



Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais



Gabriel Marques Bonifácio Chaves

FILTRABILIDADE DE GRANÉIS SOB DIVERSOS MEIOS FILTRANTES

Ouro Preto
Novembro de 2022

Gabriel Marques Bonifácio Chaves

Filtrabilidade de granéis sob diversos meios filtrantes

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Engenheiro Metalúrgico.

Orientador: Prof. Dr. José Aurélio Medeiros da Luz

Co-orientadora: Msc. Mariana Caroline Andrade Silva

Ouro Preto
Novembro de 2022



FOLHA DE APROVAÇÃO

Gabriel Marques Bonifácio Chaves

Filtrabilidade de granéis sob diversos meios filtrantes

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Metalúrgica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em engenharia metalúrgica

Aprovada em 04 de novembro de 2022.

Membros da banca

Dr. - José Aurélio Medeiros da Luz - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
M. Sc. - Mariana Caroline Andrade Silva - (Universidade Federal de Ouro Preto)
M. Sc. - Jorge Carlos Guerrero Vargas - (Universidade Federal de Ouro Preto)

José Aurélio Medeiros da Luz, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 24/09/2024.



Documento assinado eletronicamente por **Jose Aurelio Medeiros da Luz, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 24/09/2024, às 19:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0783339** e o código CRC **555DF17A**.

RESUMO

As operações de separação sólido/líquido têm se revestido de grande importância na atualidade, no âmbito do tratamento de minérios, em vista de que um desaguamento eficiente de sistemas granulares pode implicar substanciais vantagens técnicas, econômicas, e ambientais, seja no que concerne aos concentrados, seja aos rejeitos. O presente projeto se insere nesse contexto e objetiva estudar a influência tanto da distribuição granulométrica na filtração, quanto o tipo de meio filtrante empregado. Ensaios de filtração em bancada foram realizados empregando sistemas granulares com granulometria menor que 0,3 mm (fração fina), entre 0,3 e 0,6 mm (fração média), maior que 0,6 mm (fração grossa) e para amostra global do sistema e três diferentes tipos de meio filtrante, disponibilizados pela *Clear Edge Filtration Group*, sendo eles o E3-0430 (tecido branco), E2-0200-C (tecido verde) e E3-0261 (tecido azul). Os parâmetros usuais como coeficientes de permeabilidade do meio filtrante, umidade residual e espessura da torta foram monitorados e quantificados. O coeficiente de permeabilidade calculado para o tecido branco foi de $6,91 \times 10^{-8} \text{cm}^2$, $8,27 \times 10^{-8} \text{cm}^2$ para o tecido verde e $6,94 \times 10^{-8} \text{cm}^2$ no filtro azul. De maneira geral os filtros apresentaram umidade residual médias entre 22%-24%, tendo variações significativas entre as faixas granulométricas utilizadas. A espessura média da torta fica em torno de 0,35cm nos testes realizados com polpa de 30% de sólidos e 0,96cm nos testes com polpa de 60% de sólidos. Nenhum dos filtros apresentou desempenho satisfatório para filtração da fração fina ou global. Além disso, observou-se que o filtro branco, obteve o melhor desempenho na filtração da fração média e grossa. O único fator que influencia a espessura final da torta é a porcentagem de sólidos da polpa.

Palavras-chave: Filtração. Granéis. Beneficiamento mineral.

ABSTRACT

Solid/liquid separation operations have been of great importance nowadays in the field of mineral processing, since efficient dewatering of granular systems may imply substantial technical, economical, and environmental advantages, both for the concentrates and the tailings. The present project is inserted in this context and aims to study the influence of both the particle size distribution at the filtration and the type of filter medium employed. Bench filtration tests were performed using granular systems with granulometry lower than 0.3mm (fine fraction), between 0.3 and 0.6mm (medium fraction), greater than 0.6 mm (coarse fraction) and also for the overall sample of the system and three different types of filter medium, available by The Clear Edge Filtration Group, being the E3-0430 (white fabric), E2-0200-C (green fabric) and E3-0261 (blue fabric). The filters presented average residual moisture between 22%-24%, with significant variations between the granulometric ranges used. The average thickness of the cake is approximately 0.35cm in the tests performed with pulp of 30% solids and 0.96cm in tests with pulp of 60% solids. None of the filters presented satisfactory performance for fine or global fraction filtration. In addition, it was observed that the white filter obtained the best performance in filtering the medium and coarse fraction. The only factor that influences the final thickness of the pie is the percentage of pulp solids.

Key-words: Filtration. Granular system. Mineral Processing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Princípio de filtração.....	14
Figura 2: Efeito da área superficial específica na taxa unitária de filtração e na umidade da torta.	17
Figura 3: Tensões básicas dos tecidos.....	19
Figura 4: Exemplo de elementos utilizados para cada tipo de filtro.....	20
Figura 5: Meios filtrantes utilizados nos testes: E3-0261 (azul), E3-0430 (branco) e E2-2000-C (verde).....	22
Figura 6: Tecido Azul (E3-0261) – Visão de frente.	23
Figura 7: Tecido Azul (E3-0261) – Visão verso.	23
Figura 8: Tecido Branco (E3-0430) - Visão Frente.	24
Figura 9: Tecido Branco (E3-0430) - Visão Verso.....	24
Figura 10: Tecido Verde (E2-0200-C) - Visão Frente.....	24
Figura 11: Tecido Verde (E2-0200-C) - Visão Verso.....	25
Figura 12: Processo de quarteamento realizado em laboratório.....	26
Figura 14: Sistema de Kitasato e bomba acoplado a montagem da peneira e fundo.....	28
Figura 15: Testes de folha realizados no laboratório.	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Variáveis que afetam a velocidade de filtração relativas ao sólido, torta/filtrado, polpa e o tipo de equipamento	17
Tabela 2: As propriedades físicas das fibras dos tecidos filtrantes	21
Tabela 3: Peneiramento granulométrico realizado em laboratório.....	26
Tabela 4: Dimensões da Peneira e Pressão calculada.	30
Tabela 5: Medidas de vazão obtidas com e sem a bomba.....	30
Tabela 6: Valores de permeabilidade calculados para cada meio filtrante.	31

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA	12
3	OBJETIVOS	13
3.1	Objetivo Geral	13
3.2	Objetivos Específicos	13
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
4.1	O processo de filtração	14
4.1.1	Os mecanismos de filtração	15
4.1.2	Fatores que influenciam a Filtrabilidade	15
4.1.3	Os elementos filtrantes	18
5	MATERIAIS E MÉTODOS	21
5.1	Meios Filtrantes Utilizados	22
5.1.1	Tecido Azul (E3-0261)	22
5.1.2	Tecido Branco (E3-0430)	23
5.1.3	Tecido Verde (E2-0200-C)	24
5.2	Preparação da amostra	25
5.3	Determinação da pressão e vazão utilizadas na filtração	27
5.4	Determinação do coeficiente de permeabilidade (k) de cada tecido	28
5.5	Teste de filtrabilidade	28
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
6.1	Determinação da pressão e vazão utilizadas na filtração	30
6.2	Determinação do coeficiente de permeabilidade (k) de cada tecido	31
6.3	Teste de filtrabilidade	31
6.4	Fatores que influenciam a umidade final da torta	33
6.5	Fatores que influenciam a espessura da torta	35
7	CONCLUSÕES	37
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38

1 INTRODUÇÃO

No processamento mineral a etapa de separação sólido/líquido ganha notório destaque atualmente, dada a crescente importância de um desaguamento eficiente para o bom funcionamento das atividades da indústria mineral. A filtração de sistemas granulares pode acarretar vantagens técnicas, como o aumento da vida útil de barragem de rejeitos, disposição de rejeitos em pilhas, entre outras. Tais vantagens apresentam ainda oportunidades de ganhos econômicos, e ambientais, que endossam a importância desse processo. (SOUZA, 2020)

Aplicar esforços para melhorar cada vez mais a eficiência operacional da filtração, otimizando o processo é pauta relevante no que tange a indústria mineral da atualidade.

O presente projeto se insere nesse contexto e objetiva estudar a influência tanto da distribuição granulométrica na filtração, quanto o tipo de meio filtrante empregado. Para isso, visa realizar ensaios de filtração em bancada utilizando-se de sistemas granulares com distribuições granulométricas controladas em três diferentes tipos de meio filtrante disponíveis comercialmente no Brasil. (SOUZA, 2020)

A partir dos resultados obtidos nos testes, existe a expectativa de conseguir algumas correlações entre parâmetros granulométricos dos granéis estudados e sua filtrabilidade, bem como correlacionar a curva granulométrica com resultados como umidade residual e espessura da torta.

2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

O setor mineral, tem evoluído bastante nos últimos anos, desenvolvendo tecnologias cada vez mais eficazes de concentração de processos de tratamento de minério cada vez mais robustos, que viabilizam o aproveitamento cada vez mais otimizado dos recursos minerais. Quando se trata de processos de tratamento de minério as operações de separação sólido/líquido têm ganhado cada vez mais notoriedade: desaguamento eficiente de sistemas granulares pode implicar substanciais vantagens técnicas, econômicas, e ambientais, seja no que concerne aos concentrados, seja aos rejeitos. (SOUZA, 2020)

Com os recentes rompimentos de barragens ocorridos nos anos de 2015 e 2019, cada vez mais é importante desenvolver métodos eficazes de secagem de materiais de rejeito, para que estes tenham uma destinação segura.

Desta maneira, avaliar as melhores condições e opções de materiais filtrantes torna-se pauta significativa para a continuidade do desenvolvimento da indústria mineral e siderúrgica.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência da distribuição granulométrica e do meio filtrante na filtração.

3.2 Objetivos Específicos

- Realizar ensaios de filtração em bancada utilizando três granulometrias (inferior a 0,3 mm, entre 0,3 e 0,6 mm e acima de 0,6 mm) três diferentes tipos de meio filtrante, disponibilizados pela *Clear Edge Filtration Group*, sendo eles o E3-0430 (tecido branco), E2-0200-C (tecido verde) e E3-0261 (tecido azul).
- Avaliar condições ideais dos parâmetros usuais como espessura e umidade residual da torta;
- Avaliar possíveis correlações entre os parâmetros granulométricos dos grânulos estudados e os meios filtrantes empregados.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 O processo de filtração

O processo de filtração se caracteriza pela separação dos sólidos em suspensão em um determinado líquido. Este líquido é transferido por um meio poroso que retém os sólidos, impedindo sua passagem e os separando da fase líquida (SOUZA, 2020). A Figura 1 apresenta uma ilustração sobre este processo.

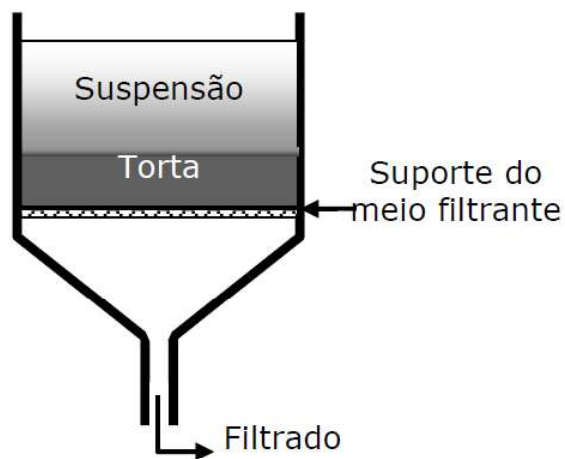


Figura 1: Princípio de filtração
Fonte: Souza (2020)

O líquido que perpassa pelo meio poroso é denominado filtrado, ao passo que a fase sólida retida neste meio é chamada de torta. A polpa em suspensão é pressionada ou succionada escoando o líquido através de um elemento filtrante, por exemplo, um tecido, empregado para reter a fase sólida. (LUZ; OLIVEIRA, 2016).

A posição de entrada da polpa e o meio filtrante empregado são pontos importantes na composição do projeto operacional dos equipamentos de filtração. Além disto, é necessário avaliar as condições de disposição do processo de beneficiamento como um todo, a destinação do líquido filtrado e a retirada da torta formada posteriormente ao processo de filtração. Para a remoção da torta, frequentemente são utilizados dispositivos auxiliares, porém em caso de entupimento do elemento filtrante, utiliza-se a sopragem como processo adicional. (LUZ, SAMPAIO E FRANÇA, 2010).

Segundo Luz e Oliveira (2016), k e c são parâmetros que dependem apenas de fatores estruturais da matriz porosa, quando não ocorre interações físico-químicas entre meio filtrante e fluido.

Segundo Chaves (2010), considera-se que:

- O filtrado escoar através de dois meios porosos em série: a torta e o meio filtrante;
- Durante o transcorrer da operação há o crescimento contínuo da torta em decorrência do aporte de suspensão;
- As propriedades da torta são dependentes do tempo de filtração e da posição em relação ao meio filtrante.

4.1.1 Os mecanismos de filtração

Segundo Luz e Oliveira (2016), quando a filtração é realizada com a aplicação de forças externas o processo se distingue por:

- Filtração à vácuo: utiliza uma pressão negativa exercida abaixo do meio filtrante;
- Filtração sob pressão: utiliza uma pressão positiva do lado da torta;
- Filtração centrífuga: utiliza a força centrífuga para forçar a passagem do líquido;
- Filtração hiperbárica: utiliza, combinadamente, pressão e vácuo;
- Filtração capilar: utiliza a ação dos capilares dos meios cerâmicos porosos.

4.1.2 Fatores que influenciam a Filtrabilidade

Para Souza (2020), a teoria clássica de filtração considera como ponto de partida o fluxo de líquido através de um meio poroso (torta) não compressível, descrito por uma relação empírica conhecida como Lei de Darcy, apresentada na equação 2:

$$Q = \frac{K \cdot \Delta P \cdot A}{\mu \cdot L} = \frac{\Delta P \cdot A}{\mu \cdot R}$$

Equação 2

Onde,

Q = fluxo do filtrado [m^3/s];

K = permeabilidade do leito [m^2];

P = diferencial de pressão através da torta e do meio filtrante [Pa];

A = área transversal ao fluxo (área filtrante) [m^2]

μ = viscosidade do filtrado [Pa.s];

L = espessura do meio filtrante + torta [m^2];

$R = L / K$ = resistência oferecida ao leito de filtrado [m^{-1}];

A equação 02 demonstra que a velocidade de filtração, definida como o volume de filtrado que atravessa o elemento filtrante por unidade de tempo, é diretamente proporcional à área de filtração, à permeabilidade do leito e ao diferencial de pressão e inversamente proporcional à espessura da torta e à viscosidade do filtrado, entre outros parâmetros (SOUZA, 2020).

A equação de Kozeny-Carman estabeleceu, para escoamento laminar e torta não compressível, a relação da permeabilidade do leito (meio filtrante e torta) com a superfície específica das partículas minerais e a porosidade da torta. (CHAVES, 2010). Esta relação é mostrada na Equação 3:

$$K = \frac{\rho_s \varepsilon^3}{K_c (1-\varepsilon)^2 S E^2}$$

Equação 3

K = coeficiente de filtração (permeabilidade do leito) [m^2];

ρ_s = massa específica dos sólidos [kg/m^3];

ε = índice de vazios no leito [-];

K_c = constante de Kozeny que depende da granulometria, forma e porosidade [-];

SE = área superficial específica [m^{-1}];

A equação 3 mostra que o fluxo de filtrado diminui com o aumento da superfície específica, ou seja, polpas contendo partículas muito finas dificultam a filtração. Por outro lado, o desaguamento é bastante favorecido com o aumento da porosidade do leito.

Ainda segundo Chaves (2010), a equação 3 permite concluir que o aumento da superfície específica da partícula faz com que o coeficiente de permeabilidade diminua, dificultando a operação de filtração, logo, as polpas que apresentam porcentagem elevada de partículas finas oferecem maior dificuldade para serem filtradas.

Tal evento pode ser verificado no estudo realizado por Araújo Jr. (2014), no qual o autor estuda as variáveis de processo que influenciam na filtração cerâmica de polpas de minério de ferro. De acordo com a Figura 2, é notável a influência da superfície específica na permeabilidade, demonstrada pelo resultado dos testes de filtração.

Observa-se que a redução da área superficial específica promove aumento relevante no valor da taxa unitária de filtração, o que é perfeitamente justificável, devido ao aumento da permeabilidade da torta ser inversamente proporcional ao quadrado da área superficial específica, conforme previsto pela equação de Kozeny-Carman. Nota-se ainda que há a redução do teor de umidade da torta em consequência da redução da área superficial específica.

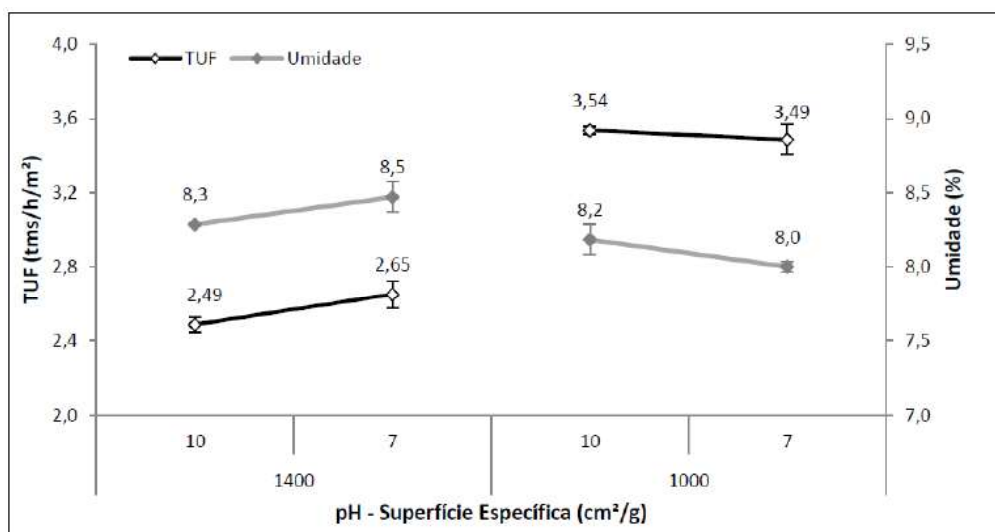


Figura 2: Efeito da área superficial específica na taxa unitária de filtragem e na umidade da torta.

Fonte: Araújo Jr. 2014

Ainda em Araújo Jr. (2014), pode-se verificar pelas equações 02 e 03 que muitas são as variáveis que afetam o desempenho de um processo de filtragem de polpas de minérios. Estas variáveis, entre outras, foram agrupadas em quatro grandes categorias (relacionadas aos sólidos, à torta/filtrado, à polpa e ao equipamento) e apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Variáveis que afetam a velocidade de filtragem relativas ao sólido, torta/filtrado, polpa e o tipo de equipamento

Sólido	Torta/filtrado	Polpa	Equipamento
- área superficial específica	- espessura da torta	- taxa de alimentação	- ciclo
- distribuição granulométrica	- porosidade do leito	- porcentagem de sólidos	- nível de vácuo e/ou sopro e/ou pressão
- forma geométrica	- permeabilidade do leito	- temperatura	- meio filtrante
- propriedades de superfície	- viscosidade do filtrado	- viscosidade	- geometria dos componentes
- massa específica		- pH	- nível de agitação
		- adição de reagentes auxiliares	
		- presença de sais dissolvidos.	

Fonte: Araújo Jr., 2014.

Dentre as variáveis apresentadas no quadro acima, pode-se destacar:

- a taxa de filtração cresce com a redução do ciclo de filtração, porém pode acarretar o aumento da umidade da torta, ou a obtenção de tortas extremamente finas, que poderão prejudicar a descarga;
- o aumento da temperatura da polpa favorece a filtração uma vez que ocorre uma redução da viscosidade do filtrado. Porém essa operação (através da aplicação de vapor superaquecido) é excessivamente dispendiosa e assim não é usual em operações industriais;
- polpas com concentração de sólidos mais elevada favorecem a filtração. A maioria dos filtros requer uma concentração de sólidos mínima na sua alimentação para garantir o seu desempenho (principalmente os filtros que operam a vácuo). Por isto é usual o adensamento da polpa por espessadores, ciclones ou outro equipamento antes da filtração;
- partículas de distribuição granulométrica grossa formam tortas com interstícios maiores. Dessa forma, o líquido atravessa com maior facilidade o meio filtrante aumentando a velocidade de filtração e reduzindo a umidade da torta;
- o valor de pH da polpa está relacionado ao estado de dispersão das partículas; maior dispersão, menor fluxo de filtrado e maior umidade da torta;
- os reagentes auxiliares de filtração são utilizados para reduzir a tensão superficial do líquido auxiliando na passagem do fluxo.
- as lamas apresentam um efeito negativo na filtração uma vez que elas tendem a “cegar” o meio filtrante. Desta forma, com o objetivo de reduzir o efeito das lamas e aumentar a taxa de filtração, algumas vezes são adicionados floculantes nos tanques.

4.1.3 Os elementos filtrantes

A escolha do meio filtrante é de suma importância para o processo de filtração, ponderando múltiplos fatores, notadamente as análises e os testes preliminares. As características precípuas para a escolha do elemento filtrante são, a boa permeabilidade, alta resistência mecânica, boa capacidade de reter os sólidos presentes na suspensão, oferecendo menor resistência ao fluxo do filtrado, e relativamente livre de entupimentos ou efeito cego (LUZ; OLIVEIRA, 2016).

Nota-se que a funcionalidade do filtro está diretamente ligada à sua atuação como base para a torta, à medida em que as camadas iniciais desta são formadas.

Os elementos filtrantes podem ser fabricados a partir de vários materiais, tais como algodão, borracha porosa, carbono poroso, fibra de vidro, juta, lã, linho, metais, nylon, seda, dentre outros materiais sintéticos. A forma pela qual as fibras dos elementos filtrantes são tecidas também influencia na sua escolha (CHAVES, 2010).

De acordo com a Figura 3, diferentes tessituras associadas aos tipos específicos de filtros elencados no capítulo anterior explicam a escolha mais adequada do elemento filtrante, conforme a especificação de cada fabricante, a fim de assegurar o funcionamento eficiente de cada filtro, (CHAVES, 2010).

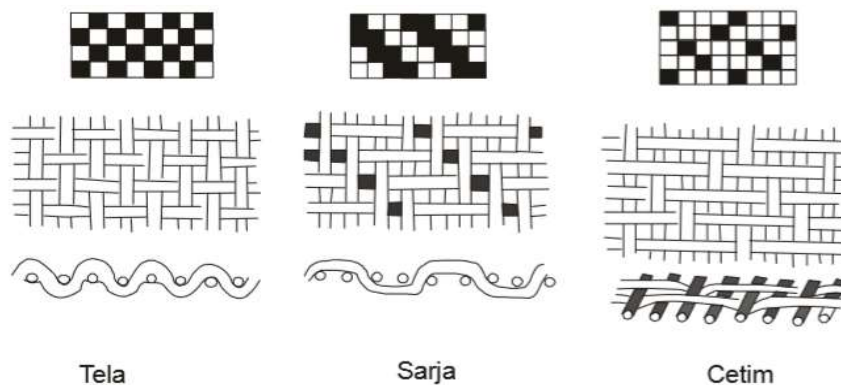


Figura 3: Tessituras básicas dos tecidos.

Fonte: Chaves, 2010.

De acordo com a Figura 4, tem-se exemplos de elementos filtrantes utilizados com diferentes tipos de tessituras, adequados para cada tipo de filtro descrito (SEFAR, 2019).

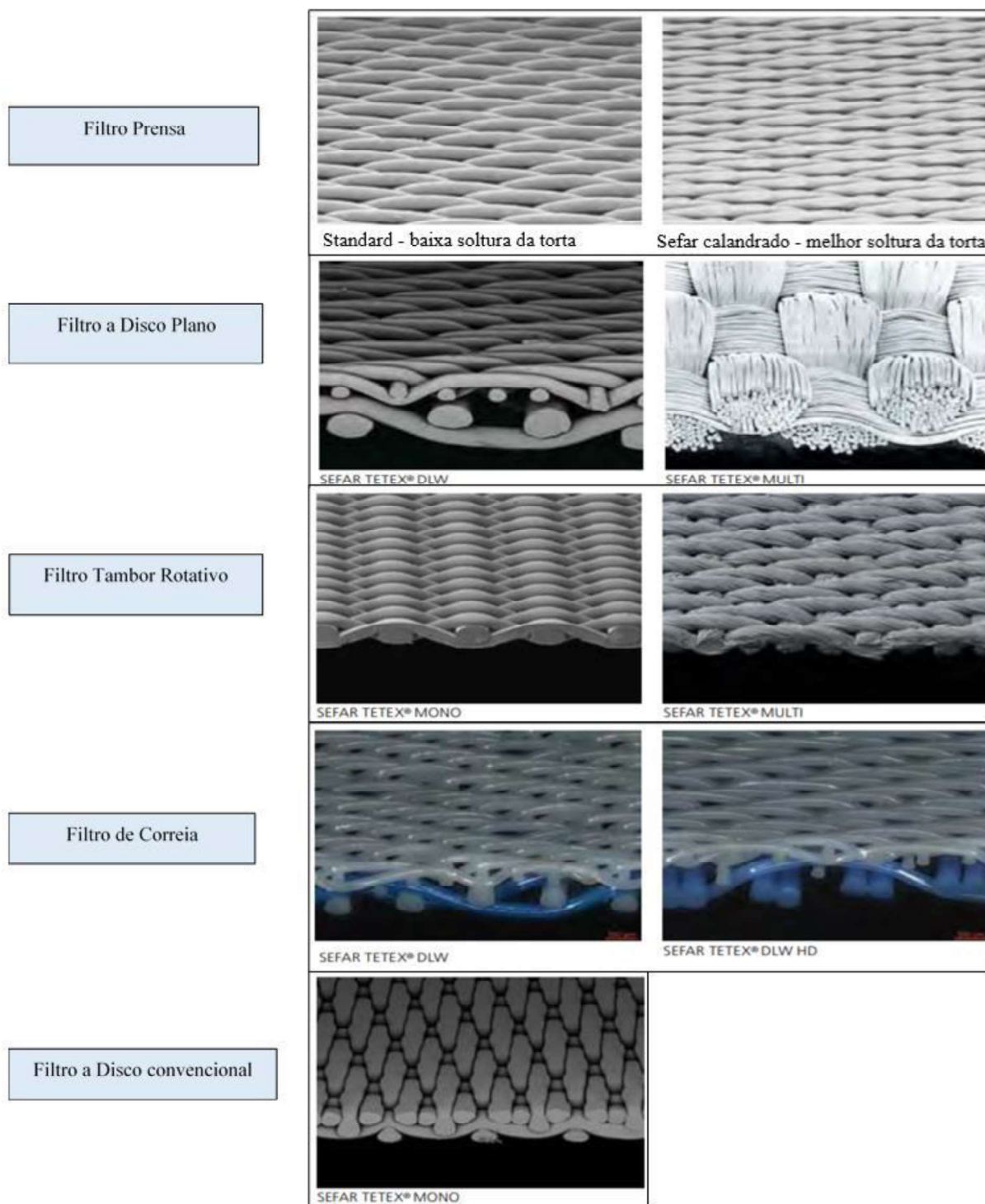


Figura 4: Exemplo de elementos utilizados para cada tipo de filtro.
Fonte: Sefar, 2019.

Conforme Tabela 2, seguem as composições químicas e físicas das fibras comumente utilizadas (CHAVES, 2010).

Tabela 2: As propriedades físicas das fibras dos tecidos filtrantes

	Temperatura Máxima de operação segura °C	Densidade g/cm³	Absorção de água (%)
Acetato	210	1,30	9-14
Acrílico	275-300	1,14-1,17	3-5
Algodão	200	1,55	16-22
Fluorocarbono	400	2,3	-
Vidro	550-600	2,50-2,55	Até 0,3
Modacrylic	160-180	1,31	0,04-4
Nomex	400-450	1,38	-
Nylon	225-250	1,14	6,5-8,3
Poliéster	300	1,38	0,04-0,08
Alta densidade	150-165	0,95	0,01
Baixa densid.	200-230	0,92	0,01
Polipropileno	250	0,91	0,01-0,1
PVC	151-160	1,30	
Rayon	2010	1,50-1,54	20-27
Saran	160-180	1,7	0,1-1,0
Lã	180-200	1,3	16-18

	Tenacidade a seco (g/den)	Alongamento na ruptura	Resistência ao Desgaste
Acetato	0,8-12	30-50	Pobre
Acrílico	1,8-3	25-70	Boa
Algodão	3,3-6,4	5-10	Razoável
Fluorocarbono	1-2	13-27	Razoável
Vidro	3-6	2-5	Pobre
Modacrylic	2-4	14-34	Razoável
Nomex	4,1	14	Excelente
Nylon	3-8	30-70	Excelente
Poliéster	3-8	10-50	Excelente
Alta densidade	1-3	20-80	Boa
Baixa densid.	3,5-7	10-45	Boa
Polipropileno	4-8	15-35	Boa
PVC	1-3		Razoável
Rayon	0,7-4	6-40	Pobre
Saran	1,2-2,3	15-30	Razoável
Lã	0,76-1,6	25-35	Razoável

Fonte: Chaves, 2010 – adaptado.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho se baseia em realizar ensaios de filtragem de bancada em granéis, em diferentes meios filtrantes. Para isso, primeiramente foram selecionados 3 meios filtrantes, dentre os comercialmente mais populares no Brasil, de acordo com a disponibilidade no laboratório de tratamento de minérios do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da UFOP.

Para cada um dos meios filtrantes escolhidos foram realizados ensaios com granéis de granulometria conhecida e devidamente controlada. Para garantir a granulometria, as amostras foram submetidas à classificação granulométrica por peneiramento a seco, antes dos ensaios de Filtrabilidade.

Para garantir condições adequadas aos ensaios foram monitorados os parâmetros usuais de filtragem. A umidade residual da torta e a espessura da mesma foram quantificados em cada um dos ensaios, sendo o principal indicador do desempenho da filtragem.

5.1 Meios Filtrantes Utilizados

Para a realização do teste foram selecionados 3 meios filtrantes, cedidos pela empresa *Clear-Edge* ao laboratório de tratamento de minérios do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da UFOP. Os tecidos em questão são identificados como E3-0261, E3-0430 e E2-0200-C. Para facilitar a identificação dos mesmos, ao longo deste trabalho utilizou-se chamar o tecido pela cor, como indicado na Figura 1. Figura 5: Meios filtrantes utilizados nos testes: E3-0261 (azul), E3-0430 (branco) e E2-2000-C (verde).



Figura 5: Meios filtrantes utilizados nos testes: E3-0261 (azul), E3-0430 (branco) e E2-2000-C (verde).

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

5.1.1 Tecido Azul (E3-0261)

O primeiro tecido aplicado é da cor azul. O tecido é aparentemente feito de material plástico. A Figura 6 e a Figura 7, mostram, através da escala de papel milimetrado que a abertura do tecido é inferior a 1mm.

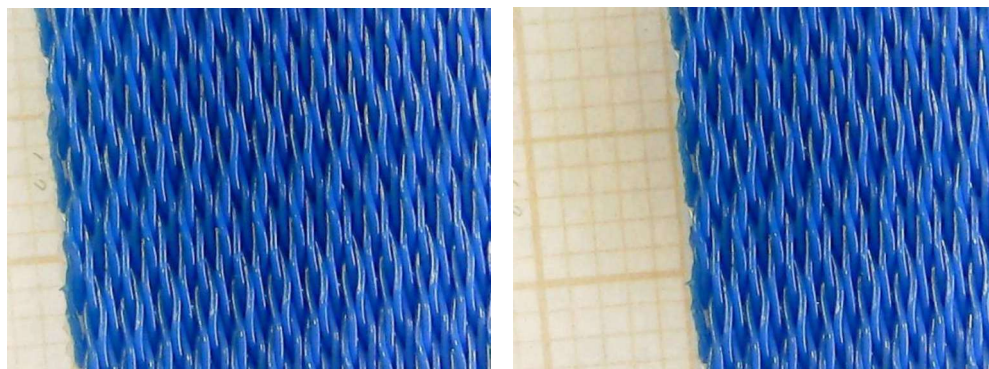


Figura 6: Tecido Azul (E3-0261) – Visão de frente.
Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

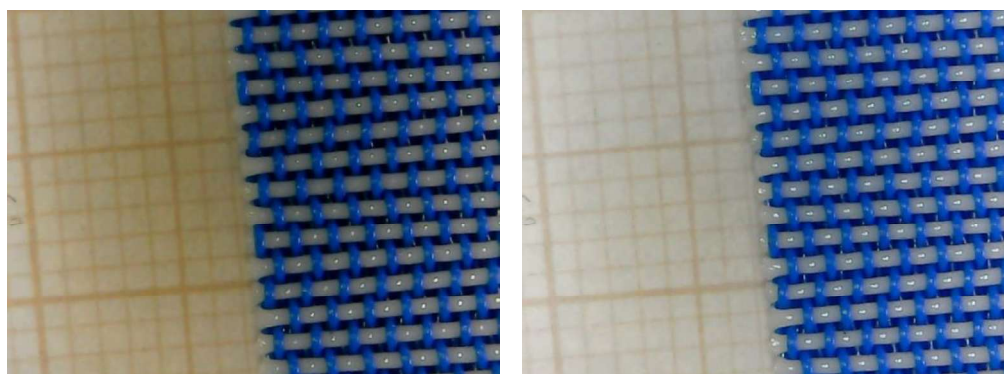


Figura 7: Tecido Azul (E3-0261) – Visão verso.
Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

5.1.2 *Tecido Branco (E3-0430)*

O segundo tecido aplicado é da cor branca. O tecido é aparentemente feito de material plástico. A Figura 8 e a Figura 9, mostram, através da escala de papel milimetrado que a abertura do tecido é inferior a 1mm.

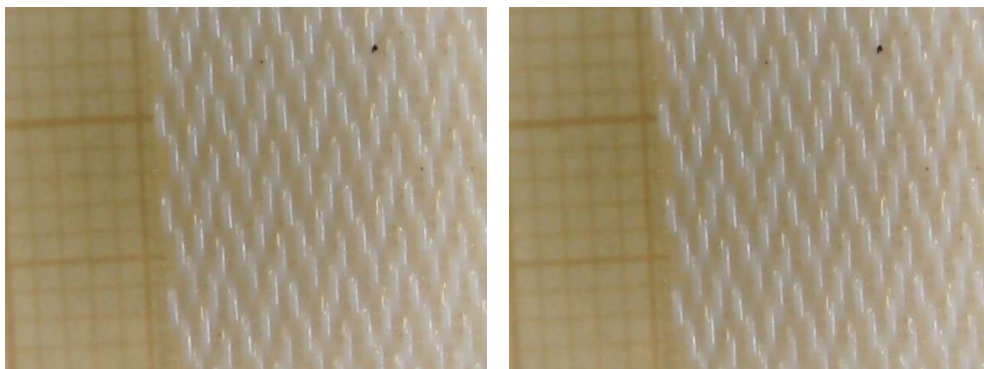


Figura 8: Tecido Branco (E3-0430) - Visão Frente.
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

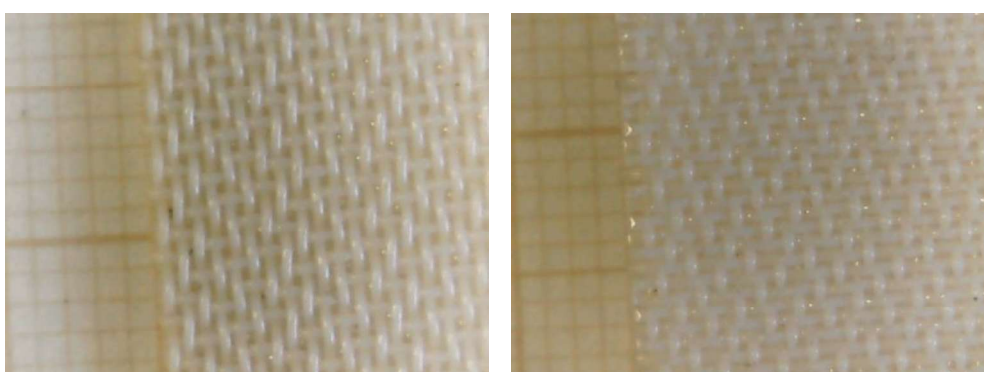


Figura 9: Tecido Branco (E3-0430) - Visão Verso.
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

5.1.3 *Tecido Verde (E2-0200-C)*

O último tecido aplicado é o da cor verde. O tecido é aparentemente feito de material plástico. A Figura 10 e a Figura 11, mostram, através da escala de papel milimetrado que a abertura do tecido é inferior a 1mm.

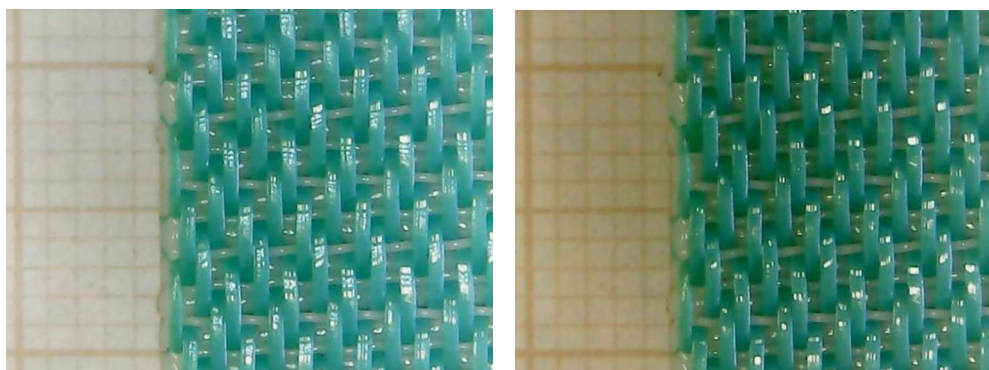


Figura 10: Tecido Verde (E2-0200-C) - Visão Frente.
Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

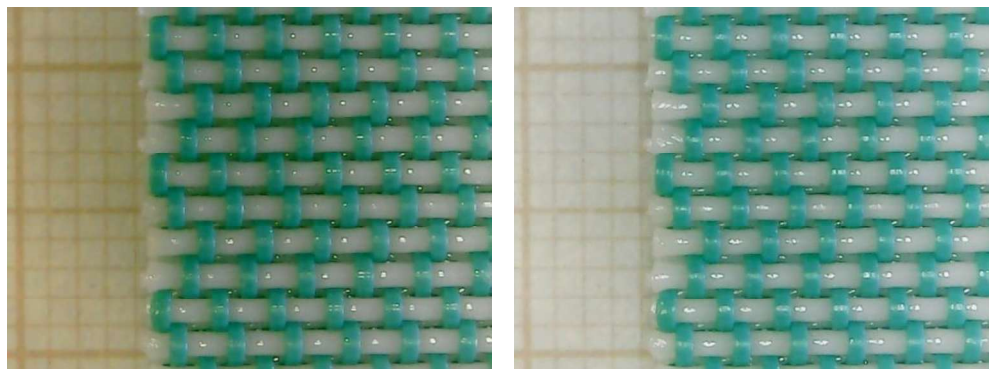


Figura 11: Tecido Verde (E2-0200-C) - Visão Verso.
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

5.2 Preparação da amostra

Para a realização do teste em questão utilizou-se amostra de quartzo, com aproximadamente 45,6kg, disponibilizada pelo laboratório de tratamento de minérios do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da UFOP.

Amostra então passou por um processo de homogeneização e quarteamento via pilha cônica até que a massa quarteada fosse suficiente para realizar sua classificação granulométrica (Figura 12).

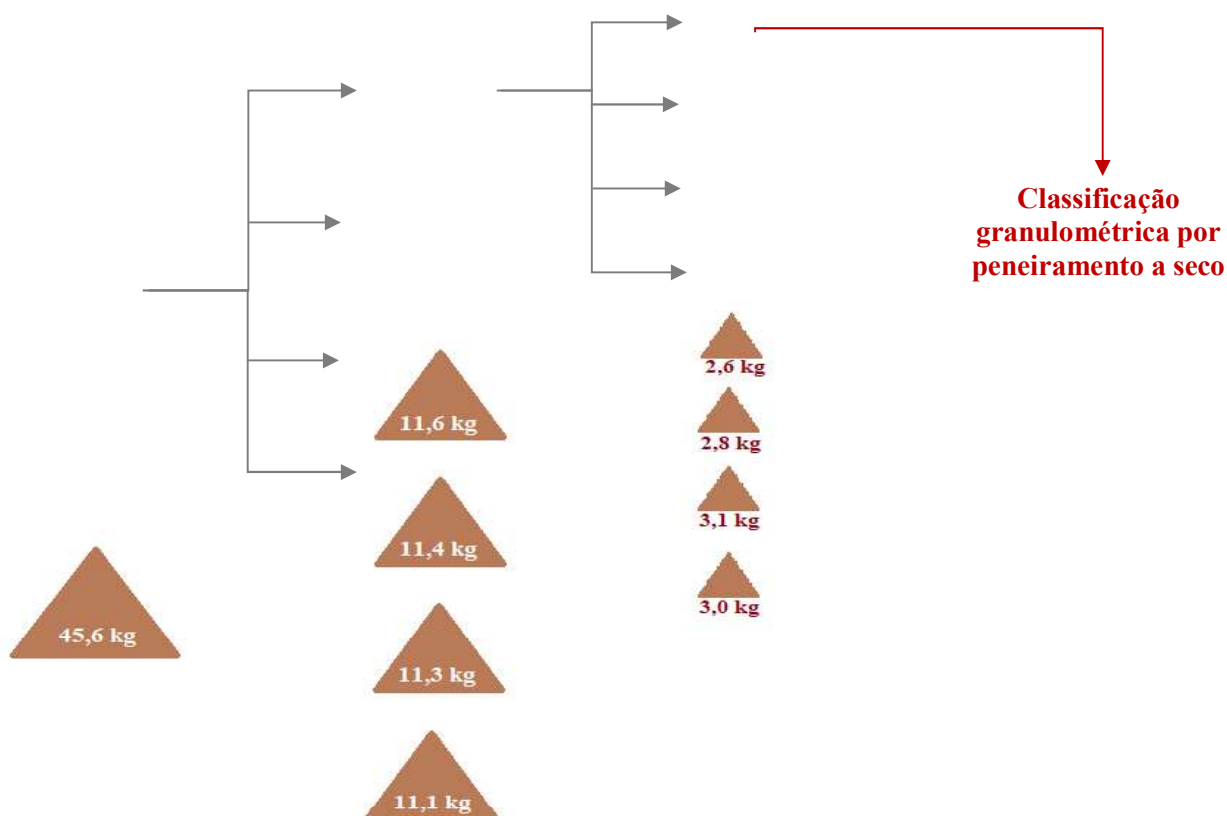


Figura 12: Processo de quarteamento realizado em laboratório.
Fonte: Elaborado pelo autor.

A amostra quarteada foi encaminhada para o peneiramento a seco em peneira vibratória, durante 40 minutos, utilizando as peneiras de 2,36 a 0,106 mm (Tabela 3 e Figura 13).

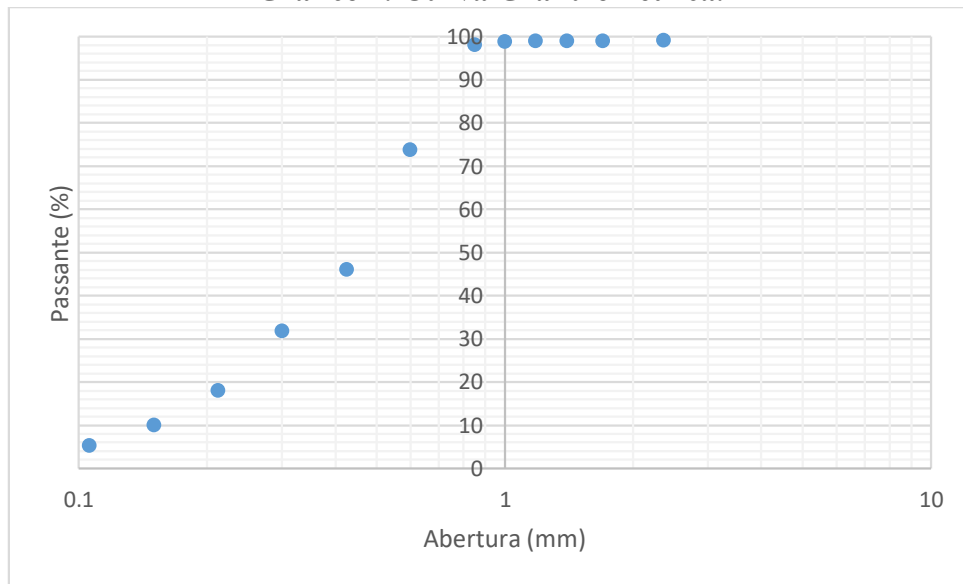
Tabela 3: Peneiramento granulométrico realizado em laboratório.

Abertura (mm)	Retido		Passante acumulado (%)
	Simples (%)	Acumulado (%)	
2,36	0,91	0,91	99,09
1,7	0,07	0,98	99,02
1,4	0,05	1,03	98,97
1,18	0,05	1,08	98,92
1	0,18	1,26	98,74
0,85	0,66	1,92	98,08
0,6	24,39	26,31	73,69
0,425	27,67	53,98	46,02
0,3	14,24	68,22	31,78
0,212	13,77	81,99	18,01
0,15	7,94	89,93	10,07
0,106	4,77	94,7	5,3
-0,106	5,29	100	

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Com base nos resultados do peneiramento, foi construída a curva granulométrica do material. A partir da curva, o material foi particionado em 3 frações granulométricas principais: Fina ($<0,3\text{mm}$), Média ($0,3\text{-}0,6\text{mm}$) e Grossa ($>0,6\text{mm}$), conforme mostrado no **Error! Reference source not found.**

Gráfico 1: Curva Granulométrica.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Conforme planejado, realizou-se os testes em cada um dos meios filtrantes, para cada granulometria (fina, média, grossa) e também com amostra global.

5.3 Determinação da pressão e vazão utilizadas na filtragem

A pressão e a vazão empregadas, foram variáveis fixas ao longo dos testes de filtragem realizados. Para a determinação dos valores das mesmas, realizou-se uma medição em laboratório, segundo o seguinte procedimento:

1. Utilizou-se uma peneira de 400#, acoplada ao fundo de peneiramento a úmido.
2. Foi realizada uma vedação no contato entre a peneira e o fundo acoplado para que se fosse possível produzir vácuo. Essa montagem foi acoplada ao sistema de kitasato e bomba, conforme mostrado na Figura 13.

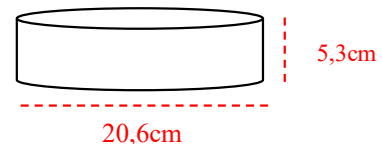


Figura 13: Sistema de Kitasato e bomba acoplado a montagem da peneira e fundo.
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

3. Calculou-se o volume da peneira baseado em suas dimensões.

$$V = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 * h$$

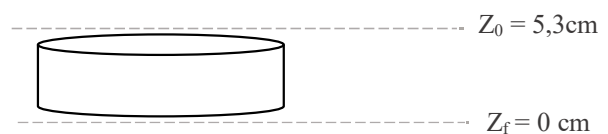
$$V = 1,766 \text{ cm}^3$$



4. De posse do volume da peneira, adicionou-se água no topo do experimento e marcou-se o tempo necessário para que todo volume de água passasse pela abertura da peneira.
5. Realizou-se oito testes, quatro com a utilização da bomba de vácuo e quatro sem a utilização da bomba, com isso foi possível obter a vazão com e sem a utilização da bomba.

6. A pressão da bomba foi calculada através da fórmula:

$$P = \rho_{fg} (z_0 - z_f) * g$$



5.4 Determinação do coeficiente de permeabilidade (k) de cada tecido

O coeficiente de permeabilidade (k) é uma propriedade do meio filtrante, sendo assim foi necessário calcular este parâmetro para cada um dos tecidos utilizados.

De posse dos valores de pressão calculados no item 5.3 e da área do meio filtrante, foi calculado o valor da constante k, utilizando a Equação 2.

5.5 Teste de filtrabilidade

Para iniciar os testes, uma alíquota da amostra foi separada em quatro frações granulométricas distintas, sendo as 3 frações apresentadas no **Error! Reference source not found.**, e uma quarta amostra com granulometria global.

Para cada uma das 4 frações granulométricas escolhidas, foram preparadas 2 polpas, com 30% e 60% de sólidos respectivamente.

O teste foi realizado em duplicata para cada um dos meios filtrantes citados (azul, branco e verde), para cada uma das frações granulométricas escolhidas (fina, média, grossa e global), com cada uma das polpas preparadas (30% e 60% de sólidos).

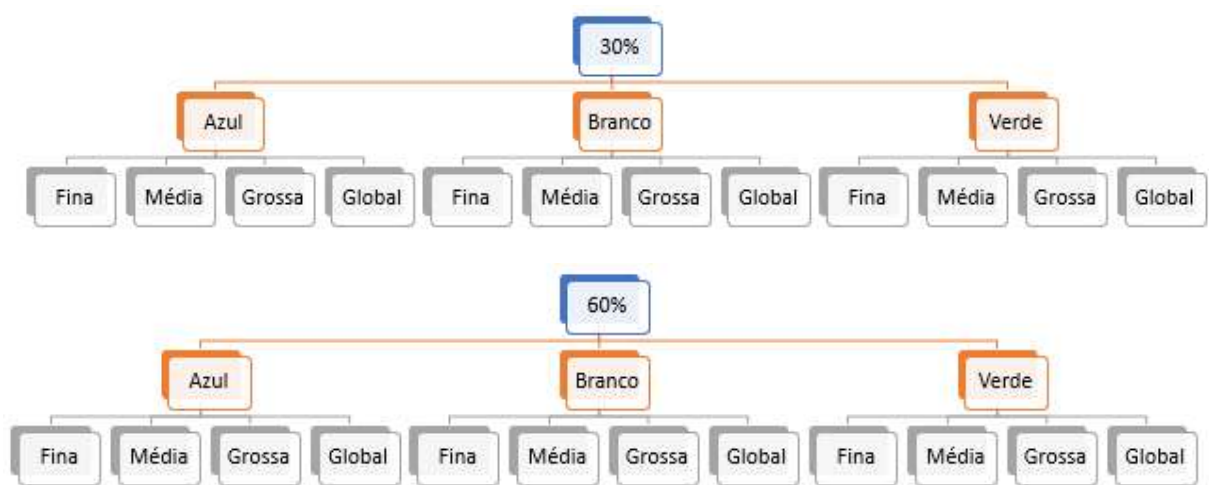


Figura 14: Testes de folha realizados no laboratório.

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Todos os testes foram realizados como ensaios tipo teste de folha, após a homogeneização da polpa, colocou-se o tecido desejado no “*leaf*” e depois ligou-se a bomba de vácuo.

Em seguida, o “*leaf*” foi alimentado com a polpa e ao mesmo tempo acionou-se o cronômetro para marcação do tempo de ensaio e do tempo de secagem (1 minuto).

Após a secagem fez-se a medição da espessura da torta em cinco pontos, considerando-se a média das medidas realizadas. Também foi feita a pesagem da torta para determinação da umidade.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Determinação da pressão e vazão utilizadas na filtração

Os valores de dimensão da peneira e cálculo de pressão obtidos são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4: Dimensões da Peneira e Pressão calculada.

Dimensões Peneira e Pressão		
Diâmetro	20.6	cm
Altura	5.3	cm
Volume	0.001766	m ³
ρ_f	1000	kg/m ³
Z ₀	5.3	cm
z _f	0	cm
g	9.81	m/s ²
P	259.965	Kg/m.s ² (Pa)

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Os valores de vazão obtidos com e sem a bomba estão mostrados na Tabela 5.

Tabela 5: Medidas de vazão obtidas com e sem a bomba.

Tempo (s)	Vazão (m ³ /s)
-----------	---------------------------

Com Bomba	Sem bomba	Com Bomba	Sem bomba
17.06	86.62	0.0001035	0.0000204
16.81	67.22	0.0001051	0.0000263
17.24	82.5	0.0001025	0.0000214
16.59	87.72	0.0001065	0.0000201
Vazão média (m³/s)		0.0001044	0.0000221

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

6.2 Determinação do coeficiente de permeabilidade (k) de cada tecido

O coeficiente de permeabilidade de cada tecido filtrante foi calculado conforme os valores apresentados na Tabela 56.

Tabela 6: Valores de permeabilidade calculados para cada meio filtrante.

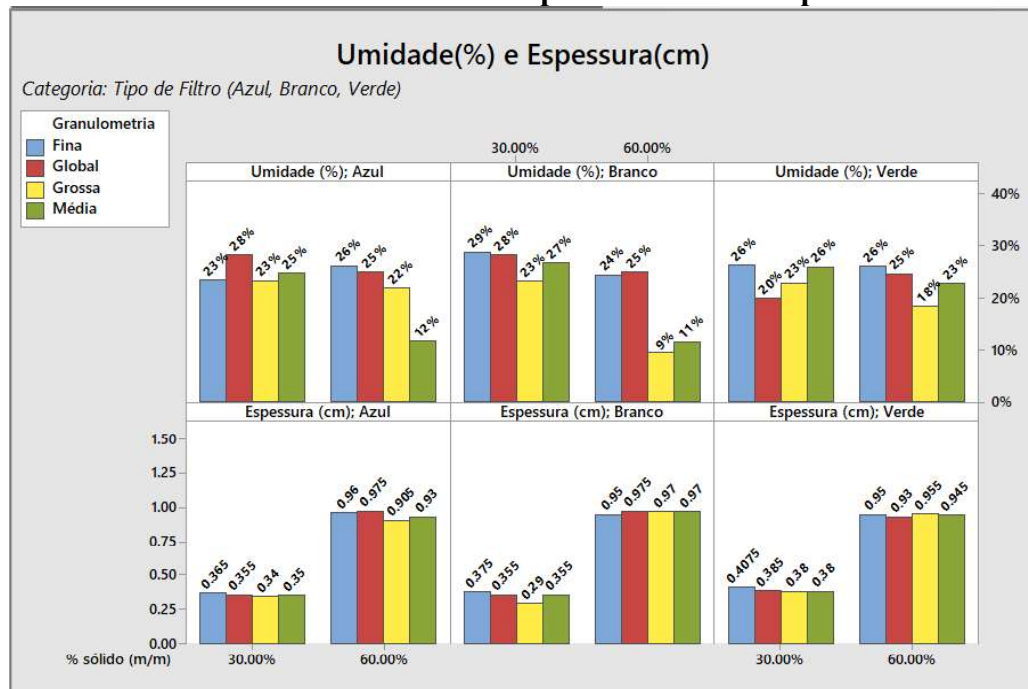
Tecido	Tempo (s)	Vazão (m³/s)		K (cm²)
Branco	22.12	0.0000254		
	20.81	0.0000270		
	20.56	0.0000274		
	Vazão média (m³/s)	0.0000266	K (médio)	6.914E-08
Verde	17.19	0.0000327		
	18.41	0.0000305		
	17.42	0.0000323		
	Vazão média (m³/s)	0.0000318	K (médio)	8.27814E-08
Azul	20.94	0.0000269		
	21.37	0.0000263		
	20.84	0.0000270		
	Vazão média (m³/s)	0.0000267	K (médio)	6.94493E-08

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

6.3 Teste de filtrabilidade

De posse dos resultados dos testes, foram plotados alguns gráficos no *Minitab* a fim de avaliar o desempenho de cada tecido no processo de filtração. Utilizando a umidade e a espessura da torta como parâmetros de desempenho, utilizou-se o **Error! Reference source not found.** para as primeiras análises.

Gráfico 2: Gráfico de médias para Umidade e Espessura



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Como base no **Error! Reference source not found.**, observa-se que a polpa com 60% de sólidos em geral, apresenta menores valores de umidade final da torta. Os menores valores de umidade são encontrados para o tecido branco, que apresenta um bom desempenho para a filtragem das frações Grossa e Média, porém fração Fina apresenta um aumento significativo de umidade, que também é observado na amostra global, tendo valores umidade de, aproximadamente, 24%. Tal observação é explicada através da equação de Kozeny-Carman (equação 3), onde fica evidente que o fluxo do filtrado diminui conforme o aumento da superfície específica, sendo assim, polpas com partículas muito finas dificultam a filtragem. De maneira geral, nenhum dos tecidos apresentou um bom desempenho na filtragem da fração Fina, impactado também na amostra global, apresentado valores de umidade superiores a 20%. Nenhum dos tecidos apresentou bom desempenho na filtragem de polpa com 30% de sólidos. Em termos de média, o tecido verde não obteve bom desempenho para nenhuma das faixas granulométricas, em ambas as porcentagens de sólidos testadas, tendo todos os resultados com umidade acima de 18%.

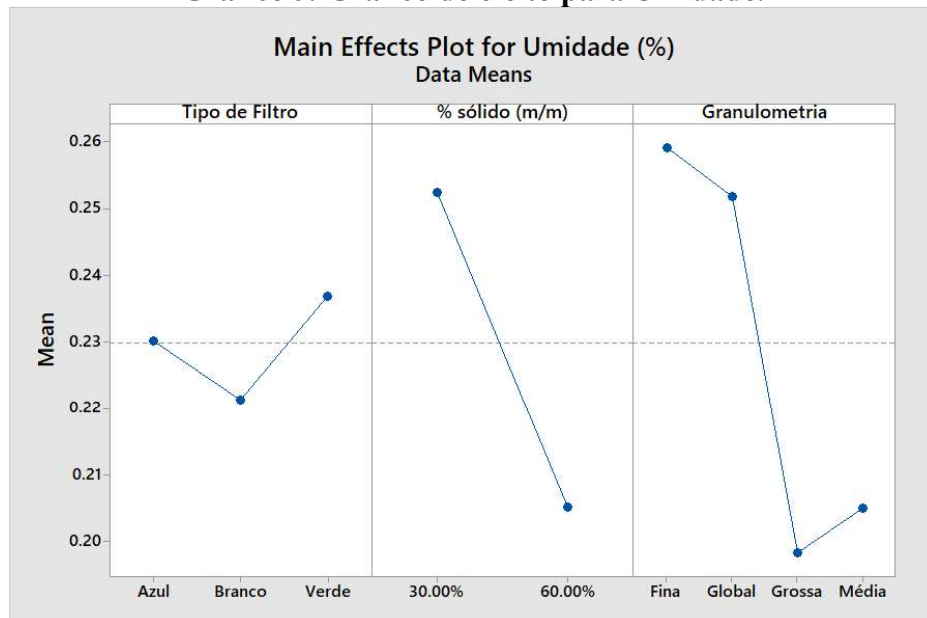
O tecido azul apresenta bom desempenho apenas na filtragem com 60% de sólidos para granulometria média, não apresentando variações significativas entre as demais faixas granulométricas.

No que tange a espessura da torta, ela apresenta significativa entre as polpas com 30% e 60% de sólidos, o que era esperado, uma vez que, não havendo perda significativa de material, haverá maior massa na polpa de 60%.

6.4 Fatores que influenciam a umidade final da torta

A fim de detalhar melhor a influência de cada um dos fatores (tipo de tecido, % de sólidos, e granulometria) na umidade final da torta utilizou-se novamente o Minitab na construção do gráfico de efeito (**Error! Reference source not found.**) e gráfico de interação (**Error! Reference source not found.**).

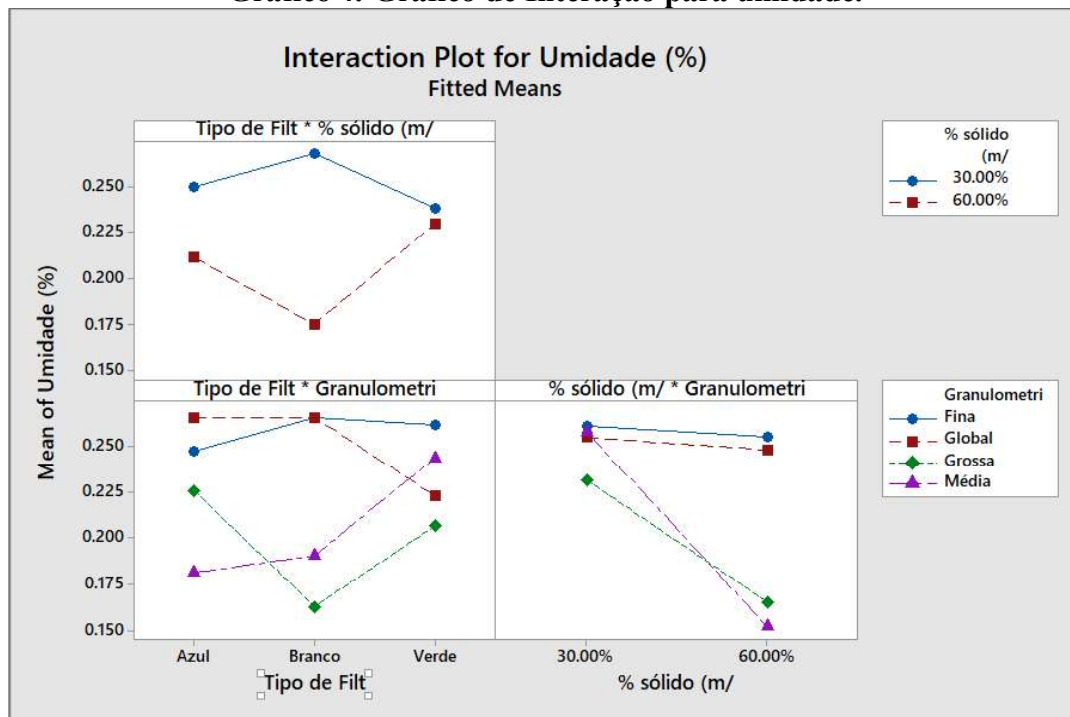
Gráfico 3: Gráfico de efeito para Umidade.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Através do gráfico de efeito é possível observar que existe uma ligeira variação de desempenho entre os tecidos, sendo o branco aquele que apresenta melhor desempenho e o verde o pior resultado. As polpas com 60% de sólidos apresentam uma umidade um pouco menor que as com 30%, o que endossa o explicado por Araújo Jr. (2014). Além disso pode-se observar que a fração fina é que apresenta valores de umidade mais alto, enquanto as frações média e grossa, tem resultados significativamente mais baixos.

Gráfico 4: Gráfico de Interação para umidade.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Pelo gráfico de interações (Gráfico 4), quando analisado o tipo de tecido X % sólidos, observa-se que as linhas não são paralelas, o que indica que a relação entre o tipo de tecido e a umidade depende da % sólidos utilizada. A interação apresentada reforça o explicitado anteriormente. A polpa com 60% apresenta melhor desempenho de filtragem. Porém observa-se claramente que o tecido branco, apresenta o melhor desempenho na filtragem da polpa com 60% de sólidos e o pior com a polpa de 30%.

Quando analisado o tipo de tecido X % granulometria, observa-se que as linhas também não são paralelas, o que indica que a relação entre o tipo de tecido e a umidade depende da granulometria da amostra. A interação apresentada mostra que o melhor desempenho da filtragem de amostra global é o tecido verde, porém o resultado não é muito positivo, uma vez que a umidade chega a cerca de 20%. Já o branco apresenta bom desempenho para as granulometrias média e grossa, enquanto o azul só consegue um desempenho razoável para a granulometria média.

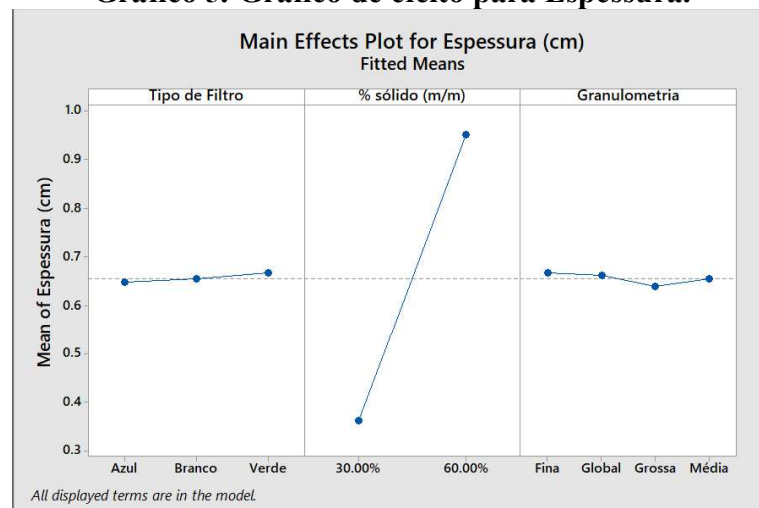
Já quando analisada a granulometria X % sólidos, observa-se que as linhas não são paralelas, o que indica que a relação entre a granulometria e a umidade depende da % de sólidos da polpa. A interação apresentada mostra que para as granulometrias fina e global, as linhas paralelas indicam que não existe influência significativa da % sólidos na umidade para essas frações. Porém as frações média e grossa apresentam uma melhora significativa no desempenho de

filtragem para polpas com 60% de sólidos, sendo a maior variação observada na granulometria média.

6.5 Fatores que influenciam a espessura da torta

De maneira análoga à análise feita para a umidade, foram construídos o gráfico de efeito (**Error! Reference source not found.**) e gráfico de interação (**Error! Reference source not found.**) para a espessura da torta.

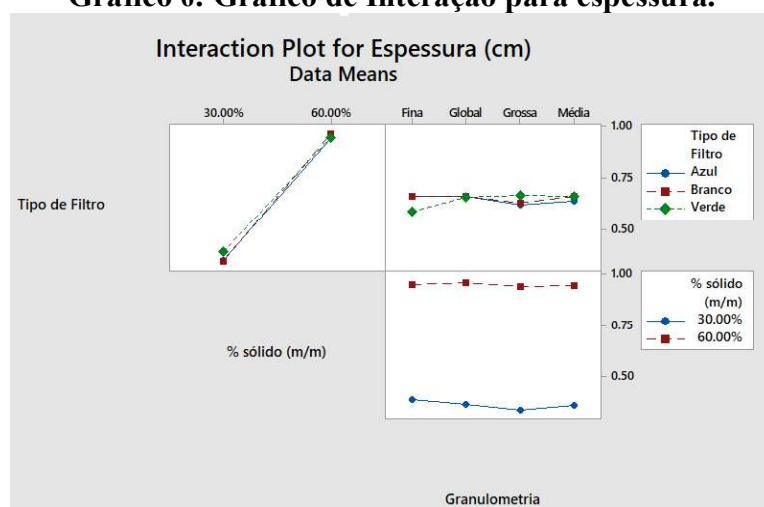
Gráfico 5: Gráfico de efeito para Espessura.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Não se observam variações significativas de espessura para nenhum dos três meios filtrantes utilizados, bem como para as frações granulométricas empregadas nos testes. Apenas a % sólidos: o aumento deste fator implicou em tortas mais espessas.

Gráfico 6: Gráfico de Interação para espessura.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Apesar das linhas dos gráficos de interação (Gráfico 6) não serem perfeitamente paralelas é possível observar que não existe influência significativa do tipo de tecido ou da granulometria, na relação entre a % sólidos e a espessura da torta. Assim pode-se entender que o único fator que influencia a espessura da torta é a % de sólidos da polpa.

7 CONCLUSÕES

Baseado nos resultados apresentados para os testes realizados neste trabalho fica evidente que a espessura da torta depende apenas da porcentagem de sólidos da polpa utilizada no ensaio. Não foram detectadas correlações entre os parâmetros granulométricos dos granéis estudados e a espessura da torta, bem como entre a qualquer influência dos meios filtrantes testados.

Ao analisar minuciosamente os resultados para a umidade residual da torta, a conclusão mais palpável é que nenhum teste realizado com polpa de 30% obteve valores de umidade satisfatórios. Neste sentido, para trabalhos futuros, é sugerido que se utilize polpa com 60% de sólidos, ou se possível, realize-se testes com % de sólidos maiores para novos ensaios.

Com relação aos testes, utilizando-se polpa de 60% de sólidos, observou-se que a fração granulométrica da amostra tem correlação direta com a umidade. Neste sentido é possível notar que, a fração fina ($<0,3\text{mm}$) apresenta uma umidade residual mais elevada, sendo o maior desafio a filtração destes materiais. É natural se pensar que partículas menores possam se agrupar nas aberturas do meio filtrante, obstruindo a passagem de água e retraindo umidade na torta, porém esta hipótese não foi testada ou evidenciada neste trabalho.

Para o tecido branco, as frações média e grossa apresentaram uma umidade residual inferior a 11%, sendo o resultado inicial mais expressivo deste teste. Como para o mesmo meio filtrante a fração global não apresentou resultados satisfatórios de umidade, é possível inferir que fração mais fina da amostra global possa ter contribuído para a retenção de umidade na torta.

Sendo assim, o tecido branco é considerado uma boa alternativa para filtração das frações média e grossa, caso essa seja uma opção viável para o trabalho que se deseja empregar o tecido. O tecido azul, apresenta um bom desempenho de filtração apenas na fração granulométrica média, porém, ainda inferior ao branco. Sendo assim, seu uso só seria recomendado para filtração desta fração granulométrica caso exista diferença significativa entre o custo dos tecidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO JR., A. Influência das variáveis de processo na filtração cerâmica de polpas de minério de ferro. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2014.

CHAVES, A. P. Teoria e prática do tratamento de minérios. 3. ed. Belo Horizonte: Signus, 2010. v. 2.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. Tratamento de minérios. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2010.

LUZ, J. A. M.; OLIVEIRA, M. Curso de separação sólido-líquido. Ouro Preto: Departamento de Engenharia de Minas, UFOP, 2016.

SEFAR. Process filtration. 2019. Disponível em:

<https://www.sefar.com/data/docs/pt/6816/FS-PDF-IF-Process-L3-Process-Filtration-EN.pdf>.

Acesso em: 2021.

SOUZA, A. H. D. Estudo comparativo das técnicas de filtração aplicadas a rejeitos de minério de ferro provenientes da etapa de deslamagem. 2020. Dissertação (Mestrado) – REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.