais;

- Deslamagem - Nessa etapa são separadas as partículas finas e ultrafinas do minério, sendo utilizado a ciclonação;
- Concentração - Processo que tem por objetivo recuperar os minerais de interesse contidos no minério na forma mais concentrada possível. Pode ser feita por separação manual, separação gravimétrica, separação por meio denso, separação magnética, separação eletrostática e flotação.
- Desaguamento - Nessa etapa remove-se grande parte da água contida no concentrado ou no rejeito. Podem ser utilizadas peneiras desaguadoras, filtragem ou espessamento.

A Figura 3.2 apresenta um fluxograma detalhado do processamento mineral do itabirito empregado pela Samarco Mineração S.A.

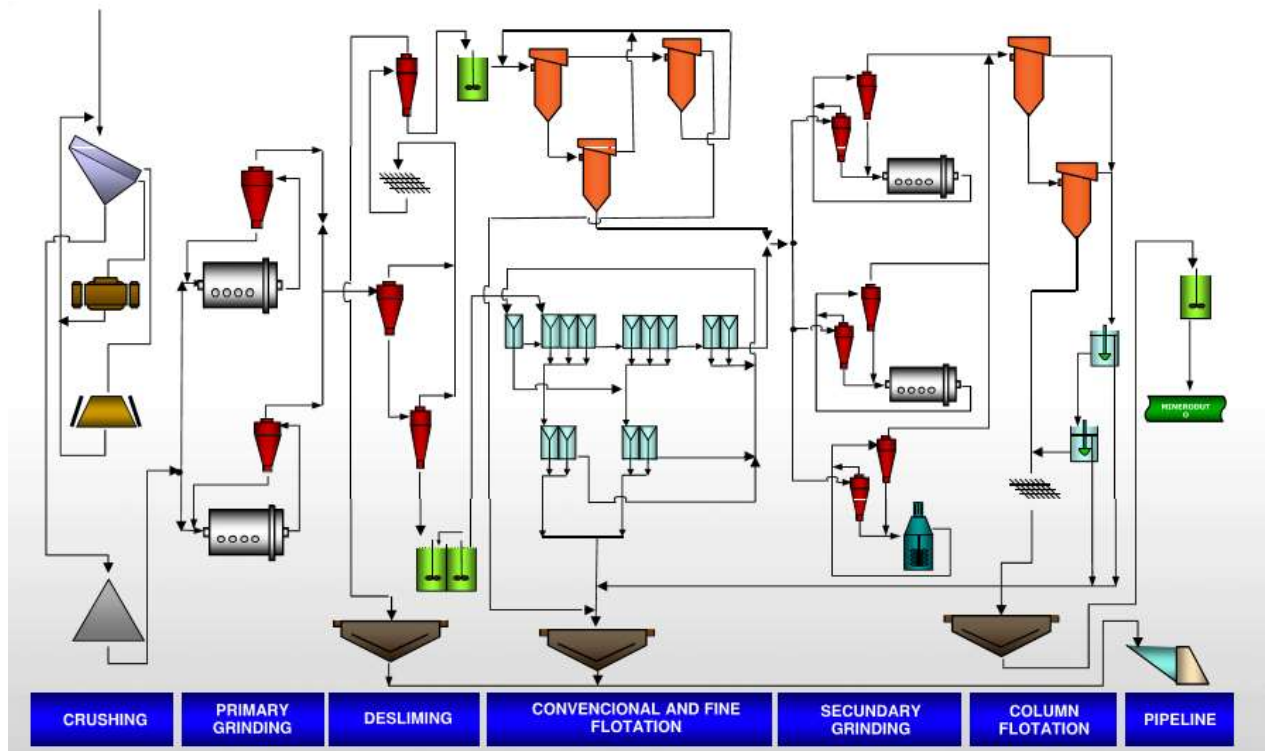


Figura 3.2- Fluxograma detalhado do processamento mineral do itabirito pela Samarco Mineração S.A. (SAMARCO, 2012).

Como apresentado no fluxograma, o minério de ferro itabirítico lavrado na mina, também conhecido como ROM (*Run of mine*), é transportado até uma instalação onde são realizados os processos de britagem e peneiramento, podendo ser a seco ou a úmido. A britagem tem como objetivo reduzir as partículas de minério de 150mm para 12,5mm e o peneiramento

tem como objetivo classificar somente as partículas abaixo de 12,5mm para alimentação dos estágios subsequentes (TOLENTINO, 2010).

O minério britado e peneirado passa inicialmente pela etapa de pré-moagem a úmido, sendo alimentado em dois moinhos de bolas. Em seguida o minério vai para etapa de moagem primária, sendo alimentado em quatro moinhos de bolas. Esses moinhos operam em circuito fechado reverso com baterias de hidrociclones. O *overflow* dos hidrociclones é o produto das etapas de pré-moagem e moagem primária e tem aproximadamente 12% das partículas com granulometria superior a 149 μ m (TOLENTINO, 2010).

Depois das etapas de pré-moagem e moagem primária o minério é deslamado em três estágios de hidrociclonagem. A deslamagem tem como objetivo remover as partículas ultrafinas de minério, tornando-o minério adequado à flotação. Conseqüentemente, nesse processo é gerado o rejeito argiloso, também conhecido como lama (VALADÃO & ARAÚJO, 2007).

O *overflow* dos hidrociclones é considerado a lama final, que é depositada nas barragens de rejeito. O *underflow* dos hidrociclones seguem para o circuito de grossos e de finos com etapas de flotação convencional ou flotação fina dependendo da granulométrica do material classificado.

A etapa seguinte é a flotação. O objetivo da flotação é realizar a separação do mineral-minério (hematita, magnetita e goethita) dos minerais de ganga (quartzo, caulinita e gibsitita) por características de superfície. Do processo de flotação obtêm-se dois produtos, o concentrado, composto principalmente pelo óxido de ferro, e o rejeito arenoso, composto principalmente por sílica (VALADÃO & ARAÚJO, 2007).

O concentrado primário, produto dos circuitos de flotação convencional e flotação fina, passa novamente em baterias de hidrociclones. O *overflow* dessa hidrociclonagem vai para etapa de flotação em coluna. Já o *underflow* passa por uma moagem secundária que opera em circuito fechado reverso com outra bateria de hidrociclones, ao final esse concentrado também vai para flotação em coluna (TOLENTINO, 2010).

No processo de flotação em coluna obtêm-se o concentrado final que é espessado em dois espessadores, passando a ter aproximadamente 71% de sólidos. Outro produto da flotação em coluna é o rejeito arenoso (TOLENTINO, 2010).

3.3 Geração do Rejeito Arenoso no Processamento do Itabirito

Como dito no item anterior, o processo de beneficiamento do minério de ferro itabirítico gera dois tipos de rejeitos: o rejeito argiloso gerado na etapa de deslamagem e o rejeito arenoso gerado na etapa de flotação.

Em média, 40% da massa de minério beneficiado correspondem aos rejeitos argilosos e arenosos, sendo que 25% corresponde ao rejeito argiloso e 75% corresponde ao rejeito arenoso.

A Figura 3.3 apresenta um esquema simplificado do processo de beneficiamento do minério de ferro itabirítico e a geração de rejeitos da Samarco Mineração S.A.

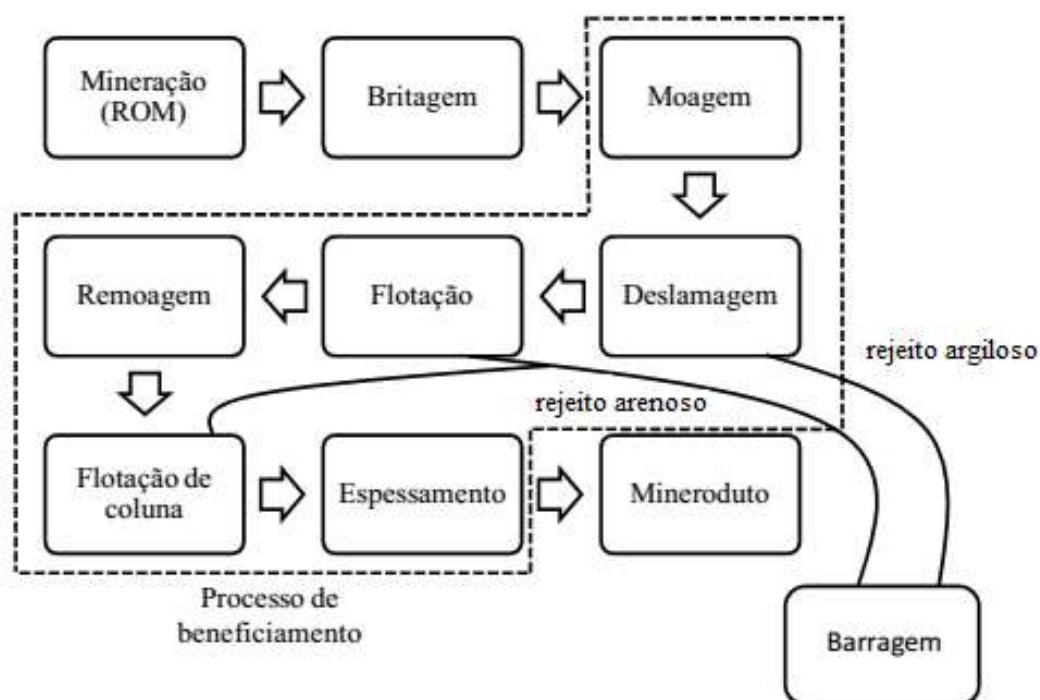


Figura 3.3- Esquema simplificado do processo de beneficiamento do minério de ferro itabirítico e a geração de rejeitos da Samarco Mineração S.A. (SAMARCO, 2009).

O rejeito argiloso (lama) apresenta granulometria muito fina, com 85% do material passante na peneira de 45 μ m (325#) e é composto basicamente por alumínio silicatos (caulinita e muscovita), óxido de ferro (hematita, magnetita e goethita) e sílica. Segundo Tavares (2012) após a etapa de espessamento, o rejeito argiloso chega a aproximadamente 35% de sólidos.

No processo de beneficiamento do minério itabirítico da Samarco Mineração S.A., descrito no item anterior, são gerados três tipos de rejeitos arenosos: o rejeito arenoso do circuito de grossos, o rejeito arenoso do circuito de finos e o rejeito arenoso da flotação em

colunas. Ao final do processo os três tipos de rejeito arenoso são misturados e geram o rejeito arenoso global.

O rejeito arenoso do circuito de grossos é gerado na etapa de flotação mecânica e apresenta granulometria com 83% do material passante na peneira de 150 μ m (100#) e é composto basicamente por sílica (85% a 87%) e óxidos de ferro (8% a 10% de Fe).

O rejeito arenoso do circuito de finos é gerado na etapa de flotação de finos e apresenta granulometria com 82% do material passante na peneira de 45 μ m (325#) e é composto basicamente por sílica (72% a 76%) e óxidos de ferro (14% a 18% de Fe).

O rejeito arenoso da flotação em colunas é gerado na etapa de flotação em colunas e apresenta granulometria com 60% do material passante na peneira de 45 μ m (325#) e é composto basicamente por sílica (76% a 80%) e óxidos de ferro (12% a 16% de Fe).

O rejeito arenoso global apresenta granulometria fina, com 90% do material passante na peneira de 150 μ m (100#) e é composto basicamente por sílica (75% a 85%) e óxidos de ferro (10% a 15% de Fe). O rejeito arenoso global chega a etapa de espessamento com aproximadamente 40% de sólidos, é espessado e chega a aproximadamente 50% sólidos.

A Tabela 3.2 mostra uma análise granuloquímica de uma amostra de rejeito arenoso global da Usina 2 da Samarco Mineração S.A.

Tabela 3.2 - Análise granuloquímica de uma amostra de rejeito arenoso global da Usina 2 da Samarco Mineração S. A. (SAMARCO, 2012).

Peneiramento		Rejeito Arenoso Natural				Teores(%)					
Malha	Abertura	Massa	% Ret.	% Ret.	% Pas-	Fe	SiO2	Al2O3	P	PPC	MnO2
Tyler	micrometros	(g)	Simplex	Acumul.	sante						
20	840	0,00	0,00	0,00	100,00						
28	595	0,00	0,00	0,00	100,00						
35	420	0,01	0,02	0,02	99,98						
48	297	0,06	0,09	0,11	99,89						
65	210	0,71	1,11	1,22	98,78						
100	149	5,38	8,39	9,61	90,39	2,46	96,32	0,07	0,003	0,08	0,01
150	105	9,94	15,50	25,11	74,89	2,53	96,27	0,06	0,003	0,04	0,01
200	74	12,81	19,98	45,10	54,90	3,24	95,20	0,07	0,004	0,07	0,01
270	53	10,16	15,84	60,94	39,06	4,71	92,99	0,09	0,006	0,10	0,07
325	44	3,31	5,16	66,10	33,90	7,46	88,94	0,15	0,008	0,22	0,01
400	37	2,52	3,93	70,03	29,97	11,03	83,74	0,21	0,010	0,21	0,05
<400	<37	19,21	29,97	100,00	0,00	38,30	43,13	0,61	0,032	1,40	0,03
				Cabeça Calculada		14,32	78,74	0,24	0,01	0,48	0,03
Massa Total		64,1		Cabeça Analisada		14,23	78,91	0,23	0,01	0,48	0,01

A Figura 3.4 apresenta a curva granulométrica da amostra de rejeito arenoso global para o qual foi realizado a análise granuloquímica.

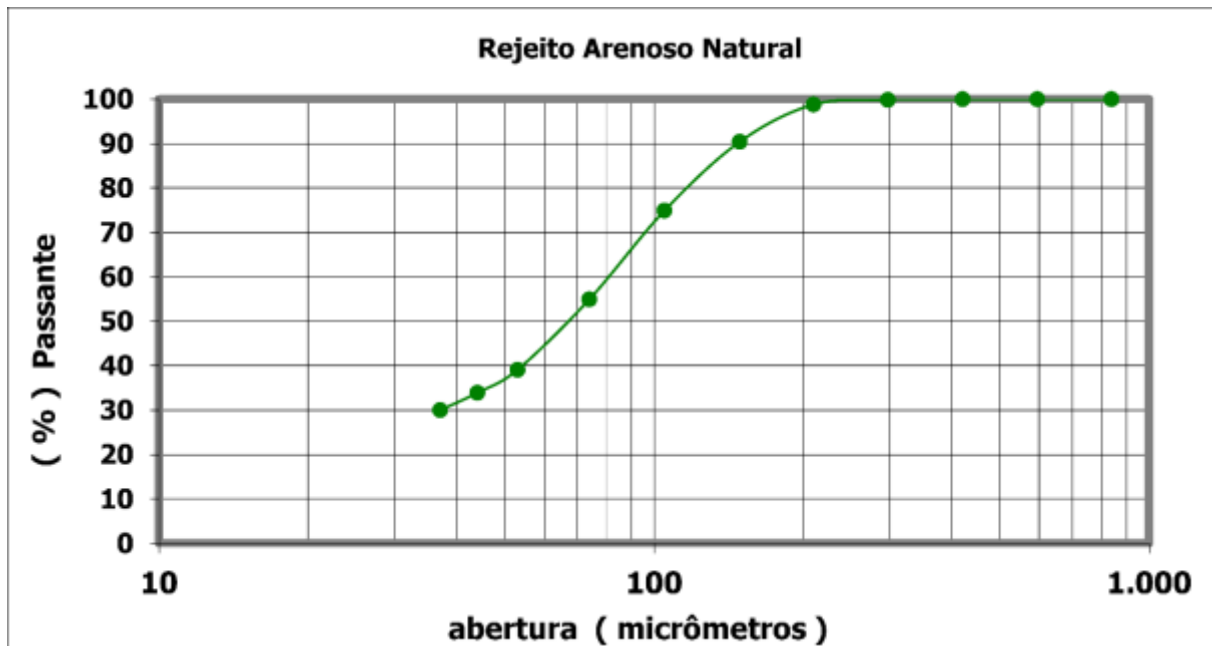


Figura 3.4- Curva granulométrica de uma amostra de rejeito arenoso global da Usina 2 da Samarco Mineração S.A. (SAMARCO, 2012).

A partir da análise granuloquímica apresentada foi possível observar que a medida que a granulometria do rejeito arenoso aumenta, a porcentagem de sílica aumenta e a porcentagem de ferro diminui.

Para a faixa granulométrica menor que 37 μ m (400#) a amostra tem composição química de 38% de ferro e 43% de sílica. Essa faixa representa aproximadamente 30% da massa total da amostra.

Para a faixa granulométrica entre 37 μ m (400#) e 105 μ m (150#) a amostra tem composição química de 3% a 11% de ferro e de 95% a 84% de sílica. Essa faixa representa aproximadamente 45% da massa total da amostra

Para a faixa granulométrica acima de 105 μ m (150#) a amostra tem composição química de 96% de sílica e 2,5% de ferro. Essa faixa representa aproximadamente 25% da massa total da amostra. O alto teor de sílica dessa faixa granulométrica possibilita a sua utilização como um produto para outros seguimentos industriais como a areia de fundição.

Ao final do processo de beneficiamento do minério itabirítico da Samarco Mineração S.A. o rejeito arenoso global e o rejeito argiloso são depositados separadamente em locais específicos nas barragens de rejeito.

Segundo Samarco (2015), a massa de rejeitos gerada no concentrador de Germano da empresa em 2014, foi de 21,978 milhões de toneladas, com aproximadamente 17 milhões de toneladas de rejeito arenoso e 5 milhões de toneladas de rejeito argiloso (lama). Os rejeitos arenosos e argilosos produzidos pela Samarco Mineração S.A. são classificados como resíduos do tipo classe IIB - não perigosos e inertes.

Segundo Nociti (2011), as características dos rejeitos variam de acordo com o material lavrado e com os processos empregados no beneficiamento do mesmo, por isso, se rejeitos gerados em plantas diferentes forem comparados, é bem comum encontrarmos rejeitos arenosos e rejeito argilosos de diferentes características granulométricas e químicas.

A geração de grandes volumes de rejeito os torna de difícil destinação. A deposição inadequada dos rejeitos pode causar vários impactos ambientais (SILVA, 2006). No Brasil, essa grande produção de rejeitos vem provocando, cada vez mais, problemas ao meio ambiente, e uma alternativa adotada pelas mineradoras é a disposição dos rejeitos em barragens de contenção de rejeitos (GUMIERE et al., 1995).

Mas as disposições dos rejeitos em barragens de contenção de rejeitos configuram situações de risco, como rompimento da barragem ou instabilidade geotécnica, além de requerer altos investimentos para sua construção e manutenção. Por isso é necessário o desenvolvimento de políticas de gestão de rejeitos com o intuito de maximizar o aproveitamento dos mesmos, reduzir os impactos ambientais e minimizar os custos financeiros (FREIRE, 2012; MARTINS, 2016).

Diante do apresentado em relação às características físicas e químicas do rejeito arenoso, das quantidades anuais produzidas e da necessidade de desenvolvimento de novas formas de seu aproveitamento, a utilização do rejeito arenoso como matéria-prima para obtenção da areia de fundição se torna muito interessante.

3.4 Areia de Fundição

A areia de fundição é utilizada para confecção de moldes e machos de fundição, chamados mais comumente como moldes refratários. Ela é definida como um material

heterogêneo composto essencialmente por um elemento granular refratário, a areia base, e um elemento aglomerante, podendo ser mineral ou orgânico (FERNANDES, 2006).

A areia de fundição tem a função de resistir às solicitações térmicas, mecânicas e químicas que os moldes são submetidos, desde o vazamento do metal fundido até a solidificação das peças (LUZ e LINS, 2005).

Segundo Figueiredo (2017), as areias de fundição podem ser classificadas de acordo com diversos critérios, como a sua origem (natural, sintética e semissintética), o seu estado de uso (nova ou usada), a distribuição granulométrica, o teor de argila, a sua aplicação na moldagem, entre outros.

O comportamento e as características das areias de fundição dependem da distribuição granulométrica, do tipo de aglomerante utilizado, da forma dos grãos e da textura, do módulo de finura, entre outros (REGO, 2005).

3.4.1 Areia base

O principal insumo no processo de confecção de moldes de areia para a fundição é a areia base. A areia base é um material refratário granular não consolidado constituído basicamente de grãos de sílica, porém pode haver outros elementos que dependendo da aplicação da areia podem prejudicar seu desempenho. Os elementos mais comuns encontrados na areia base são: sílica, alumina, óxido de ferro, feldspato, mica, zirconita, calcita, dolomita, entre outros (MUCHON, 1988).

Segundo Figueiredo (2017) a areia base é fundamental para o sucesso do processo de fundição, pois a qualidade final da peça fundida é influenciada diretamente pela areia base utilizada para confecção do molde. A escolha do tipo de areia, vai de acordo com as suas características e com as características do metal ou liga a ser fundida.

Para um bom desempenho da areia, alguns fatores são requeridos, como apresentar estabilidade térmica e dimensional a elevadas temperaturas, distribuição granulométrica estreita, grãos arredondados, módulo de finura e teor de finos adequado, composição química uniforme, ter compatibilidade com o aglomerante e não apresentar reatividade química na presença de metais líquidos (MUCHON, 1988; LUZ e LINS, 2005; FERREIRA, 2007).

As principais areias de base utilizadas com aglomerantes são as areias de sílica, de cromita, de zirconita e de olivina, sendo que, a areia de sílica é a mais utilizada nos processos de moldagem e macharia devido ao seu baixo custo, sua abundância na natureza, a facilidade de extração e beneficiamento, e sua qualidade obtida nos moldes e nas peças fundidas (ROMANUS, 1991; FERNADES, 2006).

Figueiredo (2017) caracterizou duas areias silicosas utilizadas como areia base em processos de fundição, sendo elas uma amostra de areia base utilizada pela Siderúrgica Itabirito em seu processo produtivo e uma amostra de areia base padrão comercializada pela Mineração Jundu. Com o trabalho foi possível observar algumas características das areias base como composição química, mineralogia, forma dos grãos, distribuição granulométrica, módulo de finura e teor de finos, umidade, permeabilidade entre outros.

A areia base utilizada pela Siderúrgica Itabirito em seu processo produtivo apresentou composição química de 98,30% de sílica e 0,19% de óxido de ferro. Mineralogia composta por quartzo (SiO_2) e óxido de ferro (Fe_2O_3). Forma dos grãos é subangular e estrutura dos grãos compactos. Distribuição granulométrica é estreita, módulo de finura de 50,47 AFS com classificação de areia média e teor de finos de 2,97%. Umidade é de 0,03%, permeabilidade de 161 AFS e perda por calcinação de 0,01% (FIGUEIREDO, 2017).

A areia base padrão comercializada pela Mineração Jundu apresentou composição química de 98,81% de sílica e 0,65% de óxido de ferro. Mineralogia composta por quartzo (SiO_2) e óxido de ferro (Fe_2O_3). Forma dos grãos é subangular e estrutura dos grãos compactos. Distribuição granulométrica é estreita, módulo de finura de 67,27 AFS com classificação de areia média e teor de finos de 0,64%. Umidade é de 0,02%, permeabilidade de 103 AFS e perda por calcinação de 0,07% (FIGUEIREDO, 2017).

As areias têm composição química, mineralogia, formatos e estruturas dos grãos muito próximos. Elas se diferem na distribuição granulométrica, módulo de finura e teor de finos, a amostra de areia base padrão da Mineração Jundu tem distribuição granulométrica mais estreita, módulo de finura maior e teor de finos menor.

A Figura 3.5 apresenta a curva granulométrica da amostra de areia base utilizada pela Siderúrgica Itabirito e da amostra de areia base padrão comercializada pela Mineração Jundu.

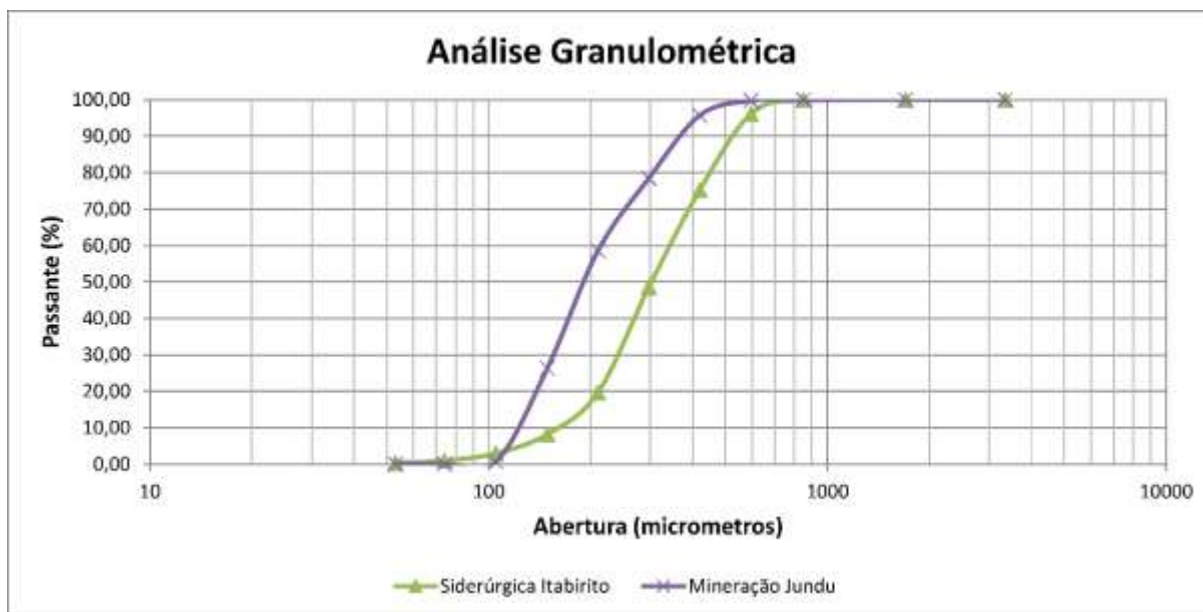


Figura 3.5- Curva granulométrica da amostra de areia base utilizada pela Siderúrgica Itabirito e da areia base padrão comercializada pela Mineração Jundu (FIGUEIREDO, 2017).

A Figura 3.6 apresenta a distribuição granulométrica das amostras de areia base utilizada pela Siderúrgica Itabirito e da amostra de areia base padrão comercializada pela Mineração Jundu.

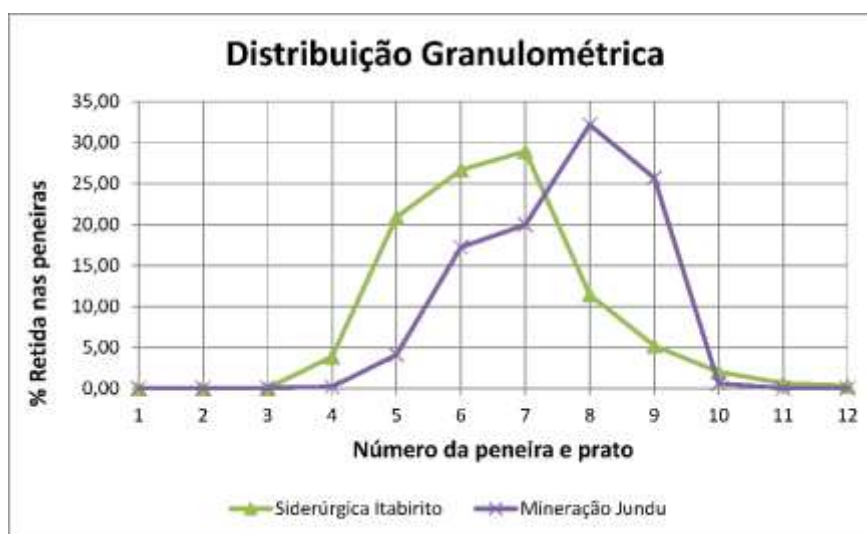


Figura 3.6- Distribuição granulométrica da amostra de areia base utilizada pela Siderúrgica Itabirito e da areia base padrão comercializada pela Mineração Jundu (FIGUEIREDO, 2017).

A partir da análise granulométrica apresentada foi possível observar que aproximadamente 97% da massa total amostras analisadas têm granulometria acima de 105µm (150#). A amostra de areia base da Siderúrgica Itabirito possui aproximadamente 77% da massa total com granulometria concentrada entre 420µm (35#) e 210µm (65#). Já a amostra de areia

base padrão da Mineração Jundu possui aproximadamente 78% da massa total com granulometria entre 210 μ m (65#) e 105 μ m (150#).

3.4.2 Produção de areia base

A areia base de fundição pode ser obtida através da desagregação ou cominuição de rochas ricas em quartzo. Elas podem ser encontradas em jazidas, rios, lagos e praias. No Brasil a maior produção de areias para indústria de fundição é oriunda de jazidas, onde são extraídas por métodos de lavra convencionais (FERNANDES, 2006).

Segundo o Anuário Mineral (DNPN, 2010), a produção total de areia industrial beneficiada no Brasil, em 2009, foi de 4,7 milhões de toneladas, com o preço em torno de R\$32,00 a tonelada. O setor de fundição é responsável pelo consumo de 24,77% do total de areia industrial beneficiada produzida, aproximadamente 1,2 milhões de toneladas.

Ainda segundo o Anuário Mineral (DNPN, 2010), o estado de São Paulo é de longe o maior produtor (70,4%), seguido por Santa Catarina (16%), Pernambuco (5,4%) e Minas Gerais (2,3%). O estado de São Paulo também é o maior consumidor (55,82%), seguido por Santa Catarina (13,18%) e Minas Gerais (10,07%).

A maioria das empresas produtoras de areia industrial estão localizadas no estado de São Paulo, mais precisamente nos municípios de Descalvado, Analândia, São Simão, São Pedro e Rio Claro. A principal empresa produtora de areia de fundição no Brasil é a Mineração Jundu, atuando nos municípios de Descalvado e Analândia (SP) e Viamão (RS) (LUZ e LINS, 2005).

Também existem empresas lavrando e beneficiando areia industrial no estado de Santa Catarina, mais precisamente nos municípios de Araquari, Jaguaruna e Imbituba. Grande parte da areia industrial produzida nesse estado abastece a indústria de fundição localizada em Joinville (LUZ e LINS, 2005).

Nos municípios de Descalvado e Analândia as empresas adotam o método de lavra a céu aberto, em bancadas de 10 metros e taludes de 45° a 80°, utilizando escavadeiras e escarificador para a extração da areia. Esta, quando proveniente de bancadas inferiores, onde está intensamente lixiviada, destina-se à produção de areias para indústria de vidro, cerâmica e química. A areia extraída da bancada superior, onde não ocorreu a lixiviação, é destinada a produção de areias industriais para fundição (LUZ e LINS, 2005).

Após a extração na frente de lavra, as areias são carregadas e transportadas para as unidades de beneficiamento onde são processadas de acordo com as especificações requeridas. O processamento típico consiste de lavagem e classificação, atrição, peneiramento e secagem (LUZ e LINS, 2005).

A lavagem e a classificação por hidrociclones, a deslamagem, visam a remoção da fração síltico-argilosa, prejudicial ao processo de produção de vidros especiais e moldes de fundição por conter alumínio, ferro e álcalis. A atrição é feita para limpar a superfície das partículas. O peneiramento realiza a classificação em frações grossas e finas, para obtenção de um material com a distribuição granulométrica desejada. A secagem é realizada para reduzir a porcentagem de umidade da areia (LUZ e LINS, 2005).

Na Mineração Jundu o beneficiamento da areia consiste nas seguintes etapas: formação da polpa, desagregação em *trommel*, atrição, deslamagem em hidrociclones, peneiramento, desaguamento do produto em hidrociclones e secagem do produto final em leito fluidizado. A Mineração Jundu também utiliza, como métodos de purificação complementares, a flotação, em Analândia e a separação magnética, em Descalvado (LUZ e LINS, 2005).

3.4.3 Aglomerantes

Os aglomerantes são produtos adicionados à areia que promovem coesão entre os grãos da areia base, permitindo a sua aplicação na fundição para confecção de moldes. A natureza do aglomerante vai depender do processo escolhido para a moldagem da areia (FERNANDES, 2006).

Segundo Figueiredo (2017) para areia verde o aglomerante utilizado é a bentonita, que se apresenta em porcentagens variando entre 5% a 7%. Outros processos utilizam diferentes tipos de aglomerantes como resinas líquidas com catalisadores ou o silicato de sódio.

A bentonita é o tipo de argila mais utilizada como aglomerante no processo de moldagem em areia e é composta por montmorilonita ou silicato de alumina hidratado. Trata-se de um material tixotrópico, ou seja, suas placas separam-se quando em contato com a água, formando um gel coloidal. Esse gel diminui a distância entre as partículas de areia aumentando a intensidade das forças de Van der Waals e, em consequência, confere resistência mecânica ao molde de areia (PIWONKA, 1988).

Segundo Figueiredo (2017) as resinas sintéticas são amplamente utilizadas e são obtidas pela condensação e polimerização de duas ou mais substâncias, com aspecto resinoso e propriedades mecânicas que possibilitam diversas aplicações. Alguns exemplos de resinas utilizadas em vários processos são: a resina fenólica-uretânica, utilizada para o processo de cura a frio e para o processo de caixa frio; as resinas fenólica-alcalina e furânica, utilizadas no processo de cura a frio, dentre outros.

Para moldagens de areias aglomeradas com silicato de sódio são utilizados catalizadores gasosos ou líquidos. Comparando com ligantes orgânicos, os moldes aglomerados com silicato de sódio apresentam menores valores de resistência. O silicato de sódio é adicionado à areia base numa proporção que varia, geralmente, de 3% a 5% e seu processo de cura mais comum é realizado pela gasagem com gás CO₂ no molde (COUTINHO NETO, 2004).

3.5. Estudos Existentes Sobre o Aproveitamento do Rejeito Arenoso como Areia de Fundição

Existem poucos estudos e pesquisas realizados sobre o aproveitamento dos rejeitos arenosos do processo de beneficiamento do minério de ferro itabirítico como areia base em processos de moldagem para fundição. Oliveira (2016) e Figueiredo (2017) realizaram estudos de caracterização analítica e tecnológica aplicando o rejeito arenoso da Samarco Mineração S.A. como areia base.

Oliveira (2016) obteve por meio de classificação granulométrica do rejeito arenoso gerado no processo de beneficiamento do minério de ferro itabirítico dois tipos de areias. A areia chamada de areia fina é o material retido resultante da classificação granulométrica do rejeito arenoso na malha de 150 μ m (100#). A areia chamada de areia muito fina é o material retido resultante da classificação granulométrica do rejeito arenoso na malha de 74 μ m (200#).

As referidas areias passaram por caracterizações científicas e tecnológicas por meio de ensaios comumente adotados na indústria de fundição. Ao final, com o intuito de avaliar o comportamento das areias quando submetidas a todas as etapas do processo de fundição e de todos os esforços que estarão sujeitas foi realizada a fundição de peças de alumínio utilizando as areias.

Pela caracterização científica dos materiais, foi possível observar que algumas propriedades como umidade, perda ao fogo e potencial hidrogeniônico não prejudicaram o

desempenho das areias, porém, na análise granulométrica percebeu-se a grande quantidade de finos contidos na areia muito fina, finos estes que, geralmente, não são desejáveis para uma areia de fundição, pois diminuem a permeabilidade e provocam um maior consumo de aglomerante para que se obtenha um mesmo valor de resistência de uma areia normalmente usada em fundição.

Segundo o autor a etapa de moldagem e produção das peças de alumínio pelo processo de moldagem com resina de cura a frio foi um sucesso. As areias proporcionaram a fabricação de moldes adequados para a fundição de peças em alumínio. As peças produzidas não apresentaram nenhum defeito em decorrência de deficiências das areias como matéria-prima para moldagem.

O mesmo comportamento foi observado utilizando o processo de moldagem com as areias aglomeradas com silicato de sódio, as areias produziram moldes e peças com qualidade, o que comprova a eficácia das areias para a moldagem.

O autor enfatizou que é preciso considerar que a produção de peças com alumínio impõe esforços menores ao molde devido às menores temperaturas de fusão do metal e temperatura de vazamento em torno de 800°C. Por fim, foi concluído pelos resultados obtidos no trabalho que ambas as areias podem ser utilizadas como areia de fundição na produção de peças de alumínio, originando produtos de qualidade.

A Figura 3.7 apresenta o molde de areia fabricado com areia fina pelo processo de resina de cura a frio e a peça de alumínio obtida pelo molde.



Figura 3.7- (a) Imagem do molde de areia fabricado com areia fina pelo processo resina de cura a frio. (b) Vista frontal da peça de alumínio obtida pelo molde de areia fina pelo processo de cura a frio (OLIVEIRA, 2016).

Figueiredo (2017) realizou um estudo de caracterização analítica e tecnológica de diferentes amostras de areias silicosas e de rejeitos de mineração para uso dos rejeitos como areia base nos processos de fundição.

Foram utilizados cinco tipos distintos de materiais como areia base para realização dos ensaios de caracterização. Duas amostras de rejeito arenoso da Samarco Mineração S.A., sendo uma amostra composta pelo rejeito arenoso natural (AM01) e outra amostra composta por material retido resultante da classificação granulométrica do rejeito arenoso na malha de 150 μ m (100#) (AM02). Duas amostras de areia base utilizadas no processo de fundição da Siderúrgica Itabirito, sendo uma amostra de areia nova e outra de areia de processo, além de uma amostra de areia base padrão comercializada pela Mineração Jundu.

Os ensaios foram realizados variando-se os teores padrões de aglomerantes e também com a realização de *blends* entre as areias. As areias passaram por caracterizações analíticas e tecnológicas por meio de ensaios comumente adotados na indústria de fundição. Nesses ensaios foram simulados os processos de areia verde, areia de cura a frio com resina fenólica-uretânia e areia com silicato de sódio/CO₂.

Em relação à caracterização analítica o rejeito arenoso classificado em 150 μ m (100#) (AM02) obteve resultados de análise granulométrica e permeabilidade semelhantes à areia base padrão comercializada pela Mineração Jundu. Em alguns parâmetros como morfologia e estrutura dos grãos, o rejeito arenoso classificado (AM02) não oferece as características desejadas, porém, suas demais propriedades ainda o qualificam para sua utilização como areia base de fundição.

Segundo o autor o rejeito arenoso natural (AM01) apresentou características como, por exemplo, ampla distribuição granulométrica, baixa permeabilidade e elevado teor de finos que tornam inadequada sua utilização como areia de fundição.

Em relação à caracterização tecnológica, o rejeito arenoso natural (AM01) apresentou resultados não satisfatórios para os três processos estudados, não sendo recomendado a sua utilização como areia de fundição.

Em relação à caracterização tecnológica e do ponto de vista da análise estatística o rejeito arenoso classificado (AM02) apresentou resultados inferiores em relação à areia base padrão da Mineração Jundu para os processos de areia verde e areia de cura a frio. Para os

ensaios em areia com silicato de sódio/CO₂ os resultados do rejeito arenoso classificado foram estatisticamente semelhantes aos da areia base padrão da Mineração Jundu.

Para chegar a valores próximos aos da areia base padrão da Mineração Jundu e a areia base da Siderúrgica Itabirito, a melhor alternativa encontrada para o processo de areia de cura a frio foi o aumento do teor dos aglomerantes. A variação dos teores dos aglomerantes em relação ao valor de referência no processo de areia de cura a frio mostrou-se uma maneira eficaz de viabilizar o uso industrial do rejeito arenoso classificado.

Por fim o autor conclui que em relação às amostras de rejeito de mineração estudadas, o rejeito arenoso classificado (AM02) foi o que apresentou o melhor potencial de uso como areia base para a indústria de fundição, sendo uma alternativa às areias atualmente utilizadas, principalmente no processo de silicato de sódio/CO₂ e quando ocorre a variação dos teores dos aglomerantes no processo de areia de cura a frio.

A Figura 3.8 apresenta a curva granulométrica das amostras de rejeito arenoso natural, de rejeito arenoso classificado em 150µm (100#), de areia base nova da Siderúrgica Itabirito, de areia base de processo da Siderúrgica Itabirito e de areia base padrão da Mineração Jundu.

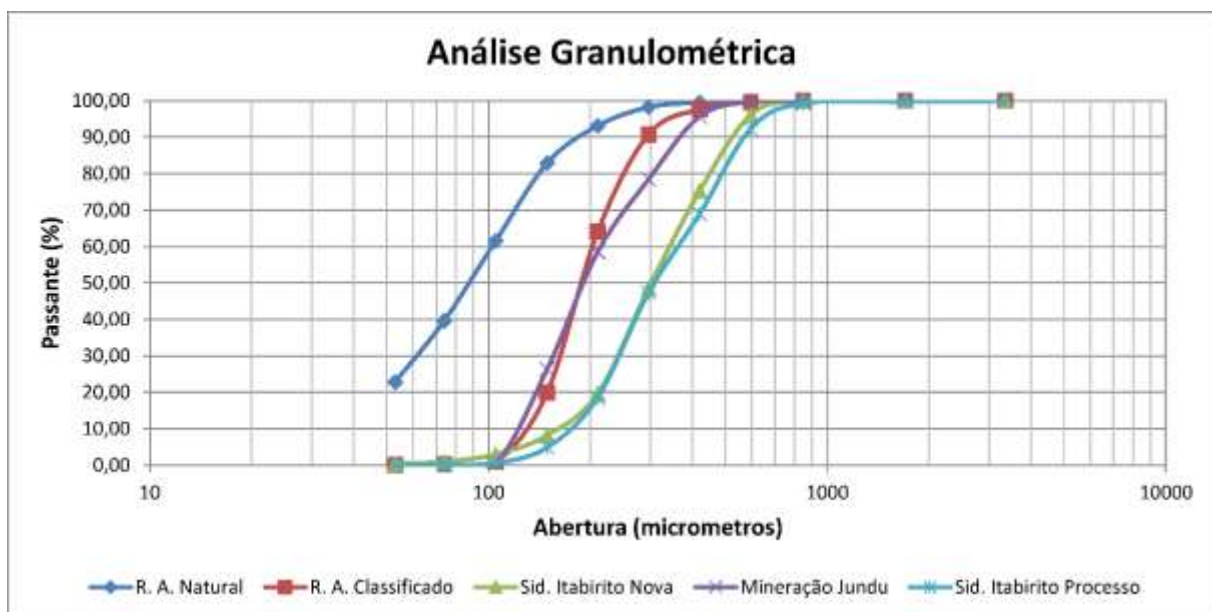


Figura 3.8- Curva granulométrica das amostras de rejeito arenoso natural, de rejeito arenoso classificado em 150µm (100#), de areia base nova da Siderúrgica Itabirito, de areia base de processo da Siderúrgica Itabirito e de areia base padrão da Mineração Jundu (FIGUEIREDO, 2016).

A Figura 3.9 apresenta a distribuição granulométrica das amostras de rejeito arenoso natural, de rejeito arenoso classificado em 150µm (100#), de areia base nova da Siderúrgica

Itabirito, de areia base de processo da Siderúrgica Itabirito e de areia base padrão da Mineração Jundu.

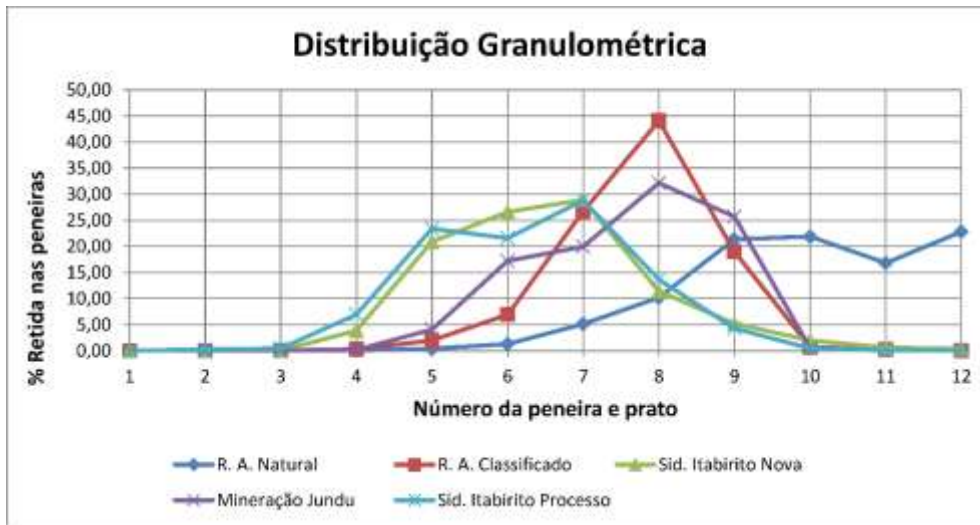


Figura 3.9- Distribuição granulométrica das amostras de rejeito arenoso natural, de rejeito arenoso classificado em 150 μ m (100#), de areia base nova da Siderúrgica Itabirito, de areia base de processo da Siderúrgica Itabirito e de areia base padrão da Mineração Jundu (FIGUEIREDO, 2016).

De acordo com os resultados e conclusões de Oliveira (2016) e Figueiredo (2017), dificilmente será possível a utilização do rejeito arenoso *in natura* como areia base, mas o rejeito arenoso processado demonstrou propriedades analíticas e tecnológicas que o qualificam para utilização como areia base em processos de moldagem para fundição.

As amostras de rejeitos arenosos processadas, utilizadas nos trabalhos descritos acima, foram preparadas em laboratório pela Fundação Gorceix, por isso sabe-se que é possível obter amostras de rejeito arenoso com granulometrias acima de 150 μ m (100#), 105 μ m (150#) ou 74 μ m (200#). Mas ainda, não existem estudos sobre a viabilidade técnica do processamento industrial dos rejeitos arenosos para utilização como areia base de fundição.

3.6 Processamento do Rejeito Arenoso para Utilização como Areia de Fundição

Como apresentados nos itens anteriores, para o aproveitamento do rejeito arenoso como areia base para processos de fundição será necessário a realização de seu processamento. Devido às características do rejeito arenoso esse processamento pode ser dividido nas seguintes etapas: desaguamento, deslamagem, peneiramento, lavagem e secagem.

O rejeito arenoso é disposto nas barragens de rejeito após a etapa de espessamento e tem aproximadamente 50% de sólidos, por isso, é necessário a etapa de desaguamento, para aumentar a porcentagem de sólidos.

Com a análise da curva granulométrica do rejeito arenoso é possível perceber que aproximadamente 30% da massa é composto por partículas com granulometria abaixo de $37\mu\text{m}$ (400#), por isso, é necessário a etapa de deslamagem, para reduzir a porcentagem de partículas abaixo de $37\mu\text{m}$ (400#).

A partir dos resultados dos estudos de Oliveira (2016) e Figueiredo (2017) utilizando rejeitos arenosos processados como areia base de fundição foi possível definir que o rejeito deve ser peneirado utilizando tela de $150\mu\text{m}$ (100#), garantindo que pelo menos 95% da massa de rejeito peneirado seja de partículas acima de $105\mu\text{m}$ (150#).

O peneiramento tem como objetivo classificar o rejeito arenoso natural produzindo um material com granulometria semelhante a areia base de fundição, obedecendo aos critérios de estreita distribuição granulométrica, módulo de finura adequado e baixo teor de finos.

O peneiramento deve ser a úmido pois o rejeito arenoso está em forma de polpa. Para realizar o peneiramento a seco, seria necessário secar todo o volume de rejeito arenoso natural, para no fim, obter como produto apenas 20% da massa alimentada, o que torna inviável secagem antes do peneiramento.

Mesmo após o peneiramento acredita-se que ainda possam existir partículas abaixo de $150\mu\text{m}$ (100#) no rejeito arenoso processado, localizadas principalmente na superfície das partículas mais grossas, dessa forma, é necessário a etapa de lavagem a alta pressão. Outro motivo para a realização da lavagem do rejeito arenoso é a remoção de resíduos do processo de flotação durante o tratamento do minério de ferro que podem influenciar no processo de fundição.

As areias base devem apresentar umidades muito baixas, abaixo de 0,1%, para sua perfeita aplicação no processo de fundição, por isso, é necessário realizar a secagem do rejeito arenoso ao final do seu processamento.

As etapas de desaguamento e deslamagem podem ser realizadas pelo mesmo equipamento, no caso os hidrociclones. A etapa de peneiramento pode ser realizada por peneiras

vibratórias. A etapa de lavagem pode ser realizada pelo lavador de alta pressão. A etapa de secagem pode ser realizada por secadores de leito fluidizado.

Este item apresenta resumidamente as etapas de beneficiamento mineral que o rejeito arenoso deve ser submetido durante seu processamento.

3.6.1 Desaguamento e deslamagem com hidrociclones

Os hidrociclones são classificadores que possuem como princípio básico de separação a sedimentação centrífuga. O seu desempenho é influenciado pelas propriedades físicas dos sólidos classificados e da polpa alimentada, por suas dimensões e pelas variáveis operacionais (LUZ et al., 2010).

Segundo Luz et al. (2010) o hidrociclone convencional consiste em uma câmara cilíndrico-cônica com uma entrada tangencial e duas saídas. A polpa é alimentada sob pressão no equipamento pela entrada tangencial localizada na parte superior da câmara cilíndrica, como resultado da entrada de material tangencial é criado um redemoinho no seu interior.

A classificação dá origem a dois produtos: o *underflow* e o *overflow*. O *underflow* é constituído pelas partículas mais grossas e mais densas que são arremessadas as paredes do hidrociclone e são descarregadas na saída inferior, denominada *ápex*. O *overflow* é constituído das partes mais finas, menos densas e grande parte da fase líquida que são dirigidas para o centro do hidrociclone e saem pela saída superior, denominada *vórtex* (LUZ et al., 2010).

A Figura 3.10 apresenta um desenho esquemático de um hidrociclone convencional.

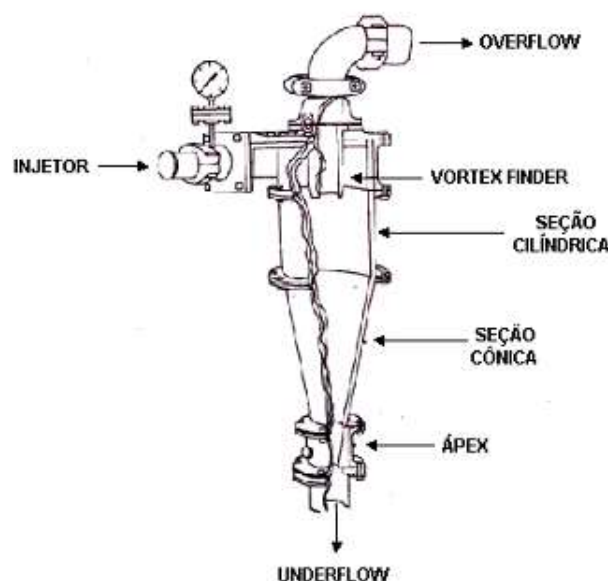


Figura 3.10- Desenho esquemático de um hidrociclone convencional (LUZ et al., 2010).

As principais aplicações dos hidrociclones são: espessamento (desaguamento), deslamagem, classificação, classificação seletiva e pré-concentração. Neste trabalho o hidrociclone terá como função o espessamento (desaguamento) e a deslamagem do rejeito arenoso, com objetivo de obter no *overflow* um produto abaixo de $37\mu\text{m}$ (400#) misturado com grande volume de água, e no *underflow* um produto acima de $37\mu\text{m}$ (400#) com pequeno volume de água.

Destacam-se as seguintes vantagens apresentadas pelos hidrociclones: capacidade elevada em relação ao seu volume e à área ocupada; controle operacional relativamente simples e custo de investimento pequeno. E as seguintes desvantagens: se o material for abrasivo, custo relativamente elevado de manutenção das bombas e dos hidrociclones e não possibilidade de realizar ajustes para diminuir os efeitos de oscilações da alimentação. (LUZ et al., 2010)

As seguintes características e condições de operação influenciam no desempenho do equipamento: o diâmetro do hidrociclone, a área de abertura de entrada, o diâmetro do *vórtex*, a altura da seção cilíndrica, o diâmetro do *ápex*, o ângulo da parte cônica, a pressão, percentagem de sólidos (LUZ et al., 2010).

O diâmetro do hidrociclone define a capacidade e o diâmetro de corte do equipamento. Os diâmetros do *vórtex* e do *ápex* possibilitam a regulagem da capacidade e do diâmetro de corte. Aumentando a pressão diminui o diâmetro do corte. Aumentando a percentagem de sólidos na polpa aumenta o diâmetro de corte até um determinado limite e depois, diminui. (LUZ et al., 2010).

Os hidrociclones são amplamente aplicados em processos de beneficiamento de minérios e são de fácil aquisição no meio industrial. Existem diversos tipos de hidrociclones no mercado, podendo variar de tamanhos, produção, materiais de confecção, entre outros. A FL Smidth é uma das referências nessa área.

A Mineração Jundu é uma das empresas que possui em seu processo de beneficiamento de areia hidrociclones que realizam a atividade de desaguamento e deslamagem.

3.6.2 Classificação a úmido por peneiramento

Segundo Chaves & Peres (2012) o peneiramento é a operação de separação de um material em duas ou mais frações de tamanhos diferentes, mediante a classificação por aberturas

fixas e pré-determinadas. O material passante pela abertura da tela é denominado *undersize* e o retido na tela é denominado *oversize*.

O peneiramento é dito a seco quando o material é alimentado com sua umidade natural e é dito a úmido quando o material é alimentado em forma de polpa ou recebe água adicional por meio de *sprays* instalados sobre os *decks* de peneiramento (CHAVES & PERES, 2012). No peneiramento a úmido é adicionada água ao material para facilitar a passagem dos finos através das telas (LUZ et al., 2010).

No peneiramento industrial a seco é possível classificar tamanhos de partículas de até 0,1mm (100#), já no peneiramento industrial a úmido é possível classificar tamanhos de partícula até 53 μ m (270#).

Os equipamentos utilizados para peneiramento podem ser classificados de acordo com seu movimento em duas categorias: fixos e móveis. Os equipamentos fixos são as grelhas fixas e as peneiras fixas. Os equipamentos móveis são as grelhas vibratórias, peneiras rotativas (*trommel*), peneiras vibratórias e peneiras reciprocativas (LUZ et al., 2010).

Neste trabalho serão utilizadas peneiras vibratórias para classificação granulométrica do rejeito arenoso, com objetivo de obter dois produtos: um material retido acima de 105 μ m (150#) e um material passante abaixo de 105 μ m (150#).

As peneiras vibratórias podem ser divididas em peneiras vibratórias horizontais, que tem o movimento vibratório linear num plano normal à superfície de peneiramento, e peneiras vibratórias inclinadas, que tem o movimento circular ou elíptico neste mesmo plano (LUZ et al., 2010). A Figura 3.11 apresenta uma peneira vibratória horizontal da Haver & Boecker.



Figura 3.11- Peneira vibratória horizontal com movimento linear da Haver & Boecker (HAVER, 2017a).

As peneiras vibratórias geralmente são constituídas por um chassi robusto, apoiado em molas, um acionamento responsável pelo movimento vibratório e um, dois ou três *decks* (quadros para suporte das telas) (CHAVES & PERES, 2012).

O comportamento dinâmico das peneiras vibratórias é controlado pela amplitude (podendo variar de 1,5mm a 25mm) e pela rotação (podendo variar de 600rpm a 3.600rpm), resultando em uma aceleração.

O movimento vibratório faz as partículas serem lançadas para cima e para frente, de modo que possam ser lançadas às telas várias vezes, sobre aberturas consecutivas. Esse movimento promove também a estratificação do material sobre a tela, fazendo com que as partículas maiores fiquem por cima e as partículas menores por baixo (CHAVES & PERES, 2012).

A inclinação das peneiras vibratórias inclinadas varia entre 15° e 35° e transportam material sobre a superfície de peneiramento com uma velocidade de 18m/min a 36 m/min, dependendo da inclinação. Já as peneiras vibratórias horizontais transportam material com uma velocidade de 12m/min (CHAVES & PERES, 2012).

Para peneiramento fino a úmido, como no caso do rejeito arenoso, a peneira vibratória horizontal é a mais indicada, pois é possível atingir uma rotação elevada e uma amplitude baixa. Como o peneiramento será realizado a úmido e com o corte de 105µm (150#) a malha com telas de aço inoxidável é a mais indicada.

As peneiras vibratórias horizontais são amplamente aplicadas em processos de beneficiamento de minérios e são de fácil aquisição no meio industrial. Existem diversos modelos de peneiras no mercado, podendo variar de tamanhos, produção, aplicação, entre outros. Empresas como a Haver & Boecker, a Metso, a Schenck e a Derrick são referências nesta área.

A Mineração Jundu é uma das empresas que possui em seu processo de beneficiamento de areia peneiras que realizam a atividade de classificação granulométrica.

3.6.3 Lavagem com *Hydro Clean*

O *Hydro Clean* é um sistema de lavagem e limpeza que utiliza alta pressão, para materiais que têm tamanho de partículas entre 0mm e 80mm. Ele é adequado especialmente,

para utilização nas indústrias de areia, pedra britada e cascalho, indústria de pedras naturais e de reciclagem. Os equipamentos têm capacidade de produção entre 50 t/h e 400 t/h de material produzido (LUZ et al., 2010; HAVER, 2017b).

Segundo Luz et al. (2010) a taxa de alimentação de material no *Hydro Clean* é ajustada de acordo com o nível de limpeza que é desejado para o material. Apenas 0,12m³ a 0,3m³ de água de circulação é necessária para limpeza de uma tonelada de argila ou sujeira do material, com um gasto de energia entre 0,3kWh a 0,5kWh.

O equipamento é composto por um silo onde é armazenado o material a ser alimentado, uma correia transportadora para alimentação do material, um rotor de lavagem com *sprays* de alta pressão, uma câmara onde ocorre a lavagem, uma correia transportadora para descarga do material lavado e uma saída para água contaminada (HAVER, 2017b).

O equipamento trabalha com um jato de água de alta pressão (de 40ba a 200ba), limpando o produto e evitando desperdício de água. Este equipamento é capaz de alcançar altíssimos índices de limpeza dos produtos, permitindo que materiais, antes impossíveis de serem limpos, sejam vendidos com alto valor agregado (HAVER, 2017b). A Figura 3.12 apresenta o equipamento de lavagem *Hydro Clean* da Haver & Boecker.



Figura 3.12- Equipamento de lavagem *Hydro Clean* da Haver & Boecker (HAVER, 2017b).

O sistema pode ser instalado em uma linha de beneficiamento já existente, funciona apenas com a unidade de lavagem ou pode funcionar com um sistema completo que inclua

equipamentos de peneiramento, peneiras desaguadoras e um circuito hidráulico (LUZ et al., 2010).

Ainda segundo Luz et al. (2010) a distância variável entre o rotor de lavagem e o leito de material permite o ajuste do estado de entrada do material. Os sensores localizados na área de alimentação do material permitem o controle de fluxo de entrada do material e, assim, uma constância na qualidade do produto.

Devido aos *sprays* de alta pressão não tocarem no material durante a lavagem praticamente não há o desgaste verificado nos sistemas convencionais. As peças sujeitas a um eventual desgaste são de fácil manutenção e rápida substituição (LUZ et al., 2010).

O *Hydro Clean* é um equipamento relativamente novo e é aplicado em alguns processos de beneficiamento de minérios como bauxita e manganês. Ele é utilizado na substituição de equipamentos como o *trommel* e o *scrubber* devido ao baixo consumo de água e alta eficiência de lavagem. Existem vários modelos de *Hydro Clean* no mercado, variando o tamanho e a produção.

3.6.4 Secagem com leito fluidizado

Segundo Oliveira (2017) a umidade da areia de fundição deve ser mantida em valores abaixo de 0,1%. Com valores de umidade acima de 0,1% o desempenho da areia no processo de fundição é prejudicado, principalmente quando se utiliza resina como aglomerante. A umidade interfere nas reações químicas da resina e essa provém de diversas fontes, sendo importante identificá-las.

Diante disso, o rejeito arenoso processado necessita passar pela etapa de secagem para obter valores de umidades dentro dos valores padrões para areia de fundição.

A secagem é a atividade de remover água de materiais sólidos, líquidos ou gasosos. Em quase todas as indústrias, em alguma etapa do processo o material necessita ser secado. A secagem pode ser a etapa inicial, intermediária e final no fluxograma de processo de um material (METSO, 2012).

Segundo Metso (2012) os dois métodos primários de remover água são: mecanicamente, com peneiras desaguadoras ou filtros, e por meio da evaporação da água utilizando equipamentos com processo térmico, como secadores rotativos e secadores de leito fluidizado.

Este item será focado nos secadores de leito fluidizado pois são amplamente aplicados na indústria de areia de fundição, demonstrando boa viabilidade técnica e econômica.

O termo "leito fluidizado" refere-se geralmente a um leito de materiais sólidos finos através do qual passa um gás. O leito fluidizado está num estado entre o de um leito estático e um onde todos os sólidos estão suspensos na corrente de gás (METSU, 2012).

A introdução de um fluxo de gás apropriado ao leito de material provoca o início da fluidização. Bolhas de gás passam através do leito de material criando uma condição de mistura rápida. O leito tem o aspecto de um líquido fervente e, de fato, o leito de material assume muitas das propriedades de um fluido. Ele exerce uma pressão hidrostática e o material flui por meio de aberturas por baixo e por cima do corpo do leito fluidizado (METSU, 2012).

A ação de ebulição num leito fluidizado leva as partículas a entrarem em contato umas com as outras, removendo a poeira que é transportada na corrente de gás. A mesma ação de ebulição garante uma mistura muito rigorosa, proporcionando condições de temperatura uniformes e permitindo uma secagem completa sem sobreaquecimento do material (METSU, 2012).

Diversas empresas empregam os secadores de leito fluidizado para secagem de areias industriais, um exemplo é a unidade de Descalvado da empresa Mineração Jundu, que realiza a secagem das areias de fundição e das areias para fabricação vidros por meio de secadores de leito fluidizado.

Não foram realizados ensaios de secagem do rejeito arenoso processado por leito fluidizado neste trabalho pois não foi possível a aquisição de um leito fluidizado de escala piloto e por não existir secadores de leito fluidizado pilotos nos laboratórios utilizados e nas empresas parceiras.

Como o rejeito arenoso classificado e lavado terá características químicas e físicas semelhante a areia de fundição, podemos presumir que a secagem do rejeito arenoso por secadores de leito fluidizado será um grande sucesso, pois para areia de fundição essa tecnologia é bastante conhecida e amplamente aplicada.

3.7 Ensaios de Areia de Fundição

Para caracterização e controle das areias de fundição utilizadas na indústria podem ser realizados ensaios de laboratório, que são divididos em ensaios analíticos e ensaios tecnológicos.

3.7.1 Ensaios analíticos

Os ensaios analíticos são realizados com o objetivo de caracterizar os componentes da areia de fundição, como, por exemplo, análise química, análise mineralógica, análise granulométrica e granuloquímica, ensaios de determinação de umidade, permeabilidade e perda por calcinação.

A análise química é realizada por Espectrometria por Fluorescência de Raios X (FRX). Segundo Carneiro e Nascimento Filho (1996) a fluorescência de raios X é uma técnica instrumental e não destrutiva, que por meio das intensidades dos raios X emitidos pela amostra permite determinar a concentração de elementos químicos. Segundo Luz e Lins (2005) a areia de fundição deve conter teor de sílica acima de 98%.

A análise mineralógica é realizada por Difratometria de Raios X (DRX). Segundo Ulsen (2011) a difração de raios X é uma técnica instrumental e não destrutiva, que permite determinar a composição mineralógica de uma amostra por meio das distâncias interplanares de cada mineral. A areia de fundição deve ter sua mineralogia composta em sua maioria por sílica (SiO_2).

A análise granulométrica é realizada por peneiradores com uma série de peneiras com aberturas padronizadas, mais conhecido como peneirador vibratório. Com o resultado da análise granulométrica é possível obter a curva e a distribuição granulométrica, o módulo de finura e o teor de finos do material ensaiado.

As areias para fundição devem apresentar distribuição granulométrica estreita, com mais de 70% dos grãos retidos concentrados em três peneiras consecutivas da série padrão Tyler. As areias com alta concentração granulométrica apresentam alta permeabilidade e baixa expansão, devido ao número de espaços vazios presentes entre os grãos (LUZ e LINS, 2005; MUCHON, 1988).

O módulo de finura é um índice para determinar as características granulométricas dos agregados. Segundo a norma CEMP-81 (ABIFA, 2015a) módulo de finura é definido como o número que se obtém ao realizar a soma dos produtos da massa de material retido em cada peneira pelo seu fator, dividido pelo somatório de todas as retenções. As areias de fundição podem ser classificadas de acordo com o seu módulo de finura como mostra a Tabela 3.3:

Tabela 3.3 - Classificação da areia pelo módulo de finura.

Módulo de Finura	Classificação
20 - 50	Areia Grossa
50 - 70	Areia Média
70 - 100	Areia Fina
100 - 150	Areia Muito Fina
>150	Areia Finíssima

Fonte: MUCHON (1988)

O teor de finos de uma areia pode ser denominado como o valor percentual do material retido nas duas últimas peneiras da série padrão Tyler acrescido do material que passa pela última peneira, portanto é o material menor que 105 μ m (ABIFA, 2015a).

As areias de fundição devem ter módulo de finura adequado para garantir um bom acabamento superficial da peça fundida e ao mesmo tempo garantir uma boa permeabilidade do molde. O teor de finos das areias de fundição não pode exceder 5% para não afetar a permeabilidade do molde (FIGUEIREDO, 2017).

Na análise granuloquímica é coletado amostras representativas das frações granulométricas obtidas no peneiramento com aberturas padronizadas. Cada amostra coletada é analisada quimicamente por Fluorescência de Raios X (FRX) resultando em um teor químico por faixa granulométrica.

Segundo Fernandes (2006) a determinação da umidade é de extrema importância para areia de fundição devido à influência da quantidade de água na qualidade do molde e da peça fundida. Para areia de fundição a umidade deve estar abaixo de 0,1%.

A permeabilidade é definida como a capacidade que a areia de fundição apresenta de ser permeável, ou seja, a capacidade de permitir que os gases atravessem seus poros. O valor numérico da permeabilidade determinado expressa o volume de ar em cm³ que, sob uma pressão de 1g/cm², passaria em um minuto em um cubo de 1cm³ de areia (ROMANUS, 1991; FERREIRA, 2007).

A perda por calcinação (PPC), também conhecida como perda ao fogo, é a determinação da porcentagem de materiais eliminados por calcinação (ABIFA, 2015b). Segundo Nociti (2011) o PPC indica o teor de matéria orgânica presente e água intercrystalina. Para areia de fundição a presença de material orgânico pode causar a geração de gases no molde e provocar defeitos nas peças fundidas (FIGUEIREDO, 2017).

3.7.2 Ensaios tecnológicos

Os ensaios tecnológicos têm a função de determinar algumas propriedades das areias de fundição, como resistência à tração, resistência à flexão, compactabilidade e resistência à compressão. Com os valores dos ensaios tecnológicos é possível determinar o comportamento da areia em cenário próximo das condições requeridas pelo seu uso na fundição (FIGUEIREDO, 2016).

A seguir são apresentados os ensaios de compactabilidade, resistência à compressão a verde, resistência à tração e resistência à flexão. Neste trabalho o aglomerante escolhido para a moldagem da areia é a resina fenólica-uretânica, por isso não serão realizados os ensaios de compactabilidade e de resistência a compressão a verde, que são utilizados quando o aglomerante escolhido para a moldagem da areia é a bentonita.

3.7.2.1 Compactabilidade

O ensaio de compactabilidade é realizado para saber se a mistura entre a areia e a bentonita está em proporções adequadas para os demais ensaios. A compactabilidade é a redução percentual da altura sofrida por uma determinada massa de areia, sob influência de compactação (ABIFA, 2015c).

3.7.2.2 Resistência à compressão a verde

O ensaio de resistência à compressão a verde é realizado para determinar qual é a máxima tensão de compressão que um corpo padronizado é capaz de suportar sob determinadas condições de ensaio (ABIFA, 2015d).

3.7.2.3 Resistência à tração

O ensaio de resistência à tração resulta na máxima tensão de tração que um corpo de prova padronizado é capaz de suportar até a sua ruptura, sendo confeccionado com mistura

padrão. O ensaio consiste na aplicação de uma carga contínua e progressiva em uma das extremidades do corpo de prova padrão, enquanto a outra extremidade permanece fixa, até sua ruptura (ABIFA, 2015e).

3.7.2.4 Resistência à flexão

O ensaio de resistência à flexão resulta na máxima tensão de flexão que um corpo de prova padronizado é capaz de suportar até a sua ruptura, sendo confeccionado com mistura padrão. O ensaio consiste na aplicação de uma carga contínua e progressiva no meio do corpo de prova padrão, assentado sobre dois apoios, até sua ruptura (ABIFA, 2015f).

3.8 Tecnologia Haver & Boecker de uma Planta Móvel de Tratamento de Solos

A empresa Haver & Boecker em parceria com a empresa Ambievo, desenvolveu uma tecnologia móvel de tratamento de solos chamada de RECOY. Ela é um processo de circuito fechado, construído numa plataforma móvel para transporte permitindo que os resíduos sejam tratados localmente à temperatura ambiente. É uma pequena planta com capacidade para lavar até 20 toneladas por hora de qualquer tipo de solo contaminado com HC (Compostos de hidrogênio e de carbono), sem gerar água contaminada, recuperando o óleo contaminante e separando do solo tratado e agora limpo (HAVER, 2017).

O processo baseia-se na aplicação da solução de Terpen-P, com alta pressão sobre um solo contaminado com HC (Compostos de hidrogênio e de carbono). Este processo remove o HC da superfície do solo e realiza a separação do mesmo.

A Planta móvel de tratamento de solos da Haver & Boecker tem capacidade entre 5t/h e 20t/h de material processado, tem potência de 350kW, comprimento de 18,4m, largura de 3,2m e altura de 4,4 m.

Ela possui 6 tipos de tanques desempenhando cada um uma função: o tanque de mistura, o tanque de homogeneização, o tanque de óleo terpen 1, o tanque de óleo terpen 2, o tanque de separação de água e óleo, e o tanque de óleo.

A Figura 3.13 apresenta a visão geral da planta móvel de tratamento de solos da Haver & Boecker

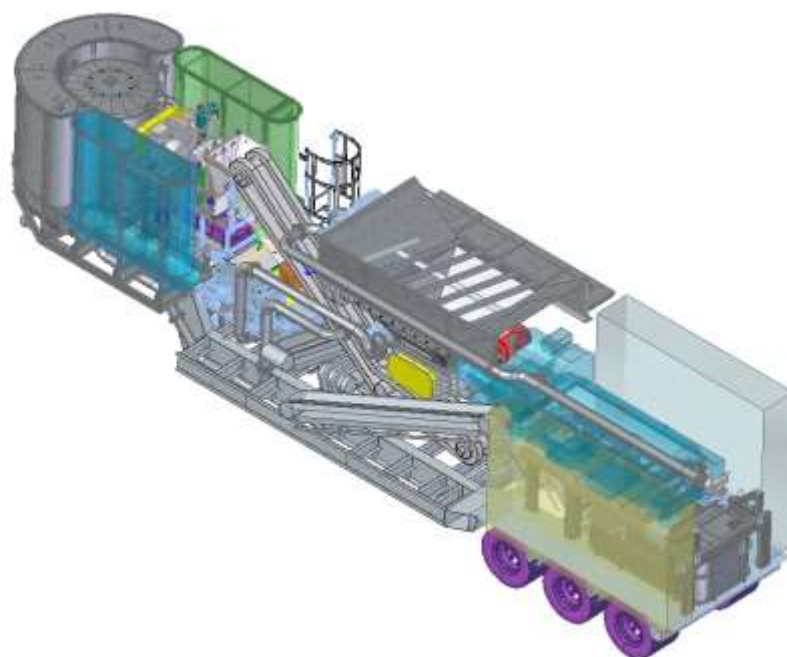


Figura 3.13- Visão geral da planta móvel de tratamento de solos da Haver & Boecker (HAVER, 2017).

A planta móvel possui 6 transportadores de correia, um equipamento Haver Hydro Clean, uma peneira vibratória horizontal Haver modelo UMD800x1500, um britador *Sizer*, uma tremonha de alimentação, um equipamento classificador chamado *Tricanter* além de várias bombas e componentes elétricos. A Figura 3.14 apresenta a visão parcial da planta móvel de tratamento de solos da Haver & Boecker.

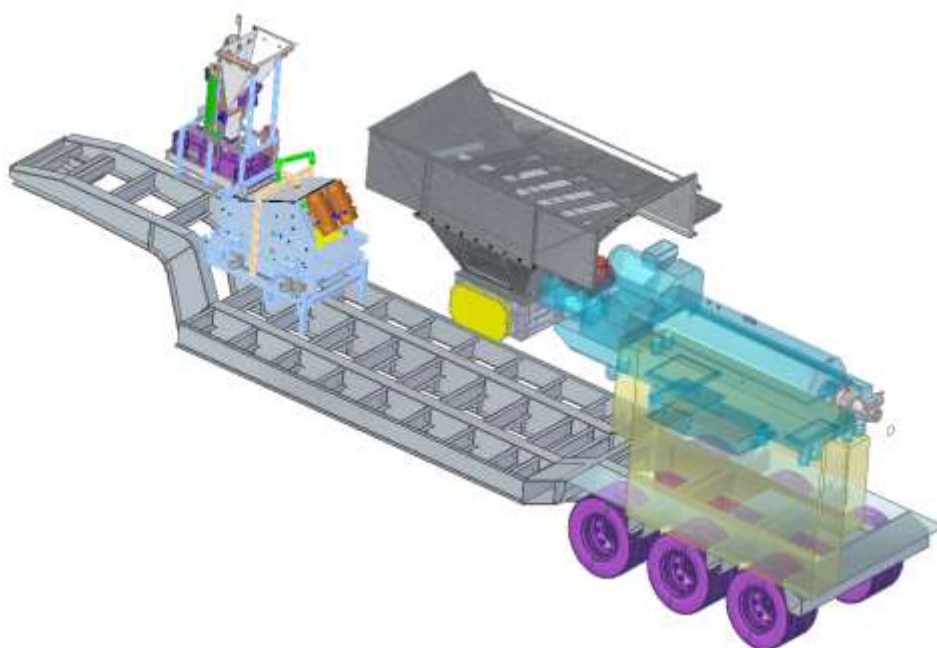


Figura 3.14- Visão parcial da planta móvel de tratamento de solos da Haver & Boecker (HAVER, 2017).

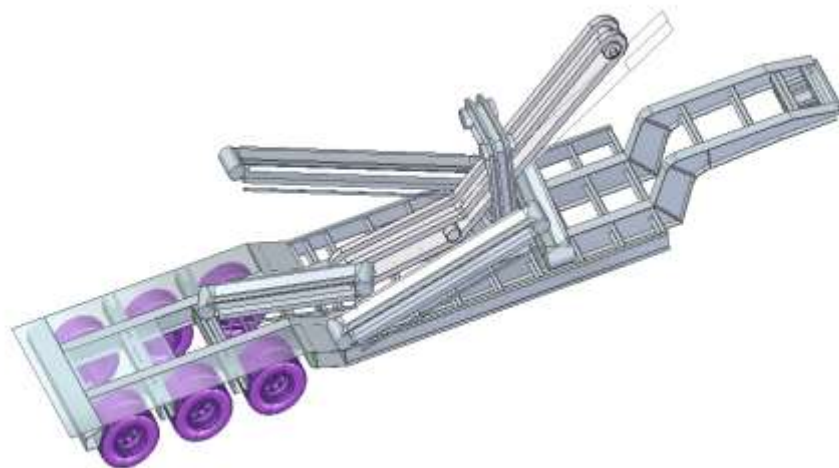


Figura 3.15- Equipamentos da planta móvel de tratamento de solos da Haver (HAVER, 2017).

A Figura 3.15 apresenta os equipamentos da planta móvel de tratamento de solos da Haver & Boecker.

O processo da planta móvel de tratamentos de solos consiste nas seguintes etapas: alimentação do solo contaminado na tremonha de alimentação, homogeneização do material por dois misturadores, cominuição do material por um britador *Sizer*, lavagem do material em alta pressão com equipamento *Hydro Clean*, desaguamento e classificação grosseira com a peneira vibratória, classificação fina do material e separação sólido-líquido com equipamento *Tricanter* e centrifugação e separação líquido-líquido (água e óleo) com a combinação dos tanques.



Figura 3.16- Comparação do solo antes e depois do tratamento, removendo 98% da contaminação (HAVER, 2017).

Ao final do processamento é possível obter um produto grosseiro lavado e sem contaminação (brita ou cascalho), um produto fino sem contaminação do óleo (solo), água limpa sem contaminação e o óleo. A Figura 3.16 apresenta uma comparação do solo antes e depois do tratamento.

A planta móvel de tratamento de solos é apresentada neste item com o objetivo de evidenciar que já existem tecnologias de plantas móveis de processamento mineral para outros segmentos industriais e que essa tecnologia também pode ser aplicada para a fabricação de uma planta móvel de processamento de rejeito arenoso para produção de areia de fundição.

Quando ocorre o processamento do rejeito arenoso natural para produção de areia de fundição apenas 20% da massa alimentada se torna produto, os outros 80% da massa alimentada é descartado. Então, se transportarmos dez caminhões de rejeito arenoso até uma unidade de processamento fixa localizada a uma certa distância das plantas de processamento do minério de ferro, dois caminhões seriam de produto e oito caminhões seriam do rejeito. Dessa forma, torna-se inviável o transporte dos oito caminhões de rejeito de volta para a barragem.

A melhor solução para esse problema é a utilização de uma planta móvel de processamento do rejeito arenoso, podendo deslocar, de acordo com a planta que fornecerá o rejeito arenoso, e descartando o rejeito do processo no mesmo local da coleta, evitando gastos com o transporte.

4 METODOLOGIA

Este trabalho foi dividido em cinco etapas. A primeira etapa tem por finalidade a realização de ensaios de caracterização química, física e granulométrica das amostras de rejeito arenoso natural utilizadas nos ensaios piloto de processamento.

A segunda etapa tem por finalidade a realização dos ensaios piloto de processamento do rejeito arenoso, como o de deslamagem e desaguamento com hidrociclones, o de separação granulométrica a úmido com peneiras vibratórias e o de lavagem de alta pressão com água com o *Hydro Clean*.

A terceira etapa tem por finalidade a realização de ensaios de caracterização química, física e granulométrica dos produtos do ensaio piloto de processamento, sendo eles o rejeito arenoso deslamado e desaguado, o rejeito arenoso classificado e o rejeito arenoso classificado e lavado.

A quarta etapa tem por finalidade a realização de ensaios tecnológicos para avaliar a resistência à tração e resistência à flexão em corpos de prova padronizados para areia de fundição fabricados a partir do rejeito arenoso classificado e seco, e do rejeito arenoso classificado, lavado e seco.

A quinta e última etapa tem por finalidade definir uma rota tecnológica, propor um sistema fixo e um sistema móvel de processamento para a produção de areias artificiais de fundição a partir do rejeito arenoso estudado.

A metodologia utilizada na primeira etapa está ilustrada no fluxograma da Figura 4.1.

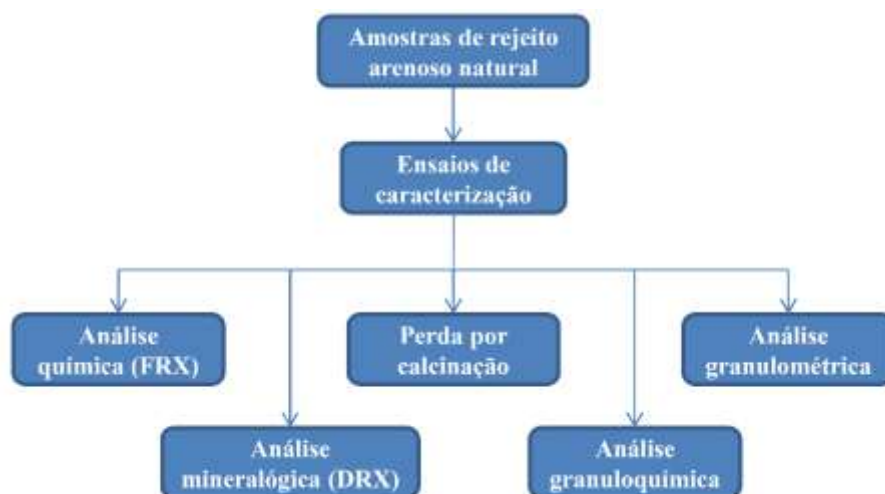


Figura 4.1- Fluxograma da metodologia da primeira etapa do trabalho.

A metodologia utilizada na segunda etapa está ilustrada no fluxograma da Figura 4.2.

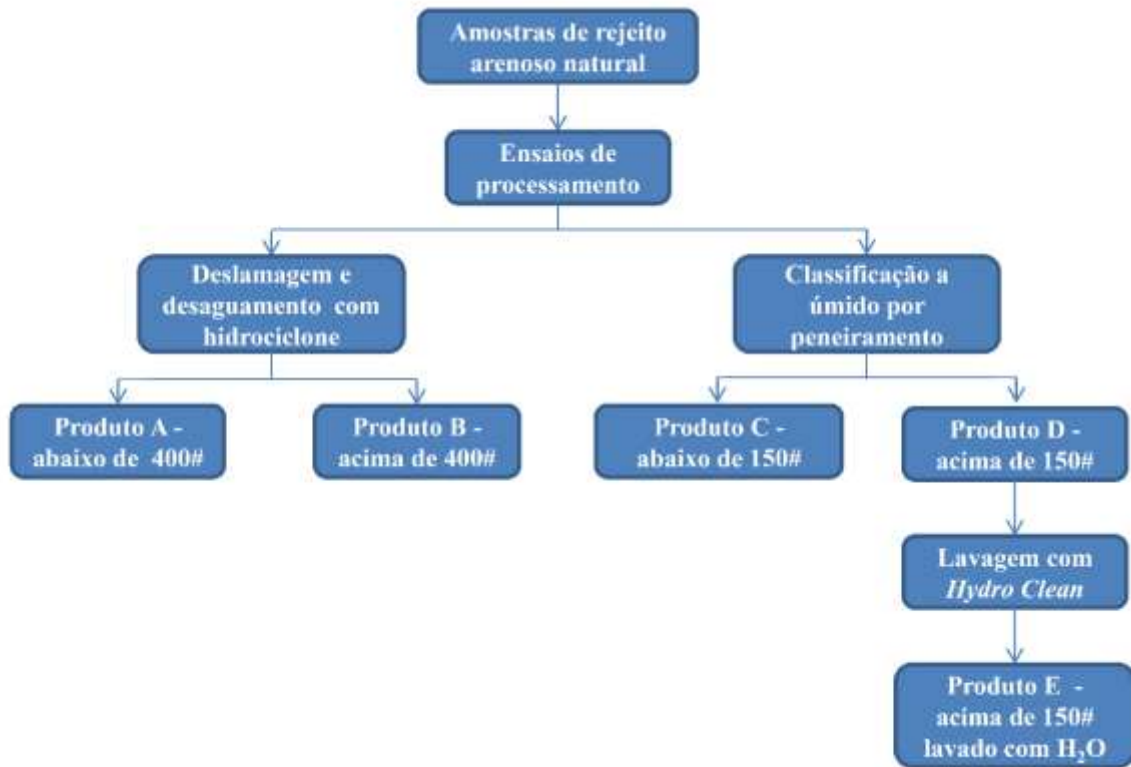


Figura 4.2- Fluxograma da metodologia da segunda etapa do trabalho.

A metodologia utilizada na terceira etapa está ilustrada no fluxograma da Figura 4.3.



Figura 4.3- Fluxograma da metodologia da terceira etapa do trabalho.

A metodologia utilizada na quarta etapa está ilustrada no fluxograma da Figura 4.4.



Figura 4.4- Fluxograma da metodologia da quarta etapa do trabalho.

4.1 Materiais

Os materiais utilizados para realização dos ensaios de caracterização química, física e granulométrica da primeira etapa foram retirados de amostras de rejeito arenoso natural coletadas do processo de flotação da Samarco Mineração S.A.

Existem duas amostras de rejeito arenoso natural:

- A primeira amostra (RA01) com massa total de 10kg foi secada pela Fundação Gorceix e armazenada no Laboratório de Fundição da UFOP;
- A segunda amostra (RA02) com massa total de 1 tonelada estava armazenada na Vale Mina do Pico e foi transportada para as instalações da Haver & Boecker Serviços.

Os ensaios piloto de processamento da segunda etapa deram origem a cinco produtos do rejeito arenoso natural:

- O produto A é resultado do ensaio de deslamagem e desaguamento da amostra RA01, sendo um material com granulometria abaixo de 400#;
- O produto B também é resultado do ensaio de deslamagem e desaguamento da amostra RA01, sendo um material com granulometria acima de 400#;
- O produto C é resultado do ensaio de classificação a úmido por peneiramento da amostra RA02, sendo um material com granulometria abaixo de 150#;

- O produto D também é resultado do ensaio de classificação a úmido por peneiramento da amostra RA02, sendo um material com granulometria acima de 150#;

- O produto E é resultado do ensaio de lavagem de alta pressão com água utilizando o *Hydro Clean* do produto D, sendo um material lavado com granulometria acima de 150#.

Os materiais utilizados para realização dos ensaios de caracterização química, física e granulométrica da terceira etapa foram retirados dos produtos A, B, C, D e E.

Os materiais utilizados para realização dos ensaios tecnológicos da quarta etapa foram retirados dos produtos D e E. Para os ensaios tecnológicos foram utilizados como aglomerante a resina fenólica-uretânica e o catalisador amínico fabricados pela Buntech.

4.2 Ensaio de Caracterização do Rejeito Arenoso Natural e dos seus Produtos

As amostras de rejeito arenoso natural e seus produtos foram caracterizadas para que se tenha conhecimento de suas propriedades físicas, químicas e granulométricas e, assim, seja possível analisar se a etapa de processamento utilizada realmente foi efetiva para produção de areia base de fundição.

A caracterização das amostras de rejeito arenoso natural e seus produtos foi realizada pelos seguintes métodos:

- Análise química por espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX);
- Análise mineralógica por difratometria de raios X (DRX);
- Perda por calcinação;
- Análise granulométrica;
- Análise granuloquímica;
- Umidade;
- Permeabilidade.

4.2.1 Análise química por espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX)

A análise química semiquantitativa foi realizada pelo método de espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX) com um espectrômetro modelo EDX-720, da marca Shimadzu no Nanolab - Redemat/UFOP. Os materiais analisados foram:

- Rejeito arenoso natural RA01 e RA02;
- Produtos A, B, C, D e E.

4.2.2 Análise mineralógica por difratometria de raios X (DRX)

A análise mineralógica para determinação de fases cristalinas foi realizada por difratometria de raios X (DRX) com um difratômetro modelo D2PHASE, da marca Bruker no Nanolab - Redemat/UFOP. As fases minerais das amostras foram identificadas usando o método de pó total com radiação $\text{CuK}\alpha$, numa faixa de varredura de 2θ entre 11° e 80° . O tubo de raios X operou com 30kV e 10mA. Os materiais analisados foram:

- Rejeito arenoso natural RA01 e RA02;
- Produtos D e E.

4.2.3 Perda por calcinação

O ensaio de perda por calcinação do rejeito arenoso natural e seus produtos foi realizado no laboratório químico da Samarco Mineração S.A. onde cada material foi previamente secado a uma temperatura de 110°C por quatro horas e aquecido a uma temperatura de 950°C por duas horas. Após certo tempo a amostra foi resfriada em um dessecador e pesada. O valor do PPC, em porcentagem, foi calculado a partir da Equação 4.1.

$$PPC = \frac{m_A - m_R}{m_A} \times 100 \quad (4.1)$$

onde:

PPC = Perda por calcinação, em %;

m_A = Massa da amostra, em g; e

m_R = Massa do resíduo, em g.

Os materiais analisados foram os rejeitos arenosos naturais RA01 e RA02, e os produtos A, B, C, D e E.

4.2.4 Análise granulométrica

A análise granulométrica foi realizada a seco em peneirador automático de laboratório utilizando as peneiras da série Tyler, com as seguintes aberturas: 1 (6# ou $3350\mu\text{m}$), 2 (10# ou $1700\mu\text{m}$), 3 (20# ou $840\mu\text{m}$), 4 (28# ou $595\mu\text{m}$), 5 (35# ou $420\mu\text{m}$), 6 (48# ou $297\mu\text{m}$), 7 (65# ou $210\mu\text{m}$), 8 (100# ou $149\mu\text{m}$), 9 (150# ou $105\mu\text{m}$), 10 (200# ou $74\mu\text{m}$), 11 (270# ou $53\mu\text{m}$) e 12 (o fundo). A partir do resultado da análise granulométrica, obteve-se a curva e a distribuição granulométrica, o módulo de finura e o teor de finos das amostras seguindo as recomendações da norma CEMP-81 (ABIFA, 2015a).

O módulo de finura foi calculado por meio da soma dos produtos da multiplicação da porcentagem de material retido em cada peneira pelo seu fator correspondente, que é específico de cada peneira, dividido por 100, como mostrado na Equação 4.2.

$$\text{Módulo de finura} = \frac{\Sigma(\% \text{retido simples} \times \text{fator de multiplicação})}{100} \quad (4.2)$$

O teor de finos foi calculado pela relação entre a soma da massa de todo o material passante na abertura de 150# (105µm) e a soma da massa da amostra total, como mostrado na Equação 4.3.

$$\text{Teor de finos} = \frac{\Sigma(\text{Massa da amostra} < 105\mu\text{m})}{\Sigma(\text{Massa da amostra total})} \quad (4.3)$$

Os ensaios foram realizados no laboratório químico da Samarco Mineração S.A. Os materiais analisados foram os rejeitos arenosos naturais RA01 e RA02, e os produtos A, B, C, D e E.

4.2.5 Análise granuloquímica

A análise granuloquímica foi realizada por coleta de amostras representativas das frações granulométricas retidas nas peneiras da série Tyler, com as seguintes aberturas: 20# (840µm), 28# (595µm), 35# (420µm), 48# (297µm), 65# (210µm), 100# (149µm), 150# (105µm), 200# (74µm), 270# (53µm), 325# (44µm), 400# (37µm) e o fundo. Cada fração retida foi analisada quimicamente pelo método de espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX) em função de teores de Fe, SiO₂, Al₂O₃, P e MnO presentes nas amostras. Os ensaios foram realizados no laboratório químico da Samarco Mineração S.A.

Os materiais analisados foram os rejeitos arenosos naturais RA01 e RA02, e os produtos A e B.

4.2.6 Umidade

O ensaio de determinação da umidade das amostras foi realizado no Laboratório de Caracterização de Areias do DEMET/EM/UFOP, seguindo as especificações da norma CEMP-105 (ABIFA, 2015g). Os materiais analisados foram os produtos D e E.

4.2.7 Permeabilidade

O ensaio de determinação da permeabilidade foi realizado seguindo as recomendações da norma CEMP-80 (ABIFA, 2015h). Os ensaios foram feitos por meio de um permeâmetro, modelo PER da marca Tecnofund no Laboratório de Caracterização de Areias do DEMET/EM/UFOP. Os materiais analisados foram os produtos D e E.

4.3 Ensaio Piloto de Processamento do Rejeito Arenoso

Os ensaios piloto de processamento foram realizados visando o beneficiamento do rejeito arenoso natural para a obtenção de um produto final com características químicas, físicas e granulométricas semelhantes as areias base aplicadas no processo de fundição.

Foram realizados ensaios piloto de deslamagem e desaguamento com hidrociclones, de separação granulométrica a úmido com peneiras vibratórias e de lavagem de alta pressão com água com o *Hydro Clean*.

4.3.1 Deslamagem e desaguamento com hidrociclones

O ensaio piloto de deslamagem e desaguamento com hidrociclones foi utilizada com o objetivo de separar as partículas com granulometria abaixo de 400# (37 μ m) e de aumentar a porcentagem de sólidos da polpa de rejeito. Os ensaios foram realizados com uma amostra de 10kg do rejeito arenoso natural RA01.

O equipamento utilizado é um conjunto de hidrociclonagem piloto modelo LBCBHL da marca FLSmidth Krebs, localizado no laboratório químico da Samarco Mineração S.A. O conjunto de hidrociclonagem é composto por três hidrociclones com diâmetros de 2", 3" e 4", um jogo de *vórtex* para os hidrociclones de 2" e 3" com os diâmetros de 3/8", 5/8" e 3/4", um jogo de *ápex* para os hidrociclones de 2" e 3" com os diâmetros de 0,156", 0,256" e 0,312", um jogo de *vórtex* para o hidrociclone de 4" com os diâmetros de 1,25" e 1,6", um *ápex* para o hidrociclone de 4" com o diâmetro de 1/2", bomba de polpa, caixa da bomba com agitador incorporado, tubulações e válvulas.

O conjunto opera em circuito fechado, sendo que o *overflow* e o *underflow* dos hidrociclones retornam para a caixa da bomba. O controle da vazão que alimenta os hidrociclones é obtido por meio do ajuste de válvulas e a pressão é controlada por manômetros.

Os ensaios foram realizados com o rejeito arenoso natural diluído com água formando uma polpa com 10% de sólidos. As variáveis utilizadas durante o ensaio foram o diâmetro do hidrociclone (de 2” ou de 4”), o diâmetro do *vórtex* (de 3/8”, 5/8” e 3/4” para o hidrociclone de 2” e de 1,25” e 1,6” para o hidrociclone de 4”), o diâmetro do *ápex* (de 0,156”, 0,256” e 0,312” para o hidrociclone de 2” e de 1/2” para o hidrociclone de 4”) e a pressão constante em 2kgf/cm².

Foi definido por meio da densidade do rejeito arenoso, das porcentagens de sólidos da alimentação, do *overflow* e do *underflow* qual a combinação ideal para obtenção de uma curva de partição mais próxima possível para realização da separação em 400# (37µm). As Tabelas 4.1 e 4.2 apresentam os planejamentos experimentais utilizados para a definição da melhor curva de partição.

Tabela 4.1 – Planejamento experimental utilizado para definição da melhor curva de partição para separação em 400# com hidrociclone com diâmetro de 2”.

Para Hidrociclone com diâmetro de 2”				
N° do Teste	Fatores de controle			Resultado
	<i>Vórtex</i>	<i>Ápex</i>	Pressão	Curva de partição
1	3/8”	0,156”	2kgf/cm ²	y1
2	3/8”	0,256”	2kgf/cm ²	y2
3	3/8”	0,312”	2kgf/cm ²	y3
4	5/8”	0,156”	2kgf/cm ²	y4
5	5/8”	0,256”	2kgf/cm ²	y5
6	5/8”	0,312”	2kgf/cm ²	y6
7	3/4"	0,156”	2kgf/cm ²	y7
8	3/4"	0,256”	2kgf/cm ²	y8
9	3/4"	0,312”	2kgf/cm ²	y9

Tabela 4.2 – Planejamento experimental utilizado para definição da melhor curva de partição para separação em 400# com hidrociclone com diâmetro de 4”.

Para Hidrociclone com diâmetro de 4”				
N° do Teste	Fatores de controle			Resultado
	<i>Vórtex</i>	<i>Ápex</i>	Pressão	Curva de partição
1	1,25”	1/2”	2kgf/cm ²	y1
2	1,6”	1/2”	2kgf/cm ²	y2

Após a definição da combinação ideal e da estabilização do circuito, o *underflow* e o *overflow* do hidrociclone foram coletados. O *overflow* deu origem ao produto A e o *underflow* deu origem ao produto B. Os produtos A e B foram caracterizados como descrito no item 4.2.

A Figura 4.5 apresenta o conjunto de hidrociclonagem piloto modelo LBCBHL da marca FLSmidth Krebs, no laboratório químico da Samarco Mineração S.A.



Figura 4.5- Conjunto de hidrociclonagem piloto modelo LBCBHL da marca FLSmidth Krebs.

4.3.2 Classificação a úmido por peneiramento

A técnica de classificação granulométrica a úmido por peneiramento foi utilizada com o objetivo de classificar o rejeito arenoso em dois produtos: um material com granulometria abaixo de 150# (105 μ m) e outro material com granulometria acima de 150# (105 μ m).

O equipamento utilizado é uma peneira vibratória horizontal modelo UMD800x1500 fabricada pela empresa Haver & Boecker, localizada na empresa Haver Serviços. Ela tem o

movimento vibratório linear gerado por dois motovibradores de alta frequência que possibilitam o peneiramento de materiais finos. A peneira vibratória tem as seguintes dimensões: 800mm de largura e 1500mm de comprimento. A inclinação da peneira é de 3° negativos possibilitando uma melhor classificação.

A peneira é composta por um *chute* de alimentação, um *chute* de retido (*overflow*), um *chute* de passante (*underflow*) e bicos de aspersão de água. A tela utilizada no ensaio é de aço inoxidável com abertura de 100# (74µm).

O conjunto operou em circuito aberto, sendo que o *overflow* foi depositado em um *big bag* e o *underflow* foi bombeado para um reservatório ao lado da peneira.

Os ensaios foram realizados com uma amostra de 1 tonelada do rejeito arenoso natural RA02. O material foi alimentado em forma de polpa com 50% de sólidos. As variáveis utilizadas durante o ensaio foram a amplitude e a rotação da peneira vibratória, e a taxa de alimentação da polpa de rejeito arenoso.

Primeiramente foram definidos por meio de aparelho de medição da condição dinâmica de peneiras vibratórias a amplitude e a rotação ideais para obtenção de uma aceleração adequada para a realização da separação em 150# (105µm). A Tabela 4.3 apresenta o planejamento experimental utilizado para a definição da melhor aceleração.

Tabela 4.3 – Planejamento experimental utilizado para definição da melhor aceleração para a separação em 150# com peneiras vibratórias.

N° do Teste	Fatores de controle		Resultado
	Amplitude	Rotação	Aceleração
1	2,0mm	1000rpm	y1
2	2,0mm	1200rpm	y2
3	2,2mm	1000rpm	y3
4	2,2mm	1200rpm	y4

Com a definição da aceleração ideal foi realizado a alimentação da polpa de rejeito arenoso sobre a peneira de forma gradativa, até que se atingisse a máxima capacidade de produção sem comprometer a qualidade do peneiramento. A Tabela 4.4 apresenta o planejamento experimental utilizado para a definição da taxa de alimentação da polpa de rejeito arenoso.

Tabela 4.4 – Planejamento experimental utilizado para definição da melhor taxa de alimentação da polpa de rejeito arenoso sobre a peneira.

N° do Teste	Fator de controle	Resultado
	Taxa de alimentação	Qualidade de peneiramento
1	25%	y1
2	50%	y2
3	75%	y3
4	100%	y4

Após a escolha da taxa de alimentação e a estabilização do circuito ocorreu a classificação de toda a amostra produzindo o *underflow* e o *overflow*. O *underflow* deu origem ao produto C e o *overflow* deu origem ao produto D. Os produtos C e D foram caracterizados como descrito no item 4.2.

A Figura 4.6 apresenta a peneira vibratória horizontal modelo UMD800x1500 fabricada pela empresa Haver & Boecker, localizada na empresa Haver Serviços.



Figura 4.6- Peneira vibratória horizontal modelo UMD800x1500 fabricada pela empresa Haver & Boecker.

4.3.3 Lavagem com *Hydro Clean*

A técnica de lavagem com o *Hydro Clean* foi utilizada com o objetivo de lavar o rejeito arenoso classificado com água utilizando altas pressões, garantindo que sejam eliminadas todas as partículas abaixo de 150 μ m (100#), localizadas principalmente na superfície das partículas mais grossas, e para a remoção de resíduos do processo de flotação que podem influenciar no processo de fundição.

O equipamento utilizado é um *Hydro Clean* piloto fabricado pela empresa Haver & Boecker, localizada na empresa Haver Serviços. O equipamento é composto por uma câmara de lavagem, um rotor de lavagem com *sprays* de alta pressão, uma bomba de água, uma peneira de laboratório de 100# (150µm), um reservatório de água e um reservatório para água utilizada na lavagem.

Com o *Hydro Clean* piloto é possível simular o comportamento do material durante a lavagem e obter alguns parâmetros para definição do *Hydro Clean* ideal para processamento industrial.

O *Hydro Clean* piloto funciona da seguinte maneira: o material deve ser depositado sobre a peneira de 100# (150µm), que fica posicionada no final da câmara de lavagem. A bomba é ligada com determinado tempo e pressão, assim o rotor de lavagem esguicha água com alta pressão sobre o material depositado sobre a tela. O material retido na tela de 100# (150µm) é lavado e a água passante na respectiva peneira vai para o reservatório da água utilizado na lavagem.

Os ensaios foram realizados com 15kg do produto D (com granulometria acima de 150#), resultante da classificação a úmido por peneiramento do rejeito arenoso natural RA02. O material foi lavado com uma pressão de 50ba. A variável utilizada durante o ensaio foi o tempo de lavagem.

Foi definido por meio da qualidade visual de lavagem qual o tempo ideal para realizar a lavagem. A Tabela 4.5 apresenta o planejamento experimental utilizado para a definição do tempo de lavagem no *Hydro Clean*.

Tabela 4.5 – Planejamento experimental utilizado para definição do tempo de lavagem no Hydro Clean.

N° do Teste	Fator de controle	Resultado
	Tempo de lavagem	Qualidade de lavagem
1	15s	y1
2	30s	y2

Após a definição do tempo ocorreu a lavagem de toda a amostra. O produto da lavagem deu origem ao produto E, que foi caracterizado como descrito no item 4.2.

A Figura 4.7 apresenta o *Hydro Clean* piloto fabricado pela empresa Haver & Boecker, localizada na empresa Haver Serviços.



Figura 4.7- *Hydro Clean* piloto fabricado pela empresa Haver & Boecker.

4.4 Ensaio Tecnológico de Areia de Fundição

Os ensaios tecnológicos têm como objetivo avaliar o comportamento dos produtos do beneficiamento do rejeito arenoso como areia base de fundição. Os resultados dos ensaios de resistência à tração e à flexão foram comparados com os resultados obtidos por Figueiredo (2017) durante seu trabalho de caracterização de areias de fundição.

Os ensaios tecnológicos foram realizados empregando ensaios de resistência à tração e resistência à flexão em corpos de prova padronizados para areia de fundição fabricados a partir dos produtos do processamento do rejeito arenoso e aglomerados com resina fenólica-uretânica.

Os ensaios de resistência à tração e à flexão foram realizados com corpos de prova que utilizaram o produto D (acima de 150#) e o produto E (acima de 150# e lavado com H₂O). A porcentagem de resina fenólica-uretânica utilizada foi de 1,4% em peso (0,7% de cada parte) em conjunto com o catalisador amínico 5% em peso dos 0,7% da parte 1 da resina.

Os ensaios tecnológicos das areias foram realizados no Laboratório de Fundição do DEMET da Escola de Minas da UFOP. As metodologias para preparação das misturas e para execução dos ensaios são baseadas nas normas da ABIFA.

Para avaliar o comportamento da mistura com o decorrer do tempo os ensaios de resistência à tração e resistência à flexão foram realizados em triplicata em determinados intervalos de tempo após a confecção do corpo de prova (FIGUEIREDO, 2017).

A mistura de areia com resina utilizada nos ensaios tecnológicos foi preparada de acordo com as recomendações da norma CEMP-182 (ABIFA, 2015i) que determina as condições para preparação da mistura padrão de areia e resinas do processo de cura a frio utilizando bateadeira planetária.

4.4.1 Resistência à tração

O ensaio de resistência à tração foi realizado de acordo com as recomendações da norma CEMP-162 (ABIFA, 2015j) que determina o método de ensaio de resistência à tração do corpo de prova confeccionado de mistura de areia padrão para o processo de cura a frio.

Na realização do ensaio de resistência à tração foram utilizados:

- Máquina universal para resistência de areia e acessórios para o ensaio de resistência à tração a frio modelo DAP da fabricante Tecnofund;
- Caixa de macho para confecção de corpos de prova do tipo biscoito modelo AM08T fabricado pela Tecnofund.

A Tabela 4.6 apresenta o planejamento experimental utilizado o ensaio de resistência à tração dos corpos de prova das areias processadas.

Tabela 4.6 – Planejamento experimental do ensaio de resistência à tração.

Nº do Teste	Fator de controle	Resultado
	Tempo de cura	Resistencia à tração
1	0h	y1
2	1h	y2
3	2h	y3
4	4h	y4
5	6h	y5
6	8h	y6
7	12h	y7

A Figura 4.8 apresenta a máquina universal para resistência de areia com o acessório para o ensaio de resistência à tração e a caixa de macho para confecção dos corpos de prova.



Figura 4.8- Máquina universal para resistência de areia com o acessório para o ensaio de resistência a tração e caixa de macho para confecção dos corpos de prova.

4.4.2 Resistência à flexão

O ensaio de resistência à flexão foi realizado de acordo com as recomendações da norma CEMP-181 (ABIFA, 2015k) que determina o método de ensaio de resistência à flexão do corpo de prova confeccionado de mistura de areia padrão para o processo de cura a frio.

Para realização do ensaio de resistência à tração foram utilizados:

- Máquina universal para resistência de areia e acessórios para o ensaio de resistência à flexão modelo DAP da fabricante Tecnofund;
- Caixa de macho para confecção de corpos de prova alongado modelo AM08F fabricado pela Tecnofund.

A Tabela 4.7 apresenta o planejamento experimental utilizado o ensaio de resistência à flexão dos corpos de prova das areias processadas.

Tabela 4.7 – Planejamento experimental do ensaio de resistência à tração.

N° do Teste	Fator de controle	Resultado
	Tempo de cura	Resistencia à flexão
1	0h	y1
2	1h	y2
3	2h	y3
4	4h	y4
5	6h	y5
6	8h	y6
7	12h	y7

A Figura 4.9 apresenta a máquina universal para resistência de areia com o acessório para o ensaio de resistência à flexão e a caixa de macho para confecção dos corpos de prova.



Figura 4.9- Máquina universal para resistência de areia com o acessório para o ensaio de resistência à flexão e caixa de macho para confecção dos corpos de prova.

4.5 Definição da Rota Tecnológica e Proposição dos Sistemas de Processamento

Esta etapa tem por finalidade definir uma rota tecnológica, propor um sistema fixo e um sistema móvel de processamento para a produção de areias artificiais de fundição a partir dos resultados das caracterizações dos materiais, dos ensaios de processamento e dos ensaios tecnológicos de areia de fundição.

A rota tecnológica foi definida levando em consideração quais as etapas de processamento são realmente necessárias para a produção de areia de fundição a partir de rejeito arenoso natural. A rota tecnológica foi definida em um diagrama de blocos que apresenta detalhadamente as etapas do processamento do rejeito arenoso e a sua situação antes e depois de cada etapa até o produto final.

Os sistemas de processamento foram propostos levando em consideração a rota tecnológica definida anteriormente. Para o sistema fixo foi considerando a capacidade de produção em torno de 20t/h de areia de fundição, para o sistema móvel foi considerado a capacidade de produção em torno de 10t/h. Os sistemas de processamento foram propostos em forma de um fluxograma de processo que apresentam detalhadamente os equipamentos utilizados, as taxas de produção e a situação da areia em cada equipamento.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados são apresentados em módulos diferentes. No primeiro módulo estão os resultados dos ensaios de caracterização química, física e granulométrica das amostras de rejeito arenoso natural utilizadas nos ensaios piloto de processamento. No segundo módulo estão os resultados dos ensaios piloto de processamento do rejeito arenoso. No terceiro módulo estão os resultados dos ensaios de caracterização química, física e granulométrica dos produtos do ensaio piloto de processamento. No quarto módulo estão os resultados das análises tecnológicas dos produtos D e E segundo as normas da ABIFA. No quinto módulo apresentam-se uma rota tecnológica, um sistema fixo e um sistema móvel de processamento para a produção de areias artificiais de fundição a partir do rejeito arenoso estudado.

5.1 Ensaios de Caracterização do Rejeito Arenoso Natural

Apresentam-se os resultados da caracterização química, física e granulométrica das amostras de rejeito arenoso natural RA01 e RA02.

O resultado da análise química semiquantitativa via espectroscopia por fluorescência de raios X (FRX) das amostras de rejeito arenoso está disposto na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Análise química das amostras de rejeito arenoso por fluorescência de raios x.

Elemento Químico	Rejeito Arenoso RA01	Rejeito Arenoso RA02
SiO ₂	80,07%	79,73%
Fe	13,18%	13,11%
CaO	0,03%	0,012%
MnO	0,01%	0,001%
Al ₂ O ₃	0,54%	0,62%
TiO ₂	-	0,004%
MgO	-	0,181%
P	0,004%	0,013%

Os rejeitos arenosos naturais RA01 e RA02 apresentam os respectivos teores de óxido de silício, 80,07% e 79,73%. O ferro é o segundo elemento com maior representação nos rejeitos arenosos naturais RA01 e RA02, com teor 13,18% e 13,11%, respectivamente. Com a análise é possível perceber que o rejeito arenoso natural RA01 possui composição química muito semelhante ao rejeito arenoso natural RA02.

A análise química da amostra de rejeito arenoso global da Usina 2 da Samarco Mineração S.A., apresentada no item 3.3, possui teores de óxido de silício e ferro iguais a

78,91% e 14,22%, respectivamente, valores bem próximos aos dos rejeitos arenosos RA01 e RA02. O mesmo acontece com a análise química do rejeito arenoso natural (AM01) realizada por Figueiredo (2017), que apresenta os teores de óxido de silício e ferro iguais a 85,82% e 13,82%, respectivamente.

Mesmo com as quatro amostras de origem distintas, o rejeito arenoso natural apresentou composição química muito semelhante, confirmando a informação apresentada no item 3.3 de que ele tem teor de óxido de silício entre 75% e 85% e ferro entre 10% e 15%.

Segundo Figueiredo (2017) o teor mínimo de sílica para areia base de fundição é de 80% para ligas de ponto de fusão mais baixos e de 90% para de aços e ferros fundidos. O baixo teor de sílica e o alto teor de óxido de ferro impossibilita que o rejeito arenoso seja utilizado *in natura* como areia base de fundição, sendo necessário o seu beneficiamento.

Os resultados das análises mineralógicas dos rejeitos arenosos naturais RA01 e RA02 via difratometria de raios X estão apresentados nas Figuras 5.1 e 5.2

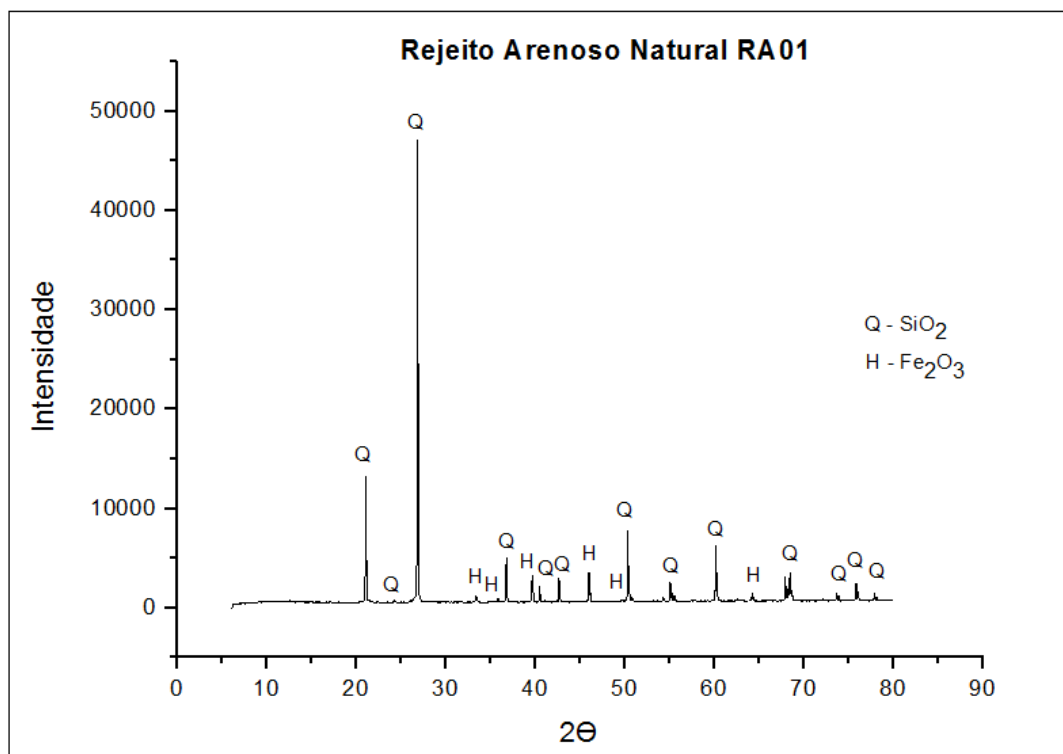


Figura 5.1- Análise mineralógica por difratometria de raios X da amostra de rejeito arenoso natural RA01.

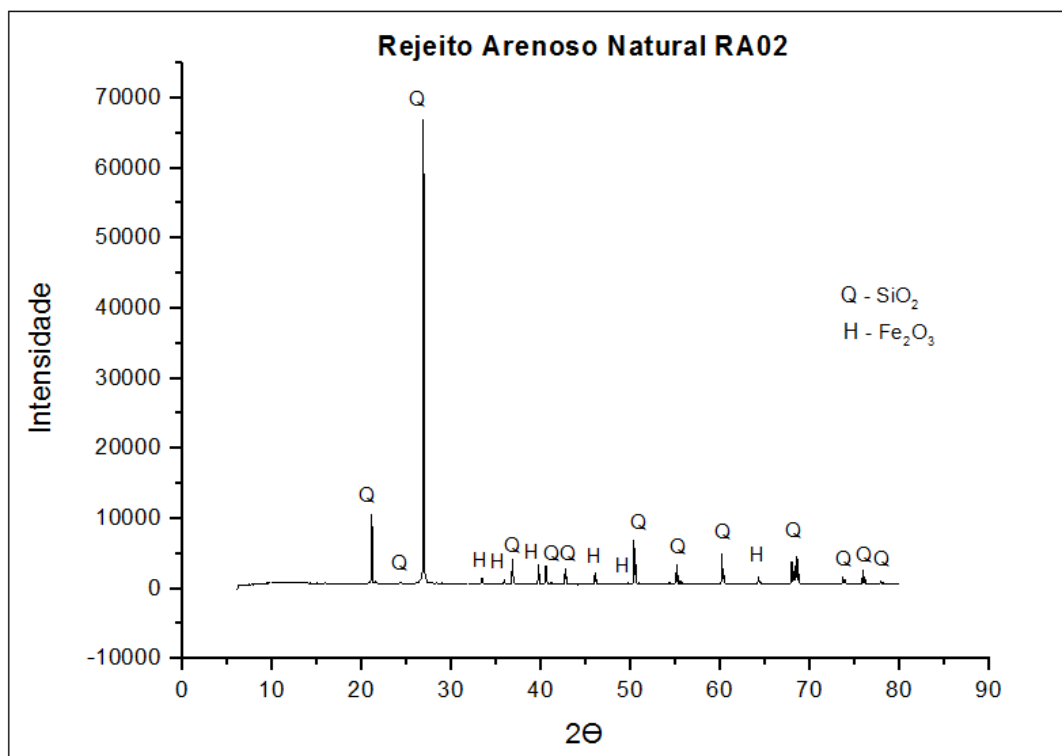


Figura 5.2- Análise mineralógica por difratometria de raios X da amostra de rejeito arenoso natural RA02.

As análises mineralógicas realizadas confirmam a presença de quartzo (SiO₂) e óxido de ferro (Fe₂O₃) nas amostras de rejeito arenoso natural. Esta análise vem a contribuir com os resultados das análises químicas por fluorescência de raios X, que apontam que os principais elementos da sua composição são os óxidos citados.

A Tabela 5.2 apresenta os resultados do ensaio de perda por calcinação das amostras de rejeito arenoso natural RA01 e RA02.

Tabela 5.2 – Resultados do ensaio de perda por calcinação dos rejeitos arenosos naturais RA01 e RA02.

Ensaio	Rejeito Arenoso RA01	Rejeito Arenoso RA02
Perda por calcinação	0,48%	0,68%

A perda por calcinação (PPC) das amostras de rejeito arenoso RA01 e RA02 foi de 0,48% e 0,68%, respectivamente. Com a análise é possível perceber que o rejeito arenoso natural RA01 possui perda por calcinação semelhante ao rejeito arenoso natural RA02.

A perda por calcinação da amostra de rejeito arenoso global da Usina 2 da Samarco Mineração S.A., apresentada no item 3.3, foi de 0,48%, valor bem próximo ao dos rejeitos arenosos RA01 e RA02. O mesmo acontece com a perda por calcinação do rejeito arenoso natural (AM01) realizada por Figueiredo (2017), que apresentou valor de 0,52%.

Segundo Figueiredo (2017) a perda por calcinação para areia base de fundição deve apresentar o menor valor possível, sendo aceitável até 2%. As amostras de rejeito natural apresentam valor de perda por calcinação dentro dos limites para areia base de fundição.

As Figuras 5.3 e 5.4 apresentam o resultado da análise granulométrica das amostras de rejeito arenoso natural RA01 e RA02.

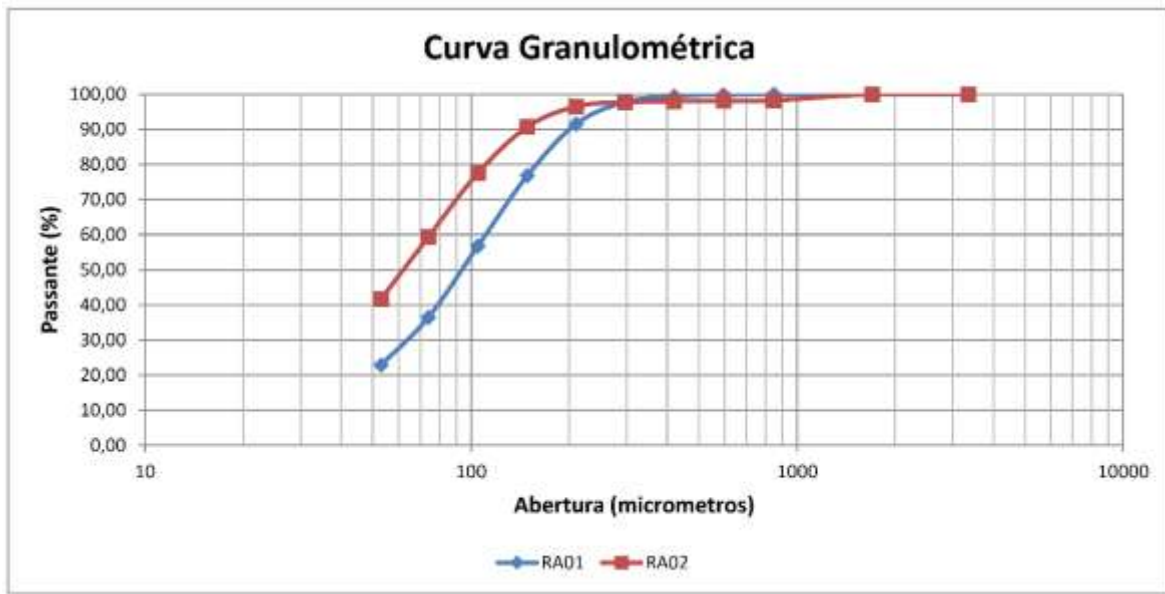


Figura 5.3- Curva granulométrica das amostras de rejeito arenoso natural RA01 e RA02.



Figura 5.4- Distribuição granulométrica das amostras de rejeito arenoso natural RA01 e RA02.

Os rejeitos arenosos naturais RA01 e RA02 possuem ampla faixa de distribuição granulométrica, com concentração de partículas em várias peneiras, o que pode gerar problemas na permeabilidade da areia base e defeitos nas peças fundidas.

A partir da curva e da distribuição granulométrica é possível perceber que o rejeito arenoso natural RA02 é mais fino, pois possui maior porcentagens de partículas abaixo de 105 μ m (150#) e tem distribuição granulométrica mais concentrada nas peneiras mais finas. Essa mudança de característica aconteceu porque as amostras de rejeito arenoso foram coletadas em lugares distintos.

Comparando as análises granulométricas dos rejeitos arenosos naturais estudados nesse trabalho com o rejeito arenoso natural (AM01) estudado no trabalho de Figueiredo (2017), pode-se perceber que o rejeito arenoso RA01 tem curva granulométrica e distribuição granulométrica semelhante ao estudado pelo autor, porém o RA02 é mais fino.

As Figuras 5.5 e 5.6 apresentam um comparativo dos resultados das análises granulométricas das amostras de rejeito arenoso natural RA01 e RA02, e da amostra de rejeito arenoso (AM01) estudada por Figueiredo (2017).

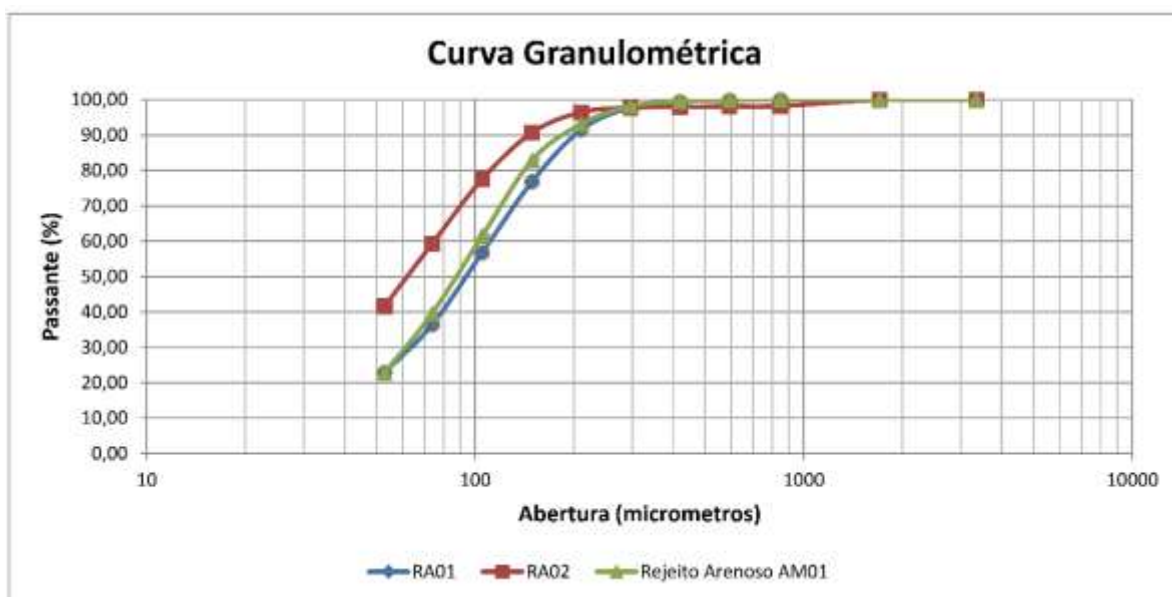


Figura 5.5- Comparativo da curva granulométrica das amostras de rejeito arenoso natural RA01 e RA02, e da amostra de rejeito arenoso (AM01).



Figura 5.6- Comparativo da distribuição granulométrica das amostras de rejeito arenoso natural RA01 e RA02, e da amostra de rejeito arenoso (AM01).

A Tabela 5.3 apresenta os valores de módulo de finura, classificação da areia em relação ao módulo de finura e o teor de finos das amostras de rejeito arenoso natural RA01 e RA02.

Tabela 5.3 – Módulo de finura, classificação da areia em relação ao módulo de finura e teor de finos dos rejeitos arenosos naturais RA01 e RA02.

Parâmetro	Rejeito Arenoso RA01	Rejeito Arenoso RA02
Módulo de Finura (AFS)	158,48	203,99
Classificação da Areia	Areia Finíssima	Areia Finíssima
Teor de finos (%)	56,73	77,54

Os rejeitos arenosos naturais RA01 e RA02 apresentaram módulos de finura muito altos, 158,48AFS e 203,99AFS, respectivamente, sendo classificadas como areia finíssima. Os teores de finos apresentados também estão muito altos, sendo equivalentes a 56,73% e 77,54% da massa dos rejeitos. Quanto maior o módulo de finura menor é o tamanho médio das partículas, provando mais uma vez que o rejeito arenoso natural RA02 é mais fino.

Quando comparamos o módulo de finura e o teor de finos das amostras de rejeito arenoso RA01, RA02 e a amostra de rejeito arenoso (AM01) estudada por Figueiredo (2017), percebe-se, novamente, grande semelhança entre as amostras RA01 e AM01. A amostra AM01 apresentou módulo de finura de 164,45AFS e teor de finos de 61,52% da massa do rejeito.

Os resultados da análise granuloquímica da amostra de rejeito arenoso RA01 estão dispostos na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Análise granuloquímica da amostra de rejeito arenoso RA01.

Peneiramento		Rejeito Arenoso Natural RA01				Teores (%)					
Malha	Abertura	Massa	% Ret.	% Ret.	% Pas-	Faixa	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	MnO ₂
Tyler	micrometros	(g)	Simple	Acumul.	sante						
20	840	0,026	0,03	0,03	99,97						
28	595	0,120	0,12	0,14	99,86						
35	420	0,429	0,41	0,56	99,44						
48	297	1,735	1,68	2,23	97,77						
65	210	6,492	6,28	8,51	91,49	>100#	6,69	90,02	0,16	0,001	0,01
100	149	15,142	14,64	23,16	76,84	>200#	6,85	89,84	0,16	0,001	0,01
150	105	20,795	20,11	43,27	56,73	>325#	11,24	83,30	0,25	0,005	0,01
200	74	20,988	20,30	63,57	36,43	<325#	44,72	34,27	0,64	0,015	0,04
270	53	14,036	13,57	77,14	22,86						
325	44	3,768	3,64	80,78	19,22						
400	37	1,741	1,68	82,47	17,53						
<400	<37	18,13	17,53	100,00	0,00						
Massa Total		103,4		Cabeça Analisada			13,19	80,07	0,54	0,004	0,01

A partir da análise granuloquímica apresentada é possível observar que a medida que a granulometria do rejeito arenoso aumenta, a porcentagem de sílica aumenta e a porcentagem de ferro diminui.

Para a faixa granulométrica menor que 44 μ m (325#) a amostra tem composição química de 44,72% de ferro e 34,27% de sílica. Essa faixa representa aproximadamente 19% da massa total da amostra.

Para a faixa granulométrica entre 44 μ m (325#) e 149 μ m (100#) a amostra tem composição química de 6% a 11% de ferro e de 90% a 83% de sílica. Essa faixa representa aproximadamente 58% da massa total da amostra.

Para a faixa granulométrica acima de 149 μ m (100#) a amostra tem composição química de 90,02% de sílica e de 6,69% de ferro. Essa faixa representa aproximadamente 23% da massa total da amostra. O alto teor de sílica dessa faixa granulométrica possibilita a sua utilização como areia base de fundição.

O resultado da análise granuloquímica do rejeito arenoso natural RA01 confirmou a existência de características físicas e químicas necessárias para realização do seu beneficiamento e a obtenção de uma areia base para fundição.

Os resultados da análise granulométrica da amostra de rejeito arenoso RA02 estão dispostos na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Análise granulométrica da amostra de rejeito arenoso RA02.

Peneiramento		Rejeito Arenoso Natural RA02				Teores (%)				
Malha	Abertura	Massa	% Ret.	% Ret.	% Pas-	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	MnO ₂
Tyler	micrometros	(g)	Simples	Acumul.	sante					
20	840	1,48	1,77	1,77	98,23					
28	595	0,09	0,11	1,88	98,12					
35	420	0,11	0,13	2,00	98,00					
48	297	0,20	0,24	2,24	97,76					
65	210	1,08	1,30	3,53	96,47	28,50	53,23	2,52	0,033	0,04
100	149	4,82	5,76	9,30	90,70	3,45	94,47	0,20	0,006	0,00
150	105	11,00	13,16	22,46	77,54	3,13	94,91	0,26	0,006	0,00
200	74	15,21	18,19	40,65	59,35	3,42	94,60	0,17	0,007	0,00
270	53	14,79	17,70	58,35	41,65	4,51	93,00	0,13	0,006	0,00
325	44	5,58	6,68	65,03	34,97	7,05	89,22	0,24	0,008	0,00
400	37	3,00	3,59	68,62	31,38	8,80	86,38	0,25	0,009	0,00
<400	<37	26,23	31,38	100,00	0,00	32,48	50,73	1,11	0,023	0,02
				Cabeça Calculada		14,02	78,46	0,56	0,01	0,01
Massa Total		83,6		Cabeça Analisada		13,11	79,73	0,62	0,01	0,00

A partir da análise granulométrica apresentada também foi possível observar que, à medida que a granulometria do rejeito arenoso aumenta, a porcentagem de sílica aumenta e a porcentagem de ferro diminui. Apenas a faixa granulométrica acima de 210 μ m (65#) apresentou comportamento anormal.

O motivo desse comportamento anormal é que a amostra de rejeito arenoso RA02 ficou durante muito tempo armazenada na Mina do Pico, na empresa VALE S.A, e ocorreu uma pequena contaminação com partículas de minério de ferro acima de 210 μ m (65#). As outras faixas granulométricas não sofreram alterações.

Para a faixa granulométrica menor que 37 μ m (400#) a amostra tem composição química de 32,48% de ferro e 50,73% de sílica. Essa faixa representa aproximadamente 31% da massa total da amostra.

Para a faixa granulométrica entre 37 μ m (400#) e 105 μ m (150#) a amostra tem composição química de 3% a 8% de ferro e de 94% a 86% de sílica. Essa faixa representa aproximadamente 46% da massa total da amostra

Para a faixa granulométrica acima de 105 μ m (150#) a amostra tem composição química de 95% de sílica e 3% de ferro. Essa faixa representa aproximadamente 23% da massa total da amostra. O alto teor de sílica dessa faixa granulométrica possibilita a sua utilização como areia base de fundição.

O resultado da análise granuloquímica do rejeito arenoso natural RA02 também confirmou a existência de características físicas e químicas necessárias para realização do seu beneficiamento e a obtenção de uma areia base para fundição.

A partir dos resultados de caracterização química, física e granulométrica das amostras de rejeito arenoso natural RA01 e RA02 foi definido por quais etapas de beneficiamento eles seriam processados. Também foi definido quais os objetivos de cada ensaio de processamento.

5.2 Ensaio Piloto de Processamento do Rejeito Arenoso

Apresentam-se os resultados dos ensaios piloto de processamento realizados com as amostras de rejeito arenoso natural RA01 e RA02.

5.2.1 Deslamagem e desaguamento com hidrociclones

As Tabelas 5.6 e 5.7 apresentam os resultados dos ensaios para definição da melhor curva de partição para a separação das partículas abaixo de 400# (37 μ m).

Tabela 5.6 – Resultados dos ensaios para definição da melhor curva de partição para separação em 400# com hidrociclone com diâmetro de 2”.

Para Hidrociclone com diâmetro de 2”				
N° do Teste	Fatores de controle			Resultado Curva de partição
	Vórtex	Ápex	Pressão	
1	3/8”	0,156”	2kgf/cm ²	86%
2	3/8”	0,256”	2kgf/cm ²	90%
3	3/8”	0,312”	2kgf/cm ²	95%
4	5/8”	0,156”	2kgf/cm ²	78%
5	5/8”	0,256”	2kgf/cm ²	87%
6	5/8”	0,312”	2kgf/cm ²	89%
7	3/4”	0,156”	2kgf/cm ²	75%
8	3/4”	0,256”	2kgf/cm ²	85%
9	3/4”	0,312”	2kgf/cm ²	88%

Tabela 5.7 – Resultados dos ensaios para definição da melhor curva de partição para separação em 400# com hidrociclone com diâmetro de 4”.

Para Hidrociclone com diâmetro de 4”				
N° do Teste	Fatores de controle			Resultado
	<i>Vórtex</i>	<i>Ápex</i>	Pressão	Curva de partição
1	1,25”	1/2”	2kgf/cm ²	87%
2	1,6”	1/2”	2kgf/cm ²	82%

A faixa granulométrica abaixo de 37 μ m (400#) da amostra de rejeito arenosos RA01 representa aproximadamente 17% da massa total da amostra, o que indica que para essa classificação o valor mais indicado para a curva de partição é próximo de 83%.

Como indicado nas Tabelas 5.6 e 5.7 o hidrociclone que apresentou a melhor configuração foi o de 4” de diâmetro com *ápex* de 1/2" e *vórtex* de 1,6”, atingindo a melhor curva de partição, 82%, para a separação das partículas com granulometria abaixo de 37 μ m (400#) da amostra de rejeito arenoso natural RA01.

Para essa configuração obteve-se o melhor resultado devido à razão de redução de 3,2 do *ápex* em relação ao *vórtex*. Para as outras configurações a razão de redução do *ápex* em relação ao *vórtex* variou de 1,2 até 4,8.

Após a definição da utilização do hidrociclone de 4” de diâmetro com *ápex* de 1/2" e *vórtex* de 1,6”, esperou-se a estabilização do circuito e foram coletados o *underflow* e o *overflow* do hidrociclone. O *overflow* deu origem ao produto A e o *underflow* deu origem ao produto B. Os produtos A e B foram caracterizados como descrito no item 4.2.

Em relação ao desaguamento foram medidos as porcentagens de sólido da alimentação, do *overflow* e do *underflow* que foram de 9%, 2% e 45%, respectivamente. O desaguamento ocorreu como esperado e a porcentagem de sólidos do *underflow* aumentou consideravelmente.

Realizando o balanço de massa após a deslamagem, foi constatado que aproximadamente 5% do material foi direcionado para o *overflow* e os outros 95% do material foi direcionado para o *underflow* juntamente com a água do processo.

A Figura 5.7 apresenta as saídas de *underflow* e *overflow* do conjunto de hidrociclone piloto modelo LBCBHL durante o ensaio de deslamagem e desaguamento do rejeito arenoso RA01, no laboratório químico da Samarco Mineração S.A.



Figura 5.7- Saídas de *underflow* e *overflow* do conjunto de hidrociclonação piloto modelo LBCBHL durante o ensaio de deslamagem e desaguamento do rejeito arenoso RA01.

5.2.2 Classificação a úmido por peneiramento

A Tabela 5.8 apresenta os resultados dos ensaios para definição da melhor aceleração para separação do rejeito arenoso natural RA02 em 150# com peneiras vibratórias.

Tabela 5.8 – Resultados dos ensaios para definição da melhor aceleração para a separação em 150# com peneiras vibratórias.

N° do Teste	Fatores de controle		Resultado
	Amplitude	Rotação	Aceleração
1	2,0mm	1000rpm	2,20G
2	2,0mm	1200rpm	3,20G
3	2,2mm	1000rpm	2,40G
4	2,2mm	1200rpm	3,50G

Como o rejeito arenoso natural RA02 tem granulometria muito fina, é necessário que a peneira vibratória atinja o melhor resultado de aceleração possível, evitando que as partículas mais finas fiquem retidas nas aberturas das telas e contaminem o produto. Por isso foi definida a amplitude de 2,2mm e a rotação de 1200rpm para atingir uma aceleração de 3,50G.

Com a aceleração definida foi realizada a alimentação da polpa de rejeito arenoso sobre a peneira de forma gradativa e foi observada a qualidade do peneiramento. A Tabela 5.9 apresenta os resultados da qualidade de peneiramento em função da taxa de alimentação da polpa de rejeito arenoso.

Tabela 5.9 - Resultados da qualidade de peneiramento em função da taxa de alimentação da polpa de rejeito arenoso sobre a peneira.

N° do Teste	Fator de controle	Resultado
	Taxa de alimentação	Qualidade de peneiramento
1	25%	Médio
2	50%	Bom
3	75%	Excelente
4	100%	Ruim

A taxa de alimentação da polpa de rejeito arenoso sobre a peneira que gerou uma excelente qualidade de peneiramento foi de 75%, equivalente a 7,5t/h de material alimentado na peneira. Quando é utilizado 100% da taxa de alimentação, é criada uma lamina de água sobre a abertura da tela impedindo a passagem do material abaixo de 150# e contaminando o *overflow*.

Após a escolha da taxa de alimentação e a estabilização do circuito, ocorreu o peneiramento de 1 tonelada de amostra, produzindo o *underflow* e o *overflow*. O *underflow* deu origem ao produto C e o *overflow* deu origem ao produto D. Os produtos C e D foram caracterizados como descrito no item 4.2.

Realizando o balanço de massa, após o peneiramento, foi constatado que aproximadamente 20% do material peneirado ficou retido na tela e foi direcionado para o *overflow* e os outros 80% do material alimentado passou pela tela e foi direcionado para o *underflow* juntamente com a água do processo.

Como o rejeito arenoso natural foi alimentado na peneira com 50% de sólidos o produto do overflow foi coletado com aproximadamente 20% de umidade, mas se for instalado um hidrociclone sobre a peneira para aumentar a porcentagem de sólidos do material alimentado a umidade do overflow pode diminuir bastante.

Para realização do peneiramento foram utilizados bicos de aspersão de água com um volume de alimentação de aproximadamente 0,5m³ de água por tonelada de material alimentado.

As Figura 5.8 e 5.9 apresentam uma visão superior da peneira vibratória durante a classificação do rejeito arenoso RA02 e uma visão da descarga da peneira com a areia classificada sendo depositada no *big bag*.



Figura 5.8- Visão superior da peneira vibratória durante a classificação do rejeito arenoso RA02.



Figura 5.9- Visão da descarga da peneira com a areia classificada sendo depositada no *big bag*.

5.2.3 Lavagem com *Hydro Clean*

A Tabela 5.10 apresenta o tempo ideal para realizar a lavagem do produto D (com granulometria acima de 150#), retido da classificação a úmido por peneiramento do rejeito arenoso natural RA02. A definição foi pela qualidade visual da lavagem.

Tabela 5.10 – Resultados dos ensaios para definição do tempo de lavagem no *Hydro Clean*.

N° do Teste	Fator de controle	Resultado
	Tempo de lavagem	Qualidade de lavagem
1	15s	Média
2	30s	Excelente

O tempo ideal foi definido como 30 segundos, pois foi o que apresentou melhor qualidade de lavagem. O tempo de 15 segundos não foi suficiente para lavar a amostra por completo. Após a definição do tempo ocorreu a lavagem de toda a amostra. O produto da lavagem deu origem ao produto E, que foi caracterizado como descrito no item 4.2.

Para realização da lavagem foram utilizados aproximadamente 20 litros de água a cada 1kg de produto E produzido. A água utilizada na lavagem saiu bem turva, mostrando que ainda existia uma certa quantidade de partículas finas de óxido de ferro.

A Figura 5.10 apresenta o *Hydro Clean* piloto na realização dos ensaios de lavagem com o produto D e produzindo o produto E.



Figura 5.10- Ensaio de lavagem do produto D no *Hydro Clean* piloto.

5.3 Ensaio de Caracterização dos Produtos do Processamento

Apresentam-se os resultados da caracterização química, física e granulométrica das amostras dos produtos A, B, C, D e E.

Os resultados das análises químicas semiquantitativas via espectroscopia por fluorescência de raios X (FRX) das amostras dos produtos A, B, C, D e E estão dispostos na Tabela 5.11.

Tabela 5.11 – Análise química das amostras dos produtos A, B, C, D e E por fluorescência de raios X.

Elemento Químico	Produto A	Produto B	Produto C	Produto D	Produto E
SiO ₂	36,44%	82,28%	77,71%	95,51%	95,69%
Fe	41,19%	11,74%	14,55%	2,73%	2,60%
CaO	0,08%	0,02%	0,000%	0,000%	0,000%
MnO	0,10%	0,01%	0,000%	0,000%	0,000%
Al ₂ O ₃	2,04%	0,49%	0,56%	0,19%	0,18%
TiO ₂	-	-	0,004%	0,000%	0,000%
MgO	-	-	0,182%	0,179%	0,177%
P	0,043%	0,007%	0,013%	0,005%	0,005%

O produto A é resultado do *overflow* do ensaio de deslamagem e desaguamento da amostra RA01 e apresentou teores de óxido de silício e ferro iguais a 36,44% e 41,19%, respectivamente. Comparando o produto A com o rejeito arenoso RA01 foi possível perceber que ocorreu uma grande alteração nos teores de óxido de silício e ferro.

O produto B é resultado do *underflow* do ensaio de deslamagem e desaguamento da amostra RA01 e apresentou teores de óxido de silício e ferro iguais a 82,28% e 11,74%, respectivamente. Comparando o produto B com o rejeito arenoso RA01 foi possível perceber que ocorreu uma pequena alteração nos teores de óxido de silício e ferro.

Os resultados das análises químicas dos produtos A e B mostraram que o objetivo da deslamagem de separar as partículas de óxido de ferro (goethita) foi atingido, gerando um produto deslamado que pode ser utilizado no processo de peneiramento.

O produto C é o passante do ensaio de peneiramento da amostra RA02 e apresentou teores de óxido de silício e ferro iguais a 77,71% e 14,55%, respectivamente. Comparando o produto C com o rejeito arenoso RA02 percebe-se que ocorreu uma alteração significativa nas porcentagens de óxido de silício e ferro após o processamento.

O produto D é o retido do ensaio de peneiramento da amostra RA02 e apresentou teores de óxido de silício e ferro iguais a 95,51% e 2,73%, respectivamente. Comparando o produto D com o rejeito arenoso RA02 foi possível perceber que ocorreu uma grande alteração nos teores de óxido de silício e ferro. O retido do peneiramento gerou um produto de alto teor de sílica e baixo teor de ferro, ideal para realização dos ensaios tecnológicos para sua utilização como areia base de fundição.

Os resultados das análises químicas dos produtos C e D mostraram que o objetivo do peneiramento de aumentar o teor de sílica e diminuir o teor de ferro foi atingido, gerando um produto retido que pode ser utilizado no processo de lavagem.

O produto E é o resultado do ensaio de lavagem do produto D e apresentou teores de óxido de silício e ferro iguais a 95,69% e 2,60%, respectivamente. Comparando o produto E com o produto D foi possível perceber que ocorreu uma pequena alteração nos teores de óxido de silício e ferro. O produto da lavagem também gerou um produto de alto teor de sílica e baixo teor de ferro, ideal para realização dos ensaios tecnológicos para sua utilização como areia base de fundição.

A partir do resultado da análise química do produto E, não foi possível definir se a lavagem atingiu seu objetivo, o que será possível definir a partir dos resultados da análise granulométrica, da permeabilidade e dos ensaios tecnológicos.

Comparando os resultados das análises químicas dos produtos D e E com a análise química da amostra de rejeito arenoso processada (AM02) realizada por Figueiredo (2017), os teores de óxido de silício e óxido de ferro são bem próximos. A amostra AM02 apresentou os teores de óxido de silício e ferro iguais a 93,35% e 6,20%, respectivamente.

Os resultados das análises mineralógicas dos produtos D e E, via difratometria de raios X, estão apresentados nas Figura 5.11 e 5.12.

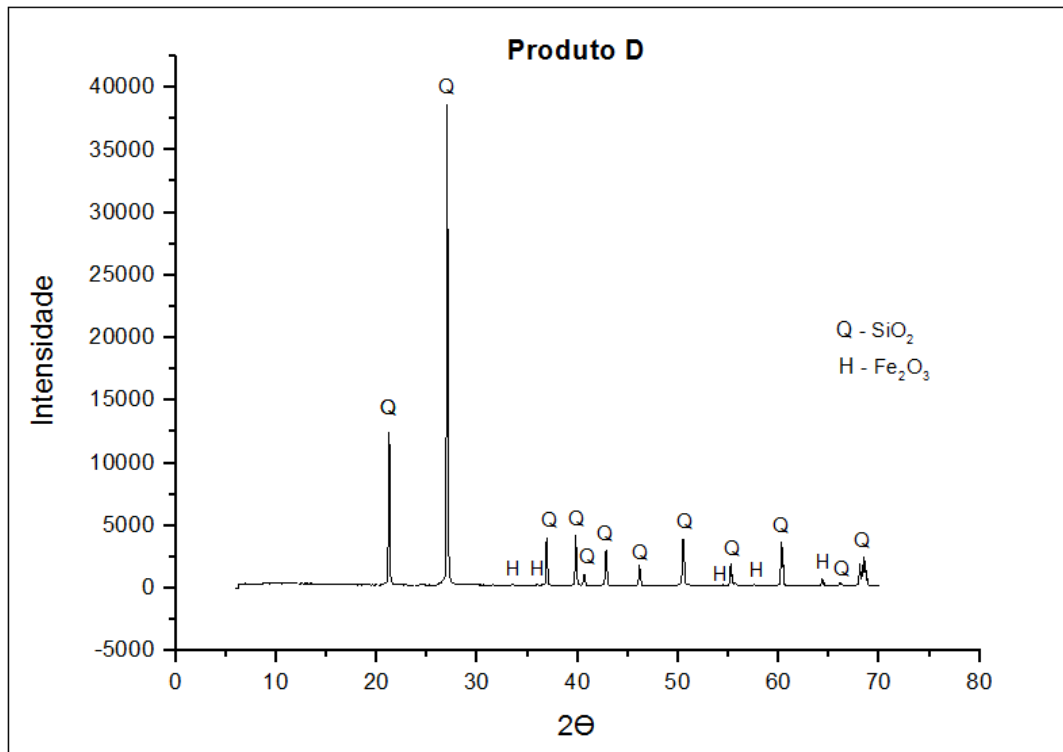


Figura 5.11- Análise mineralógica por difratometria de raios X da amostra do produto D.

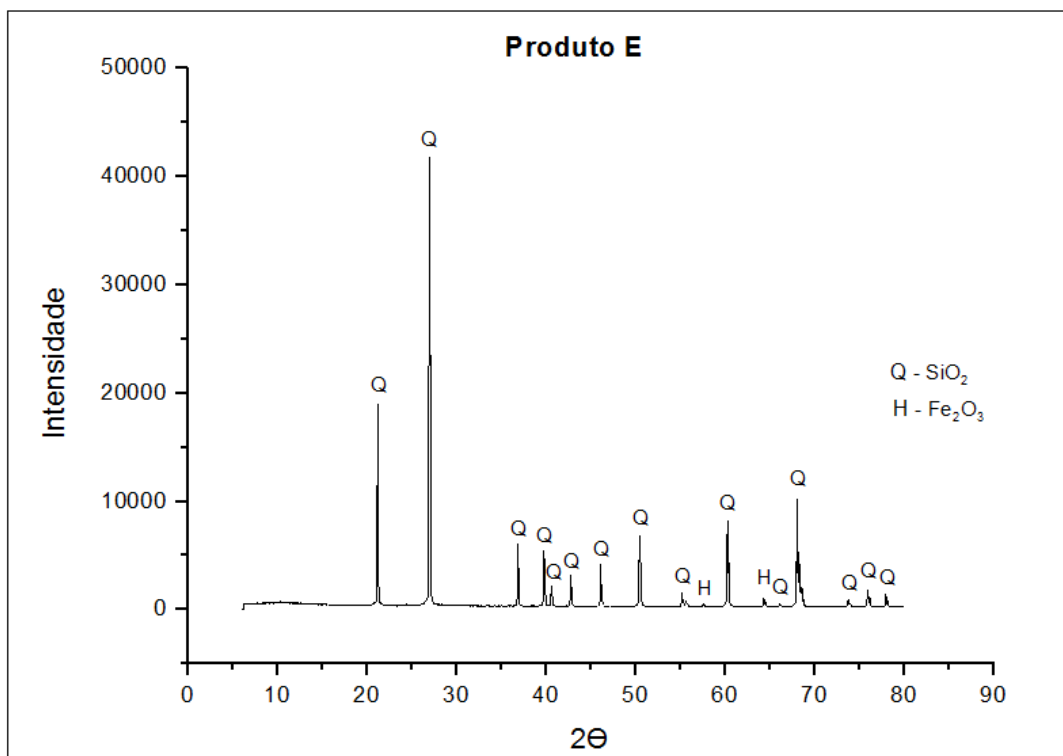


Figura 5.12- Análise mineralógica por difratometria de raios X da amostra do produto E.

As análises mineralógicas realizadas confirmam a grande presença de quartzo (SiO₂) e pequena presença de óxido de ferro (Fe₂O₃) nas amostras dos produtos D e E. Esta análise vem

contribuir com os resultados das análises químicas por fluorescência de raios X, que apontam que o principal elemento da sua composição é o óxido de silício.

A Tabela 5.12 apresenta os resultados do ensaio de perda por calcinação das amostras do produto A, B, C, D e E.

Tabela 5.12 – Resultados do ensaio de perda por calcinação dos produtos A, B, C, D e E.

Ensaio	Produto A	Produto B	Produto C	Produto D	Produto E
Perda por calcinação	2,32%	0,40%	0,71%	0,21%	0,22%

A perda por calcinação (PPC) das amostras dos produtos A, B, C, D e E foi de 2,32%, 0,40%, 0,71%, 0,21% e 0,22%, respectivamente. O produto A apresentou perda por calcinação muito superior aos outros produtos, devido ao seu teor de goethita.

O produto B apresentou uma perda por calcinação um pouco menor em relação a amostra de rejeito natural AR01. O produto C apresentou perda por calcinação muito semelhante a amostra de rejeito natural AR02.

As amostras dos produtos D e E apresentaram uma grande redução da perda por calcinação, se comparado ao rejeito arenoso natural AR02, devido à alta porcentagem de sílica e baixa porcentagem óxidos de ferro (goethita).

Ao compararmos os resultados da perda por calcinação dos produtos D e E ao resultado da amostra de rejeito arenoso processado (AM02), realizada por Figueiredo (2017), percebe-se que os produtos possuem perda por calcinação ligeiramente menor. A amostra AM02 apresentou 0,35%.

Segundo Figueiredo (2017) a perda por calcinação para areia base de fundição deve apresentar o menor valor possível, sendo aceitável até 2%. As amostras de produto D e E apresentam valor de perda por calcinação dentro dos limites para areia base de fundição.

As Figuras 5.13 e 5.14 apresentam o resultado da análise granulométrica das amostras dos produtos A e B, resultado da deslamagem e do desaguamento do rejeito arenoso natural RA01.

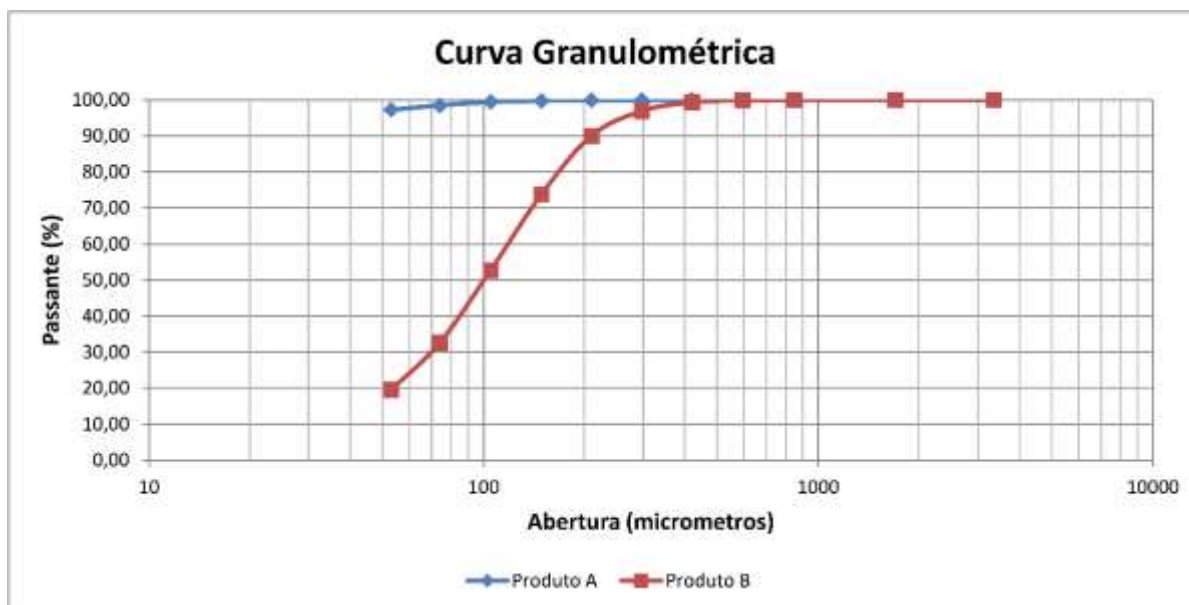


Figura 5.13- Curva granulométrica das amostras dos produtos A e B.



Figura 5.14- Distribuição granulométrica das amostras dos produtos A e B.

O produto A, que é resultado do *overflow* do ensaio de deslamagem e desaguamento da amostra RA01, apresentou granulometria muito fina, com 96,35% da massa da amostra passante na peneira de 37 μ m (400#).

O produto B, que é resultado do *underflow* do ensaio de deslamagem e desaguamento da amostra RA01, apresentou granulometria ligeiramente mais grossa que a do rejeito arenoso RA01, porém ainda com 14,57% da massa da amostra passante na peneira de 37 μ m (400#).

Os resultados das análises granulométricas dos produtos A e B mostraram que o objetivo da deslamagem de separar as partículas ultrafinas abaixo de $37\mu\text{m}$ (400#) não foi totalmente atingido, podendo melhorar o processo para atingir uma maior porcentagem de classificação.

As Figuras 5.15 e 5.16 apresentam o resultado da análise granulométrica das amostras dos produtos C, D, e E, resultado do peneiramento do rejeito arenoso natural RA02.

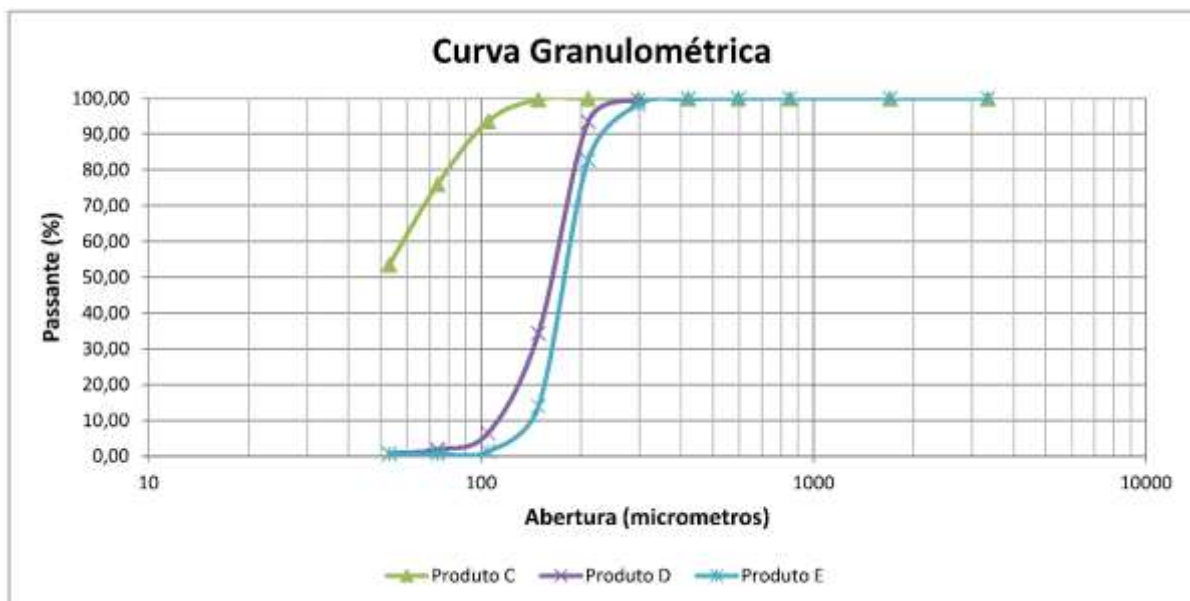


Figura 5.15- Curva granulométrica das amostras dos produtos C, D e E.

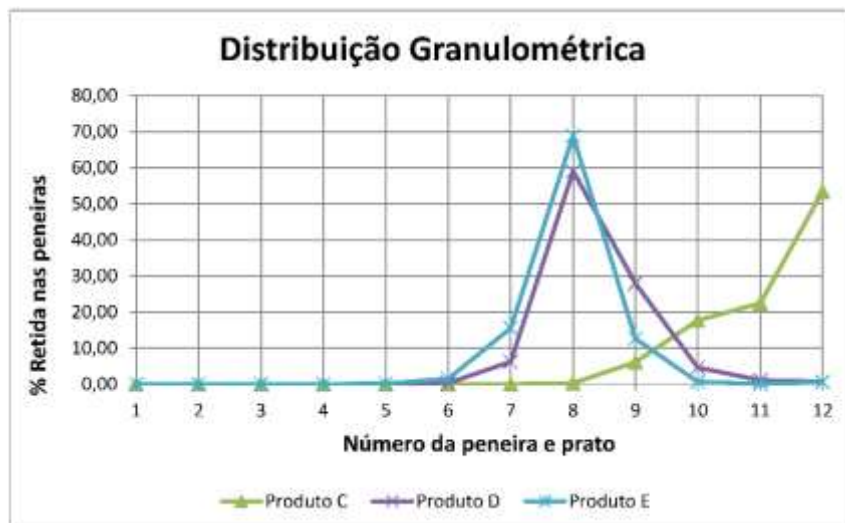


Figura 5.16- Distribuição granulométrica das amostras dos produtos C, D e E.

O produto C, que é o passante do ensaio de peneiramento da amostra RA02, apresentou uma granulometria mais fina que a amostra RA02, com 93,63% da massa da amostra passante na peneira de $105\mu\text{m}$ (150#).

O produto D, que é o retido do ensaio de peneiramento da amostra RA02, apresentou granulometria mais grossa que a amostra RA02, com 93,60% da massa da amostra retido na peneira de 105 μ m (150#). A amostra apresentou distribuição granulométrica concentrada em três peneiras em sequência, conforme recomendado por alguns autores (MUCHON,1988; LUZ e LINS, 2005). O retido do peneiramento gerou um produto com boa granulometria para realização dos ensaios tecnológicos para sua utilização como areia base de fundição.

Os resultados das análises granulométricas dos produtos C e D mostraram que o objetivo do peneiramento de classificar o material com um corte em 105 μ m (150#) foi atingido, gerando um produto retido que pode ser utilizado no processo de lavagem.

O produto E, que é o resultado do ensaio de lavagem do produto D, apresentou granulometria mais grossa que o produto D, com 98,75% da massa da amostra retida na peneira de 105 μ m (150#). A amostra também apresentou distribuição granulométrica concentrada em três peneiras em sequência. A lavagem gerou um produto com granulometria ideal para realização dos ensaios tecnológicos para sua utilização como areia base de fundição.

A partir do resultado da análise granulométrica do produto E, foi possível perceber que a lavagem atingiu seu objetivo, reduzindo significativamente a presença de partículas abaixo de 105 μ m (150#).

Comparando as análises granulométricas dos produtos D e E, estudados nesse trabalho, com o rejeito arenoso processado (AM02) estudado no trabalho de Figueiredo (2017), pode-se perceber que eles possuem curva granulométrica e distribuição granulométrica semelhantes, porém os produtos D e E são mais finos.

As Figuras 5.17 e 5.18 apresentam um comparativo dos resultados das análises granulométricas das amostras dos produtos C e D, e da amostra de rejeito arenoso processado (AM02) estudada por Figueiredo (2017).

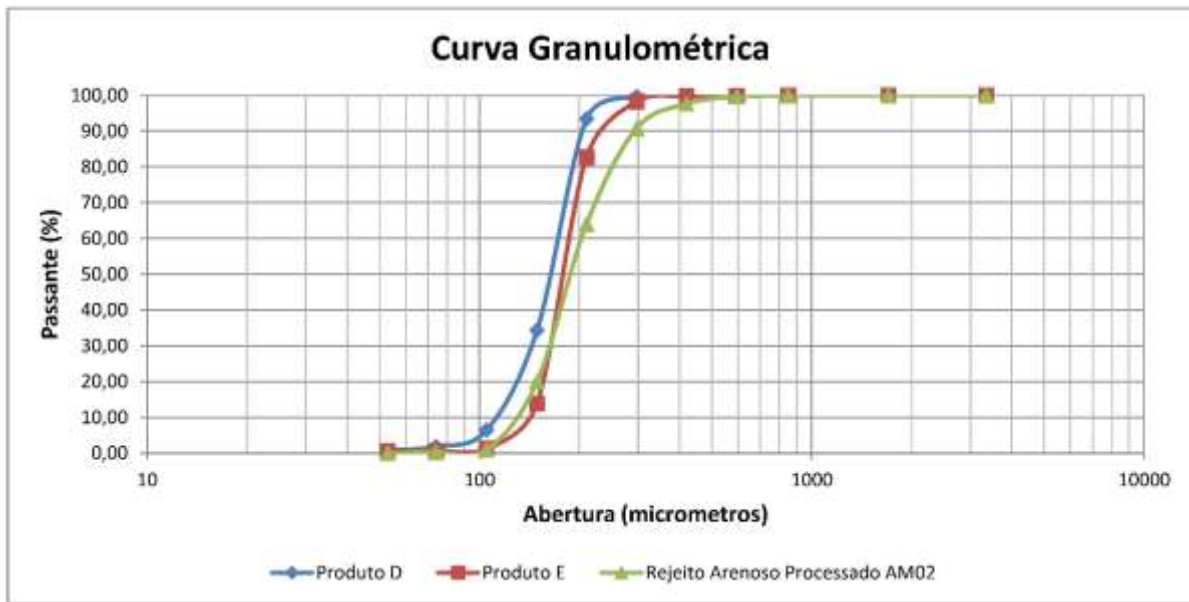


Figura 5.17- Comparativo da curva granulométrica das amostras dos produtos D e E, e da amostra de rejeito arenoso processada (AM02).



Figura 5.18- Comparativo da distribuição granulométrica das amostras dos produtos D e E, e da amostra de rejeito arenoso processada (AM02).

A Tabela 5.13 apresenta os valores de módulo de finura, classificação da areia em relação ao módulo de finura e o teor de finos das amostras dos produtos A, B, C, D e E.

Tabela 5.13 – Módulo de finura, classificação da areia em relação ao módulo de finura e teor de finos dos produtos A, B, C, D e E.

Parâmetro	Produto A	Produto B	Produto C	Produto D	Produto E
Módulo de Finura (AFS)	296,04	149,94	236,38	83,31	71,98
Classificação da Areia	Areia Finíssima	Areia Muito Fina	Areia Finíssima	Areia Fina	Areia Fina
Teor de finos (%)	99,43	52,72	93,64	6,40	1,25

Os produtos A e C apresentaram módulos de finura muito altos, 296,04 e 236,38, respectivamente, sendo classificadas como areia finíssima. Os teores de finos apresentados estão muito altos, sendo equivalentes a 99,43% e 93,64% da massa das amostras.

O produto B também apresentou módulo de finura alto, 149,94, sendo classificadas como areia muito fina. O teor de finos apresentado também está alto, sendo equivalente a 52,72% da massa das amostras.

Já os produtos D e E apresentaram módulo de finura bem menores que os demais, 83,31 e 71,98, respectivamente, sendo classificadas como areia fina. Os teores de finos apresentados estão mais baixos, sendo equivalentes a 6,40% e 1,25% da massa das amostras.

De acordo com Figueiredo (2017) o teor de finos recomendado para areia base de fundição é de 5%, por isso, somente o produto E é recomendado para utilização no processo de fundição.

Quando comparamos o módulo de finura e o teor de finos da amostra do produto E e da amostra de rejeito arenoso processada (AM02) estudada por Figueiredo (2017), percebe-se a semelhança nos valores, porém o produto E ainda é mais fino. A amostra AM02 apresentou módulo de finura de 68,17AFS e teor de finos de 0,95%.

Os resultados da análise granulométrica da amostra do produto A estão dispostos na Tabela 5.14.

Para a faixa granulométrica acima de 44 μ m (325#) a amostra tem composição química de 6,79% de ferro e 88,76% de sílica. Essa faixa representou apenas 3,38% da massa total da amostra.

Para a faixa granulométrica abaixo de 44 μ m (325#) a amostra tem composição química de 40,50% de ferro e 37,49% de sílica. Essa faixa representou 96,62% da massa total da amostra. O resultado da análise granuloquímica do produto A confirmou que a deslamagem produziu um produto com grande porcentagem de ultrafinos com alto teor de óxidos de ferro.

Tabela 5.14 – Análise granuloquímica da amostra do produto A.

Peneiramento		Produto A				Teores (%)					
Malha	Abertura	Massa	% Ret.	% Ret.	% Pas-	Faixa	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	MnO ₂
Tyler	micrometros	(g)	Simples	Acumul.	sante						
20	840	0,000	0,00	0,00	100,00						
28	595	0,000	0,00	0,00	100,00						
35	420	0,000	0,00	0,00	100,00						
48	297	0,032	0,03	0,03	99,97						
65	210	0,050	0,04	0,07	99,93	>325#	6,79	88,76	0,53	0,005	0,02
100	149	0,160	0,14	0,22	99,78	<325#	40,50	37,49	1,97	0,040	0,09
150	105	0,399	0,36	0,57	99,43						
200	74	1,054	0,95	1,52	98,48						
270	53	1,373	1,23	2,75	97,25						
325	44	0,697	0,63	3,38	96,62						
400	37	0,305	0,27	3,65	96,35						
<400	<37	107,43	96,35	100,00	0,00						
Massa Total		111,5		Cabeça Analisada			41,19	36,44	2,04	0,043	0,10

Os resultados da análise granuloquímica da amostra do produto B estão dispostos na Tabela 5.15.

Tabela 5.15 – Análise granuloquímica da amostra do produto B.

Peneiramento		Produto B				Teores (%)					
Malha	Abertura	Massa	% Ret.	% Ret.	% Pas-	Faixa	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	MnO ₂
Tyler	micrometros	(g)	Simples	Acumul.	sante						
20	840	0,008	0,01	0,01	99,99						
28	595	0,140	0,10	0,10	99,90						
35	420	0,854	0,59	0,70	99,30						
48	297	3,456	2,40	3,10	96,90						
65	210	9,956	6,92	10,02	89,98	>100#	4,80	92,49	0,21	0,002	0,01
100	149	23,292	16,20	26,22	73,78	>200#	6,03	90,80	0,18	0,003	0,01
150	105	30,291	21,06	47,29	52,71	>325#	11,47	82,83	0,24	0,002	0,01
200	74	28,934	20,12	67,41	32,59	<325#	43,47	36,20	0,49	0,015	0,03
270	53	18,761	13,05	80,45	19,55						
325	44	4,830	3,36	83,81	16,19						
400	37	2,333	1,62	85,43	14,57						
<400	<37	20,95	14,57	100,00	0,00						
Massa Total		143,8		Cabeça Analisada			11,74	82,28	0,49	0,007	0,01

Para a faixa granulométrica abaixo de 44 μ m (325#) a amostra tem composição química de 43,47% de ferro e 36,20% de sílica. Essa faixa representou aproximadamente 16% da massa total da amostra.

Para a faixa granulométrica acima de 44 μ m (325#) a amostra tem composição química variando de 4,80% a 11,47% de ferro e de 82,83% a 92,49% de sílica. Essa faixa representou aproximadamente 84% da massa total da amostra.

O resultado da análise granuloquímica do produto B apresentou uma pequena melhora em comparação com a amostra RA01, porém mostrou que, mesmo com a deslamagem, ainda restou uma alta porcentagem de materiais ultrafinos na amostra do produto B.

A Tabela 5.16 apresenta os resultados dos ensaios de umidade e permeabilidade das amostras dos produtos D e E.

Tabela 5.16 – Resultados dos ensaios de umidade e permeabilidade dos produtos D e E.

Ensaio	Produto D	Produto E
Umidade (%)	0,04	0,03
Permeabilidade (AFS)	63	74

O teor de umidade dos produtos D e E foi respectivamente, 0,04% e 0,03%. Segundo Figueiredo (2017) a recomendação para areia base de fundição é que o teor de umidade não exceda valores de 0,1%, portanto, os produtos D e E estão dentro do recomendado.

Os produtos D e E apresentaram permeabilidade de 63 AFS e 74 AFS, respectivamente. Os valores de permeabilidade estão diretamente relacionados ao tamanho médio dos grãos e com o teor de finos da amostra. Os produtos D e E obtiveram valores de permeabilidade mais baixos quando comparados a permeabilidade obtida pela amostra de rejeito arenoso processada (AM02) estudada por Figueiredo (2017). A amostra AM02 atingiu valores de 122 AFS.

5.4 Ensaios Tecnológicos de Areia de Fundição

Apresentam-se os resultados dos ensaios tecnológicos utilizando os produtos D e E como areia base de fundição.

Os resultados dos ensaios de resistência à tração das amostras preparadas pelo processo de cura a frio com resina fenólica-uretânica estão dispostos na Figura 5.19.



Figura 5.19- Resistência à tração em função do tempo dos produtos D e E.

Para o produto E obteve-se maiores valores de resistência à tração comparado ao produto D em todos os intervalos. Essa diferença entre as resistências pode ser justificada pela granulometria do produto D ser mais fina que o produto E, além de possuir um módulo de finura superior e maior teor de finos.

Os resultados dos ensaios de resistência à flexão das amostras preparadas pelo processo de cura a frio com resina fenólica-uretânica estão dispostos na Figura 5.20.

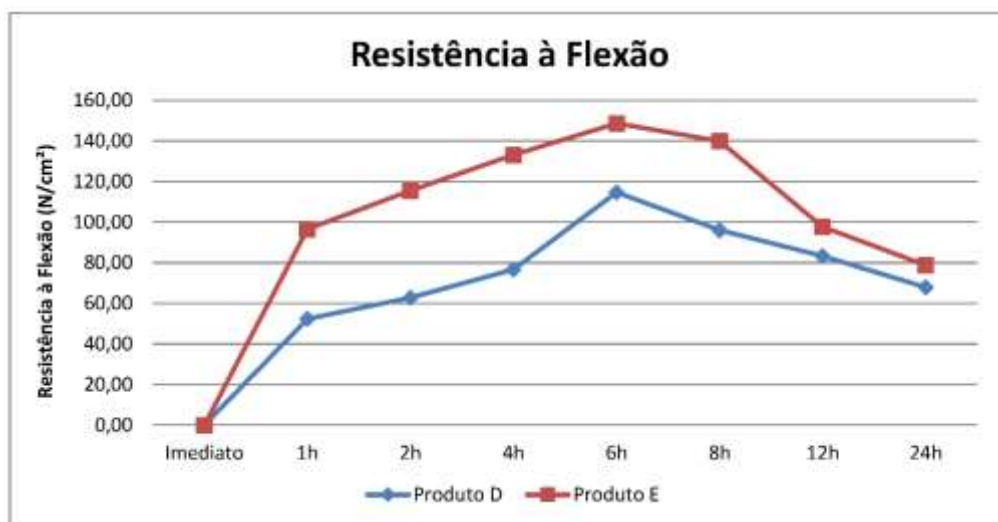


Figura 5.20- Resistência à flexão em função do tempo dos produtos D e E.

Para o produto E também obteve-se maiores valores de resistência à flexão comparado ao produto D em todos os intervalos. Essa diferença entre as resistências também pode ser justificada pela granulometria do produto D ser mais fina que o produto E, além de possuir um módulo de finura superior e maior teor de finos.

As Figuras 5.21 e 5.22 apresentam um comparativo dos resultados da resistência à tração e da resistência à flexão dos produtos C e D, e da amostra de rejeito arenoso processado (AM02) estudada por Figueiredo (2017).



Figura 5.21- Comparativo da resistência à tração em função do tempo dos produtos D e E, e do rejeito arenoso processado AM02.



Figura 5.22- Comparativo da resistência à flexão em função do tempo dos produtos D e E, e do rejeito arenoso processado AM02.

Comparando os resultados de resistência à tração e flexão dos produtos D e E estudados nesse trabalho com os resultados obtidos para o rejeito arenoso processado (AM02) estudado no trabalho de Figueiredo (2017), pode-se perceber que o produto D apresentou os menores valores de resistência à tração e flexão em todos os intervalos de tempo, porém o produto E apresentou valores de resistência à tração e flexão semelhantes ao da amostra AM02.

Os resultados de resistência à tração e flexão apontam o produto E como o mais indicado para a utilização como areia base de fundição. Além de suas características físicas, químicas e granulométricas serem adequadas ele ainda apresentou os melhores resultados de resistência à tração e flexão.

Como só é possível obter o produto E após a lavagem do produto D, as etapas de lavagem e peneiramento tornam-se imprescindíveis para obtenção de areia de fundição por meio de rejeito arenoso natural.

5.5 Rota Tecnológica e Sistema de Processamento do Rejeito Arenoso

Apresenta-se a rota tecnológica definida pelos resultados das caracterizações químicas, físicas e granulométricas dos produtos dos ensaios de processamento e pelos resultados dos ensaios tecnológicos de areia de fundição.

Também é apresentado um sistema fixo e um sistema móvel de processamento do rejeito arenoso para a produção de areias artificiais de fundição baseado na rota tecnológica definida.

A rota tecnológica para a obtenção de areia base de fundição, por meio do beneficiamento do rejeito arenoso natural, está apresentada na Figura 5.23.

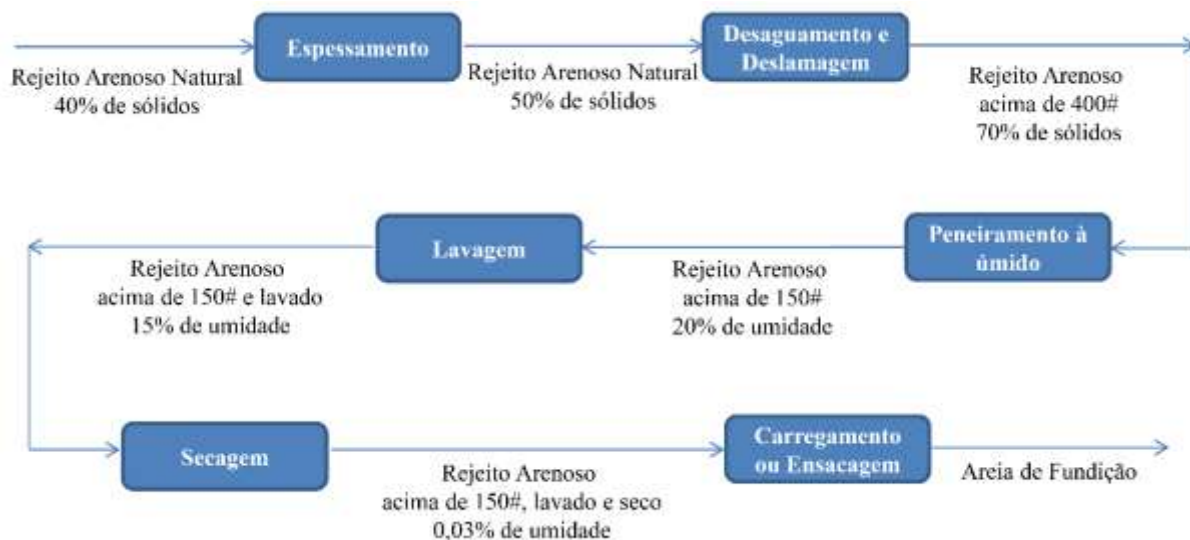


Figura 5.23- Rota tecnológica para fabricação de areia de fundição por meio do processamento do rejeito arenoso.

Os sistemas de processamento representados em forma de um fluxograma de processo apresentam detalhadamente os equipamentos utilizados, as taxas de produção e a situação da areia em cada equipamento.

O sistema fixo de processamento com capacidade de produção de 20t/h de areia de fundição produzida a partir do rejeito arenoso natural está apresentada na Figura 5.24.

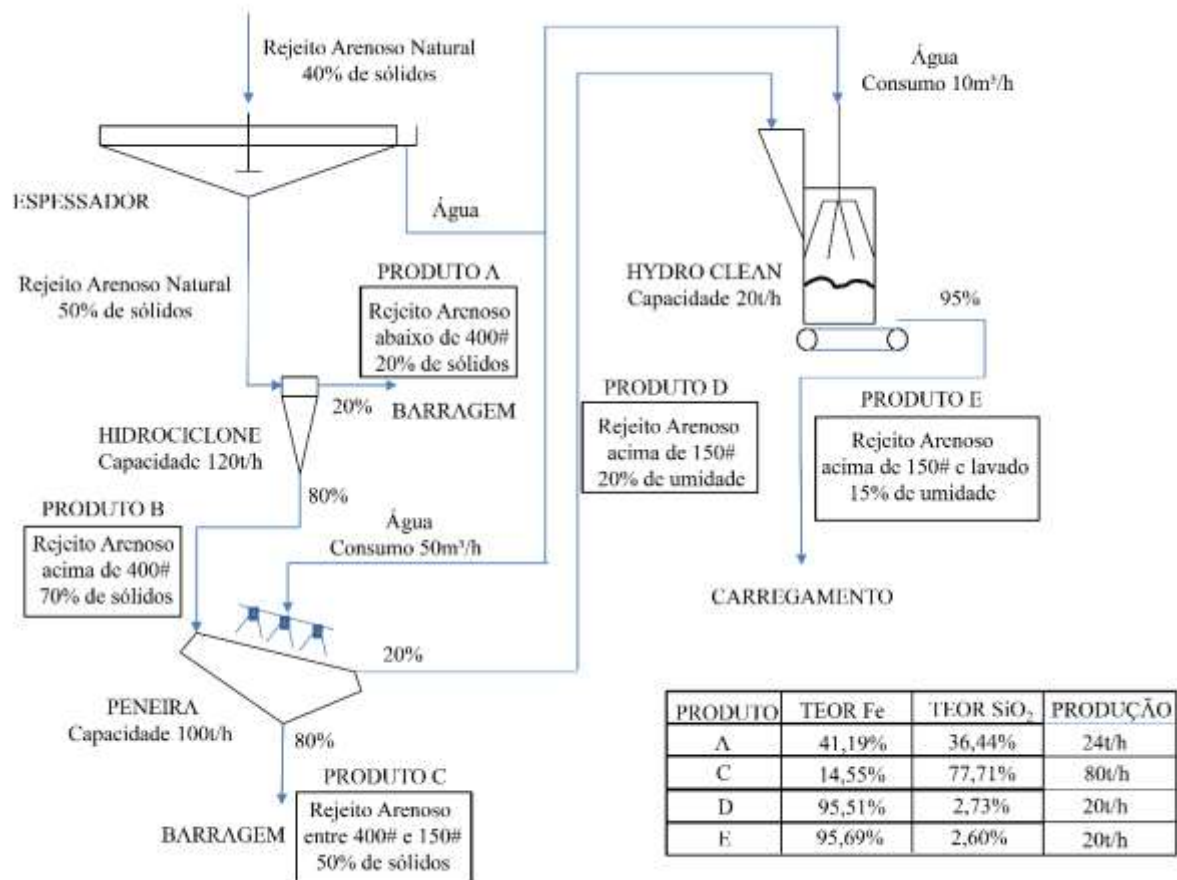


Figura 5.24- Sistema fixo de processamento com capacidade de produção de 20t/h de areia de fundição produzida a partir do rejeito arenosos natural.

Os equipamentos do sistema fixo de processamento foram definidos a partir da produção do menor Hydro Clean disponível no mercado, com capacidade para 20t/h. Com isso foi selecionada uma peneira com capacidade de 100t/h e dimensões de 2440mm de largura e 6096mm de comprimento.

Para produção acima de 20t/h pode-se utilizar modelos de Hydro Clean com maior capacidade e maior quantidade de peneiras com a capacidade de 100t/h, visto que não é recomendado utilizar peneiras com maiores dimensões.

O sistema móvel de processamento com capacidade de produção de 10t/h de areia de fundição produzida a partir do rejeito arenoso natural está apresentada na Figura 5.25.

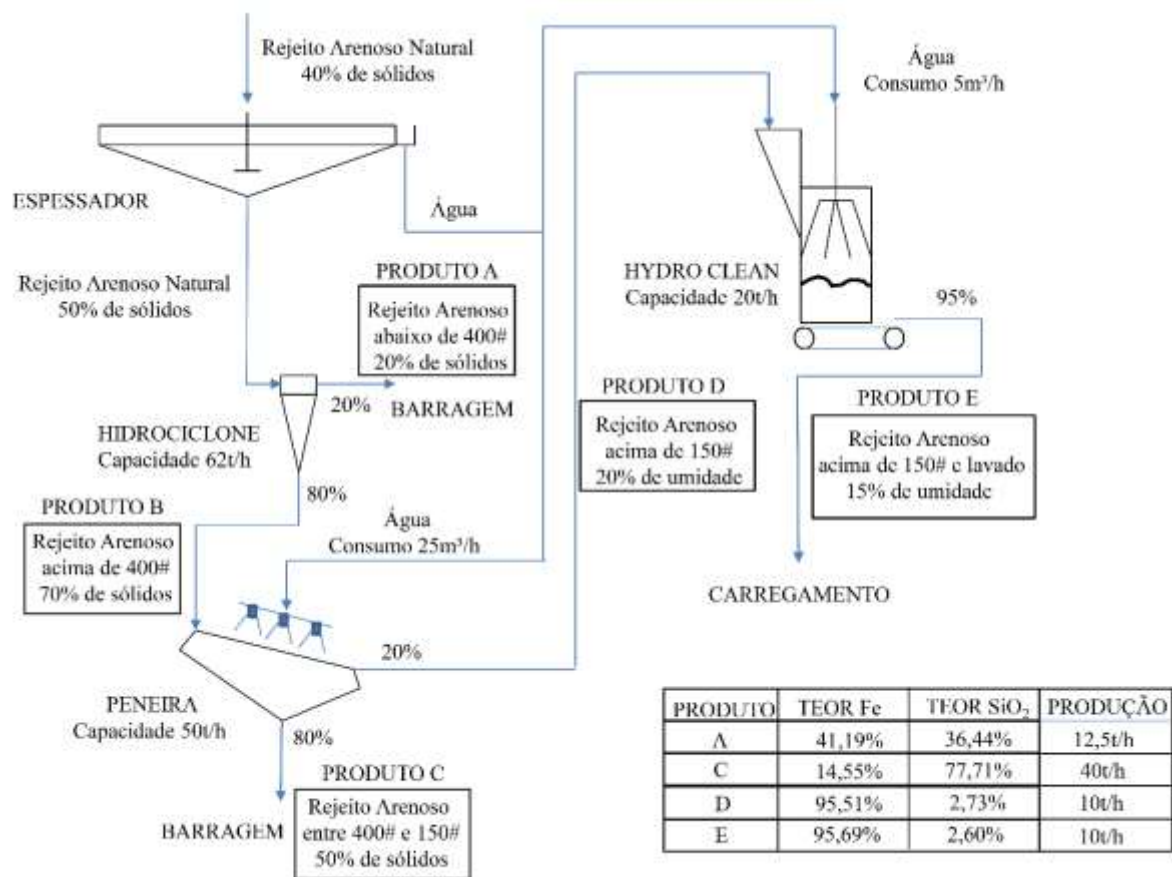


Figura 5.25- Sistema móvel de processamento com capacidade de produção de 10t/h de areia de fundição produzida a partir do rejeito arenosos natural.

Os equipamentos do sistema móvel de processamento foram definidos a partir do tamanho máximo da peneira vibratória, porque o sistema móvel possui uma limitação de largura para poder transitar em rodovias. A peneira com a maior capacidade e com dimensões que permitem sua instalação na carreta tem capacidade de 50t/h e dimensões de 1200mm de largura e 5000mm de comprimento.

Como o menor Hydro Clean disponível tem capacidade de produção de 20t/h o sistema móvel será equipado com ele, mesmo produzindo apenas 10t/h. Para sistema móvel de processamento a produção máxima é 10t/h.

6 CONCLUSÕES

A caracterização química, física e granulométrica das amostras de rejeito arenoso natural RA01 e RA02 mostrou que as amostras não possuem as características necessárias para serem utilizadas *in natura* como areia base de fundição, sendo necessário o seu processamento. O resultado da análise granuloquímica mostrou que na faixa granulométrica acima de 150# as amostras possuem composição química com alto teor de sílica e baixo teor de óxidos de ferro, possibilitando uma classificação nessa faixa para se obter um produto com características necessárias para utilização como areia base de fundição.

Em relação aos ensaios piloto de processamento do rejeito arenoso natural, os ensaios de deslamagem e desaguamento com hidrociclones apresentaram resultados satisfatórios, podendo melhorar a deslamagem do rejeito arenoso. Os ensaios de classificação com peneira apresentaram bons resultados, atingindo uma boa eficiência de peneiramento. Os ensaios de lavagem com *Hydro Clean* também apresentaram bons resultados, reduzindo a porcentagem de finos no produto E.

Em relação a caracterização física, química e granulométrica dos produtos A, B, C, D e E, o produto A é um material resultante da deslamagem com alto teor de óxidos de ferro e granulometria ultrafina. O produto B é o rejeito arenoso deslamado e desaguado, que apresenta boas características para sua alimentação no processo de peneiramento, principalmente pela porcentagem de sólidos. O produto C é o passante do peneiramento apresentando granulometria muito fina e teores de sílica abaixo do permitido para utilização como areia base de fundição. Os produtos D e E apresentaram os melhores resultados em relação a análises químicas, mineralógicas, PPC, granulométricas, permeabilidade e umidade, sendo aptos para realização dos ensaios tecnológicos como areia de fundição. Porém o produto E mostrou melhores características do que o D em todas as análises.

Em relação a caracterização tecnológica o produto E apresentou resultados superiores ao produto D e, em comparação com a amostra de rejeito arenoso processada AM02 estudada por Figueiredo (2017), apresentou resultados semelhantes. O produto E apresentou um grande potencial de uso como areia base de fundição, sendo alternativa às areias utilizadas atualmente.

Em relação a rota tecnológica, apresentou-se como resultado um diagrama de blocos com as etapas de processamento a serem utilizados e a situação do rejeito arenoso antes e após cada etapa. Os sistemas fixo e móvel de processamento para a produção de rejeito arenoso

apresentaram-se como resultado um fluxograma de processo para a produção de 20t/h e de 10t/h de produto E, com os equipamentos a serem utilizados e suas respectivas capacidades.

A rota tecnológica para processamento de rejeito arenoso apresentou bons resultados para obtenção de areia base de fundição e mostrou que é viável tecnicamente a realização do beneficiamento do mesmo pelas etapas de deslamagem e desaguamento, peneiramento e lavagem.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os conhecimentos obtidos por meio da realização desta dissertação podem ser expandidos por meio de trabalhos que venham complementar o estudo aqui realizado, tornando-se, desta maneira sugestões para trabalhos futuros.

São sugeridos os seguintes tópicos de estudo:

- Realizar o estudo da viabilidade econômica para o beneficiamento do rejeito arenoso utilizando a rota tecnológica desenvolvida neste trabalho, analisando os custos de produção e transporte até um potencial cliente.
- Realizar estudos de deslamagem para melhorar o desempenho desta etapa do processamento.
- Realizar estudos para o aproveitamento dos produtos A e C do processamento do rejeito arenoso natural.
- Realizar a produção em escala industrial do produto E, com a utilização de equipamentos com maior capacidade de produção.
- Realizar ensaios com o produto E em escala industrial para a produção de peças com diferentes ligas para melhor avaliação do seu uso como areia de fundição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIFA. Comissão Estudos de Matéria-Prima – CEMP-81. **Materiais para fundição-Determinação da distribuição granulométrica, módulo de finura e teor de finos em materiais granulares.** São Paulo, 1982. Rev.2015a.

ABIFA. Comissão Estudos de Matéria-Prima – CEMP-120. **Materiais para fundição-Determinação da perda ao fogo.** São Paulo, 1985. Rev.2015b.

ABIFA. Comissão Estudos de Matéria-Prima – CEMP-65. **Bentonita para fundição-Determinação da compactabilidade da mistura padrão.** São Paulo, 1980. Rev. 2015c.

ABIFA. Comissão Estudos de Matéria-Prima – CEMP-60. **Bentonita para fundição-Determinação da resistência à compressão a verde da mistura padrão.** São Paulo, 1980. Rev. 2015d.

ABIFA. Comissão Estudos de Matéria-Prima – CEMP-163. **Resina cura a frio para fundição-Determinação da vida útil pelo método de resistência à tração da mistura padrão.** São Paulo, 1992. Rev.2015e.

ABIFA. Comissão Estudos de Matéria-Prima – CEMP-173. **Silicato de sódio e/ou resina fenólica alcalina para fundição- Determinação da resistência à flexão da mistura padrão.** São Paulo, 1992. Rev.2015f.

ABIFA. Comissão Estudos de Matéria-Prima – CEMP-105. **Materiais para fundição-Determinação do teor de umidade.** São Paulo, 1983. Rev.2015g.

ABIFA. Comissão Estudos de Matéria-Prima – CEMP-80. **Areia base para fundição-Determinação da permeabilidade.** São Paulo, 1982. Rev. 2015h.

ABIFA. Comissão Estudos de Matéria-Prima – CEMP-182. **Resina cura a frio para fundição-Preparação da mistura padrão utilizando batedeira planetária.** São Paulo, 1993. Rev.2015i.

ABIFA. Comissão Estudos de Matéria-Prima – CEMP-162. **Resina cura a frio para fundição-Determinação da resistência à tração da mistura padrão.** São Paulo, 1992. Rev.2015j.

ABIFA. Comissão Estudos de Matéria-Prima – CEMP-181. **Resina cura a frio para fundição-Determinação da resistência à flexão da mistura padrão.** São Paulo, 1993. Rev.2015k.

CARNEIRO, A. E. V; NASCIMENTO FILHO, V. F. **Análise quantitativa de amostras geológicas utilizando a técnica de fluorescência de raios x por dispersão de energia.** *Scientia Agrícola*, Piracicaba , v. 53, n. 1, p. 94-104, Jan. 1996.

CHAVES, A. P.; PERES, A. E. C. **Teoria e pratica do tratamento de minérios - Britagem, Peneiramento e Moagem.** São Paulo. Oficina de textos. 5ª Edição, São Paulo , 2012, 324 p.

COUTINHO NETO, B. **Avaliação do reaproveitamento de areia de fundição como agregado em misturas asfálticas densas.** Tese (Doutorado em Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

DNPN. **Anuário Mineral Brasileiro-** 2010. Brasília; Departamento Nacional de Produção Mineral. v.35. ISSN: 0100-9303.

- DUTRA, R. **Beneficiamento de minerais industriais**. In Anais, 2º Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais: Ponta Grossa, 2008.
- ESCHWEGE, W. L. von. *Pluto brasiliensis*. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 1944.
- FERNANDES, D. L. **Areias sílico-argilosas sintéticas**. Itaúna: SENAI.DR.MG, 2006. 143p.
- FERREIRA, M. J. G. C. **Tecnologia da fundição**. 2ª Edição. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2007.
- FIGUEIREDO, R. A. M. **Caracterização tecnológica de areias silíceas para processos de fundição**. 2017. 92 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – REDEMAT (Rede Temática em Engenharia de Materiais), UFOP – Universidade Federal de Ouro Preto, 2017.
- FREIRE, C. B. **Utilização de resíduos da exploração do itabirito em pavimentos intertravados**. 2012, 189 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) - Rede Temática em Engenharia de Materiais- Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.
- GAUDIN, A. M. *Principles of mineral dressing*. New York: Mc Graw Hill, 1939. 554p.
- GUMIERE, A. G. et al. **Estudo do potencial de liquefação de rejeitos de mineração de ferro sob cargas estáticas**. In: Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos, 3. 1995, Ouro Preto. REGEO'95. Ouro Preto: UFOP, 1995. 2v.
- HAYER & BOECKER a. **Hydro Clean**. Disponível em:
<www.haverbrasil.com.br/segmentos#hydro-cleanTM#362#3>. Acesso em 28 fev. 2017.
- HAYER & BOECKER b. **Peneiras Vibratórias**. Disponível em:
<www.haverbrasil.com.br/segmentos#classificação#274#3>. Acesso em 28 fev. 2017.
- LUZ, A. B.; LINS, F. F. **Areia Industrial - Capítulo 5**. In: Rochas e Minerais Industriais. p.107 – 126. Centro de Tecnologia Mineral. Rio de Janeiro, 2005.
- LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. L. **Tratamento de Minérios**. Rio de Janeiro, CETEM/MCT, 5ª Edição, Rio de Janeiro, 2010, 963p.
- MACHADO, F. B. **Itabirito**. Disponível em:
<www.rc.unesp.br/museudpm/rochas/metamorficas/itabirito.html>. Acesso em 27 fev. 2017.
- MARTINS, P. F. F. **Obtenção de sílica de elevada pureza a partir do rejeito de flotação de um minério de ferro itabirítico**. 2016. 128 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais). Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Belo Horizonte, 2016.
- METSO. **Fluid beds and rotary dryers and coolers**. Pensilvânia, 2012.
- MUCHON, L. G. O. **Caracterização das areias silíceas de Minas Gerais usadas em moldagem**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1988.

NOCITI, D. M. **Aproveitamento de rejeitos oriundos da extração de minério de ferro na fabricação de cerâmicas vermelhas.** 2011. 111 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia - Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

OLIVEIRA, S. J. **Estudo de dois tipos de areias silicosas artificiais para aplicação na indústria de fundição de alumínio.** 2016. 58 p. Monografia (Engenharia Metalúrgica) Escola de Minas - UFOP – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto 2016.

PIWONKA, T. S. Aggregate molding materials. In: ASM Handbook. **Casting.** 9th.ed. p.450-458, 1988.

REGO, F. C. A. **Sistema de beneficiamento de areia para fins industriais.** 2005. 57 p. Projeto Final de Curso (Engenharia Química) - Escola de Química - UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

ROMANUS, A. **Areias de moldagem a verde.** Osasco: SENAI, 1991. 4v.

ROSIÈRE, C. A.; CHEMALE JR., F.; GUIMARÃES, M. L. V. **Um modelo para a evolução microestrutural dos minérios de ferro do quadrilátero ferrífero. Parte I - estruturas e recristalização.** Geonomos, Belo Horizonte, v. 1 (1), p. 65-84, 1993.

ROSIÈRE, C. A.; CHEMALE JR., F. **Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do Quadrilátero Ferrífero - Uma visão geral e discussão.** Geonomos, Belo Horizonte, v. 8, n. 2, p. 27-43, 2000.

ROSIÈRE, C. A.; SIEMENS, H. Q.; BRAKMEIER, H. M. **Microstructures, textures and deformer mechanisms in hematite.** Journal of Structural Geology, v. 23, 2001.

SAMARCO. **Aproveitamento de subprodutos do processo de concentração do minério de ferro da Samarco Mineração S.A. em outros setores industriais.** Ouro Preto, 2009.

SAMARCO. **Fluxograma de Processo - Apresentação Interna.** Ouro Preto, 2012.

SAMARCO. **Relatório Anual de Sustentabilidade 2014.** Belo Horizonte, 2015.

SILVA, G. P.; FONTES, M. P.; COSTA, L. M.; BARROS, N. F. **Caracterização química, física e mineralógica de estéreis e rejeito da mineração de ferro da Mina de Alegria, Mariana MG.** Pesquisa Agropecuária Tropical, v. 36, n.1, p. 45-52, 2006.

TAVARES, P. H. C. P. **Obtenção de pigmentos de óxido de ferro a partir da lama gerada no beneficiamento de itabirito.** 2012. 133p. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais). REDEMAT (Rede Temática em Engenharia de Materiais), UFOP – Universidade Federal de Ouro Preto, 2012

TOLENTINO, M. V. C. **Estudo da viabilidade técnica do aproveitamento do resíduo arenoso da mineração do itabirito.** 2010. 104 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais). CDTN - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Belo Horizonte, 2010.

ULSEN, C. **Caracterização e separabilidade de agregados miúdos produzidos a partir de resíduos de construção e demolição.** 2011. 222p. Tese (Doutorado em Engenharia Mineral)-Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

VALADÃO, G. E. S.; ARAÚJO, A. C. de. **Introdução ao tratamento de minérios**. Belo Horizonte. Editora UFMG, 2007. 234p.