



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIDADE ARAXÁ**

INGRID GUIMARÃES SILVEIRA E SILVA

**UTILIZAÇÃO DE MEIOS FILTRANTES ALTERNATIVOS PARA
FILTRAGEM A VÁCUO**

ARAXÁ/MG

2018

INGRID GUIMARÃES SILVEIRA E SILVA

**UTILIZAÇÃO DE MEIOS FILTRANTES ALTERNATIVOS PARA
FILTRAGEM A VÁCUO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Me. Tamiris Fonseca de Souza
Coorientador: Prof. Dr. Delma Pereira Caixeta

ARAXÁ/MG


2018

INGRID GUIMARÃES SILVEIRA E SILVA

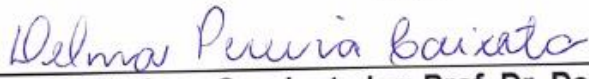
UTILIZAÇÃO DE MEIOS FILTRANTES ALTERNATIVOS PARA FILTRAGEM A VÁCUO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

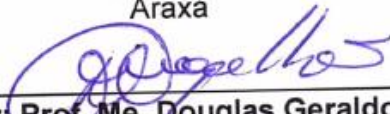
Araxá, 28 de junho de 2018.




Presidente e Orientador: Prof. Me. Tamiris Fonseca de Souza
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade
Araxá



Membro Titular e Coorientador: Prof. Dr. Delma Pereira Caixeta
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade
Araxá



Membro Titular: Prof. Me. Douglas Geraldo Magalhães
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade
Araxá



Membro Titular: Prof. Me. Alexander Martin Silveira Gimenez
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade
Araxá

Aos meus pais, com todo amor e gratidão pelo apoio, paciência e carinho durante a realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela vida, por sempre me guiar e me dar forças que superassem minhas angustias e dificuldades.

A minha mãe Luciana, por todo amor, amizade, companheirismo e por sempre falar as palavras que eu precisava ouvir. Ao meu pai Marcos, que sempre tirou um pouquinho do seu tempo tão curto, para não só me auxiliar neste trabalho, mas por sempre estar do meu lado e me apoiar com muito carinho.

A Tafty, por todo amor, atenção e por sempre cuidar do meu pai. Aos meus irmãos Marco Antônio e Maria Alice pela presença linda nessa família maravilhosa. A Ti Denner, pelo carinho, pelo apoio e por sempre estar ao lado da minha mãe.

A minha madrinha Helen, por sempre estar presente, me apoiar e se preocupar comigo em todos os momentos da minha vida.

Aos meus orientadores, Tamiris, Leandro e Delma, pela paciência e pelo carinho durante a realização deste trabalho, além de transmitir conhecimentos, sempre estiveram presentes e dispostos a me ajudar e contribuir para a realização de um bom trabalho.

Ao técnico João Vitor, sou imensamente grata pelas conversas, auxílios, sugestões, apoio e enorme paciência durante a realização deste trabalho. Sem você, com certeza este trabalho não teria sido possível.

Ao professor e amigo Chico, que carinhosamente acompanha minha carreira acadêmica e sempre buscou me apoiar e dar conselhos que contribuíssem para a realização deste trabalho.

Ao Baby, Morgana e Pablim, pela amizade, pelo apoio e por terem sido pessoas essenciais na minha vida e durante a realização deste trabalho. E a Bianca, pela companhia durante os testes de laboratório e pelo apoio durante a realização deste trabalho.

RESUMO

A filtração é uma das etapas do processo de separação sólido/líquido no tratamento de minérios, que tem como produto final a torta e o filtrado. Para garantir a eficiência na separação destes componentes é necessário um meio filtrante adequado, que seja resistente e tenha capacidade de reter o maior número de partículas sólidas possíveis. O filtro de disco cerâmico é um equipamento muito utilizado nesse processo, haja vista possuir microporos que realizam a filtração de forma eficiente. O objetivo deste trabalho foi estudar meios filtrantes alternativos - que possuem macroporos - analisando a eficiência de filtração dos mesmos a partir de resultados de testes de laboratório, a fim determinar se o material era um meio filtrante sólido, poroso e competente. Foram realizados os testes de caracterização física para o minério, caracterização física e química para os meios filtrantes e análise da influência de variáveis nos testes de filtração de laboratório, em que foram estudados os materiais de concreto celular autoclavado e pedra pomes branca, verde e cinza que possuem diferentes porosidades, além do estudo de suas espessuras em 1,3 cm; 2,3 cm e 3,7 cm em dois níveis de vácuos de 275 mm de Hg e 400 mm de Hg. Os resultados obtidos a partir dos testes de filtração, concluíram que os meios filtrantes mais promissores, utilizando vácuos de 400mm de Hg, foram a pedra pomes verde e branca de 1,3 cm de espessura com tempo de formação de torta de até 1 minuto com umidades em torno de 17% e turbidez de até 130 FTU.

Palavras-chave: Pedra pomes, concreto celular, meios filtrantes, separação sólido/líquido.

ABSTRACT

Filtration is one of the steps of the solid / liquid separation process in the treatment of ores, the final product being the pie and the filtrate. To ensure efficient separation of these components, a suitable filter medium is required, which is resistant and has the capacity to retain as many solid particles as possible. The ceramic disc filter is a widely used equipment in this process, since it has micropores that efficiently perform filtering. The objective of this work was to study alternative filter media - which have macropores - analyzing the efficiency of filtering them from laboratory test results, in order to determine if the material was a porous and competent solid filter medium. The physical characterization tests for the ore were carried out, physical and chemical characterization for the filter media and analysis of the influence of variables in the laboratory filtration tests, in which the materials of autoclaved cellular concrete and white, green and gray pumice stone that have different porosities, besides the study of its thicknesses in 1.3 cm; 2.3 cm and 3.7 cm at two vacuum levels of 275 mm Hg and 400 mm Hg. The results obtained from the filtration tests, concluded that the most promising filter media, using vacuums of 400 mm Hg, were the green and white pumice stone of 1.3 cm thickness with pie formation time of up to 1 minute with humidity around 17% and turbidity of up to 130 FTU.

Keywords: Pumice stone. cellular concrete. filter media. solid / liquid separation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Espessador convencional	20
Figura 2 – Representação esquemática de filtração	21
Figura 3 - Sistema de montagem do filtro	22
Figura 4 - Filtro de disco.....	23
Figura 5 - Representação esquemática do ciclo de filtração para filtro de disco.....	24
Figura 6 - Poros do meio filtrante	25
Figura 7 – Tessituras básicas dos tecidos	26
Figura 8 – Microestrutura de uma cerâmica densa típica.....	27
Figura 9 – Macroestrutura de uma Pedra pomes natural	28
Figura 10 – Teste de folhas (Leaf test).....	29
Figura 11 - Concreto celular autoclavado.....	33
Figura 12 - Pedra pomes de porosidades variadas. A) Pedra pomes branca B) Pedra pomes cinza e C) Pedra pomes verde	34
Figura 13 - Minério de ferro com granulometrias entre 150 μm (100#) e 45 μm (325#)	35
Figura 14 – A) Balança de precisão de 0,01 g com pesagem hidrostática. B) Meio filtrante totalmente submerso em água	37
Figura 15 – Picnômetros	38
Figura 16 - Peneirador Suspenso.....	39
Figura 17 - Teste de folha com funil PVC adaptado.....	40
Figura 18 - Curva granulométrica do minério de ferro.....	47
Figura 19 – A) Torta obtida a partir da filtração utilizando pedra pomes branca com 3,7 cm de espessura em 275 mm de Hg e B) 400 mm de Hg.....	48
Figura 20 – Falha dos testes na filtração utilizando pedra pomes branca com 2,3 cm de espessura e 400 mm de Hg	49
Figura 21 – A) Torta obtida a partir da filtração utilizando pedra pomes branca com 1,3 cm de espessura em 275mm de Hg e B) 400mm de Hg.....	50
Figura 22 - A) Torta obtida a partir da filtração utilizando pedra pomes verde com 1,3 cm de espessura em 275mm de Hg e B) 400mm de Hg.....	52
Figura 23 – A) Torta obtida a partir da filtração utilizando concreto celular autoclavado com 3,7 cm de espessura em 275mm de Hg e B) 400mm de Hg.....	54

Figura 24 - Concreto celular de 1,3 cm de espessura utilizando vácuo de 200mm de Hg.....55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Série de peneiras utilizadas	39
Tabela 2 - Meios filtrantes	42
Tabela 3 - Matriz do planejamento	43
Tabela 4 - Óxidos identificados por FRX para os meios filtrantes	44
Tabela 5 - Característica física em média dos meios filtrantes	45
Tabela 6 - Pedra pomes branca de 3,7 cm	48
Tabela 7 -- Pedra pomes branca de 2,3 cm	49
Tabela 8 - Pedra pomes branca de 1,3 cm	50
Tabela 9 - Pedra pomes verde de 1,3 cm	52
Tabela 10 - Concreto celular autoclavado de 3,7 cm	54
Tabela A. 1 - Teste de submersão em água corrigido.....	61
Tabela A. 2 - - Característica física geral dos meios filtrantes.....	62
Tabela B.1 - Massa específica do minério de ferro	63
Tabela C. 1 – Tabela de análise granulométrica do minério de ferro	64

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Massa específica aparente seca (kg/m ³).....	36
Equação 2 - Massa específica aparente saturada (kg/m ³)	36
Equação 3 - Porosidade aparente.....	36
Equação 4 - Absorção d'água aparente	36
Equação 5 - Densidade dos sólidos	37
Equação 6 - Umidade da torta.....	42

LISTA DE SÍMBOLOS

US\$	dólar
%	porcentagem
L/h	Velocidade de Filtragem
(Kg/h)/ft ²	Razão de Filtragem
cm	centímetro
cm ²	centímetro quadrado
cm ³	centímetro cúbico
#	meshes
g	gramas
°C	graus Celsius
kg	quilograma
m ³	metro cúbico
ρ_s	densidade de sólidos
mm	milímetros
μm	micromêtros
U	umidade em base úmida
mm de Hg	milímetros de mercúrio
g/cm ³	gramas por centímetro cúbico
FTU	Unidades de turbidez formazina

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	15
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1	Separação sólido-líquido	18
2.1.1	Espessamento	19
2.1.2	Filtragem	20
2.1.2.1	Filtros a vácuo.....	22
2.1.2.2	Meios filtrantes.....	25
2.1.2.3	Mecanismos de filtragem	28
2.1.2.4	Dimensionamento de filtros	28
2.3	Planejamento fatorial.....	30
2.4	Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA.....	31
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1	Meios filtrantes	33
3.2	Minério de Ferro	34
3.3	Caracterização dos meios filtrantes	35
3.3.1	Caracterização química	35
3.3.2	Caracterização física.....	35
3.4	Caracterização do minério de ferro	37
3.4.1	Determinação da massa específica dos sólidos	37
3.4.2	Análise Granulométrica.....	38
3.5	Teste de filtragem.....	39
3.6	Planejamento fatorial das variáveis	42
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	44
4.1	Caracterização química dos meios filtrantes	44
4.2	Caracterização física dos meios filtrantes	45
4.3	Caracterização física do minério de ferro.....	46
4.3.1	Determinação da massa específica dos sólidos	46
4.3.2	Análise Granulométrica	46
4.4	Testes de Filtragem.....	47
4.4.1	Pedra pomes branca.....	48
4.4.2	Pedra pomes cinza	51
4.4.3	Pedra pomes verde.....	52

4.4.4	Concreto celular autoclavado.....	53
5.	CONCLUSÕES.....	56
6.	REFERÊNCIAS	58
	APÊNDICE A - RESULTADOS DOS TESTES DE SUBMERSÃO EM ÁGUA.....	61
	APÊNDICE B – DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DOS SÓLIDOS.....	63
	APÊNDICE C – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO MINÉRIO DE FERRO	64

1. INTRODUÇÃO

O Brasil, país com grande potencial para o crescimento econômico, tem a indústria mineral como um setor essencial em seu desenvolvimento. De acordo com o Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM (2015) a produção mineral brasileira atingiu o valor de US\$ 40 bilhões, o que representou cerca de 5% do PIB industrial do país. Sendo que o setor mineral abrange uma produção de 72 substâncias minerais, das quais 23 são metálicas, 45 não metálicas e 4 energéticas, sendo 1.820 lavras garimpeiras, 830 complexos de água mineral e 13.250 licenciamentos.

A mineração é um setor vital na economia de um país. Este lugar de destaque põe em foco a necessidade da indústria de mineração de buscar um desenvolvimento que fomente um maior respeito ao meio ambiente, tendo em vista principalmente a grande necessidade de resguardar para que sejam cessados os acidentes ambientais que vêm ocorrido com maior frequência atualmente, como o desastre na barragem de rejeitos da Samarco, na cidade de Mariana - MG em 2015, que sobretudo teve sua principal causa devido ao acúmulo excessivo de água na barragem de rejeitos, levando a ruptura desta.

Nessa circunstância, têm sido realizados diversos estudos acerca dos tipos de melhorias que podem ser oferecidas a este setor, como por exemplo, a substituição de barragens de rejeito por polpas devidamente adensadas, depositadas em forma de pilha e a possibilidade desta água seja recuperada e devolvida à rota de beneficiamento.

Nesse contexto, a operação de filtragem, uma das etapas finais do tratamento de minérios, tem como objetivo principal proporcionar a recuperação máxima da água de processo, além de um produto final com o mínimo de umidade possível. Portanto, é essencial analisar a necessidade de busca por melhorias na eficiência desta operação.

Com esse intuito, foram iniciados estudos e pesquisas com alternativas técnicas e economicamente mais viáveis. A título de exemplo, pode-se citar a busca por

melhores equipamentos, meios filtrantes alternativos e reagentes que proporcionem melhor desempenho da operação.

Torna-se essencial quantificar e qualificar os estudos e pesquisas através de um teste, denominado de *leaf test* ou teste de folha, que é um teste de laboratório largamente empregado para o dimensionamento de filtros e análise de eficiência de meios filtrantes. A partir deste teste podem ser controladas diversas variáveis da operação. Contudo, o teste de folhas não possui padronização no seu uso, podendo conter diversas variações, a citar: tipo de meio filtrante que pode ser aplicado, a presença de agitação mecânica ou manual, área do suporte utilizado e as leis que regem esta operação. Cabe ao operador a escolha do melhor método.

No presente trabalho, busca-se estudar a capacidade de filtração de materiais macroporosos, sendo eles, bloco de concreto celular autoclavado (CCA) e pedra pomes industrializada importada. Esses materiais não apresentam aplicação atual na indústria mineral como elementos filtrantes. Todavia, possuem aplicações diversas na construção civil, na indústria de cosméticos, odontologia e limpezas em geral, por isso a pertinência destes nesta pesquisa

A pedra pomes industrializada, empregada nos testes de folha deste trabalho, é constituída basicamente por pó de quartzo. Foi dada preferência pela sintética em detrimento da natural, pois além deste material ser de mais fácil obtenção, possui constância em sua composição química e ausência de impurezas consideráveis, apresenta poros mais controlados e homogêneos, podendo ser posteriormente fabricada e estudadas as modificações das variáveis de produção para maximizar sua eficiência na filtração.

Já o bloco de concreto celular corresponde a um composto de cimento Portland, cal, agente expensor e materiais ricos em sílica. Além de ser um material leve, barato e de fácil manuseio, possui macroporos e características semelhantes às da pedra pomes industrializada, o que permite o estudo comparativo.

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar a eficiência da pedra pomes e do concreto celular como meios filtrantes na filtração de minério de ferro e os objetivos

específicos consistiram em caracterizar quimicamente e fisicamente os meios filtrantes, além de classificar a qualidade da água do filtrado obtido a fim de direcionar onde seria o melhor local de descarte para este efluente.

Este trabalho foi composto por quatro capítulos, sendo que o primeiro aborda a revisão bibliográfica apresentando os principais aspectos conceituais utilizados para o desenvolvimento deste trabalho. O segundo capítulo apresenta a metodologia experimental aplicada para realização da caracterização dos materiais e dos testes de filtração, e por fim, apresenta os resultados obtidos e uma discussão dos mesmos seguidos de uma conclusão.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados diversos conceitos para uma melhor concepção do trabalho.

2.1 Separação sólido-líquido

As etapas de beneficiamento de minérios geralmente ocorrem de forma sequencial, podendo ser diferenciadas de acordo com seus objetivos específicos, como a adequação de granulometria, separação e purificação da substância desejada e adequação de umidade para obter o produto final (LUZ, SAMPAIO E FRANÇA, 2010).

Na usina de beneficiamento, em sua maioria, as operações são realizadas a úmido e o produto final sempre é vendido a seco, por isso muitas vezes é necessário realizar a separação sólido-líquido do minério que se quer obter. A separação sólido-líquido é capaz de proporcionar o adensamento da polpa através do ajuste da porcentagem de sólidos, além de possibilitar a recirculação/recuperação de água, desaguamento final de concentrados e preparação de rejeitos para disposição/descarte. Consistem, portanto, em um conjunto de operações essenciais para garantir a eficiência de todo o processo.

O desaguamento pode ser considerado uma etapa crítica nas usinas de beneficiamento, uma vez que possui alto consumo energético e alto consumo de água, podendo ser frequentemente uma etapa ineficiente em sua aplicação. Por isso, há a necessidade de sempre estudar novas tecnologias e maneiras alternativas de realizar este processo (VALADÃO E ARAUJO, 2012).

Aplicada à mineração, são utilizados diversos tipos de equipamentos para realizar o desaguamento, como peneiras DSM, classificadores espirais, cones desaguadores, pilhas e silos de drenagem. Entretanto, os espessadores e os filtros são os equipamentos mais utilizados neste ramo (CHAVES, 2013).

A filtração consiste em um processo físico com o objetivo de promover a remoção de partículas sólidas através de um meio filtrante no qual a água possa percolar. A diferença entre uma indústria de tratamento de água e a mineração está nos produtos desejáveis ao fim do processo, dos quais a água é o foco da primeira, enquanto as partículas sólidas são o foco da segunda (FERREIRA FILHO 2017).

Os espessadores são equipamentos que utilizam a sedimentação de partículas para propiciar a separação da fase sólida e líquida. Podem ser utilizados tanto para tratamento de água com o objetivo de obter um líquido puro e clarificado como também para adequação de uma polpa contendo sólidos, retirando a água para atingir uma concentração de sólidos adequada (AROUCA, 2007).

2.1.1 Espessamento

O espessador convencional é um equipamento constituído por uma parte cilíndrica e outra cônica, que possibilita a separação sólido-líquido através de partículas que são sedimentadas pela ação da gravidade e retiradas do fundo do equipamento por bombeamento, ao mesmo tempo em que a água é descartada na parte superior (*overflow*).

A alimentação da polpa é recebida pelo centro, enquanto as partículas sólidas são depositadas no fundo do espessador, promovendo o aumento da porcentagem de sólidos na parte inferior, e na parte superior é obtido um produto clarificado, composto basicamente por água, que será descartado nas calhas do *overflow*.

O processo de sedimentação de partículas utilizando espessadores é um processo de baixo custo e de grande simplicidade operacional, podendo ser realizado de várias formas, tais como bateladas, semicontínuo ou continuamente, sendo a última a mais indicada na maioria das vezes.

Na mineração, os espessadores são utilizados para as seguintes finalidades: obtenção de polpas mais adensadas para serem encaminhadas à filtração; espessamento de rejeitos com concentração de sólidos elevada, para descarte em barragens; recuperação de água para recirculação industrial e recuperação de

sólidos provenientes das operações de lixiviação (LUZ, SAMPAIO E FRANÇA, 2010).

De acordo com Valadão e Araújo (2012), o espessador é um equipamento que pode receber uma polpa contendo entre 1% a 50% de sólidos, enquanto as partículas sólidas podem ser descartadas a uma porcentagem de sólidos entre 10% a 75%. A Figura 1 apresenta a representação esquemática de um espessador convencional.



Figura 1– Espessador convencional
Fonte: Outotec, 2017.

2.1.2 Filtragem

A filtragem, aplicada ao beneficiamento de minérios, é classificada como uma operação de separação sólido-líquido, sendo utilizada normalmente após o adensamento da polpa por um espessador. O filtro possui dois produtos, sendo eles, o material retido no meio filtrante, que pode ser denominado de torta, e o líquido que atravessa, podendo ser chamado de filtrado.

Segundo Chaves (2013), os filtros são capazes de receber uma polpa entre 50% a 75% de sólidos, e obter uma torta com umidades menores que 15%. O método consiste na separação de uma suspensão composta por sólido e líquido (água) através de um meio poroso, que é denominado meio filtrante, como mostra a Figura 2.

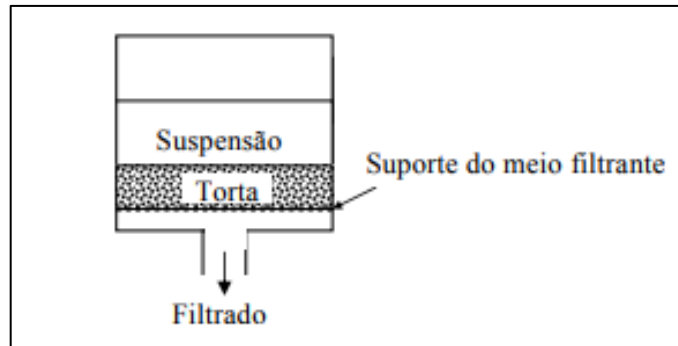


Figura 2 – Representação esquemática de filtração
 Fonte: Luz, Oliveira e Lacerda (2004).

Para que a operação de filtração possa resultar nos produtos citados, torna-se necessário que haja a ação de uma força externa promovendo a separação dos componentes. No contexto do tratamento de minérios, os métodos mais utilizados são os de filtração a vácuo e sob pressão.

Para fazer a filtração a vácuo, é criada uma diferença de pressão entre os dois lados do meio filtrante, fazendo com que o líquido seja sugado e atravesse os poros, enquanto as partículas sólidas ficam retidas e se mantêm presas na superfície do filtro.

Já na filtração sob pressão ocorre a aplicação de uma pressão positiva na região onde está localizada a torta. Em resposta à força aplicada, a parte sólida é levada ao meio poroso, enquanto o líquido é movimentado para fora da torta.

De acordo com Chaves (2013) um filtro deve realizar aos seguintes requisitos:

- Suportar o meio poroso e a torta;
- Levar a torta do ponto de alimentação até a descarga;
- Permitir a passagem do filtrado;
- Manter a pressão diferencial no meio filtrante.

Para que todas essas funções sejam realizadas, faz-se necessário desenvolver sistemas no interior do filtro para o funcionamento de válvulas de vácuo e ar comprimido, conforme está representado a seguir na Figura 3.

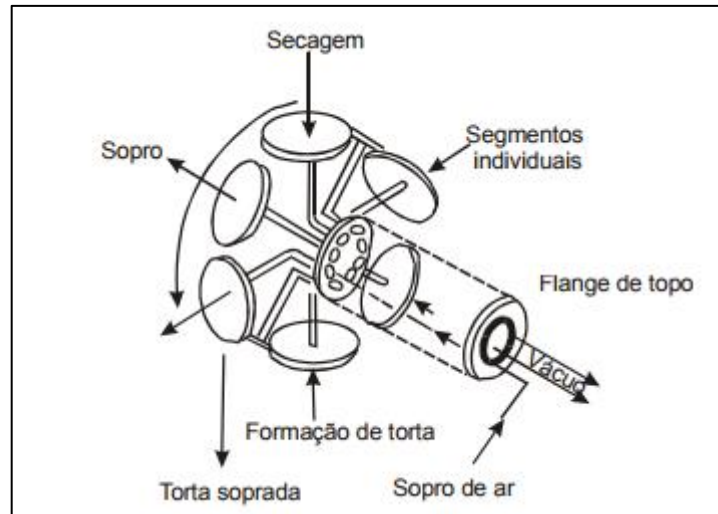


Figura 3 - Sistema de montagem do filtro
Fonte: Chaves (2013).

2.1.2.1 Filtros a vácuo

Na mineração, existem diversos tipos de filtros a vácuo, tais como filtro prensa horizontal, filtro horizontal de correia, filtro de disco convencional e filtro de disco cerâmico.

Com exceção dos filtros prensa, todas as operações de filtração apresentam-se de forma contínua e cíclica. De acordo com Chaves (2013), apesar dos equipamentos explorarem princípios físicos de funcionamento diferentes, todos eles seguem as seguintes fases:

- Formação da torta: adensamento de material sobre o meio filtrante;
- Secagem: retirada da água levando-a para o filtrado;
- Descarga: retirada da torta e lavagem da tela se necessário.

Existem diversos fatores que podem alterar a taxa de filtração dos filtros, tais como:

- Área da superfície de filtração;
- Viscosidade do líquido;
- Resistência do meio filtrante;
- Nível de vácuo;
- Resistência da torta.

Tratando-se dos filtros de disco a vácuo (Figura 4), que realizam a operação de filtração de forma contínua, estes possuem como princípio de funcionamento a aplicação de uma diferença de pressão entre os dois lados do disco, fazendo com que a polpa seja sugada do tanque e se prenda na superfície do meio filtrante. Isso faz com que permita a passagem apenas de líquido pelos poros, o que promove a formação de torta (LUZ, OLIVEIRA E LACERDA, 2004).

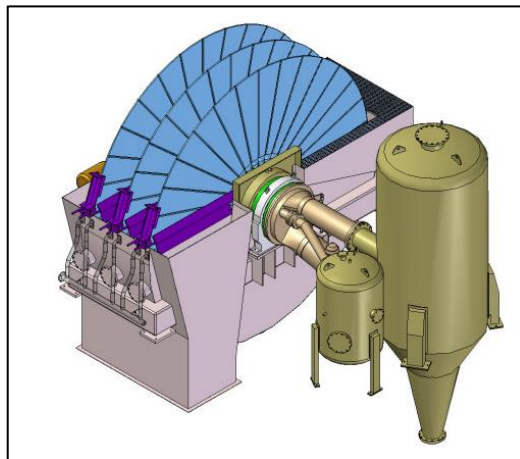


Figura 4 - Filtro de disco
Fonte: Bokela (2017).

Nesse equipamento, os discos ocupam a posição vertical e paralelos entre si, enquanto no centro encontram-se as tubulações na qual permitem a aplicação de vácuo e passagem de ar comprimido. Cada disco é composto por placas independentes, chamados de setores, que ficam abaixo do meio filtrante.

O filtro de disco possui um tanque contendo polpa, no qual os discos, por meio da rotação do eixo central, vão receber a polpa por baixo, realizar a formação da torta e depois descartá-la. Os filtros de disco não são capazes de lavar seu meio filtrante. Portanto, após o descarte da torta há a necessidade de desobstruir os poros dos mesmos. Essa etapa é realizada a partir do sopro (fluxo inverso do vácuo) ou raspagem para a limpeza dos poros. A Figura 5 apresenta esquematicamente o ciclo de filtração em um filtro de disco a vácuo.

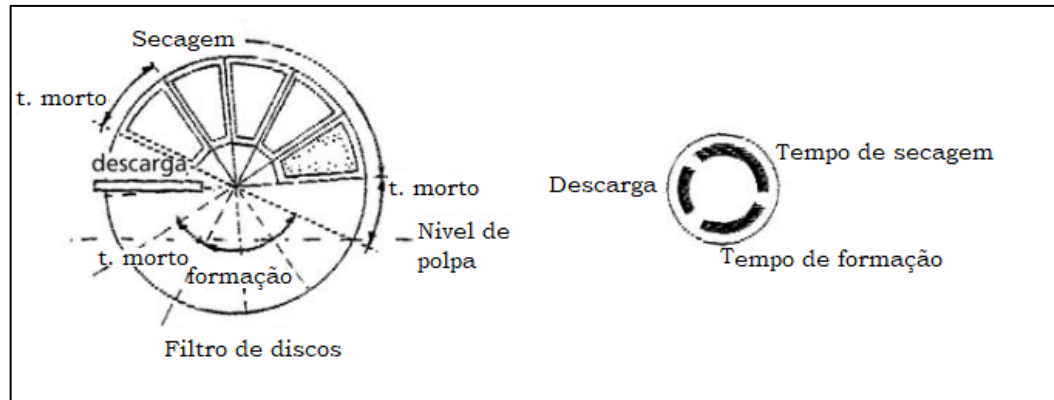


Figura 5 - Representação esquemática do ciclo de filtragem para filtro de disco
Fonte Chaves (2013).

Uma vantagem que pode ser observada nos filtros de disco é a área interna do filtro disponível para filtragem sendo ocupada por uma área de chão reduzida. Isso porque, enquanto outros tipos de filtros possuem apenas um lado da área do filtro disponível, o filtro de disco é capaz de filtrar através de ambas as faces.

Já o filtro de disco cerâmico utiliza um nível de vácuo bem menor em relação aos valores industrialmente aplicados, além do emprego de telas mais resistentes a produtos químicos e altas temperaturas. Isso devido ao fato de seus setores possuírem uma tela capilar composta de placas cerâmicas microporosas. Seu emprego pode ser aplicado a processos que necessitam de um produto com umidade mínima, além de um filtrado muito puro. Esse equipamento pode ser facilmente utilizado para o beneficiamento do minério de ferro, em que o produto final deve conter uma umidade muito inferior, devido à especificação da etapa de pelotização, subsequente à filtragem.

De acordo com Guimarães (2011), em seu projeto de mestrado “Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas”, em que objetivou realizar uma comparação técnica dos equipamentos de filtragem mais utilizados atualmente, a fim de aplicá-los na disposição de rejeitos de minério de ferro em forma de pilhas; estudou o dimensionamento dos equipamentos de filtragem utilizando o teste de folhas, afim de definir os melhores parâmetros para operacionalização para tais equipamentos. Durante os testes para obter as variáveis do filtro de discos convencional este autor obteve uma umidade de torta entre 10% e 17%, enquanto o filtro de discos cerâmico obteve uma umidade de torta entre 8% e 9%.

A porosidade que está presente nestes filtros cerâmicos pode ser definida como uma característica da estrutura que possui vazios interconectados entre si que permitem que a água passe através da superfície.

Quanto maior a porosidade da estrutura, menor será sua resistência. A porosidade pode ser calculada determinando-se o índice de vazios existentes no material, seguindo as normas NBR 12766 (ABNT,1992), no qual calcula-se a razão entre a massa do meio filtrante saturado, seco em estufa, e saturado imerso em água.

2.1.2.2 Meios filtrantes

O meio filtrante (Figura 6) corresponde a uma barreira física que recobre a superfície do equipamento de filtragem para permitir a passagem do líquido e reter partículas sólidas, com o objetivo de garantir a separação sólido-líquido da polpa alimentada.

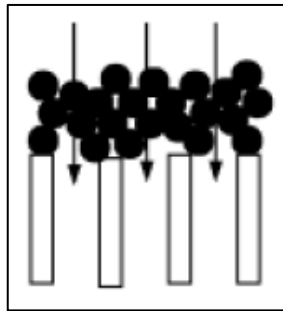


Figura 6 - Poros do meio filtrante
Fonte: Wakeman (2005).

Existem diversos tipos de meios filtrantes e de acordo com Luz, Oliveira e Lacerda (2004), os meios filtrantes podem ser feitos em sua maioria de materiais flexíveis utilizando algodão, lã, linho, nylon, seda, juta, fibra de vidro e materiais rígidos como borracha porosa, carbono poroso e metais. A indústria mineral utiliza, em sua maioria, os meios filtrantes flexíveis que são compostos por tecido. Contudo, é evidente o quanto os materiais rígidos porosos também vêm conquistando cada vez mais este mercado.

Os tecidos utilizados na filtragem recebem grande influência da composição química do material utilizado, bem como a maneira em que as malhas são tecidas, podendo

resultar em uma tela ou trama de quadrados alternados. As tramas de maior destaque na aplicação industrial estão representadas na Figura 7.

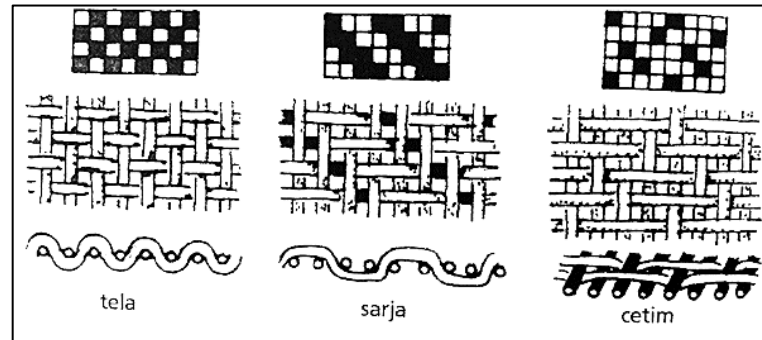


Figura 7 – Tessituras básicas dos tecidos
Fonte Chaves (2013)

Cada tecido acompanha uma forma de trançado diferente, por isso, tem influência direta com a operação de filtragem. Além disso, a característica física do fio também pode ser um fator para a permeabilidade do meio filtrante. Como exemplo, as telas podem ser monofilamentares, como nylon ou felpudas, que o caso do linho ou da lã. Estes, por possuírem um comprimento muito curto, devem ser trançados em conjunto.

Já os filtros cerâmicos não utilizam telas filtrantes, mas setores de material poroso rígido, que permitem a filtração por capilaridade através de microporos que compõem a sua estrutura. Suas características são influenciadas pela composição química, mineralógica e pelo tratamento térmico recebido durante sua fabricação, no qual atuam diretamente com o arranjo dos átomos na sua estrutura e define suas propriedades como meio filtrante, bem como sua permeabilidade e resistência. Por isso, existem diversos tipos de meios porosos sendo estudados, além da forma de produzi-los, com o objetivo de promover melhoria da operação de filtragem com o avanço tecnológico (GUIMARÃES, 2011).

Segundo Andrade, *et al* (2005), os produtos cerâmicos são constituídos, basicamente, de silicatos, aluminossilicatos de Ca, K e Na (argilas, quartzo e feldspato) e carbonatos de Ca e Mg (calcários e dolomitas).

Os meios filtrantes cerâmicos ou rígidos podem ser compostos por diferentes volume e tamanho de poros, sendo que os cerâmicos possuem uma microestrutura.

Contudo ainda assim, existem outros materiais rígidos que possuem uma macroestrutura de poros.

A microestrutura geralmente é determinada como a estrutura de um material que não pode ser vista a olho nu. Ou seja, só pode ser percebida a partir de técnicas microscópicas disponíveis. Os elementos que compõem a microestrutura são os grãos individuais, limites de grãos, poros ou defeitos. A Figura 8 representa esquematicamente os microporos existentes nos materiais cerâmicos (LANDMESSER, TRAINOFF E NANDIVADA, 2011).

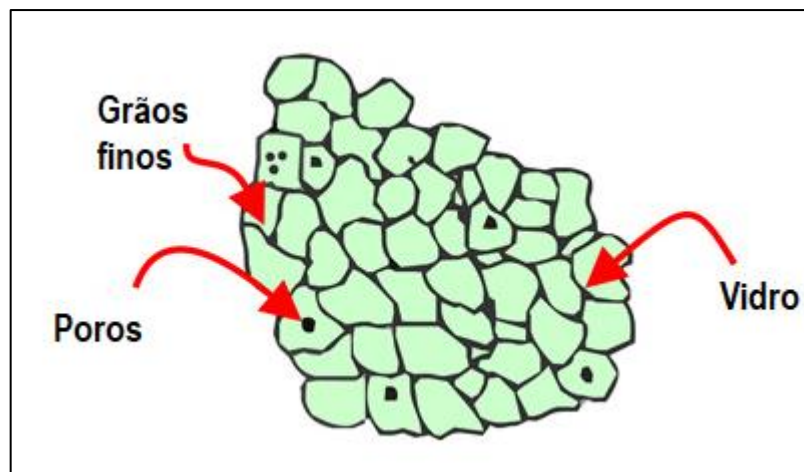


Figura 8 – Microestrutura de uma cerâmica densa típica
Fonte: Landmesser, Trainoff e Nandivada (2011)

Existe uma relação direta entre a microestrutura e as propriedades dos materiais como força, dureza e tenacidade. Devido a esta relação, vários estudos têm sido desenvolvidos acerca das diversas aplicações destes materiais.

Materiais que possuem macroestruturas são aqueles que as estruturas podem ser vistas a olho nu (Figura 9), ou seja, tamanhos de grãos da ordem igual ou maior que 1mm. Geralmente é característica de materiais porosos e com camadas superficiais. O que distingue as microestruturas das macroestruturas é a composição química dos materiais que os compõem, além do tratamento térmico recebido durante a sua fabricação.



Figura 9 – Macroestrutura de uma Pedra pomes natural
Fonte: Pluritec (2014).

2.1.2.3 Mecanismos de filtração

Conforme Chaves (2013), o dimensionamento dos filtros e a análise dos meios filtrantes podem ser realizados com base em ensaios empíricos ou através dos resultados das operações industriais. Não obstante, o tratamento teórico é importante para obter uma compreensão melhor dos resultados obtidos.

Em vista disso, a partir de estudos feitos anteriormente, é possível perceber que a velocidade de filtração tem relação com os fatores listados a seguir:

- Área de filtração;
- Abertura ou poros do meio filtrante;
- Viscosidade do filtrado;
- Ciclo de filtração;
- Temperatura da polpa;
- Porcentagem de sólidos;
- Granulometria das partículas;
- pH da polpa.

2.1.2.4 Dimensionamento de filtros

De acordo com os autores Sampaio, França e Braga (2007), para realizar o dimensionamento de filtros industriais, normalmente emprega-se o *leaf test* ou testes de folha, em escala laboratorial. O teste consiste em ensaios totalmente empíricos

feitos por fabricantes de filtros e aceitos mundialmente para obter a velocidade de filtração (L/h), razão de filtração (kg/h)/ft² e também parte dos tempos de ciclo de filtração como a formação da torta e secagem. Contudo, não é permissível quantificar tempos de sopragem e os tempos mortos (tempo existente entre formação da torta e secagem).

Ainda de acordo com estes autores, o teste apresenta montagem e aparelhagem simples, baseando-se em um suporte capaz de apoiar o meio filtrante escolhido, para que seja conectado a um kitasato, constituído por um vidro espesso e um orifício central, sendo este acoplado a bomba de vácuo (Figura 10). No teste de folha é possível quantificar variáveis como controle do nível de vácuo e porcentagem de sólidos da alimentação, temperatura da polpa e a lavagem da torta. Posteriormente, é possível obter outros parâmetros, como tempo ótimo de formação da torta e secagem, turbidez e volume de filtrado, umidade e espessura finais da torta.

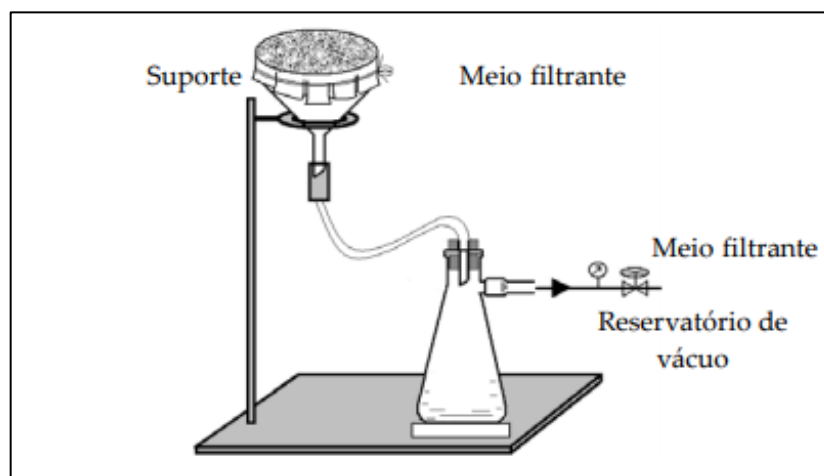


Figura 10 – Teste de folhas (*Leaf test*)

Fonte: Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais – Sampaio, França e Braga (2007).

De acordo com Amarante (2002), em sua dissertação de mestrado “Filtração de minérios de ferro - comparação entre métodos de filtração de laboratório: Testes de Folha e de Funil de Büchner”, o teste de folha é um experimento que pode ser realizado de diferentes maneiras como:

- Teste de Folha convencional (com submersão do suporte de filtração);
- Teste de Folha com alimentação por cima;

- Testes com Funil de Büchner com alimentação por cima (com auxílio da coluna de filtro).

No primeiro caso, o suporte de filtração é submerso em uma caixa contendo polpa durante um tempo determinado. Com auxílio da ação do vácuo, ocorre a formação da torta. Após esse intervalo o suporte é retirado da caixa de polpa e colocado na posição vertical, iniciando-se o tempo de secagem.

No segundo caso, o suporte de filtração recebe a polpa, que é alimentada por cima. Com a ajuda do vácuo e da ação da gravidade se formará a torta. É considerado como tempo de formação da torta aquele em que ocorre a interrupção da passagem de líquido de forma contínua; a partir disso é considerado o tempo de secagem.

Os testes realizados utilizando o funil de Büchner possuem os mesmos princípios do segundo; o diferencial desde está na coluna do filtro, que possui uma altura considerável de forma a permitir que a torta permaneça firme durante todo o teste.

2.3 Planejamento fatorial

O planejamento experimental é composto por um conjunto de princípios de estatística que nos permite fazer experimentos de forma mais competente visando resultados satisfatórios e que sejam capazes de nos levar as conclusões necessárias com mais facilidade durante o experimento. É um método que define, quantifica e organiza todas as variáveis, de forma que sejam obtidas todas as combinações possíveis entre elas com o fim de atingir o propósito desejado (BARROS NETO *et al.*, 2001), sendo essencial em uma pesquisa científica, uma vez que permite qualificar e organizar os parâmetros nos experimentos de maneira adequada.

Existem diversas formas de fazer este planejamento, dentre as quais podemos destacar os experimentos univariados e os multivariados. Os experimentos analisados de forma univariável apresentam algumas desvantagens, a citar: tempo gasto para realizar as análises e ausência de relação/interação entre as variáveis. Já o método multivariável ou fatorial se destaca do primeiro em virtude de ser capaz de

avaliar o efeito de uma grande quantidade de variáveis em conjunto em vez de apenas uma, sendo possível atingir experimentos mais rápidos e com melhor percepção entre a relação das variáveis com os resultados dos testes (CUNICO *et al.*, 2008).

Em um trabalho que utiliza a base experimental para sustentar seus resultados a primeira coisa que é necessário fazer é decidir quais são as variáveis que serão propostas e as respostas desejadas. As variáveis são os elementos que o experimentador pode controlar, enquanto as respostas são os efeitos verificados após a realização do experimento que podem ser ou não afetados por tais variáveis. Neste trabalho será estudado o planejamento fatorial a dois níveis, chamado de 2k (BARROS NETO *et al.*, 2001).

2.4 Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA

O Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, considera que a água está entre as preocupações do desenvolvimento sustentável e é dever do Estado a prevenção e controle de lançamentos de poluentes que são perigosos para os seres vivos no meio ambiente.

À vista disso, o CONAMA dispõe da Resolução CONAMA Nº 357/2005, publicada no Diário Oficial da União nº 053, de 18/03/2005, sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências necessárias para o tratamento de tal.

Nesta Resolução, existem diversas análises que devem ser realizadas para classificar a qualidade da água, como analisar a presença ou não de materiais flutuantes, presença de óleos ou graxas, presença de coliformes termotolerantes, análise da turbidez da água, entre outros.

Em se tratando da turbidez da água, em que esta pode ser medida em unidades nefelométrica de turbidez (FTU), este trabalho também irá classificar a água do filtrado obtido em classes ou padrões que estão pertencentes a Resolução

CONAMA Nº 357/2005, de forma a identificar um dos parâmetros necessários para estabelecer a qualidade dos produtos de filtrado obtidos neste trabalho.

Esta classificação irá auxiliar na escolha do local mais adequado para direcionar-se os produtos destas filtragens, ou seja, poderá ser descartado em corpos de água sem a preocupação ambiental, ou poderá retornar apenas para a rota de processo de beneficiamento ou o descarte desse material não será indicado devido a elevada turbidez presente no filtrado.

O artigo técnico “Tratamento de água de abastecimento por meio da tecnologia de filtração em múltiplas etapas – FiME” escrito por Veras e Bernardo (2008), estudou e avaliou um sistema de Filtração em Múltiplas Etapas (FiME), composto por duas unidades de pré-filtros dinâmicos em série, três linhas de pré-filtros de escoamento ascendente, em série e em camadas, e quatro filtros lentos com diferentes meios filtrantes, totalizando, desta maneira, em treze unidades de tratamento. Este sistema foi avaliado utilizando os parâmetros de turbidez, cor aparente, sólidos suspensos, coliformes totais e fecais e ferro.

Ainda de acordo com os autores Veras e Bernardo (2008), o artigo técnico apresentou os locais onde o circuito de tratamento apresentava resultados elevados de turbidez que chegavam a 335 FTU e 264 FTU, entretanto os pré-filtros dinâmicos 1 e 2, colocados em série, foram capazes de remover, nestes locais, a turbidez de 63% e 37%, respectivamente. Os outros locais onde continha poucas variações, os demais filtros removeram uma turbidez em torno de 35%. Este artigo confirma, portanto, a necessidade da avaliação da turbidez presente no filtrado resultante das filtragens realizadas neste trabalho.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os métodos que foram empregados para prosseguir com este trabalho e os materiais utilizados durante os experimentos de laboratório.

3.1 Meios filtrantes

Os materiais utilizados para esta pesquisa consistem de meios filtrantes que possuem macroporos, possíveis de serem vistos a olho nu, resultando em um material com alto índice de porosidade. Foram utilizados quatro tipos de meios filtrantes distintos entre si, sendo eles: concreto celular autoclavado e três tipos de pedras pomes de porosidades variadas.

O concreto celular autoclavado (Figura 11) foi obtido da empresa Precon, empresa brasileira que produz pré-fabricados de concreto e bastante conhecida na indústria de materiais de construção. Parte deste material original foi devidamente cortado e moldado obtendo-se um diâmetro médio de 9,6 cm.



Figura 11 - Concreto celular autoclavado

A pedra pomes industrializada foi adquirida da empresa Kason, empresa chinesa fabricante de pedras pomes e espuma de vidro para uso doméstico em geral. Este material consistia de três amostras de cores esbranquiçadas, três acinzentadas e três esverdeadas (Figura 12). Cada uma dessas amostras foram devidamente cortas

e moldadas obtendo-se um diâmetro médio de 7 cm. A porosidade destas amostras se difere em grande para cinza, intermediária para verde e baixa para branca.

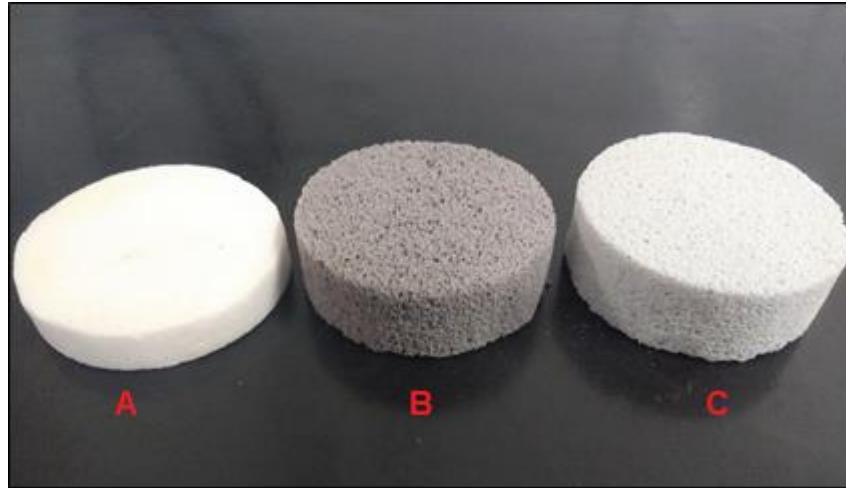


Figura 12 - Pedra pomes de porosidades variadas. A) Pedra pomes branca B) Pedra pomes cinza e C) Pedra pomes verde

3.2 Minério de Ferro

O minério de ferro (Figura 13) utilizado nesta pesquisa é proveniente da empresa Crusader referente ao depósito de Posse, localizado próximo ao município de Caeté, Minas Gerais. Esse material se encontrava no Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET-MG - Unidade Araxá. A amostra global passou por processos de homogeneização e peneiramento, sendo previamente classificado em nas granulometrias entre $150\ \mu\text{m}$ (100#) e $45\ \mu\text{m}$ (325#), com o intuito de retirar-se a lama do material original e que posteriormente fosse levado ao processo de filtração.



Figura 13 - Minério de ferro com granulometrias entre 150 μm (100#) e 45 μm (325#)

3.3 Caracterização dos meios filtrantes

As caracterizações dos meios filtrantes foram realizadas utilizando métodos físicos e químicos.

3.3.1 Caracterização química

As características químicas dos meios filtrantes foram determinadas utilizando-se a técnica de fluorescência de raios-X (FRX). O equipamento de FRX utilizado no ensaio foi da marca Shimadzu, modelo EDX-720 do Laboratório Caracterização do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAT) do CEFET MG (Campus I), situado em Belo Horizonte (MG).

3.3.2 Caracterização física

Os meios filtrantes foram caracterizados fisicamente segundo as seguintes características:

- Capacidade de absorção aparente
- Massa específica aparente
- Porosidade

Para calcular estes parâmetros foram realizados doze testes utilizando três amostras de cada meio filtrante estudado com diâmetro de 7 cm cada uma, com a finalidade de realizar testes de submersão em água semelhante à norma NBR 12766 (ABNT,1992). Os testes foram executados no Laboratório de Mecânica do CEFET-MG - Unidade Araxá, sendo necessário que as amostras fossem lavadas em água corrente, em seguida colocadas em uma estufa de aproximadamente 100°C durante 24 horas. No dia seguinte retirou-se as amostras da estufa e deixou que esfriassem naturalmente. Posteriormente, utilizou-se uma balança de precisão de 0,01 g capaz de permitir a pesagem hidrostática para realizar a pesagem dos meios filtrantes no ar, de forma que não fossem tocados (Figura 14 A e B). Foi realizada a pesagem dos meios filtrantes secos no ar, obtendo-se a massa A, em seguida foi realizada a submersão destes em água, até a sua saturação, durante 32 horas. Após este tempo, os meios filtrantes foram pesados de forma hidrostática, obtendo-se a massa B, e então estes foram secos com um tecido de algodão e levados para realizar novas pesagens no ar, obtendo-se a massa C. Adiante foram realizados os seguintes cálculos, segundo as equações 1, 2, 3, e 4.

$$\rho_{asec} = \frac{A}{(B-C)} \quad \text{Equação 1 - Massa específica aparente seca (kg/m}^3\text{)}$$

$$\rho_{asat} = \frac{B}{(B-C)} \quad \text{Equação 2 - Massa específica aparente saturada (kg/m}^3\text{)}$$

$$\eta a = \frac{(B-A)}{(B-C)} \times 100 \quad \text{Equação 3 - Porosidade aparente (\%)}$$

$$\alpha a = \frac{(B-A)}{A} \times 100 \quad \text{Equação 4 - Absorção d'água aparente (\%)}$$

Em que,

A Massa do material seco pesado no ar;

B Massa do material saturado após 32 horas com pesagem hidrostática;

C Massa do material saturado após 32 horas pesado no ar.



Figura 14 – A) Balança de precisão de 0,01 g com pesagem hidrostática. B) Meio filtrante totalmente submerso em água

Durante os testes de submersão em água, foi necessário utilizar um peso acoplado junto aos meios filtrantes, já que estes eram mais leves que a água. Este peso foi descontado dos cálculos juntamente com o peso do barbante utilizado e o erro inserido na balança.

3.4 Caracterização do minério de ferro

As caracterizações do minério de ferro foram realizadas utilizando métodos físicos, em que foram avaliados a massa específica dos sólidos e a granulometria do material.

3.4.1 Determinação da massa específica dos sólidos

Segundo Sampaio e Silva (2007), o método mais simples e rápido para a determinação da densidade de um sólido é o método do picnômetro (Figura 15). Para o cálculo da densidade de sólidos, foi utilizada a equação 5.

$$\rho_s = \frac{A_2 - A_1}{(A_4 + A_2) - (A_1 + A_3)}$$

Equação 5 - Densidade dos sólidos

Em que,

- ρ_s densidade dos sólidos;
- A1 massa do picnômetro;
- A2 massa do picnômetro + amostra;
- A3 massa do picnômetro + amostra + água;
- A4 massa do picnômetro + água.



Figura 15 – Picnômetros

Para realizar o cálculo da massa específica utilizando este método, inicialmente pesou-se os picnômetros secos obtendo o valor A1. Foi colocado no picnômetro uma quantidade representativa da amostra e a massa do A2 foi aferida. Feito isso, foi adicionado água até completar todo o volume do picnômetro e anotada a massa A3. Posteriormente, o picnômetro foi lavado e preenchido totalmente com água obtendo-se o valor A4.

3.4.2 Análise Granulométrica

O estudo da granulometria foi de grande importância dentro dos procedimentos laboratoriais desta pesquisa, pois ofereceu informações para o controle de finos que se encontravam abaixo de $45 \mu\text{m}$ na filtragem, visto que o material, por ser de alta porosidade, deveria receber um minério com granulometria mais grosseira.

Para obter-se o conhecimento da granulometria do material foi realizado um peneiramento a úmido utilizando o peneirador suspenso (CDC, modelo PV-08),

como mostrado na Figura 16, com peneiras das marcas Granutest e Brozinox e uma amostra de 168,35 g de material.



Figura 16 - Peneirador Suspenso

Para o peneiramento foi utilizada a série de peneiras detalhada na Tabela 1.

Tabela 1 - Série de peneiras utilizadas

Abertura (#)	Abertura (mm)
100	0,15
150	0,104
170	0,09
200	0,074
230	0,063
270	0,053
325	0,044
-325	-0,044

3.5 Teste de filtragem

Neste trabalho utilizou-se o teste de folha (Figura 17) com alimentação por cima, assim como já mencionado no item 2.1.2.4. Foi utilizado um funil de PVC adaptado com estrutura física semelhante ao funil de Büchner, com a finalidade de melhor

atender as especificações dos meios filtrantes que foram estudados. Não foi usado nenhum tipo de agitação de polpa.



Figura 17 - Teste de folha com funil PVC adaptado

Esse teste é composto por um funil de PVC e uma bomba de vácuo conectados a um kitasato e um meio filtrante poroso devidamente cortado de forma circular fixado ao funil com auxílio de um silicone. Foi necessário aguardar 120 horas após a colagem desses materiais para que a cola estivesse totalmente seca e fosse capaz de impermeabilizar as laterais do funil.

Durante a realização do *leaf test*, foi utilizada polpa contendo minério de ferro com 50% de sólidos, com o intuito de considerar que a filtração é um processo subsequente ao espessamento.

Para alimentar o filtro, primeiramente foi colocada a polpa com o auxílio de dois béquers. O primeiro contendo 30 ml de água e polpa e o segundo contendo apenas 20 ml de água. Assim que o primeiro béquer foi usado para alimentar o filtro, o

segundo béquer foi utilizado para limpar o resto de material presente no primeiro béquer e imediatamente adicionado na alimentação do filtro. A bomba de vácuo foi acionada e regulada para a pressão desejada. O tempo foi calculado utilizando-se um cronômetro.

O tempo de formação da torta ocorreu no momento em que a torta começou a ser formada e não havia nenhuma polpa visível. A partir desse ponto, foi determinado o tempo de secagem de no máximo 1 minuto. Além disso, foi definido um tempo total máximo de filtragem de 15 minutos.

Ao finalizar o teste, foi usado um paquímetro para medir a espessura da torta obtida. Para o descarte da torta não foi utilizado o sopro inverso nem a raspagem, face ao impedimento físico do suporte estudado. Para tanto, o PVC foi inclinado para baixo e, através de batidas leves em seu corpo, a torta foi descartada e pesada no seu estado úmido e colocada em estufa a 100°C, para que posteriormente fosse pesada no seu estado seco.

Também foi avaliada a qualidade do filtrado, utilizando um Turbidímetro HI93703 da marca Hanna Instruments. A análise de turbidez do filtrado pode ser comparada de forma diretamente proporcional com a qualidade da filtragem, ou seja, quanto menor o valor da turbidez, o filtrado apresenta-se mais puro, pois contém menores quantidades de sólidos presentes no *underflow*.

O presente trabalho objetivou realizar vinte e quatro tipos de testes diferentes, além de também realizar a replicata dos testes bem sucedidos, de forma a confirmar os resultados para os quatro de meios filtrantes propostos com suas respectivas espessuras e dois níveis de vácuos.

As dimensões e as espessuras pertencentes aos meios filtrantes estudadas neste trabalho estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Meios filtrantes

Meio filtrante	Espessura (cm)	Diâmetro (cm)	Área base (cm ²)	Volume (cm ³)
Concreto celular	3,70	9,60	72,38	267,81
	2,30	9,60	72,38	166,47
	1,30	9,60	72,38	94,10
Pedra pomes	3,70	7	38,48	142,39
	2,30	7	38,48	88,51
	1,30	7	38,48	50,03

Após a realização dos testes, foi necessário determinar o nível de vácuo adequado e calcular a umidade da torta (equação 6).

$$Umidade\ base\ úmida\ (U) = \frac{\sum massa\ úmida - \sum massa\ seca}{\sum massa\ úmida} \times 100 \quad \text{Equação 6 - Umidade da torta}$$

Todos estes valores foram anotados em uma planilha de laboratório, para melhor controle de parâmetros operacionais do teste de folha.

3.6 Planejamento fatorial das variáveis

Com objetivo de utilizar o planejamento fatorial para realizar os testes com k variáveis, um planejamento íntegro de dois níveis foi utilizado com experimentos de $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ de ensaios diferentes. Este tipo de análise é comumente realizado em testes preliminares nos quais só se conhecem as variáveis ainda de forma superficial. (BARROS NETO *et al.*, 2001)

Em busca de uma melhor análise técnica e otimização do processo, foram alteradas as seguintes variáveis: tipo do meio filtrante, espessura do meio filtrante e nível de vácuo aplicado. Na tabela 3 estão representados as variáveis propostas para este trabalho.

Os testes de folha e o planejamento fatorial das variáveis serviram de base para o projeto e foram utilizados com a finalidade de analisar algumas variáveis de filtragem, para que ao final do processo fosse possível averiguar cada material e a

pertinência das suas respectivas particularidades, buscando, portanto, circunstâncias ótimas de operação.

Tabela 3 - Matriz do planejamento

Teste	X1 (Meio filtrante)	X2 (Espessura cm)	X3 (Nível de vácuo em mm de Hg)	X1	X2	X3
1	Concreto celular (CC)	3,7	275	1	1	-1
2		2,3	275	1	0	-1
3		1,3	275	1	-1	-1
4		3,7	400	1	1	1
5		2,3	400	1	0	1
6		1,3	400	1	-1	1
7	Pedra pomes branca (PB)	3,7	275	0	1	-1
8		2,3	275	0	0	-1
9		1,3	275	0	-1	-1
10		3,7	400	0	1	1
11		2,3	400	0	0	1
12		1,3	400	0	-1	1
13	Pedra pomes cinza (PC)	3,7	275	-1	1	-1
14		2,3	275	-1	0	-1
15		1,3	275	-1	-1	-1
16		3,7	400	-1	1	1
17		2,3	400	-1	0	1
18		1,3	400	-1	-1	1
19	Pedra pomes verde (PV)	3,7	275	-2	1	-1
20		2,3	275	-2	0	-1
21		1,3	275	-2	-1	-1
22		3,7	400	-2	1	1
23		2,3	400	-2	0	1
24		1,3	400	-2	-1	1

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos dos testes de caracterização dos meios filtrantes e do minério de ferro e os testes de filtragem.

4.1 Caracterização química dos meios filtrantes

A caracterização química está representada na Tabela 4, nela tem-se a interpretação das proporções de cada óxido encontrado para os meios filtrantes estudados.

Tabela 4 - Óxidos identificados por FRX para os meios filtrantes

Óxidos identificados	Resultados (%)			
	Pedra pomes Branca (PB)	Pedra pomes Verde (PV)	Pedra pomes Cinza (PZ)	Concreto celular (CC)
SiO ₂	71,600	70,631	73,834	44,916
CaO	18,012	18,987	18,130	47,755
Na ₂ O	5,141	5,502	-	-
MgO	2,022	1,701	1,842	-
Al ₂ O ₃	1,870	1,719	2,451	2,680
K ₂ O	0,488	0,466	0,678	0,507
Sc ₂ O ₃	-	-	0,641	-
SO ₃	0,400	0,347	0,439	-
Fe ₂ O ₃	0,354	0,262	1,341	2,703
Co ₂ O ₃	-	0,108	-	-
Cr ₂ O ₃	-	0,103	0,403	-
TiO ₂	0,085	0,100	-	0,171
ZnO	-	-	0,117	-
SrO	0,020	0,020	0,027	0,136
Rb ₂ O	0,007	-	-	-
SO ₃	-	-	-	0,776
MnO	-	0,053	0,077	0,356
CuO	-	-	0,019	-

A partir dos resultados de caracterização química, é possível afirmar que os meios filtrantes estudados eram constituídos, basicamente, por sílica e óxidos de cálcio, sódio, magnésio e alumínio.

Além disso, percebe-se que uma maior quantidade de óxido de cálcio presente nos meios filtrantes causa uma menor resistência a degradação e uma maior turbidez do filtrado nos testes de filtração, devido ao desgaste do material com a aplicação do vácuo.

4.2 Caracterização física dos meios filtrantes

Os testes de submersão em água foram realizados e os valores de A, B e C foram determinados através das equações já citadas no tópico 3.3.2. O Apêndice A apresenta a Tabela A.1 com as massas obtidas durante os testes. A partir desta tabela foram obtidos os valores da Tabela A.2, com o resultado dos cálculos realizados para a massa específica aparente seca, massa específica aparente saturada, porosidade aparente e absorção d'água aparente. Abaixo na Tabela 5 estão representados os valores médios encontrados para cada meio filtrante.

Tabela 5 - Característica física em média dos meios filtrantes

Meio Filtrante	Massa específica ap. seca (kg/m ³)	Massa específica ap. saturada (kg/m ³)	Porosidade ap. (%)	Absorção d'água ap. (%)
PB	0,211	0,473	26,157	123,647
PV	0,186	0,256	7,060	38,160
PC	0,203	0,273	6,965	34,424
CC	0,408	0,766	35,838	87,922

A partir dos dados obtidos na Tabela 5, pode-se confirmar que em todos os meios filtrantes houve uma mudança significativa do peso quando estes eram submersos em água.

Entretanto, como o resultado de absorção em água utilizando a pedra pomes branca foi maior do que 100%, nota-se que o teste de submersão em água utilizado para

estes materiais não apresentam resultados coerentes e adequados, fazendo com que os valores obtidos na tabela anterior não possam ser discutidos de maneira satisfatória.

O ensaio mais adequado para estes materiais seria, portanto, o método da porosimetria por injeção de mercúrio, uma vez que este método tem como princípio o fato de que o mercúrio se comporta como um fluido não-molhante em relação à maior parte das substâncias. Este ensaio não pôde ser realizado devido à dificuldade do acesso deste equipamento.

4.3 Caracterização física do minério de ferro

A caracterização física do minério de ferro foi realizada utilizando os métodos de picnometria para obter a densidade dos sólidos e análise granulométrica para conhecer sua distribuição de tamanho de partículas .

4.3.1 Determinação da massa específica dos sólidos

As triplicatas dos resultados obtidos para o estudo da densidade do minério de granulometria entre 150 μm (100#) e 45 μm (325#), utilizando a técnica da picnometria, no qual foi citada no tópico 3.4.1 estão expressas no Apêndice B. A partir dos resultados obtidos pode-se considerar que a média das densidades foi igual a 3,94 g/cm³.

4.3.2 Análise Granulométrica

Após ter separado o material na granulometria entre 150 μm (100#) e 45 μm (325#) foi realizado o peneiramento a úmido e foram obtidos os resultados da análise granulométrica que estão representados no Apêndice C. A Figura 18 mostra a curva granulométrica obtida a partir desta tabela.

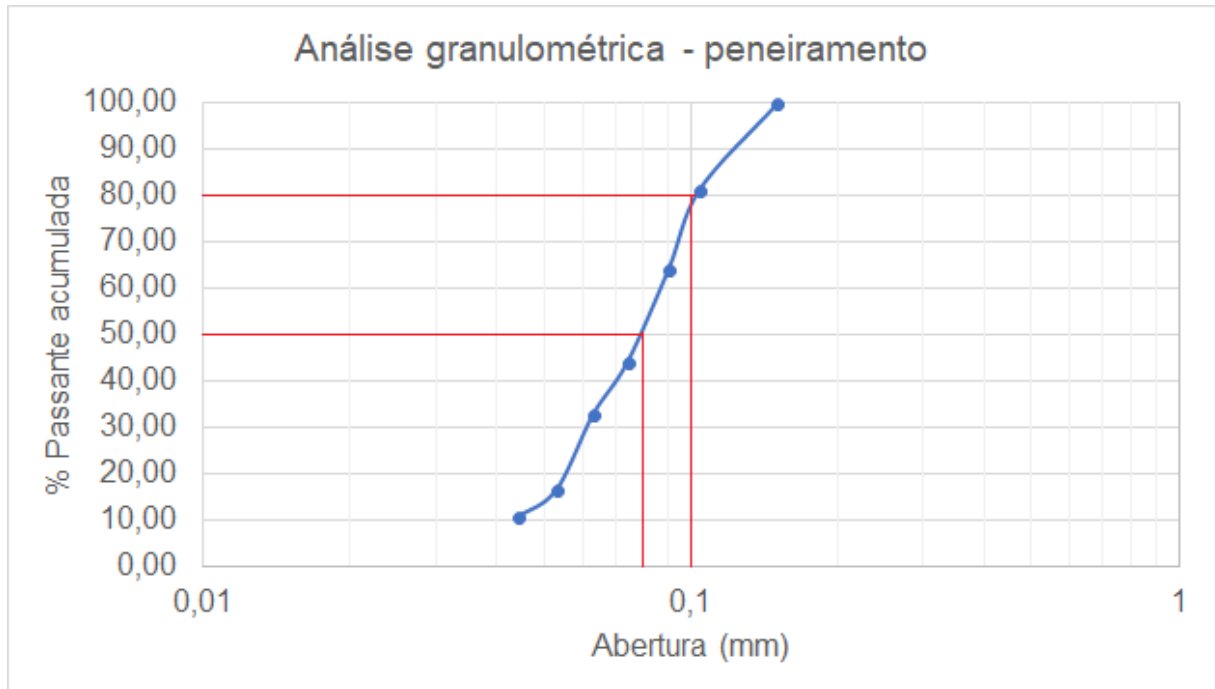


Figura 18 - Curva granulométrica do minério de ferro

A partir da Figura 19, observa-se que o d_{80} do minério de ferro estudado foi de 0,1 mm e o d_{50} deste material igual a 0,08 mm, ou seja 80% das partículas eram passantes na peneira de 0,1 mm e 50% das partículas eram passantes na peneira de 0,08 mm. Os dados obtidos mostram que mesmo tendo realizado o peneiramento prévio com objetivo de retirar-se os finos, ainda assim, o material possuía cerca de 10% das partículas abaixo de 44 μm .

4.4 Testes de Filtragem

A última etapa deste projeto consistiu em analisar os testes de filtragem e a eficiência de cada material utilizado com suas respectivas espessuras e vácuos adequados. Os testes foram realizados em duplicata.

A duplicata só foi realizada para os testes que obtiveram resultados satisfatórios, ou seja, realizados apenas para os meios filtrantes que suportaram a pressão e que filtraram adequadamente de forma a confirmar os resultados já estudados anteriormente.

Foram realizados testes preliminares com o intuito de estabelecer o tempo de secagem da torta, no qual foi pré-determinado de 1 minuto para todos os testes.

4.4.1 Pedra pomes branca

A seguir serão apresentados os resultados obtidos referentes a filtragem utilizando a pedra pomes branca de espessura 3,7 cm na Tabela 6 e suas respectivas imagens das tortas na Figura 19 A e B.

Tabela 6 - Pedra pomes branca de 3,7 cm

Meio Filtrante	Espessura (cm)	Vácuo (mm de Hg)	Tempo formação torta (min)	Espessura torta (mm)	Umidade (%)	Turbidez (FTU)
Pedra pomes branca	3,7	275	01:06	0,65	20,44	60
	3,7	400	00:56	0,75	18,62	125
	3,7*	275	01:12	0,60	20,47	100
	3,7*	400	00:45	0,40	21,98	198

*Testes em replicata

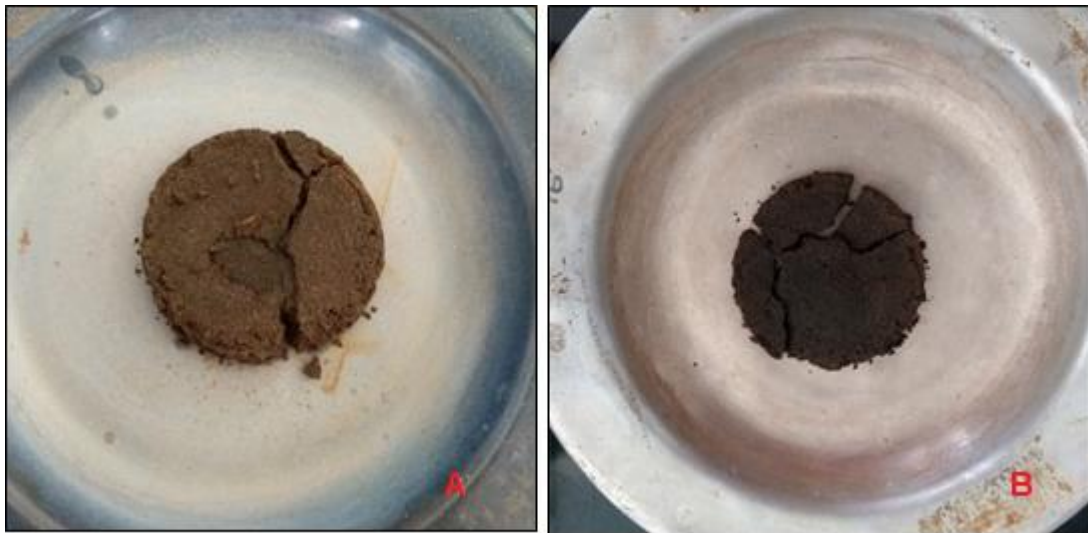


Figura 19 – A) Torta obtida a partir da filtragem utilizando pedra pomes branca com 3,7 cm de espessura em 275 mm de Hg e B) 400 mm de Hg

A Figura 19 A, mostra o resultado obtido a partir do teste de filtragem utilizando 275 mm de Hg. A partir da tabela, nota-se que o teste mostrou-se eficiente em questão de tempo de filtragem e umidade da torta mesmo a uma espessura máxima e um menor nível de vácuo. O teste em replicata foi semelhante ao teste original, entretanto houve uma elevação no valor da turbidez.

A Figura 19 B, apresenta a torta obtida no teste de filtração utilizando 400 mm de Hg. Para esse teste nota-se que um aumento do nível de vácuo não acarreta um ganho de eficiência, tendo os resultados obtidos bastante semelhantes quando utilizou-se o vácuo de 275 mm de Hg.

Além disso a turbidez para a filtração de 400 mm de Hg mostrou-se bastante elevada no teste de replicata. Contudo, acredita-se que isso ocorreu devido o material já ter sido utilizado diversas vezes antes destes testes, acarretando um desgaste maior do meio filtrante.

Os resultados obtidos referentes a filtração utilizando a pedra pomes branca de espessura 2,3 cm estão expressos na Tabela 7 e a torta obtida na Figura 20.

Tabela 7 - Pedra pomes branca de 2,3 cm

Meio Filtrante	Espessura (cm)	Vácuo (mm de Hg)	Tempo formação torta (min)	Espessura torta (mm)	Umidade (%)	Turbidez (FTU)
Pedra pomes branca	2,3	275				
	2,3	400	15:21	-	31,18	44,7
	2,3*	400	15:35	-	30,89	43,8

*Teste em replicata

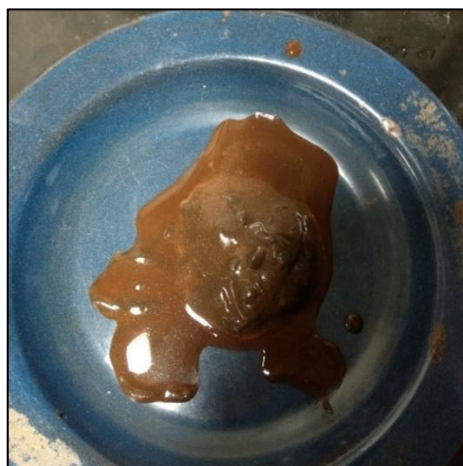


Figura 20 – Falha dos testes na filtração utilizando pedra pomes branca com 2,3 cm de espessura e 400 mm de Hg

A Tabela 7 e a Figura 20, mostram o ocorrido durante a realização do teste utilizando a pedra pomes branca com 2,3 cm de espessura e vácuo de 400 mm de

Hg. O teste não apresentou o resultado esperado, uma vez que demorou mais de 15 minutos para filtrar tanto no teste original como no de replicata. Foi necessário, portanto, optar por cessar o teste após este tempo, não sendo possível obter os valores de espessura da torta.

Além disso, optou-se por não realizar o teste utilizando 275 mm de Hg para esta mesma espessura, pois devido à demora de filtragem utilizado um vácuo maior, este também não se encontraria no tempo máximo estipulado.

Os resultados obtidos referentes a filtragem utilizando a pedra pomes branca de espessura 1,3 cm estão expressos na Tabela 8 e suas respectivas imagens das tortas na Figura 21 A e B.

Tabela 8 - Pedra pomes branca de 1,3 cm

Meio Filtrante	Espessura (cm)	Vácuo (mm de Hg)	Tempo formação torta (min)	Espessura torta (mm)	Umidade (%)	Turbidez (FTU)
Pedra pomes branca	1,3	275	05:59	0,60 ^o	18,57	70
	1,3	400	00:53	0,60	17,69	130
	1,3*	275	06:36	0,65	21,44	60
	1,3*	400	00:52	0,60	17,68	100

*Teste em replicata

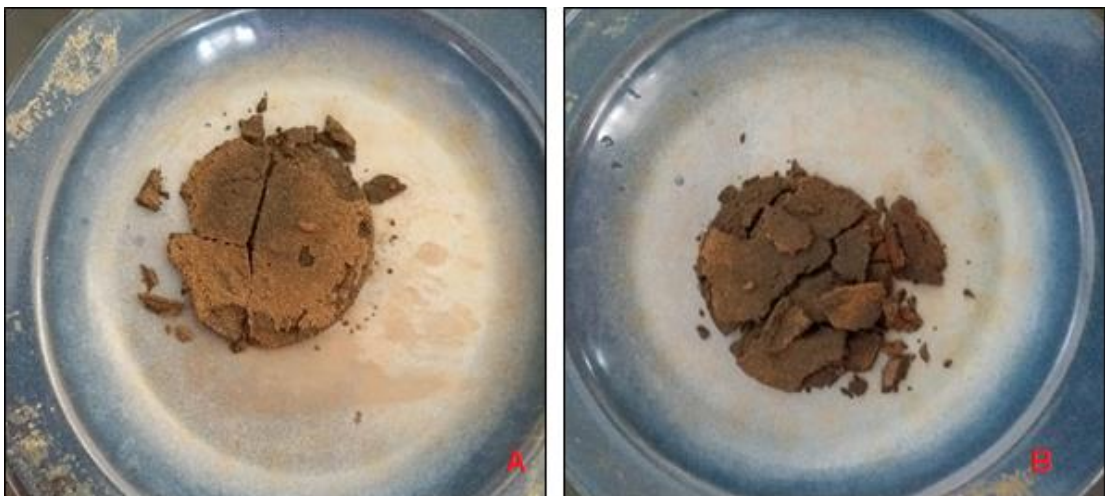


Figura 21 – A) Torta obtida a partir da filtragem utilizando pedra pomes branca com 1,3 cm de espessura em 275mm de Hg e B) 400mm de Hg

A Figura 21 A, mostra a torta obtida utilizando a pedra pomes branca com 1,3 cm de espessura em 275 mm de Hg. Este teste mostrou-se mais demorado que o teste com espessura de 3,7 cm utilizando o mesmo nível de vácuo, entretanto ainda assim obteve-se resultados de filtragem satisfatórios, no que diz respeito a turbidez do filtrado de até 100 FTU e umidade de torta em torno de 20%.

Acredita-se que o maior tempo de filtragem com o aumento da espessura, seja acarretado devido o meio filtrante estar com seus poros sendo mais facilmente entupidos pelo minério utilizado.

A Figura 21 B, mostra a torta obtida utilizando a pedra pomes branca com 1,3 cm de espessura em 400 mm de Hg. O teste mostrou-se eficiente em questão de tempo de filtragem com menos de 2 minutos e umidade da torta em torno de 18%. Entretanto apresentou-se uma maior turbidez de filtrado no teste original de 130 FTU.

A partir das três espessuras estudadas, nota-se que a diminuição da espessura da pedra pomes branca não acarreta em um grande ganho de eficiência nos testes de filtrações, já que os testes de 3,7 cm e 1,3 cm de espessura apresentaram resultados de umidade de torta e turbidez semelhantes.

4.4.2 Pedra pomes cinza

Para os testes utilizando a pedra pomes cinza foram testadas todas as espessuras recomendadas, contudo nenhuma das espessuras apresentou a filtragem esperada, uma vez que não ocorreu nenhuma passagem de água durante a filtragem até o tempo máximo de filtragem estipulado de 15 minutos.

A partir desta observação é possível afirmar que apesar deste material apresentar grandes tamanhos de poros, estes não são interconectados entre si, impedindo a filtragem de qualquer tipo de material.

4.4.3 Pedra pomes verde

Os resultados obtidos referentes a filtração utilizando a pedra pomes verde de espessura 1,3 cm estão expressos na Tabela 9 e suas respectivas imagens das tortas na Figura 22 A e B.

Os testes de filtração utilizando as espessuras de 2,3 cm não apresentaram nenhuma passagem de filtrado durante o tempo máximo estabelecido. Com isso, optou-se por não realizar os testes utilizando a espessura maior de 3,7 cm, já que este também não apresentaria a filtração esperada.

Tabela 9 - Pedra pomes verde de 1,3 cm

Meio Filtrante	Espessura (cm)	Vácuo (mm de Hg)	Tempo formação torta (min)	Espessura torta (mm)	Umidade (%)	Turbidez (FTU)
Pedra pomes verde	1,3	275	03:01	0,60	20,06	60
	1,3	400	00:55	0,60	15,29	100
	1,3*	275	01:32	0,60	14,86	49,76
	1,3*	400	01:18	0,70	18,52	99

*Testes em replicata



Figura 22 - A) Torta obtida a partir da filtração utilizando pedra pomes verde com 1,3 cm de espessura em 275mm de Hg e B) 400mm de Hg

A Figura 22 A, mostra a torta obtida utilizando a pedra pomes verde com 1,3 cm de espessura em 275 mm de Hg. Este teste mostrou-se bastante eficiente em questão de umidade da torta em torno de 15% a 20% e turbidez de filtrado de até 100 FTU. Contudo, o teste original mostrou-se muito mais demorado durante o tempo de formação da torta, do que no teste em replicata, deveria ser necessário portanto, repetir o teste realizado.

A Figura 22 B, mostra a torta obtida utilizando a pedra pomes verde com 1,3 cm de espessura em 400 mm de Hg. Este teste mostrou todos resultados satisfatórios, entretanto para esse teste nota-se que um aumento do nível de vácuo não acarretou em um ganho de eficiência operacional, visto que os resultados obtidos foram bastante semelhantes quando utilizou-se o vácuo de 275 mm de Hg nos testes de replicata.

Na Figura 22 B, nota-se também que houve uma maior dificuldade para realizar o descarte da torta, pois o minério ficou mais aderido à superfície do meio filtrante devido a umidade resultante em torno de 15%. Portanto, para este meio filtrante seria mais adequado diminuir o tempo de secagem da torta para ambos os níveis de vácuos utilizados.

Comparando-se a pedra pomes verde com a branca, os resultados não foram muito distintos entre si para a mesma espessura de 1,3 cm. Por outro lado, conforme já mencionado anteriormente, ao tentar realizar testes utilizando uma espessura maior, a pedra pomes verde não conseguiu filtrar o material. Isso ocorreu pelo mesmo motivo que a pedra pomes cinza não conseguiu filtrar o material conforme esperado, ou seja, provavelmente, os poros da pedra pomes verde são menos interconectados entre si do que a pedra pomes branca, dificultando, portanto, a filtração para mesmas espessuras.

4.4.4 Concreto celular autoclavado

Por fim, foram realizados os testes de filtração para o concreto celular autoclavado. A Tabela 10 mostra os resultados obtidos durante os testes de filtração utilizando 3,7 de espessura e a Figura 23, mostram as tortas obtidas.

Tabela 10 - Concreto celular autoclavado de 3,7 cm

Meio Filtrante	Espessura (cm)	Vácuo (mm de Hg)	Tempo formação torta (min)	Espessura torta (mm)	Umidade (%)	Turbidez (FTU)
	3,7	275	01:22	0,20	22,13	136
Concreto celular	3,7	400	00:43	0,30	15,47	520
	3,7*	275	01:19	0,40	22,71	178
	3,7*	400	00:45	0,30	12,61	550

*Testes em replicata

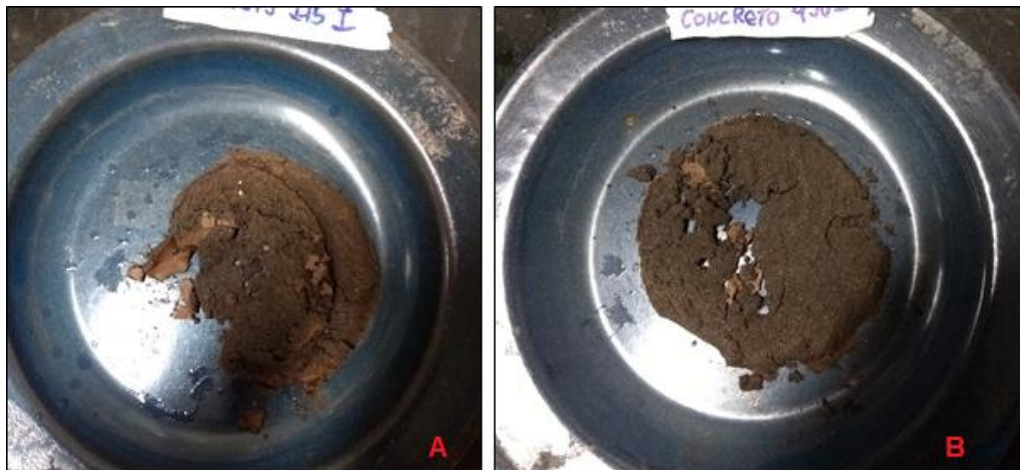


Figura 23 – A) Torta obtida a partir da filtragem utilizando concreto celular autoclavado com 3,7 cm de espessura em 275mm de Hg e B) 400mm de Hg

A Figura 23 A, mostra a torta obtida utilizando o concreto celular autoclavado com 3,7 cm de espessura em 275 mm de Hg e a Figura 23 B, mostra a torta em que foi utilizado o vácuo de 400 mm de Hg. Em relação ao tempo de filtragem e umidade da torta para este material em ambos os níveis de vácuo utilizados apresentaram resultados eficientes como os demais, sendo que a filtragem utilizando 275 mm de Hg foi mais demorada que a de 400 mm de Hg. Contudo, em ambos os vácuos utilizados, verificou-se uma certa quantidade de minério de ferro e meio filtrante presente no *underflow* da filtragem, causando uma turbidez muito elevada, especialmente no teste de 400 mm de Hg.

Os testes utilizando 2,3 cm de espessura não foram realizados. O teste utilizando 1,3 cm de espessura (Figura 24 A e B) mostrou ser um teste não adequado para

esta finalidade, uma vez que o meio filtrante não suportou o vácuo aplicado antes mesmo que chegasse ao nível de 275 mm de Hg.



Figura 24 - Concreto celular de 1,3 cm de espessura utilizando vácuo de 200mm de Hg

Baseando-se nos dados obtidos a partir de todos os testes realizados e na resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) n° 357 de 17 de março de 2005 publicada no diário oficial da união – DOU n° 53 de 18/03/2005 nas páginas 58 a 63, pode-se afirmar que os materiais de pedra pomes verde produziram um filtrado que poderia ser classificado como água doce classe 2 de acordo com os valores de turbidez obtidos de até 100 FTU, ou seja, além desta água poder ser direcionada novamente para a rota de processo de beneficiamento, esta água também pode ser descartada em corpos de água onde haja pesca ou cultivo de organismos para fins de consumo intensivo.

Os resultados de índice de turbidez para os filtrados provenientes da pedra pomes branca, por conterem valores de até 198 FTU poderão ser direcionados apenas para rota de beneficiamento. Por outro lado, o concreto celular apesar de ter apresentado bons resultados de tempos de filtragem e umidade da torta, não apresentou um filtrado que poderia retornar a rota de processo, não sendo, portanto, aplicável para esta finalidade.

5. CONCLUSÕES

Os resultados mais satisfatórios, em questão de tempo total de filtração e umidade da torta, foram obtidos durante os testes de filtração utilizando um vácuo de 400 mm de Hg para a pedra pomes branca para as espessuras de 3,7 cm e 1,3 cm, a pedra pomes verde em 1,3 cm de espessura e para o concreto celular 3,7 de espessura. Para todos estes testes o tempo máximo de filtração foram até 3 minutos com umidades em torno de 15% a 22%.

Apesar da pedra pomes branca apresentar resultados satisfatórios para as espessuras de 1,3 cm e 3,7 cm, seria necessário repetir os testes utilizando este meio filtrante, uma vez que os resultados obtidos se mostraram contraditórios quanto os resultados de filtração utilizando a espessura de 2,3 cm.

A pedra pomes verde, mostrou-se eficiente tanto para o tempo total de filtração para 275 mm de Hg, como de 400 mm de Hg, entretanto seria necessário refazer o teste de 275 mm de Hg, uma vez que o teste original e o de replicata apresentaram grandes diferenças. Este meio filtrante apresentou uma umidade entre 15% e 20% e índice de turbidez entre 50 e 100 FTU, podendo ser classificado como filtrado de água doce classe 2 de acordo com os valores de turbidez obtidos de até 100 FTU. Contudo só pôde ser estudada para a espessura de 1,3 cm, já que as outras espessuras não apresentaram filtração no tempo estabelecido de 15 minutos.

O concreto celular resultou em bons resultados de filtração com tempo total de filtração de até 3 minutos e umidades em torno de 22%, contudo apresentou valor de turbidez igual a 550 FTU, que foi bastante elevada, sendo portanto inadequado para recirculação de água no circuito de beneficiamento.

Os testes de caracterização física, por submersão em água, dos meios filtrantes não foram condizentes com o esperado, uma vez que os materiais com maior índice de absorção d'água aparente resultaram em índices com mais de 100% de absorção. Discutir sobre este ensaio, não foi viável, portanto seria necessário repetir os testes de porosidade utilizando o método da porosimetria por injeção de mercúrio, por ser um método mais adequado a estes materiais.

Apesar destes materiais apresentarem uma umidade de torta maior do que os métodos tradicionais existentes, todos eles são materiais de menor custo, sendo portanto, uma boa alternativa estudar melhor sobre o uso destes materiais na filtração durante o beneficiamento de minérios, na busca por uma fabricação de materiais mais competentes, uma vez que estes apresentaram grandes diferenças entre si.

Esta diferença, provavelmente ocorreu devido a fabricação destes materiais não possuir um controle de poros voltada para a filtração, mas sim para outros fins não semelhantes a esta aplicação. Portanto, seria necessário uma produção de materiais com poros controlados de forma que sejam melhores avaliados seus parâmetros e suas qualidades de filtração.

De acordo com os testes obtidos para filtração utilizando a pedra pomes branca, foi possível perceber a restrição de aplicação destes meios filtrantes alternativos, apenas à polpas de minério com granulometrias mais grosseiras. Isso devido ao fato de tais granulometrias não impedirem que os macroporos do meio filtrante sejam obstruídos, ao contrário de polpas com granulometria fina, que são capazes de obstruir com maior facilidade os poros do meio filtrante.

6. REFERÊNCIAS

ABNT- NBR 12766 (1992). **Rochas para revestimento - determinação da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água aparente**. Rio de Janeiro. 2 p. Disponível em: <<https://www.passeidireto.com/arquivo/16368366/nbr-12766---rochas-para-revestimento-determinacao-da-massa-especifica-aparente-p>>. Acesso em: 17 nov. 2017.

AMARANTE, S. C. **Filtragem de minérios de ferro - comparação entre métodos de filtragem de laboratório**: Testes de Folha e de Funil de Büchner. (Dissertação de mestrado). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002, 137 p.

ANDRADE, M. C.; SAMPAIO, J. A.; LUZ A. B.; BUOSO, A... **Rochas e Minerais para Cerâmica de Revestimento**. In: LUZ, A. B. *et al.*. Rochas e minerais industriais. 1. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2005. cap. 27, p. 559-581. v. 27. Disponível em: <<http://file:///C:/Users/Ingrid/Desktop/rochas-e-minerais-industriais-1-edicao.pdf>>. Acesso em: 13 nov. 2017.

AROUCA, F. O. **Uma Contribuição ao Estudo da Sedimentação Gravitacional em Batelada**. 2007. 162 p. Tese (Doutorado) — PPG-EQ/UFU, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil, 2007.

LANDMESSER, C.; TRAINOFF, S.; NANDIVADA, V.. **Engenharia de Microestruturas Cerâmicas e Usinagem**. 2011. Disponível em: <<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=5697>>. Acesso em: 23 nov. 2017.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos**. 2 ed. ARTMED, 2001. 412p.

BOKELA. **Filtro de disco**. 2011. Disponível em: <<http://www.bokela.de/br/tecnologias/filtracao-a-vacuofiltro-de-disco/techn-daten.html>>. Acesso em: 06 nov. 2017.

CHAVES, A. P. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios. Desaguamento, Espessamento e Filtragem**. 4.ed. São Paulo: Oficina de Textos, v. 2, 2013, 240 p.

Conselho Nacional do Meio Ambiente - (CONAMA). **RESOLUÇÃO No 357, DE 17 DE MARÇO DE 2005**. Publicada no diário oficial da união – DOU nº 53 de 18/03/2005.

CUNICO, M. W. M.1*; CUNICO, M. M.2; MIGUEL, O. G. 2 ; ZAWADZKI, S. F.3 ; PERALTA-ZAMORA, P.3 ; VOLPATO, N.1. **Planejamento fatorial: uma ferramenta estatística valiosa para a definição de parâmetros experimentais empregados na pesquisa científica**. NUFER, Universidade Federal do Paraná. Paraná-Curitiba, 2008

FERREIRA FILHO, S. S.; **Tratamento de água concepção, projeto e operação de estações de tratamento**. 1 ed. Rio de Janeiro. 2017. 23p.

GUIMARÃES, N. C. **Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando à sua disposição em pilhas**. UFMG. Belo Horizonte. 2011. 129p.

IBRAM (Instituto Brasileiro de Mineração). **Informações sobre a economia mineral brasileira 2015**. 1. 2015. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00005836.pdf>>. Acesso em: 18 out. 2017.

LUZ, J. A. M.; OLIVEIRA, L.M E LACERDA, C. M. M.. **Apostila de espessamento e filtragem**. Ouro Preto-MG. Departamento de Engenharia de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto. 2004, p. 16 – 46

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.. **Tratamento de Minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 965 p. Disponível em: <<http://livroaberto.ibict.br/bitstream/1/949/12/Tratamento%20de%20Minérios.pdf>>. Acesso em: 06 nov. 2017.

OUTOTEC. **Espessador de acionamento central.** Disponível em: <http://www.directindustry.com/pt/prod/outotec/product-91205-1853064.html>. Acesso em: 06 nov. 2017.

PRECON. **Concreto Celular Autoclavado (CCA).** Disponível em: <http://precon.com.br/portal/blocos-precon/>. Acesso em: 09 nov. 2017.

PLURITEC. **Pedra pomes natural. (2014)** Disponível em: <http://pluritecbr.com.br/pedra-pomes.html>

VERAS, L. R. V.; DI BERNARDO, L.. **Tratamento de água de abastecimento por meio da tecnologia de filtração em múltiplas etapas - FiME.** 2006. 8 p. . (Hidráulica e Saneamento)- Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Carlos, 2008. 13. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1413-41522008000100014&script=sci_abstract&lng=pt>. Acesso em: 12 jul. 2018.

SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A.. **Tratamento de Minérios: práticas laboratoriais.** Centro de Tecnologia Mineral Ministério da Ciência e Tecnologia (CETEM-MCT). Rio de Janeiro: 2007. Disponível em: [http://www.cetem.gov.br/files/docs/livros/2007/Trat.Min.Prat.Laboratoriais%20\(Joao,Silvia%20e%20P.Braga\).pdf](http://www.cetem.gov.br/files/docs/livros/2007/Trat.Min.Prat.Laboratoriais%20(Joao,Silvia%20e%20P.Braga).pdf). Acesso em: 30/12/2017.

SAMPAIO, J.A.; SILVA, F.A.N.G. Determinação das densidades de sólidos e de polpa. In: SAMPAIO, J.A et al. **Tratamento de minérios: Práticas Laboratoriais – CETEM/MCT.** Rio de Janeiro, 2007. P. 37-60.

VALADÃO, G. E. S., ARAUJO, C. A.. **Introdução ao tratamento de minérios.** In: UFMG (Ed.) Belo Horizonte, 2012, p.234.

WAKEMAN, R. J., TALERTON, E. S.. **Separação Sólido / Líquido: Princípios da Filtragem Industrial. 1ed.** Austrália, 2005, p.68.

APÊNDICE A - RESULTADOS DOS TESTES DE SUBMERSÃO EM ÁGUA

Tabela A. 1 - Teste de submersão em água corrigido

Meios filtrantes	A (g)	B (g)	C (g)
B1	9,06	18,7	-25,24
B2	9,62	22,73	-21,16
B3	9,2	21	-23,26
V1	8,1	12	-33
V2	8,69	11,71	-34,75
V3	8,93	11,75	-35,14
C1	8,6	11,18	-29,31
C2	8,9	11,98	-32,56
C3	9	12,48	-33,26
CC1	41,46	77,87	-24,31
CC2	39,09	75	-20,14
CC3	41,15	75,75	-25,61

Tabela A. 2 - - Característica física geral dos meios filtrantes

Meios Filtrantes	Massa específica ap. seca (kg/m ³)	Massa específica ap. saturada (kg/m ³)	Porosidade aparente (%)	Absorção d'água aparente (%)
B1	0,206	0,426	21,939	106,402
B2	0,219	0,518	29,870	136,279
B3	0,208	0,474	26,661	128,261
V1	0,180	0,267	8,667	48,148
V2	0,187	0,252	6,500	34,753
V3	0,190	0,251	6,014	31,579
C1	0,212	0,276	6,372	30,000
C2	0,200	0,269	6,915	34,607
C3	0,197	0,273	7,608	38,667
CC1	0,406	0,762	35,633	87,820
CC2	0,411	0,788	37,744	91,865
CC3	0,406	0,747	34,136	84,083

APÊNDICE B – DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DOS SÓLIDOS

Tabela B.1 - Massa específica do minério de ferro

Teste	A1 (g)	A2 (g)	A3 (g)	A4 (g)	Ps (g/cm ³ .)
1	30,78	35,24	84,95	81,61	3,98
2	29,88	33,82	83,48	80,57	3,83
3	29,73	34,71	83,89	80,15	4,02

APÊNDICE C – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO MINÉRIO DE FERRO

Tabela C. 1 – Tabela de análise granulométrica do minério de ferro

Abertura (#)	Abertura (mm)	Massa retida (g)	% Retida Simples	% Retida acumulada	% Passante acumulada
100	0,15	0	0,00	0,00	100,00
150	0,104	30,94	18,63	18,63	81,37
170	0,09	28,3	17,04	35,66	64,34
200	0,074	33,76	20,32	55,99	44,01
230	0,063	18,62	11,21	67,20	32,80
270	0,053	27,08	16,30	83,50	16,50
325	0,044	9,87	5,94	89,44	10,56
-325	-0,044	17,54	10,56	100,00	0,00
Total		166,11	100		