



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE
MINAS



IMPACTO DA AMINA RESIDUAL NA PRODUÇÃO DE
***PELLET FEED* COM FILTRO CERÂMICO**

FELIPE TRINDADE SILVA

OURO PRETO
2020

FELIPE TRINDADE SILVA

**IMPACTO DA AMINA RESIDUAL NA PRODUÇÃO DE
PELLET FEED COM FILTRO CERÂMICO**

Monografia apresentada ao curso de graduação em Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para a obtenção de grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Erica Linhares Reis

OURO PRETO
2020

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S586i Silva, Felipe Trindade.

Impacto da amina residual na produção de pellet feed com filtro cerâmico.
[manuscrito] / Felipe Trindade Silva. - 2020.
58 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientadora: Profa. Dra. Erica Linhares Reis.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas.
Graduação em Engenharia de Minas .

1. Beneficiamento de minério. 2. Flotação. 3. Minérios de Ferro. 4.
Capilaridade. I. Reis, Erica Linhares. II. Universidade Federal de Ouro Preto.
III. Título.

CDU 622.765.063

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



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
Departamento de Engenharia de Minas - DEMIN



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos seis dias do mês de outubro de 2020, às 14h, foi instalada a sessão pública remota para a defesa de Trabalho de Conclusão de Curso do discente Felipe Trindade Silva, matrícula 15.2.1306, intitulado IMPACTO DA AMINA RESIDUAL NA PRODUÇÃO DE *PELLET FEED* COM FILTRO CERÂMICO, perante comissão avaliadora constituída pela orientadora do trabalho, Prof. Dr^a. Érica Linhares Reis, MSc. Mariana Caroline Andrade Silva e MSc. Adail Mendes Araujo Junior. A sessão foi realizada com a participação de todos os membros por meio de videoconferência, com base no regulamento do curso e nas normas que regem as sessões de defesa de TCC. Inicialmente, o presidente da comissão examinadora concedeu ao discente 20 (vinte) minutos para apresentação do seu trabalho. Terminada a exposição, o presidente concedeu, a cada membro, um tempo máximo de 20 (vinte) minutos para perguntas e respostas ao candidato sobre o conteúdo do trabalho, na seguinte ordem: primeiro MSc Adail Mendes Araujo Junior segundo, MSc. Mariana Caroline Andrade Silva e em último, a Prof. Dr^a. Érica Linhares Reis. Dando continuidade, ainda de acordo com as normas que regem a sessão, o presidente solicitou ao discente e aos espectadores que se retirassem da sessão de videoconferência para que a comissão avaliadora procedesse à análise e decisão. Após a reconexão do discente e demais espectadores, anunciou-se, publicamente, que o discente foi aprovado por unanimidade com a nota 7,5 (sete e meio), sob a condição de que a versão definitiva do trabalho incorpore todas as exigências da comissão, devendo o exemplar final ser entregue no prazo máximo de 15 (quinze) dias. Para constar, foi lavrada a presente ata que, após aprovada, foi assinada pelo presidente da comissão. Os demais membros que participaram por videoconferência se comprometem a enviar um parecer digital que conste a aprovação do discente, este, por sua vez, encaminhará uma declaração de concordância com todas as recomendações apresentadas pelos avaliadores. Ouro Preto, 06 de outubro de 2020.

Presidente: Érica Linhares Reis:

Membro: Mariana Caroline Andrade Silva

Membro: Adail Mendes Araujo Junior

Discente: Felipe Trindade Silva

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que participaram deste trabalho em todos os momentos de sua elaboração.

De forma especial agradeço:

À minha mãe Dalila Cristina Trindade pelo apoio incondicional em todos os momentos.

Ao meu pai M.Sc. Adarlan Moreira e Silva pelo apoio, incentivo e pela valiosa contribuição técnica em todas etapas deste trabalho.

À minha irmã Paula Trindade e Silva pela prontidão em contribuir no desenvolvimento deste estudo, além de importantes comentários acerca dos resultados.

À Professora Dra. Erica Linhares Reis pela orientação e prontidão em contribuir no desenvolvimento deste trabalho.

À Equipe de Filtragem da Ferro + Mineração S.A, pela oportunidade de crescimento profissional e pessoal.

Ao Engenheiro Adail Mendes Araujo Junior, pela valiosa contribuição no desenvolvimento do tema desenvolvido neste trabalho, mantendo um elevado nível técnico e científico de abordagem.

Ao Técnico de Processos Valdiney Chaves pela contribuição e inquestionável dedicação na realização dos ensaios de laboratório, no manuseio das amostras e pela prontidão em contribuir para o desenvolvimento deste trabalho.

À República Casanova por ter sido minha escola de vida, por ser minha primeira casa própria e meu eterno refúgio. “*Sarto de pulga, carreira de lebre!*”

RESUMO

O presente trabalho aborda um estudo sobre a produtividade de um filtro cerâmico após o processo de flotação catiônica reversa de um minério de ferro, referente a um projeto em desenvolvimento, de uma mina localizada no Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais. A escolha da tecnologia de filtração está diretamente ligada ao seu custo operacional, buscando um sistema econômico e eficiente. A performance nessa etapa pode estar ligada ao reagente utilizados nas etapas anteriores, como a flotação. O principal objetivo desse estudo foi analisar o impacto da amina residual na polpa de concentrado de minério de ferro, na etapa de desaguamento por filtro cerâmico. Foram realizados ensaios variando a quantidade da amina residual, em: 0, 10, 20, 50 e 100 g/t, e tipo de amina, variando a proporção de monoamina e diamina, o pH da polpa que foi variado entre neutro e básico e a porosidade da placa cerâmica, com valores iguais a: 1,5, 2 e 5 μm . Foi possível concluir que de modo geral a amina residual diminui a espessura da torta e, conseqüentemente, a produtividade do filtro cerâmico bem como aumenta a umidade do *pellet feed*. Outra conclusão muito importante do estudo foi o impacto da amina nas propriedades do meio filtrante, devido a uma alteração da eficiência do princípio da capilaridade. Assim a amina pode ser utilizada no processo de flotação com poucos impactos no processo de filtração, desde que não ocorra excesso de amina residual.

Palavras chaves: Filtração Cerâmica; Amina Residual; Minério de Ferro; Princípio da Capilaridade.

ABSTRACT

The present work deals with a study on the productivity of a ceramic filter after the process of reverse cationic flotation of an iron ore, referring to a project under development, of a mine located in the Quadrilátero Ferrífero in Minas Gerais. The choice of filtration technology is directly linked to its operating cost, seeking an economical and efficient system. The performance in this step can be linked to the reagent used in the previous steps, such as flotation. The main objective of this study was to analyze the impact of the residual amine in the iron ore concentrate pulp, in the dewatering step by ceramic filter. Tests were performed varying the amount of residual amine, in: 0, 10, 20, 50 and 100 g / t, and type of amine, varying the proportion of monoamine and diamine, the pH of the pulp that was varied between neutral and basic and the porosity of the ceramic plate, with values equal to: 1.5, 2 and 5 μm . It was concluded that, in general, the residual amine decreases the thickness of the cake and, consequently, the productivity of the ceramic filter as well as increases the humidity of the pellet feed. Another very important conclusion of the study was the impact of amine on the properties of the filter medium, due to a change in the efficiency of the capillarity principle. Thus, the amine can be used in the flotation process with little impact on the filtration process, as long as there is no excess residual amine.

Keywords: Ceramic filtration; Residual Amine; Iron ore; Principle of Capillarity.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – ESTRUTURA GERAL DO AMIDO	19
FIGURA 2 – ESTRUTURA DE UM TRIGLICERÍDEO	21
FIGURA 3 – DESENHO REPRESENTATIVO DE UM MEIO FILTRANTE E A TORTA FORMADA SOBRE ELE.	22
FIGURA 4 – TECIDO DE UMA PLACA DE FILTRO PRENSA EM UMA MINERAÇÃO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO	25
FIGURA 5 – REPRESENTAÇÃO DE UM FILTRO CONTÍNUO A VÁCUO.	26
FIGURA 6 – REPRESENTAÇÃO DA ÁGUA DENTRO DA PLACA CERÂMICA.....	27
FIGURA 7 – REPRESENTAÇÃO DAS FASES DE OPERAÇÃO DE UM FILTRO CERÂMICO.	28
FIGURA 8 – REPRESENTAÇÃO DO APARATO DE <i>LEAF TEST</i>	30
FIGURA 9 – FLUXOGRAMA DOS TESTES REALIZADOS E VARIÁVEIS UTILIZADAS.	33
FIGURA 10 – CURVA DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DA AMOSTRA UTILIZADA.	34
FIGURA 11 – FOTO DE PARTE DO SISTEMA DE VÁCUO DO <i>LEAF TEST</i> UTILIZADO NOS ENSAIOS.	36
FIGURA 12 – FOTO DE UMA TORTA FORMADA SOBRE O MEIO FILTRANTE UTILIZADO NOS TESTES.....	37
FIGURA 13 – ANÁLISE ANOVA DA PRODUTIVIDADE.....	39
FIGURA 14 – COMPARAÇÕES EMPARELHADAS DE TUKEY DA PRODUTIVIDADE.	40
FIGURA 15 – ANÁLISE ANOVA DA UMIDADE.....	40
FIGURA 16 – ANÁLISE DE RESÍDUOS PARA EFETIVAÇÃO DA TEORIA DE ANOVA.	41
FIGURA 17 – <i>BOXPLOT</i> DE PRODUTIVIDADE PARA DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE AMINA RESIDUAL.	43
FIGURA 18 – <i>BOXPLOT</i> DE UMIDADE PARA DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE AMINA RESIDUAL.	44
FIGURA 19 – <i>BOXPLOT</i> DE PRODUTIVIDADE PARA DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE MONOAMINA E DIAMINA.	48
FIGURA 20 – <i>BOXPLOT</i> DE UMIDADE PARA DIFERENTES PROPORÇÕES DE MONOAMINA E DIAMINA.	49
FIGURA 23 – <i>BOXPLOT</i> DE PRODUTIVIDADE PARA DIFERENTES CAPILARIDADES DA PLACA CERÂMICA.	52
FIGURA 24 – <i>BOXPLOT</i> DE UMIDADE PARA DIFERENTES CAPILARIDADES DA PLACA CERÂMICA.	53
FIGURA 25 – <i>BOXPLOT</i> GERAL DE PRODUTIVIDADE DA SEGUNDA ETAPA DE TESTES.	54

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – TEORES MÉDIOS DOS ELEMENTOS DA AMOSTRA DE <i>PELLET FEED</i>	34
TABELA 2 – DADOS DO TESTE 1 VISANDO ANÁLISE QUANTITATIVA DA AMINA RESIDUAL.	42
TABELA 3 – DADOS DO TESTE 2 VISANDO ANÁLISE QUALITATIVA DA AMINA RESIDUAL.	45
TABELA 3 (CONTINUAÇÃO) – DADOS DO TESTE 2 VISANDO ANÁLISE QUALITATIVA DA AMINA RESIDUAL.	46

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVO	15
2.1	OBJETIVO GERAL	15
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	ASPECTOS GERAIS DO BENEFICIAMENTO DO MINÉRIO DE FERRO	16
3.2	FLOTAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO	18
3.3	REAGENTES NA FLOTAÇÃO REVERSA DO MINÉRIO DE FERRO	19
3.3.1	<i>Amidos</i>	19
3.3.2	<i>Aminas</i>	20
3.4	MECANISMOS DE FILTRAGEM	21
3.4.1	<i>Filtro à vácuo</i>	23
3.4.2	<i>Filtro prensa</i>	24
3.4.3	<i>Filtro cerâmico</i>	25
3.5	TESTE DE FOLHA (<i>LEAF TEST</i>)	29
4	MATERIAIS E MÉTODOS	31
4.1	DESCRIÇÃO GERAL DOS EXPERIMENTOS	31
4.1.1	<i>Primeira etapa: Determinação da concentração de amina residual ótima</i>	31
4.1.2	<i>Segunda etapa: Variação dos parâmetros de processo que afetam a produtividade de filtração</i>	32
4.2	CARACTERIZAÇÃO E PREPARAÇÃO DA AMOSTRA DE POLPA DE MINÉRIO DE FERRO	34
4.3	MONTAGEM DO APARATO DE FILTRAÇÃO	35
4.4	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE	37
4.5	DETERMINAÇÃO DA PRODUTIVIDADE	38
5	RESULTADOS DISCUSSÃO	39
5.1	DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO ÓTIMA DA AMINA	39
5.1.1	DADOS EXPERIMENTAIS DA PRIMEIRA ETAPA	41

5.1.1.1	<i>Determinação da concentração de amina residual crítica</i>	43
5.1.2	DADOS EXPERIMENTAIS DA SEGUNDA ETAPA	45
5.1.2.1	<i>Efeito do tipo de amina</i>	47
5.1.2.2	<i>Efeito do pH</i>	49
5.1.2.3	<i>Efeito do tamanho do capilar do meio filtrante</i>	51
5.1.2.4	<i>Parâmetros de maior influência sobre efeito da amina residual</i>	53
6	CONCLUSÃO	56
7	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	57

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos maiores produtores de minério de ferro do mundo, não apenas devido a quantidade produzida, mas também pela qualidade do minério. Um dos diferenciais é o alto teor de ferro nos minérios e baixos teores de contaminantes, o que é fundamental para colocar o país como um fornecedor de alta qualidade e grande volume, tornando-o um dos maiores/melhores *players* do mercado mundial. Entretanto, para ser comercializado, há necessidade de algum beneficiamento para adequar suas propriedades físicas e químicas ao uso industrial.

Em relação ao minério de ferro, o beneficiamento normalmente se inicia na etapa de preparação e posteriormente, a etapa de concentração, majoritariamente realizada a úmido. Para a comercialização do produto concentrado, sempre se faz necessário a etapa de desaguamento, que, normalmente, consiste no espessamento e filtração.

Na etapa de filtração, existem diversas opções de tecnologia para diferentes granulometrias e umidade residual final. A escolha da tecnologia de filtração está diretamente ligada ao seu custo operacional, pois existe uma grande demanda nas operações de processamento mineral por um sistema econômico e eficiente de separação sólido-líquido. A chave para maximizar o rendimento desta etapa é encontrar um sistema que gere baixos teores de umidade e baixo consumo energético, aliado a uma alta produtividade.

Os principais fatores que impactam na performance da filtração é a granulometria do minério e os reagentes utilizados nos processos anteriores. O problema com os reagentes vem principalmente quando há etapa de concentração por flotação. Um dos compostos químicos utilizados na flotação reversa de minério de ferro é a amina, que tem uma afinidade grande e é utilizado como coletor catiônico da sílica.

Em todo processo físico-químico não se consegue evitar que uma parte residual desses reagentes cheguem ao fim do processo produtivo. A amina por ser muito oleosa e produzir muita espuma pode ser prejudicial no processo de filtração, principalmente em filtros cerâmicos, onde pode prejudicar o efeito capilar das placas cerâmicas e alterar a tensão superficial nas placas cerâmicas.

O contexto para a realização deste trabalho permeia por um projeto de implementação de uma nova etapa em uma usina de beneficiamento, a flotação reversa catiônica. Juntamente a essa etapa, vem-se a necessidade de entender os principais efeitos dos reagentes não degradados nas etapas anteriores. No caso, deseja-se avaliar o efeito da amina graxa remanescente na filtração, adicionada na flotação catiônica reversa. Embora grande parte desse reagente é removido com o quartzo (material flotado), parte remanescente pode ser carregada para o concentrado.

Sabe-se, por experiência industrial de utilização de filtros cerâmicos em plantas de beneficiamento, que a amina aglutinada no produto concentrado, pode obstruir os poros dos filtros cerâmicos, desfavorecendo a passagem de água no processo de filtração, o que acarreta na menor produtividade. Além disso, a presença de aminas pode influenciar na formação de espumas, que alteram a tensão superficial das placas, reduzindo a produtividade da torta de filtração. Dessa maneira, ciente do potencial negativo da amina remanescente no processo de filtração, e diante da necessidade de implementar a flotação catiônica reversa para enriquecer o *pellet feed* da empresa, foram realizados experimentos de bancada para avaliar o potencial da amina remanescente na etapa de filtração.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência da amina residual do processo de flotação na filtração em placas cerâmica (filtro cerâmico) de concentrados de minério de ferro.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar o efeito de diferentes concentrações (0, 10, 20, 50 e 100 g/t) de amina residual na produtividade e umidade de pellet feed na filtração;
- Avaliar o efeito do tipo de amina residual em diferentes valores de pH (básico e neutro) na produtividade e umidade de pellet feed na filtração, variando entre o uso de monoamina e diamina, e diferentes proporções da mistura dos dois tipos de amina;
- Avaliar o efeito do tamanho do poro da placa cerâmica (1,5, 2 e 5 μm) associado ao efeito da amina residual na filtração, identificando o impacto da amina no princípio de capilaridade do processo de filtração;
- Propor condições de uso de aminas no processo de flotação reversa a fim de prever os malefícios do seu excesso no processo de filtração cerâmica.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Aspectos gerais do beneficiamento do minério de ferro

O enriquecimento de minério de ferro pode ser efetuado através de vários métodos de beneficiamento e envolve diferentes operações unitárias. O objetivo principal desses processos é adequar a granulometria do minério para a produção de ferro gusa e aço e adequar os teores de ferro, minimizando os teores de sílica. O que diferencia na escolha e emprego do método de concentração do minério de uma empresa para outra são as características físicas, químicas e mineralógicas do minério. (Nascimento, 2010). Além disso, um obstáculo na escolha do método é o investimento de capital e custos operacionais associados aos equipamentos necessários, assim como os custos associados ao aumento do consumo de água e energia nesses processos.

Diferentes teores de ferro alteram o modo de beneficiamento e, assim, para minérios de ferro com altos teores, também conhecidos como hematíticos de alto teor, geralmente com teor de ferro acima de 62%, não há necessidade de concentração, sendo necessários apenas processos de cominuição e deslamagem para alcançar o tamanho e a qualidade exigida de produtos: minério granulado, minério de esponja, finos sinterizados e *pellet feed*. Originadas do período pré-cambriano, de acordo com Dorr (1965) e associadas a hematita e magnetita, em sua maioria (Lopes, 2009). Ao passo que para depósitos de minérios de ferro com baixos teores de ferro, em média abaixo de 58 %, e conhecidos como itabiríticos (friáveis e semi friáveis de baixo teor), o processo de beneficiamento e/ou *blending* devem ser realizados, visando aumentar o teor do elemento de interesse e mitigar os teores dos elementos deletérios. Os elementos deletérios, também conhecidos como minerais de ganga, incluem, tipicamente, quartzo, como anfibólios, micas e piroxênios, carbonatos, feldspatos e argilas (Filippov et al., 2014). Dorr (1964) endossa que no minério de itabirítico a lixiviação da sílica é mais completa, e que em itabiritos mais porosos são encontrados teores mais baixos de ferro.

Sendo mais pobres em ferro, os itabiritos necessitam de plantas mais complexas de beneficiamento, com etapas de concentração mais sofisticadas e com menores índices de

recuperação metálica. No futuro próximo, existe a expectativa de que os minérios lavrados terão teores mais elevados de fósforo e alumina. O volume de minério ultrafino, tipo pellet feed, também aumentará, principalmente em função dos novos projetos. (CGEE, 2010, p.20).

As restrições de qualidades atuais para os produtos *sinter feed* e *pellet feed* de minério de ferro geralmente implicam em processamento avançado, como cominuição, classificação, concentração e desaguamento.

Os processos de concentração, podem ser realizados em rotas úmidas ou a seco. O beneficiamento a seco, não utiliza água em seu processo de concentração, permitindo assim que os rejeitos sejam empilhados a seco sem fazer o uso de barragens (Silva e Souza, 2015). O beneficiamento a úmido, mais comum, utiliza a água para a classificação e concentração do minério de ferro, separando os óxidos férricos dos silicatos por flotação, separação gravimétrica ou separação magnética.

De acordo com Silva et al. (2015), as principais plantas de processamento de minério de ferro no Brasil utilizam como método de concentração a flotação catiônica reversa. Segundo Lopes (2009), pode ser usado como único processo de concentração ou como estágio final para obtenção de produto com alto teor de ferro. No Brasil, a flotação é principalmente realizada em baterias de células mecânicas e colunas de flotação.

Após o processo de flotação é necessário o desaguamento do concentrado até a umidade requerida pelo processo de transporte. As operações de desaguamento podem compreender espessamento, filtração e secagem.

O desaguamento do concentrado pode requerer a umidade final média de 11%, podendo variar dependendo do processo e especificações mineralógicas. Para o mercado interno a umidade varia de acordo a necessidade e especificações do cliente. Já para o mercado externo a umidade acarreta no maior valor de frete de transporte, portanto, quanto menor a umidade, menor o peso do material. Além disso, se tratando do mercado transoceânico, e as diretrizes da Organização Marítima Internacional (IMO), uma medida de segurança crítica é o Limite de Umidade Transportável (TML), exigido para cargas que possuem a tendência à liquefação da carga. Dessa maneira, os processos

de desaguamento devem obedecer aos requerimentos do limite de umidade transportável de minério de ferro.

3.2 Flotação de minério de ferro

Os minérios de ferro extraídos no Brasil atualmente, pertencem a dois grandes grupos. O primeiro grupo inclui os minérios hematíticos. Este tipo de minério está relacionado com enriquecimento supergênico e é usado para a produção de minérios de ferro mais grossos, tais como *lump ore* e *sinter feed* (Araujo e Peres, 1995).

O segundo grupo inclui os minérios itabiríticos que possuem menor teor de ferro e portanto necessitam, na grande maioria das vezes, de etapas de concentração para a produção de concentrados que atendam às especificações do comprador. Itabiritos apresentam menor grau de liberação e em geral necessitam ser concentrados por flotação (Araujo e Peres, 1995).

Flotação em espuma, ou simplesmente flotação, é um processo de concentração aplicado a partículas sólidas que explora diferenças nas características de superfície entre as várias espécies minerais presentes, tratando misturas heterogêneas de partículas suspensas em fase aquosa, nas quais se introduz uma fase gasosa (Peres et al, 1980).

A seletividade na flotação de itabiritos está relacionada ao grau de hidrofobicidade e polaridade da superfície dos componentes minerais, permitindo a separação da hematita do quartzo, enriquecendo o produto de minério de ferro.

O processo de separação utiliza o fluxo gasoso, de forma que as partículas hidrofóbicas aderem às bolhas, flutuando à superfície, enquanto as partículas hidrofílicas permanecem na polpa por afinidade. Em outras palavras, as partículas hidrofóbicas seriam carregadas pelo fluxo de ar e as partículas hidrofílicas permanecem em suspensão

A flotação pode ser realizada de duas diferentes formas: direta ou reversa. Sendo que na flotação direta de minério de ferro o óxido de ferro é flotado, com o auxílio de reagentes aniônicos como sulfonato de petróleo ou ácidos graxos. Na flotação reversa,

por outro lado, a sílica que é flotada, com o auxílio de reagentes catiônicos, como a amina, e com o auxílio de depressores, como o amido. Sendo esta última o método de concentração mais utilizado no beneficiamento do minério de ferro. (Nascimento, 2010)

Segundo Uliana (2017), para que uma partícula flote é necessário o sucesso de três eventos independentes e consecutivos entre partículas e bolhas: colisão, adesão e preservação do agregado formado.

3.3 Reagentes na flotação reversa do minério de ferro

De acordo com a função específica desempenhada na flotação, os reagentes empregados podem ser classificados em: coletores, espumantes, modificadores (ou reguladores) e depressores.

Os modificadores atuam na modulação do pH (ácidos e bases), controle do estado de agregação da polpa (coagulantes e floculantes), ativação de reagentes. No item a seguir, serão destacados os principais reagentes utilizados na flotação catiônica de minério de ferro.

3.3.1 Amidos

Compostos orgânicos do grupo dos polissacarídeos, como os amidos, são usados, frequentemente, como depressores orgânicos no processo de flotação. Segundo Nascimento (2010), o amido é um regulador orgânico pertencente ao grupo dos não iônico. Na figura 1 está apresentada a estrutura geral do amido.

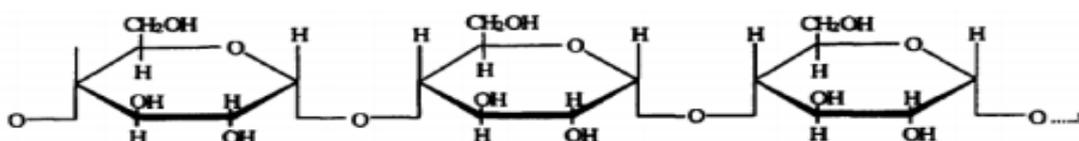


Figura 1 – Estrutura geral do amido
Fonte: Nascimento (2010)

O amido é utilizado como depressor da hematita, ele é altamente eficiente, devido, principalmente, a ligações de hidrogênio, modificadas pelas interações coulômbicas entre os grupos funcionais carregados e as superfícies minerais. No caso do amido de milho, a afinidade química entre os grupos carboxilato na estrutura do amido e a superfície da hematita poderia contribuir para a adsorção. Por ação da temperatura, hidrólise ácida ou, ainda, por ação de enzimas, os amidos de milho podem ser modificados, reduzindo o número de unidades de glicose, mantendo a proporção de amilopectina/amilose da molécula original. Mantendo sua hidrofilicidade, as moléculas de amidos não modificados e dextrinas (amido modificado) são capazes de hidrofilar as superfícies de minerais atuando como depressores no processo de adsorção (Lopes, 2009).

3.3.2 Aminas

A amina graxa é definida por Nascimento (2010) como sendo um composto derivado da amônia, de cadeia linear, sendo constituída por um número par de carbonos, variando de 8 a 22 átomos de carbono, sendo que as matérias-primas são óleos ou gorduras.

Segundo Batisteli (2007), na flotação catiônica da sílica com aminas, a polpa está em elevada faixa de pH, ou seja, um ambiente alcalino rico em íons OH⁻. Esse ambiente alcalino governa as propriedades de dissociação e hidrólise desse grupo das aminas, dando-lhes características de coletores e espumantes.

De acordo com Neder e Leal Filho (2006), as aminas graxas tem em sua molécula uma parte de origem oleosa, essa molécula pode ser de origem animal, vegetal ou mineral. Essa porção oleosa é hidrofóbica e está ligada nitrogênio, por isso apresenta características iônicas. Grande parte das propriedades das aminas graxas são provenientes das cadeias carbônicas, na forma de triglicerídes, conforme a Figura 2.

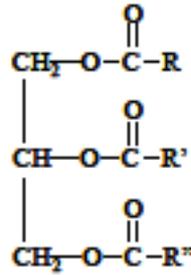


Figura 2 – Estrutura de um triglicerídeo
 Fonte: Neder e Filho (2006)

Stapelfeldt et al. (2002), afirmam que as aminas são os coletores catiônicos mais usados industrialmente. A flotação reversa do minério de ferro é realizada em pH em torno de 10,5, no qual a superfície do quartzo é altamente negativa. O mecanismo de adsorção de amina sobre a superfície do quartzo nesse valor de pH se dá por atração eletrostática entre o cátion e a superfície deste mineral carregada negativamente.

A maior parte das aminas utilizadas ficam retidas no material flotado, sendo depositado em barragens de rejeito. Entretanto, uma parte residual é disseminada na polpa de concentrado de óxido de ferro, e essa presença pode impactar no processo de filtração. A origem oleosa da amina influencia no efeito capilar da placa do filtro cerâmico, impactando no processo de secagem e no nível de produção do processo de filtração.

3.4 Mecanismos de filtração

A filtração consiste na operação unitária de separação sólido-líquido, onde os sólidos em suspensão na polpa são separados da água através de um meio poroso, retendo as partículas sólidas. O líquido que atravessa esse meio poroso é denominado filtrado e a camada de partículas retidas é chamada de torta (Araujo Junior, 2014).

Valadão et al. (2001) afirmam que a teoria clássica de filtração é baseada na equação de Darcy, uma equação empírica que descreve de forma macroscópica o fluxo de um líquido através de um meio poroso, formando a torta conforme a Figura 3. Essa

equação pode ser entendida como a razão entre o volume filtrado e o produto da área filtrante pelo tempo, conforme a expressão:

$$\frac{\Delta V}{A\Delta t} = \frac{k}{\mu} \cdot \frac{\Delta P}{L}$$

ΔV = fluxo do filtrado

L = espessura do meio filtrante + torta

ΔP = diferencial de pressão através da torta e do meio filtrante

k = coeficiente de filtração (permeabilidade do leito)

A = área filtrante

Δt = tempo de fluxo de filtrado

μ = viscosidade do filtrado

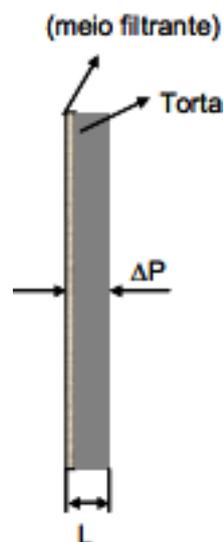


Figura 3 – Desenho representativo de um meio filtrante e a torta formada sobre ele.
adaptado de Silva (2006)

Conforme Araujo Junior (2014), a velocidade de escoamento do filtrado é diretamente proporcional à diferença de pressão (vácuo) e à porosidade da torta, e inversamente proporcional à viscosidade do filtrado, à área específica do minério e à espessura da torta.

Para se entender e otimizar o fenômeno de filtração, algumas variáveis físicas merecem o destaque, como a área superficial específica, a espessura da torta, o percentual de sólidos da suspensão, o tempo de filtração, a viscosidade do fluido, a temperatura da polpa e a diferença de pressão do sistema de filtração. (Araujo Junior, 2014)

Industrialmente a filtração é utilizada para melhorar as propriedades de manuseio, reduzir o custo de transporte, permitir operações como a pelotização e a recuperação da água. Quando se aborda especificamente o minério de ferro, há tendência do mercado mundial para a compra de produtos finos, como o *pellet feed*, nos quais a remoção de água é mais complicada. (Dias et. Al, 2002)

Atualmente existem diversos tipos de filtro para a filtração de minérios. O que leva a escolha do filtro são as características dos minerais e o tipo de processamento empregado. Os tipos de filtro, rotineiramente, utilizados na mineração são, de acordo com Chaves (2004): filtro tambor, filtro a disco à vácuo, filtro de mesa e filtro de correia. Outros tipos de filtros muito empregados recentemente são os filtros prensa e cerâmico.

3.4.1 Filtro à vácuo

Sutherland (2008) define o princípio de construção de um filtro a disco à vácuo que é formado pela montagem de discos paralelos sobre o eixo horizontal de cada filtro. Sendo que esse tipo de filtro possui a vantagem de apresentar maior área de filtração por área de piso quando comparado ao filtro tambor. Cada disco é constituído por setores substituíveis, cobertos por tecidos filtrantes. (Araujo Junior, 2014)

De acordo com Silva (2006), nas indústrias químicas e metalúrgica são utilizados um grande número de materiais como telas metálicas, plásticos porosos e membranas porosas, na indústria mineral, a escolha restringe-se a tecidos.

O tecido é o meio filtrante desse equipamento. Silva (2006) afirma que o tecido é uma estrutura produzida pelo entrelaçamento de um conjunto de fios urdume

(conjunto de fios dispostos na direção transversal ou vertical) e outro conjunto de fios de trama (conjunto de fios dispostos na direção longitudinal), formando ângulo de 90°.

A utilização do filtro convencional pode ser feita com diferentes tipos de filtros, o que caracteriza é a utilização de tecido como meio filtrante. Pode ser por meio de filtros de disco a vácuo, filtro tambor, filtro de correia a vácuo, filtro plano e filtro prensa.

Silva (2006) explicita que a tessitura do tecido pode ser feita de muitas maneiras e as mais utilizadas na indústria mineral são: tramas simples ou tela, sarjas e cetim.

3.4.2 Filtro prensa

De acordo com Araujo Junior (2014), o filtro prensa consiste de um conjunto alternado de quadros ociosos, onde a torta fica retida durante a operação de filtração, e de placas maciças que possuem superfície preparadas, com sulcos ou furos que permitem a drenagem do filtrado.

O tecido é o meio filtrante desse equipamento, como evidenciado na Figura 4, onde o operador, em uma mina do Quadrilátero Ferrífero, posiciona o tecido recobrendo os dois lados da placa.



Figura 4 – Tecido de uma placa de filtro prensa em uma mineração do Quadrilátero Ferrífero

Sendo o modelo mais simples dos filtros de pressão e o de maior aplicação industrial, o filtro prensa de placas horizontais tem a vantagem de introduzir a gravidade como uma força eletro motriz, além de formar tortas mais uniformes e livres de trincas.

3.4.3 Filtro cerâmico

O filtro de disco cerâmico é semelhante ao filtro de disco à vácuo convencional, o que difere é o meio filtrante ser composto por uma cerâmica porosa. Composto de microporos, essas placas cerâmicas utilizam do princípio da capilaridade para atrair o filtrado em função do vácuo aplicado. Apesar da operação de vácuo quase constante, as placas não permitem a passagem de ar durante a operação de filtração (Araujo Junior, 2014).

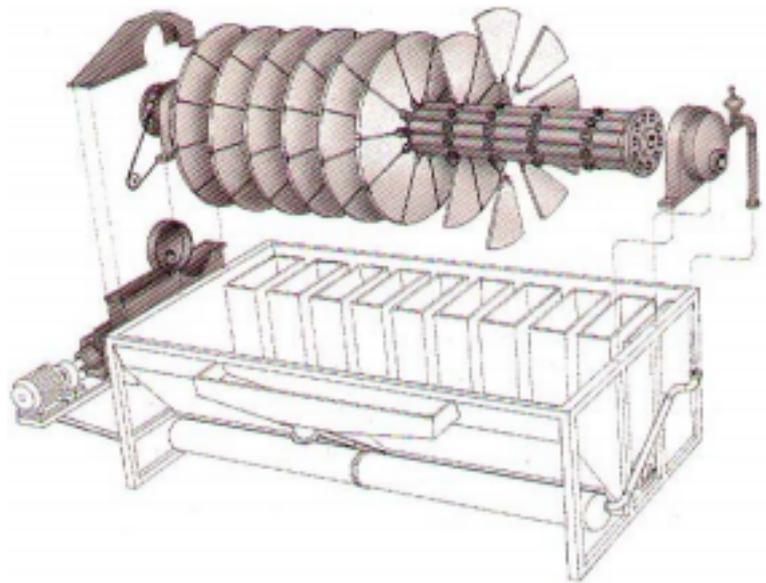


Figura 5 – Representação de um filtro contínuo a vácuo. (Silva (2006))

O princípio da capilaridade é um efeito físico devido a interações de um líquido com um a parede de um tubo fino. Devido aos microporos, a adesão do fluído com a membrana da placa hidrofílica favorece a ação capilar. Promovendo, portanto, a passagem do líquido para o interior da placa. O líquido comumente utilizado nesse processo é a água devido à sua alta polaridade (Silva, 2006).

O filtro cerâmico tem como princípio de funcionamento a formação e a secagem da torta por meio do vácuo gerado pela ação capilar nos poros das placas cerâmicas. Tal afirmação de Araujo Junior (2014), é evidenciada na Figura 6, onde os capilares, preenchidos pelo líquido, impedem a passagem de ar pela placas, por não apresentar nenhuma aderência com a parede dos capilares.

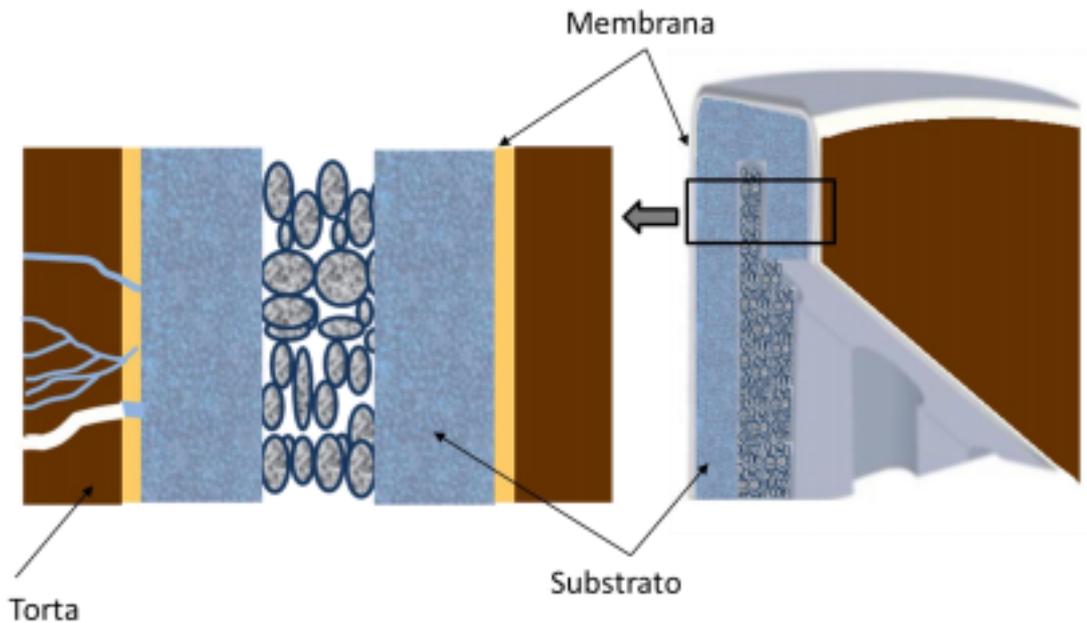


Figura 6 – Representação da água dentro da placa cerâmica.
(Adaptado de Görres, Silva e Nuuntinen (2008))

O tamanho do poro é algo que influencia na produção do filtro cerâmico. Quanto menor o diâmetro do poro melhor será a ação da força capilar. Entretanto, caso o poro seja de diâmetrização alta, o princípio de capilaridade pode não ser eficaz, porém alguns elementos que poderiam impactar na filtração podem atuar como auxiliares.

Existem cinco principais fases de operação de um filtro cerâmico, segundo Görres e Hindström (2007) apud Araujo Junior (2014), classificadas na seguinte ordem, exemplificados na Figura 7:

- 1 Formação da torta (a): Conforme os discos giram dentro da bacia, há a formação da torta, auxiliado pelo princípio da capilaridade, atraindo o líquido através da placa, com o auxílio de uma bomba de vácuo.
- 2 Secagem da torta (b): Mesmo com o disco fora da bacia o vácuo se mantém atuando, até que o líquido seja removido ao tanque de filtrado, obtendo-se uma torta seca.
- 3 Descarregamento da torta (c): Com o auxílio de raspadores, que se encontram próximos aos discos, porém nunca encostando nas placas devido ao risco de abrasão mecânica, a torta é direcionada aos chutes de descarga dos filtros, sendo posicionado sobre correias transportadoras.

- 4 Retrolavagem (d): A água, proveniente do tanque de filtrado, é injetada de dentro para fora nas placas, visando desobstruir os poros e remover a torta residual, deixando a placa livre para o início de um novo ciclo.
- 5 Regeneração da placa cerâmica (e): Essa etapa visa restaurar a permeabilidade das placas, consiste na paralização do filtro por cerca de uma hora, por meio de uma limpeza ácida e de limpeza especial. Com o auxílio de ácidos, que possam remover os materiais residuais, e de espumantes, que fazem a limpeza dos poros e da superfície das placas. Para a filtragem de polpas de pellet feed são utilizados, comumente, ácidos oxálicos e nítricos. O processo é auxiliado por ultrassons, que aumentam a eficiência da limpeza.

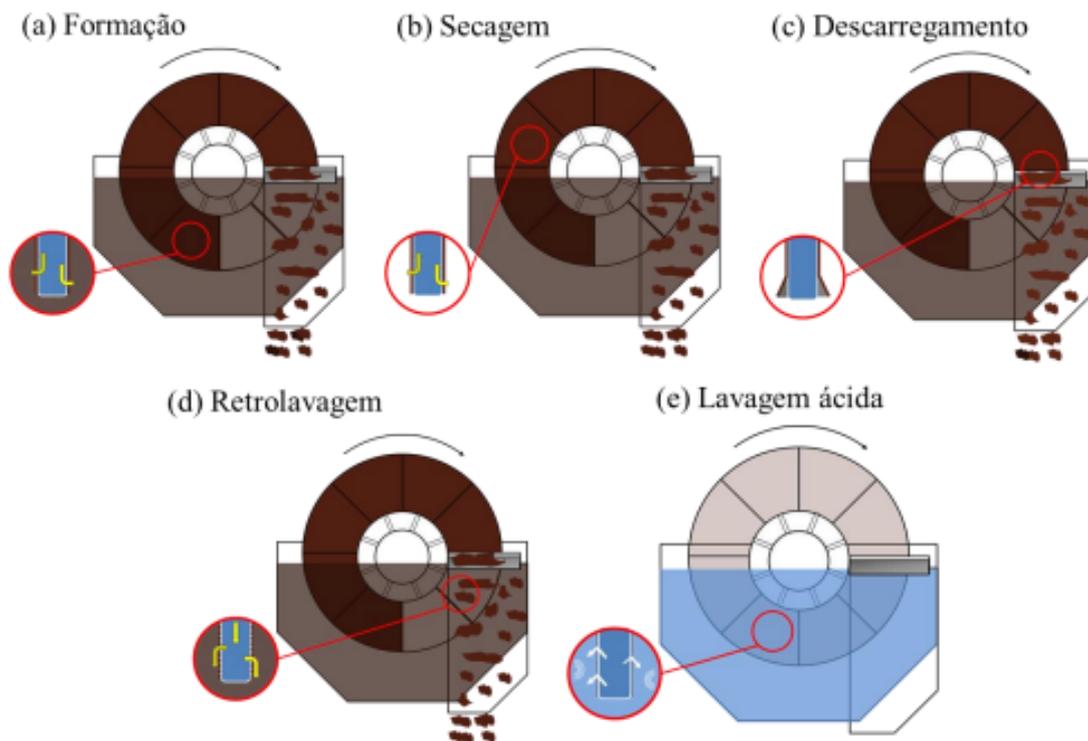


Figura 7 – Representação das fases de operação de um filtro cerâmico.
(Adaptado de Araujo Junir (2014) apud Larox (2005).

O material cerâmico da placa do filtro é de natureza altamente hidrófila. Portanto o efeito capilar poder ser alcançado com poros suficientemente grandes para assegurar alta capacidade hidráulica. O material cerâmico é forte, duro e resistente ao desgaste, garantindo a vida útil das placas de filtro cerâmicos em condições normais de operação.

Boa resistência à corrosão e grande durabilidade das placas resultam no benefício de se usar métodos de limpeza muito eficientes, assegurando, assim, um desempenho alto e consistente dos discos cerâmicos.

No processo de regeneração das placas, o ácido nítrico é responsável por remover as matérias orgânicas residuais de etapas anteriores, além de reduzir o pH da água, que possibilita a atuação do ácido oxálico, que remove as partículas de óxido de ferro impregnadas nos microporos das placas.

Nas aplicações de filtro cerâmico no Brasil observou-se que a aplicação de ácido oxálico era ineficaz e de que foi necessário introduzir alguns reagentes como Hipoclorito de sódio, surfactantes e quelantes para fazer a regeneração dos filtros cerâmicos.

O filtro cerâmico é de extrema vantagem econômica comparados a outros tipos de filtros, devido a grande redução energética em sua operação. Além de possuir duas zonas de formação de torta, permitindo a regulagem da espessura da torta formada, de acordo com as necessidades do processo utilizado.

3.5 Teste de folha (*Leaf test*)

O *Leaf test* é o método de filtragem utilizado em escala de bancada, empregado para o dimensionamento de filtros contínuos industriais. Possui um sistema com equipamentos simples e de pequena escala, o que facilita sua montagem. (França, 2007)

O equipamento é composto pela placa cerâmica que está ligada por meio de mangueiras de plástico a kitassato, a uma bomba de vácuo e a um rotâmetro. França afirma que os ensaios devem respeitar o tempo de formação da torta, o desaguamento e o nível do vácuo desejado pelo equipamento industrial.

O início do teste é realizado com o vácuo ligado e o meio filtrante imerso na polpa a ser filtrada, respeitando o tempo pré determinado para a formação da torta, como representado na Figura 8. Após esse período, retira-se o meio filtrante da polpa,

invertendo-o, posicionando o tubo de drenagem para baixo, respeitando o tempo necessário para secagem da torta, de acordo com o ciclo pré determinado. Por fim a torta é descarregada com o auxílio de raspadores.



Figura 8 – Representação do aparato de *Leaf test*.
(Adaptado de França e Casqueira 2007).

Os resultados obtidos nos testes de folha são expressos em peso de sólido seco ou volume de filtrado, por unidade de área ou por ciclo, que é a razão de filtração. Essa grandeza, multiplicada pelo número de ciclos por dia, permite o cálculo da área do filtro necessária para processar e obter uma capacidade diária de uma determinada escala de produção. No cálculo do ciclo da filtração, devem ser considerados os tempos de carga, descarga, troca de tecidos, manutenção e previsão de expansão (Chaves, 1996).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Descrição geral dos experimentos

Foram realizados testes em aparato de filtração de bancada para avaliação do efeito da amina residual do processo de flotação reversa na filtração de concentrados de minério de ferro. Os experimentos foram realizados no Laboratório Químico de uma empresa localizada no Quadrilátero Ferrífero.

O contexto para realização desses experimentos permeia por um projeto de implementação de uma nova etapa de flotação catiônica reversa em uma usina de beneficiamento. Juntamente a essa etapa, vem-se a necessidade de entender os principais efeitos dos reagentes não degradados nas etapas subsequentes. No caso, deseja-se avaliar o efeito da amina graxa remanescente na filtragem.

Sabe-se, por experiência industrial em usinas de beneficiamento de minério de ferro da região do Quadrilátero Ferrífero, de utilização de filtros cerâmicos, que a amina aglutinada com o ferro, pode obstruir os poros dos filtros cerâmicos, obstruindo a passagem de água no processo de filtração, o que acarreta menor produtividade e maior umidade do filtrado. Além disso, a presença de aminas pode influenciar na formação de espumas, que alteram a tensão superficial das placas, reduzindo a produtividade da torta de filtração.

Dessa maneira, ciente do potencial negativo da amina remanescente no processo de filtragem, busca-se realizar experimentos de bancada para avaliar o potencial da amina remanescente na etapa de filtração.

Os testes foram distribuídos em duas etapas principais descritas nos tópicos abaixo.

4.1.1 Primeira etapa: Determinação da concentração de amina residual ótima

A primeira etapa de testes teve a finalidade de determinar a concentração ideal de amina residual que menos afetasse o processo de filtração. A porcentagem de sólidos da polpa foi fixada em 70% e o pH em torno de 11. Iniciou-se com um teste com 0 g/t de amina, denominado de condição zero, a fim de comparação. Replicou-se o experimento nas mesmas condições, porém aumentando a concentração de amina a cada

batelada de testes. Variou-se a concentração da amina de 0 g/t até 100 g/t, avaliando o efeito dessa concentração na produtividade da torta de *pellet feed* e, conseqüentemente, na umidade da torta.

A partir desse teste, também foi selecionada a concentração de amina residual que maximiza os efeitos negativos desse reagente na filtração, ou seja, que minimiza a produtividade e máxima umidade do minério de ferro fora da faixa ótima (8-11 % de umidade). Essa pior condição, será utilizada na segunda etapa de testes, visando analisar o pior caso do processo.

4.1.2 Segunda etapa: Variação dos parâmetros de processo que afetam a produtividade de filtração

A segunda etapa de testes consistiu em reproduzir a filtração utilizando a concentração crítica de amina residual, e a cada batelada de testes, variou-se parâmetros que afetam a filtração cerâmica: tipo de amina residual, pH e porosidade das placas cerâmicas.

O objetivo do número de mergulhos em cada batelada é analisar o decaimento da produtividade nos primeiros ciclos do processo de filtração, visando estimar o comportamento do processo no começo do ciclo em diferentes situações, de acordo com a Figura 9 e descritas a seguir.

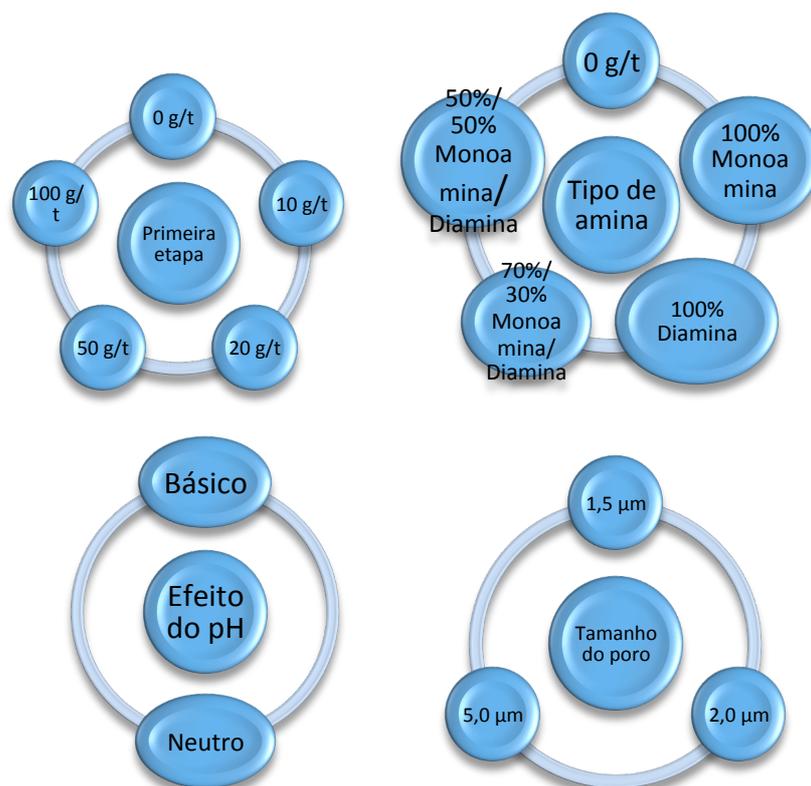


Figura 9 – Fluxograma dos testes realizados e variáveis utilizadas.

Em relação aos testes variando o tipo de amina residual, considerou variações entre a monoamina e diamina, assim como uma mistura de ambas nas seguintes proporções: 100 % de monoamina, 100% diamina, 70%/30% monoamina/diamina, 50%/50% monoamina/diamina. Embora seja mais comum o uso de monoaminas, a presença de diaminas na flotação mostrou-se positiva para o processo, devido a sua eficiência. Sendo assim, relevante para esse projeto, avaliar o efeito da diamina residual na produtividade e umidade da filtragem.

Em relação aos testes variando o pH, foram consideradas duas condições de pH ótimo para a realização da repolpagem: pH próximo de neutro (6,5-7,5) e pH básico (10-13). Para o pH próximo de neutro, preparou-se a polpa de minério de ferro com água destilada. Para o experimento em pH básico, reproduzindo as condições da planta neste pH, preparou-se a utilizando-se de soluções de hidróxido de sódio (NaOH) até atingir o pH 10. Adicionou-se a amina, e ajustou o pH da polpa final com cal (CaO) até atingir o pH 11, sempre homogeneizando a polpa a cada adição de reagente. Avaliou-se a produtividade e umidade do *pellet feed* em ambos experimentos.

Por último, variou-se o tamanho de poro do meio filtrante, pela alteração do tipo de placa cerâmica para filtração à vácuo. Os testes anteriores ocorreram em tamanho de poro igual a 1,5 μm , por serem as placas utilizadas na empresa em questão. Realizou-se mais dois experimentos com filtros cerâmicos com tamanhos de poros iguais a 2 μm e 5 μm . Para esse teste, avaliou-se a produtividade e umidade, visando entender o efeito da amina residual na capilaridade da filtração.

4.2 Caracterização e preparação da amostra de polpa de minério de ferro

Foi utilizada uma amostra extraída de uma pilha de *pellet feed* de uma mina localizada no Quadrilátero Ferrífero. Sendo padronizado o volume da repolpagem em 15 litros, a fim de manter a porcentagem de sólidos em todos os testes realizados.

Os resultados da análise granulométrica são representados na figura 10, e a Tabela 1 é representativa da análise química, sendo o material comercializado pela empresa em questão.

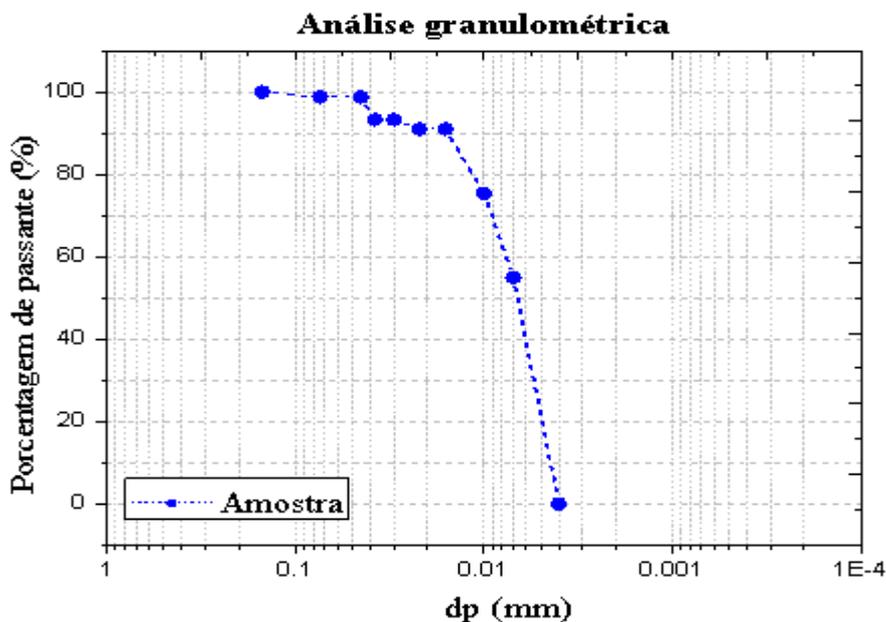


Figura 10 – Curva de análise granulométrica da amostra utilizada.

IDENTIFICAÇÃO	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	TiO ₂	PPC	Fechamento
Amostra de Pellet	66,43	2,7	0,96	0,019	0,018	0,04	1,5	100,00

Tabela 1 – Teores médios dos elementos da amostra de *pellet feed*.

O produto utilizado para preparação das polpas está majoritariamente entre 0,045 e 0,009 mm, contendo 91% do material retido, sendo definida como partículas ultrafinas (Somasundaran, 1980). O teor de Fe, em média, em torno de 66% e de SiO₂ em torno de 2,7%. Dessa forma a granulometria fica adequada, de acordo com as especificações da empresa, para ser filtrada pelo filtro cerâmico, atendendo também a porcentagem de sílica que não prejudica a filtração cerâmica.

O valor da umidade da amostra é de 11,19%. Para a repolpagem das amostras, com o volume fixo em 15 L, foi feita a padronização da densidade em 2,2 g/L e a dosagem de amina diluída a 10% em água destilada em pH 7. Para a primeira etapa quantitativa dos testes foram realizados 5 diferentes tipos de testes, conforme a Tabela 2, sendo o primeiro, sem a dosagem de amina, o ponto de referência para a comparação com os demais. Foram realizados também os testes com amina nas concentrações de 10, 20, 50 e 100 g/t.

Para variar o pH da polpa foi utilizado o hidróxido de sódio, elevando o pH da polpa para 10, adicionando ao fim desse processo a quantidade de amina requerida, e, por fim, o uso da cal, elevando o pH médio 11, garantindo que a amina será representativa para o processo.

4.3 Montagem do aparato de filtração

A primeira etapa de testes consistiu em reproduzir o processo de filtração em laboratório, de forma a obter a umidade e produtividade similar ao produzido na planta de beneficiamento. A esse experimento, atribuiu-se a denominação: condição zero.

Os ensaios de filtração seguiram as etapas de preparação da polpa e foram efetuadas as filtrações por meio de ensaios de *leaf test*. O objetivo desses ensaios foi determinar a umidade e a produtividade da torta de filtração para diferentes dosagens de aminas e diversas variáveis, como pH, porosidade e proporções de amina.

O equipamento de *leaf test* é um equipamento de dimensionamento de filtros. O equipamento gera o vácuo a partir da entrada de água, no tubo ejetor forma-se um vácuo

entre 0,80 e 0,90 bar. Fazendo com que haja a separação do sólido, que fica retido no meio filtrante formando a torta, e do líquido, que fica armazenado no kitassato e denominado filtrado. Na Figura 11 está apresentada uma parte do sistema de vácuo do aparato, no qual uma bomba ligada a esse sistema fornece força necessária para gerar o vácuo utilizado para separar o filtrado da torta para o kitassato ligado ao fim desse sistema.



Figura 11 – Foto de parte do sistema de vácuo do *leaf test* utilizado nos ensaios.

O ensaio ocorreu obedecendo o seguinte procedimento: iniciou-se com a homogeneização manual da polpa e o direcionamento do vácuo com 0,8 bar para a placa cerâmica. Cessada a homogeneização, a placa cerâmica foi inserida à polpa, com o tempo de formação de torta equivalente a 9 segundos. Em seguida manteve-se o vácuo por 30 segundos, para a secagem da torta.

Após o mergulho, há o processo de secagem e desaguamento por 30 segundos, desligando por fim o vácuo, somando-se o processo de retrolavagem de 21 segundos, totalizando 60 segundo de ciclo, ou seja, um ciclo de 1 RPM. Ao final observa-se a torta formada sobre o meio filtrante, conforme a Figura 11.



Figura 12 – Foto de uma torta formada sobre o meio filtrante utilizado nos testes.

Após o fim de cada ciclo, era realizada a raspagem dos dois lados da torta formada sobre a placa para um recipiente, para determinação do teor de umidade e da produtividade da filtração. O ciclo foi realizado por 5 vezes, visando analisar o processo de decaimento da produtividade do meio filtrante, entendendo o impacto da amina no entupimento dos capilares ao longo dos mergulhos.

Finalizando o ciclo de 5 mergulhos, foi realizada a limpeza da placa cerâmica com ultrassom. A limpeza é necessária para diminuir o processo de adsorção da placa cerâmica. No início dos testes houve a necessidade de realizar uma limpeza com hipoclorito de sódio, para garantir melhor performance da placa cerâmica.

4.4 Determinação do teor de umidade

O teor de umidade da torta é obtido pela relação entre a quantidade de água da torta e a massa da torta. Pode ser obtida a partir do quociente entre as diferenças das massas úmida e seca; pela massa úmida. Para a secagem, o material foi submetido à

temperatura de $100^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ em estufa. O cálculo do teor de umidade é realizado pela equação a seguir.

$$\textit{Umidade} = \frac{(P_u - P_s)}{P_u}$$

Onde:

P_u: peso úmido da torta;

P_s: peso seco da torta.

4.5 Determinação da produtividade

A taxa unitária de filtração (TUF) é um indicador de produtividade de um sistema de separação sólido-líquido. Corresponde à capacidade de produção referente a uma área de um metro quadrado por um intervalo de uma hora. Para comparar a produtividade do filtro industrial com o ensaio de bancada deve-se usar um fator de conversão (F), sendo multiplicada pela equação da TUF evidenciada a seguir.

$$TUF = \left(\frac{M}{t.A} \right)$$

Onde:

TUF: taxa unitária de filtração;

M: peso seco de torta em tms (tonelada métrica seca);

A: área útil do setor de teste em m²;

t: ciclo de filtração, dado em horas;

5 RESULTADOS DISCUSSÃO

5.1 Determinação da concentração ótima da amina

O método Anova foi utilizado para avaliar estatisticamente o efeito da amina residual na produtividade da filtração. A análise tem como finalidade a avaliação das médias, sendo o fator de análise a concentração de amina residual. Para esta análise foram utilizados os valores apresentados nas Tabelas 2 e 3. Sendo GL o grau de liberdade, SQ a significância dos quadrados médios, QM os quadrados médios que explica os graus de liberdade e o Valor F sendo a variação entre as médias da amostra. A partir da análise da variância, pode-se comprovar que a concentração de amina influencia na produtividade, devido ao fato do valor P (essa probabilidade nos permite determinar quão comum ou raro é o valor F) de 0,006, ser inferior ao valor do nível de significância, de 0,05. Esse fato indica que as alterações nas médias das produtividades obtidas nos testes de bancada estão atreladas à variação da quantidade de amina residual na filtração. Foi utilizado o software Minitab para fomentar essa análise de variância.

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Concentração de Amina (g/T)	4	0.1637	0.040916	5.11	0.006
Erro	19	0.1523	0.008014		
Total	23	0.3159			

Figura 13 – Análise Anova da produtividade.

A seguir foi utilizado as comparações de Tukey, que tem como objetivo testar formalmente se a diferença entre um par de grupos é estatisticamente significativa. Confirmando os resultados da Figura 14.

Comparações Emparelhadas de Tukey

Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey e Confiança de 95%

Concentração de Amina (g/T)	N	Média	Agrupamento
100	5	2.1548	A
20	4	2.1478	A
0	5	2.1311	A
50	5	2.0887	A B
10	5	1.9345	B

Figura 14 – Comparações emparelhadas de Tukey da produtividade.

A mesma análise foi realizada para a umidade, entretanto o valor P, de 0.351, foi maior que o valor do nível de significância, de 0,05. Esse fato indica que as alterações nas médias das umidades obtidas nos testes de bancada não estão atreladas à variação da quantidade de amina residual na filtragem, mas sim ao tamanho da torta. Portanto, a umidade não é estatisticamente significativa para os resultados.

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Concentração de Amina (g/T)	4	4.676	1.1691	1.18	0.351
Erro	19	18.802	0.9896		
Total	23	23.479			

Figura 15 – Análise Anova da umidade.

Para comprovar a teoria é necessário analisar os gráficos de resíduos de produtividade. Primeiramente analisa-se a normalidade dos dados, como os dados estão linearmente distribuídos, pode assumir que os resíduos não se desviam substancialmente de uma distribuição normal. Os valores ajustados são homocedáticos, isto é, estão distribuídos aleatoriamente e tem variância constante, os resíduos se distribuem aleatoriamente em torno de uma linha central, sem tendência ou dependência. O histograma segue uma distribuição gauseana, podendo determinar que existem *outliers*, como por exemplo o teste com 10 g/t de amina na primeira etapa. O gráfico de resíduos

versus ordem não mostra qualquer padrão, portanto não há dependência dos dados com o tempo.

Esses dados foram analisados estatisticamente, a princípio, para validar a teoria apresentada nos próximos capítulos dos resultados. Aferindo assim a veracidade dos dados discutidos, dando embasamento a teoria.

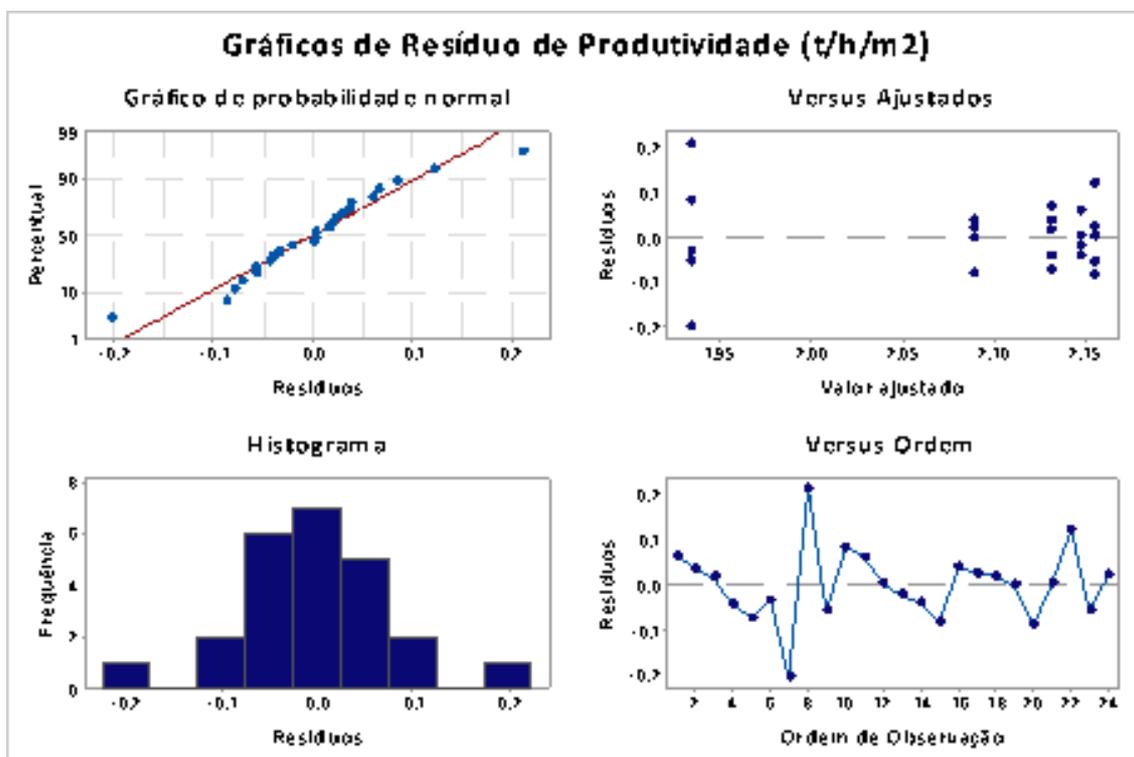


Figura 16 – Análise de resíduos para efetivação da teoria de Anova.

5.1.1 Dados experimentais da primeira etapa

A análise pôde ser feita a partir de um teste com 0 g de amina residual, que foi usado de comparativo para os testes subsequentes com 10, 20, 50 e 100g de amina residual, com o pH neutro.

Foram realizados 05 (cinco) mergulhos para cada teste, visando analisar a adsorção da placa nos primeiros ciclos do processo. Foram medidos o peso úmido e o peso seco, a partir dele foram analisados a umidade e a TUF. Os resultados são descritos de apresentados na Tabela 2.

Vale ressaltar que a Tabela 2 é necessária para avaliar o decaimento entre cada mergulho, entretanto, as análises feitas são com bases nas médias de cada teste. Mesmo assim a tabela a seguir é uma necessária fonte de informação.

Testes	Peso úmido líq. (g)	Peso Seco líq. (g)	Umidade (%)	TUF (t/h/m ²)
Mergulho 1 - 0 g/ton	825,11	732,57	11,22%	2,20
Mergulho 2 - 0 g/ton	804,96	722,10	10,29%	2,17
Mergulho 3 - 0 g/ton	789,72	715,37	9,41%	2,15
Mergulho 4 - 0 g/ton	768,10	695,62	9,44%	2,09
Mergulho 5 - 0 g/ton	762,38	686,22	9,99%	2,06
Mergulho 1 - 10g/ton	691,45	633,46	8,39%	1,90
Mergulho 2 - 10g/ton	628,29	576,78	8,20%	1,73
Mergulho 3 - 10g/ton	791,08	715,58	9,54%	2,15
Mergulho 4 - 10g/ton	692,90	625,60	9,71%	1,88
Mergulho 5 - 10g/ton	751,89	672,81	10,52%	2,02
Mergulho 1 - 20g/ton	822,67	736,08	10,53%	2,21
Mergulho 2 - 20g/ton	801,18	716,82	10,53%	2,15
Mergulho 3 - 20g/ton	793,25	710,62	10,41%	2,14
Mergulho 4 - 20g/ton	788,31	708,50	10,12%	2,13
Mergulho 5 - 20g/ton	772,72	702,40	9,10%	2,11
Mergulho 1 - 50g/ton	763,29	669,40	12,30%	2,01
Mergulho 2 - 50g/ton	775,81	708,53	8,67%	2,13
Mergulho 3 - 50g/ton	775,45	705,21	9,06%	2,12
Mergulho 4 - 50g/ton	768,85	702,01	8,69%	2,11
Mergulho 5 - 50g/ton	758,43	696,01	8,23%	2,09
Mergulho 1 - 100g/ton	759,77	689,07	9,31%	2,07
Mergulho 2 - 100g/ton	786,63	718,93	8,61%	2,16
Mergulho 3 - 100g/ton	836,43	758,63	9,30%	2,28
Mergulho 4 - 100g/ton	764,05	698,89	8,53%	2,10
Mergulho 5 - 100g/ton	798,11	725,80	9,06%	2,18

Tabela 2 – Dados do teste 1 visando análise quantitativa da amina residual.

5.1.1.1 Determinação da concentração de amina residual crítica

O teste com 0 gramas de amina foi utilizado como parâmetro de comparação para as demais situações, por ser a situação mais próxima da atual. Pelo *boxplot* da Figura 17 pode-se observar uma produtividade média de 2,13 t/h/m².

Pode-se observar que os testes realizados com 10 g/t de amina e 50 g/t de amina geraram piores resultados de produtividade, por serem os únicos abaixo da média do cenário atual. Entretanto os testes com 10 g/t de amina apresentam uma variância maior dos resultados e uma média menor de produtividade e os testes com 50 g/t de amina apresentam um decaimento similar da produtividade se comparado com o teste 0.

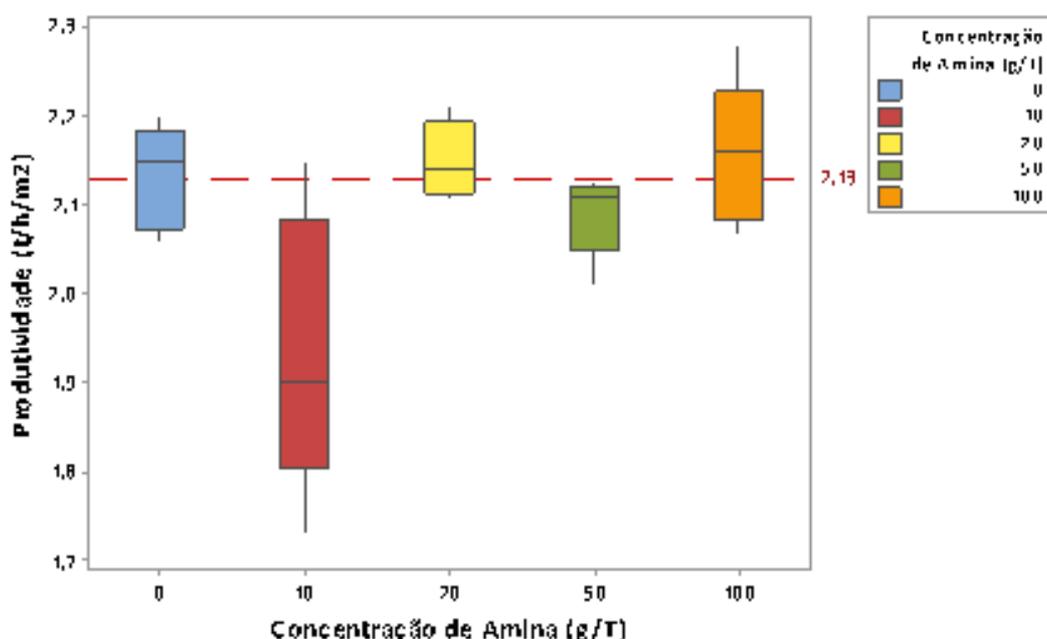


Figura 17 – *Boxplot* de produtividade para diferentes concentrações de amina residual.

Entretanto, apesar da umidade não ter significância estatística se comparado à concentração de amina, a umidade está atrelada a produtividade, pois quanto maior a torta, menor a eficiência da secagem caso não haja alteração no ciclo de rotação do filtro e no vácuo gerado pela bomba de vácuo.

Apesar da variância de umidade do caso com 10 g/t de amina, conforme a Figura 18, pode-se observar que a maioria dos resultados são mais próximos das médias de umidade, portanto a baixa produtividade para essa situação não prejudica a qualidade do produto final.

Graficamente, constata-se que a melhor situação fica evidente com 20 g/t de amina, que apresenta melhores resultados de produtividade associada a uma umidade semelhante a gerada pelo processo atual. Podendo, assim, manter as especificações requeridas.

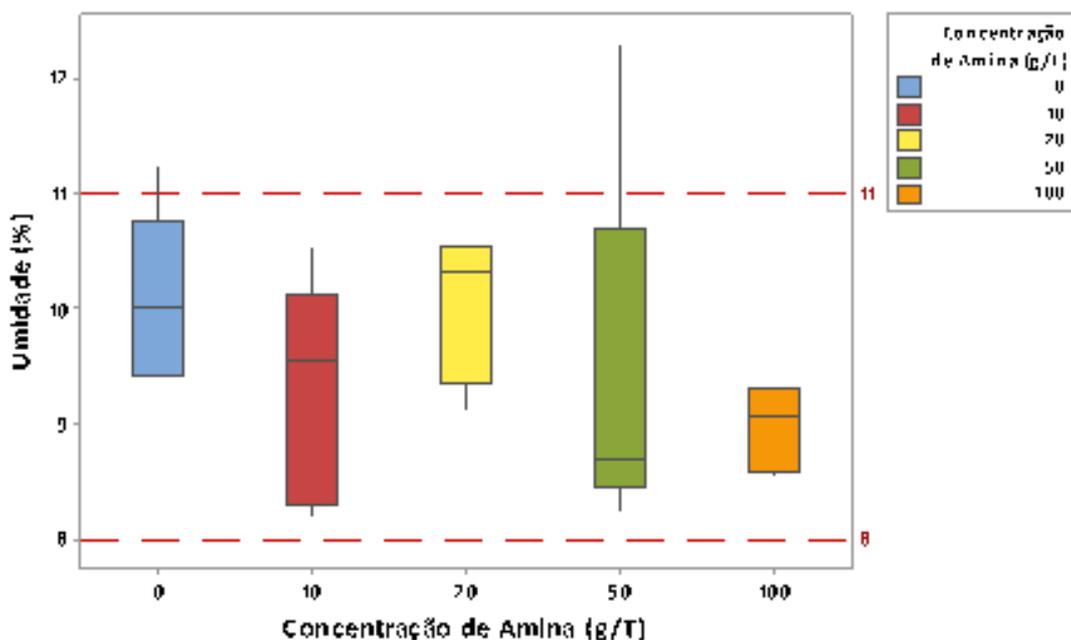


Figura 18 – *Boxplot* de umidade para diferentes concentrações de amina residual.

Portanto, a partir do *bloxpot* apresentado na Figura 18, pode-se avaliar a umidade para as diferentes concentrações de amina. Percebe-se que apesar da constante produtividade da filtragem com 50 g/t de amina há uma grande variância da umidade, essa inconstância acaba prejudicando o produto final para o cliente, elevando o nível de incerteza do produto comercializado. Além de gerar os mesmos problemas citados em situações com grandes quantidades de amina residual.

Entretanto, uma grande quantidade de amina representa uma maior chance de cegamento dos capilares, por ser um elemento gorduroso, o que gerará mais paradas para revitalização das placas.

Com uma produtividade média de 2,092 t/h/m² e uma umidade média de 9,39% a concentração de 50 g/t com valores próximos quando comparado à concentração de 10 g/t que possui 1,936 t/h/m² e 9,27% de médias, respectivamente. Porém é relevante ao estudo salientar que, as perdas de eficiência da capacidade capilar das placas acarretam

em necessidades maiores de efetuar paradas para revitalizações das placas cerâmicas. Portanto, reduz-se a utilização do filtro e, conseqüentemente, a produtividade do mesmo ainda mais.

Apesar da Tabela 2 e da análise gráfica das Figuras 17 e 18 não serem suficientes para definir a concentração crítica de amina residual, definiu-se a concentração de 50 g/t como a situação crítica de amina residual, por já ser considerada uma concentração alta de amina que poderia chegar na etapa de filtragem.

5.1.2 Dados experimentais da segunda etapa

A partir da definição da amina residual crítica foram conduzidos os testes da segunda etapa. Essa segunda batelada foi dividida em três etapas, variando o tipo de amina, o pH e a porosidade da placa cerâmica, como explicitado. Os resultados são apresentados na Tabela 3.

Diferentemente da primeira etapa da análise do trabalho, que é realizada uma análise quantitativa, a segunda etapa visa uma comparação qualitativa da amina residual.

Ensaio	Nº do mergulho	Peso úmido líq. (g)	Peso Seco líq. (g)	Umidade (%)	TUF (t/h/m ²)
0% amina / 1,5 µm	1	861,6	767,1	10,97%	2,3
0% amina / 1,5 µm	2	463,9	416,4	10,24%	1,25
0% amina / 1,5 µm	3	443,4	402,9	9,13%	1,21
0% amina / 1,5 µm	4	389,8	352,6	9,54%	1,06
0% amina / 1,5 µm	5	301,9	277,8	7,98%	0,83
0% amina / 1,5 µm	6	253,8	230,1	9,34%	0,69
50% Monoamina/50% Diamina pH=11	1	296,3	267,9	9,58%	0,8
50% Monoamina/50% Diamina pH=11	2	173,1	157,5	9,01%	0,47
50% Monoamina/50% Diamina pH=11	3	97,2	90	7,41%	0,27
50% Monoamina/50% Diamina pH=11	4	71,6	65,1	9,08%	0,2
50% Monoamina/50% Diamina pH=11	5	51,3	47,4	7,60%	0,14
50% Monoamina/50% Diamina pH=11	6	56,6	51,5	9,01%	0,15

Tabela 3 – Dados do teste 2 visando análise qualitativa da amina residual.

Ensaio	do mergulho	Peso úmido líq. (g)	Peso Seco líq. (g)	Umidade (%)	TUF (t/h/m ²)
100% Monoamina	1	472,1	429	9,13%	1,29
100% Monoamina	2	471,3	427,2	9,36%	1,28
100% Monoamina	3	356,1	324,2	8,96%	0,97
100% Monoamina	4	291,6	266,9	8,47%	0,8
100% Monoamina	5	234,8	214	8,86%	0,64
100% Monoamina	6	200,5	184,2	8,13%	0,55
100% Diamina	1	523,1	470,2	10,11%	1,41
100% Diamina	2	458,5	413,5	9,81%	1,24
100% Diamina	3	313,9	285,8	8,95%	0,86
100% Diamina	4	214,2	196,1	8,45%	0,59
100% Diamina	5	144,1	132,4	8,12%	0,4
100% Diamina	6	110,1	101,8	7,54%	0,31
70% Monoamina/30% Diamina	1	569,7	511,2	10,27%	1,53
70% Monoamina/30% Diamina	2	543,6	489,6	9,93%	1,47
70% Monoamina/30% Diamina	3	467,6	424,9	9,13%	1,27
70% Monoamina/30% Diamina	4	369,2	336,6	8,83%	1,01
70% Monoamina/30% Diamina	5	334	306,1	8,35%	0,92
70% Monoamina/30% Diamina	6	253,5	232,8	8,17%	0,7
50% Monoamina/50% Diamina pH=7	1	506	459,1	9,27%	1,38
50% Monoamina/50% Diamina pH=7	2	475,2	431,7	9,15%	1,3
50% Monoamina/50% Diamina pH=7	3	421,2	381,8	9,35%	1,15
50% Monoamina/50% Diamina pH=7	4	341,5	312,6	8,46%	0,94
50% Monoamina/50% Diamina pH=7	5	237,2	218,4	7,93%	0,66
50% Monoamina/50% Diamina pH=7	6	177,6	163,6	7,88%	0,49
50% Monoamina/50% Diamina 2 µm	1	849,5	764,6	9,99%	1,6
50% Monoamina/50% Diamina 2 µm	2	542,1	491,9	9,26%	1,03
50% Monoamina/50% Diamina 2 µm	3	495,7	452	8,82%	0,95
50% Monoamina/50% Diamina 2 µm	4	438,4	402,3	8,23%	0,84
50% Monoamina/50% Diamina 2 µm	5	345,4	317	8,22%	0,66
50% Monoamina/50% Diamina 2 µm	6	25,3	23,8	5,93%	0,05
50% Monoamina/50% Diamina 5 µm	1	926,1	825,4	10,87%	1,73
50% Monoamina/50% Diamina 5 µm	2	840	752,8	10,38%	1,58
50% Monoamina/50% Diamina 5 µm	3	752,1	673,3	10,48%	1,41
50% Monoamina/50% Diamina 5 µm	4	627,1	566,7	9,63%	1,19
50% Monoamina/50% Diamina 5 µm	5	433,8	398,7	8,09%	0,84
50% Monoamina/50% Diamina 5 µm	6	312,7	289,4	7,45%	0,61

Tabela 3 (continuação) – Dados do teste 2 visando análise qualitativa da amina residual.

Foram realizados 6 (seis) mergulhos nesse teste a fim de conferir uma maior variabilidade e entender o funcionamento da filtração nos primeiros mergulhos do ciclo. A partir dos dados foi possível realizar a análise estatística da umidade e da produtividade. O objetivo dessa segunda batelada de testes foi qualificar as variáveis dos parâmetros de processo que afetam a produtividade da filtração a partir da inclusão da flotação.

5.1.2.1 Efeito do tipo de amina

O teste com 0 gramas de amina foi realizado e novamente utilizado como parâmetro de comparação para as demais situações, por ser a situação mais próxima da atual. Pelo *bloxpot* da Figura 19 pode-se observar uma produtividade média de 1,22 t/h/m².

A constatação mais evidente, e que vale ser frisada, é a clara queda de produtividade com a concentração igual de monoamina e diamina. Mostrando que composições com essas concentrações são extremamente prejudiciais pra a etapa de filtração. A queda da permeabilidade da placa fica evidente logo no primeiro mergulho, com uma queda de produtividade de 65% se comparado ao teste 0, conforme a Tabela 3.

Pode-se afirmar que a queda de produtividade com a dosagem de monoamina e diamina se dá pelas propriedades reológicas da amina.

Ainda, uma importante confirmação do teste é que a diamina reduz a produtividade da filtração, por ser mais viscosa há uma maior capacidade de adsorção da placa cerâmica, diminuindo sua eficiência logo no começo do ciclo.

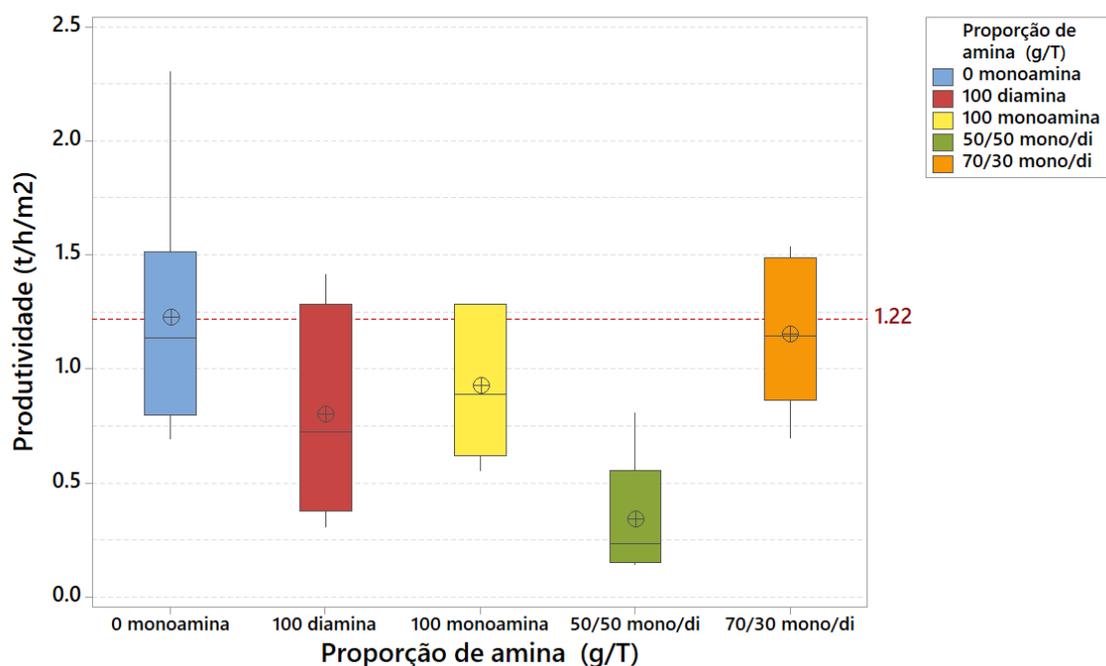


Figura 19 – *Boxplot* de produtividade para diferentes concentrações de monoamina e diamina.

Entretanto, a ausência da diamina não garante uma melhor performance. Os testes sem a presença da diamina não garantem melhor eficiência. A partir do segundo mergulho nota-se uma queda de 24% na produtividade com 100% de monoamina.

Apesar da melhor performance da monoamina no processo final da flotação, a diamina oferece maior eficiência na flotação em termos de produtividade, assim como afirmado por Matos (2017). Portanto uma combinação dos dois reagentes é valiosa ao processo com essas especificações minerais.

A melhor situação é representada na proporção de 70% de monoamina e 30% de diamina, não apenas por manter a produtividade levemente maior, quando comparado ao teste 0, mas por também apresentar uma umidade mais constante ao produto final.

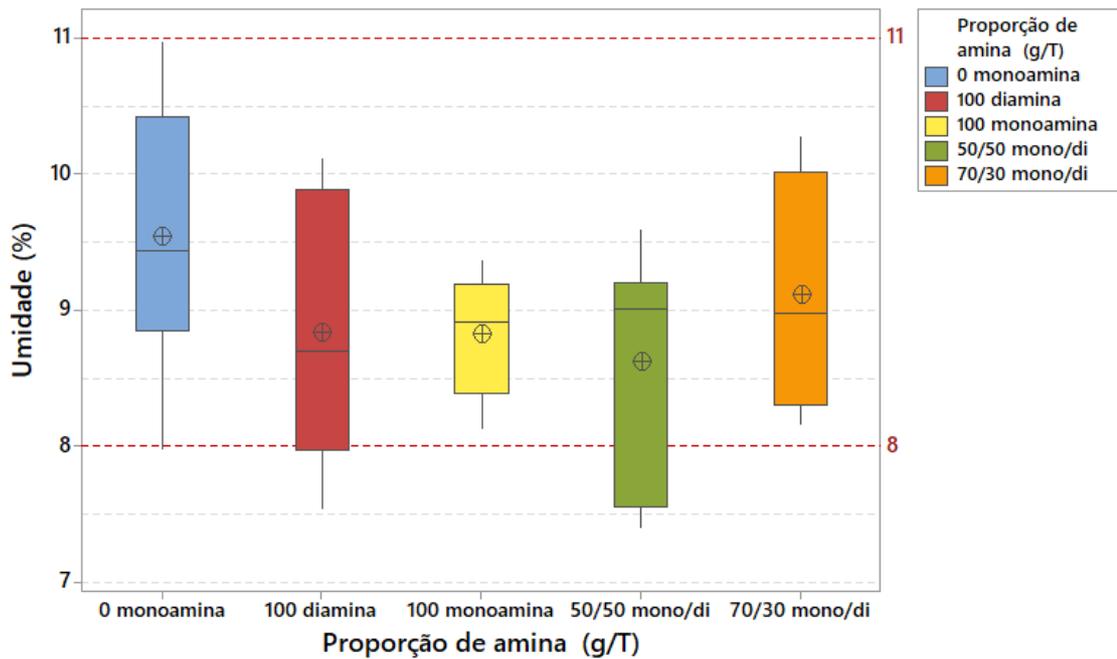


Figura 20 – *Boxplot* de umidade para diferentes proporções de monoamina e diamina.

É relevante ao estudo salientar o efeito das proporções iguais de monoamina e diamina, que além da perda da produtividade, geram produtos com alta umidade para pequenas proporções de torta filtrada. Mostrando a sua baixa eficiência nos dois parâmetros de comparação.

5.1.2.2 Efeito do pH

O pH é um importante fator a ser observado, o pH em torno de 7 utilizado na primeira etapa, apesar de apresentar melhores valores de produtividade, conforme apresentado na Figura 21, não corresponde ao valor efetivo utilizado na etapa de flotação catiônica reversa de minério de ferro.

Nessa etapa dos testes, foram realizados à mesma condição do caso com 50% de monoamina e 50% de diamina, por ser o caso mais crítico, qualitativamente, considerando assim a pior hipótese.

A partir da Figura 21, fica evidente a disparidade com a polpa em pH neutro em relação ao pH básico. Entretanto essa diferença se dá ao fato da amina não ser ativada

com o pH neutro, como dito anteriormente, apenas a partir do pH 10,5 há a ativação da mesma.

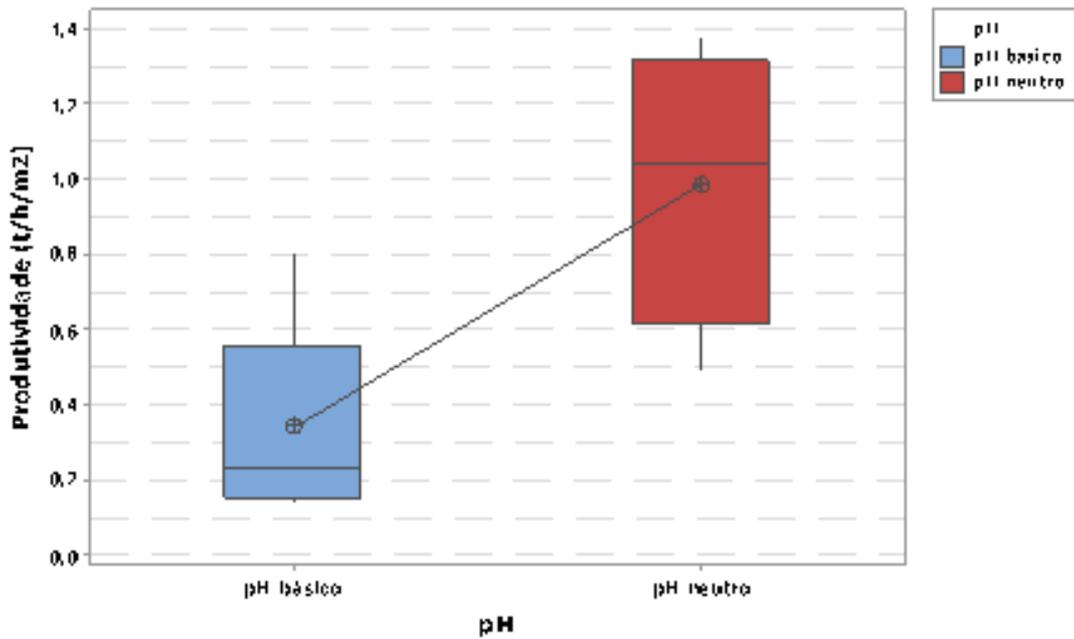


Figura 21 – *Boxplot* de produtividade para diferentes situações de pH.

A Figura 22, comprova a teoria que a umidade está atrelada à produtividade, pois quanto maior a torta, menor a eficiência da secagem caso não haja alteração no ciclo de rotação nem no vácuo gerado. A proporção de decaimento não é a mesma, pelo fato já comprovado anteriormente que a amina interfere no efeito de capilaridade na placa cerâmica.

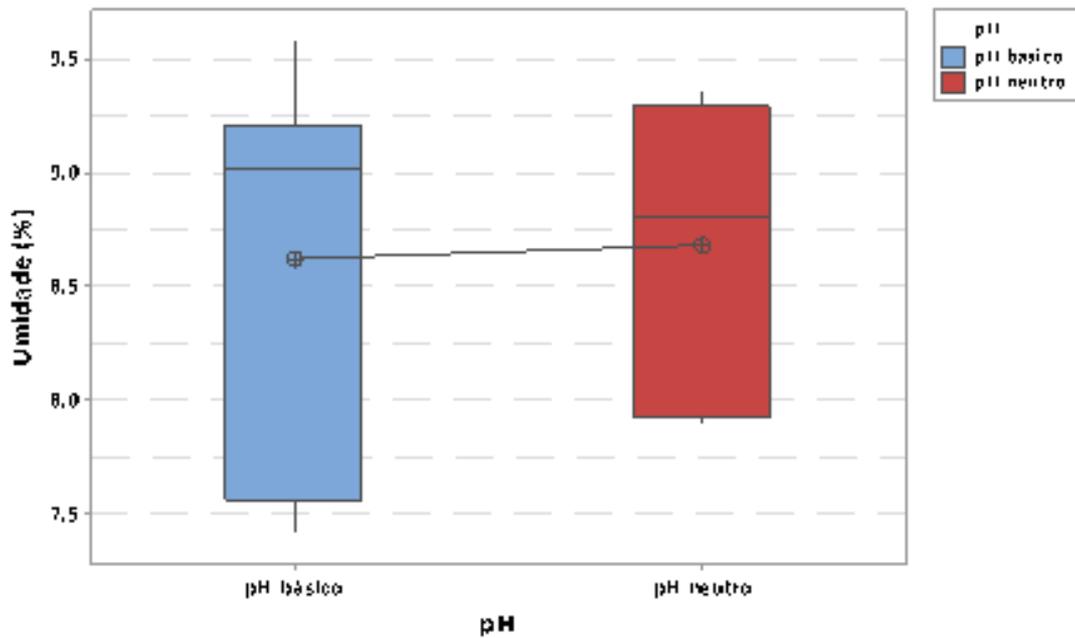


Figura 22 – *Boxplot* de produtividade para diferentes situações de pH.

5.1.2.3 Efeito do tamanho do capilar do meio filtrante

Outra teoria explorada nesse trabalho é o comportamento da placa cerâmica com a amina a partir da redução do princípio da capilaridade. Quanto maior o capilar, maior deve ser a energia gasta para atrair o líquido através da placa e deixar passar a água pelos seus capilares.

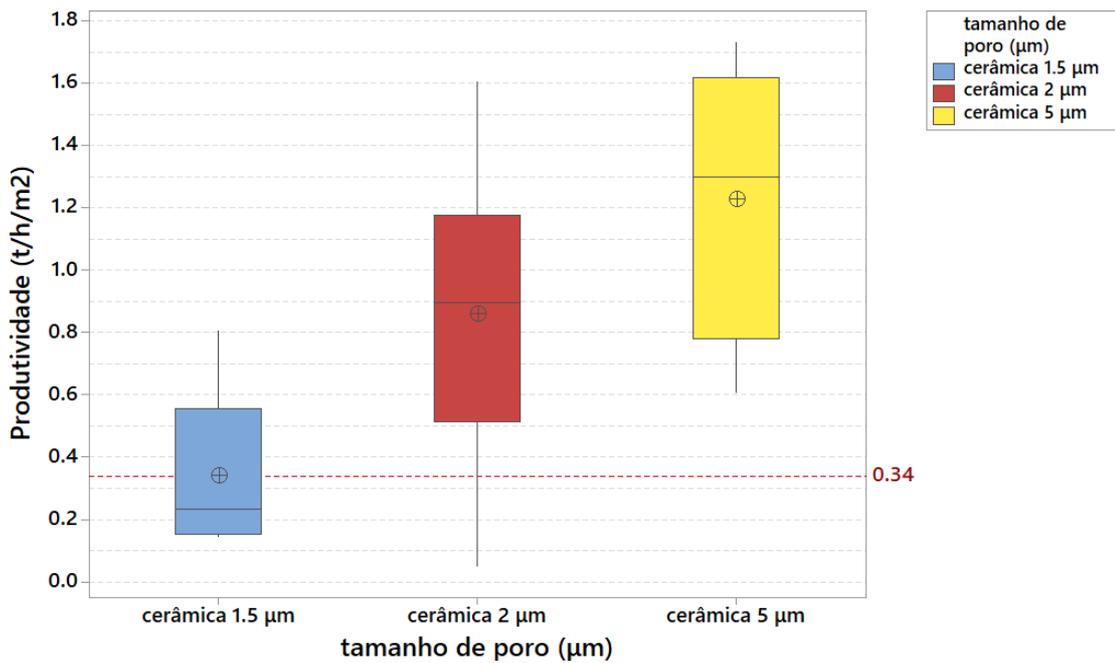


Figura 23 – *Boxplot* de produtividade para diferentes capilaridades da placa cerâmica.

Por outro lado, o problema de se ter placas com capilares com aberturas maiores, é a possibilidade de haver passagem de ar, o que propicia um filtrado mais turvo. Essa turbidez se dá ao fato de haver, junto com a passagem de ar, contaminação por partículas ultra finas.

De acordo com os resultados do *leaf test* para essa situação é possível atestar um ganho de produtividade com o aumento dos capilares, indicando a possibilidade da amina agir como um auxiliar de filtração.

Além do ganho de produtividade é possível perceber uma maior adequação dos valores de umidade conforme o aumento da capilaridade, o que sustenta a teoria da amina atuar como coletor de sílica e auxiliar de filtração, trazendo melhor eficiência se comparado a pior composição de monoamina e diamina.

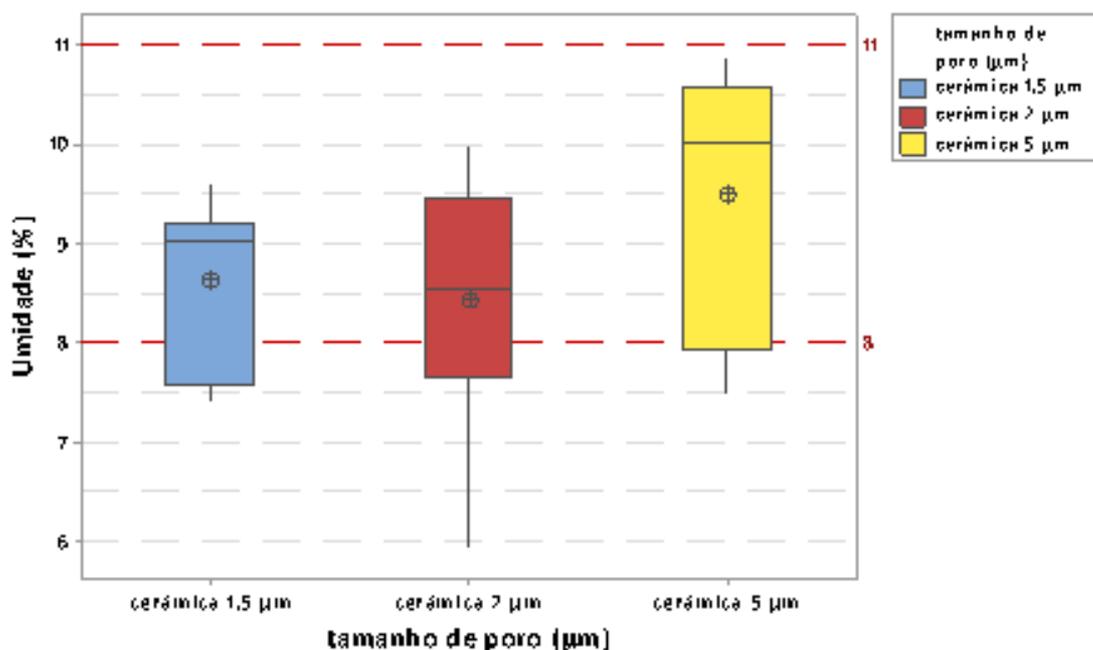


Figura 24 – Boxplot de umidade para diferentes capilaridades da placa cerâmica.

5.1.2.4 Parâmetros de maior influência sobre efeito da amina residual

É possível perceber que a composição da amina residual, o pH e a capilaridade afeta diretamente a eficiência da filtração. Entretanto, apesar de serem variáveis distintas, são dependentes e tem capacidades diferentes de influenciar a etapa de filtração.

Com o auxílio do *boxplot* da Figura 25 é possível referenciar as piores situações de eficiência do processo. A composição de 50% de monoamina e 50% de diamina e o pH básico da polpa com 1,5 µm representam o pior cenário, vale ressaltar que a baixa produtividade aliada a baixa utilização, devido a recorrentes paradas para revitalização da placa cerâmica, inviabiliza esse cenário industrialmente.

É importante alertar que esses três casos se referem ao mesmo teste, portanto a combinação desses três fatores que resulta no pior caso.

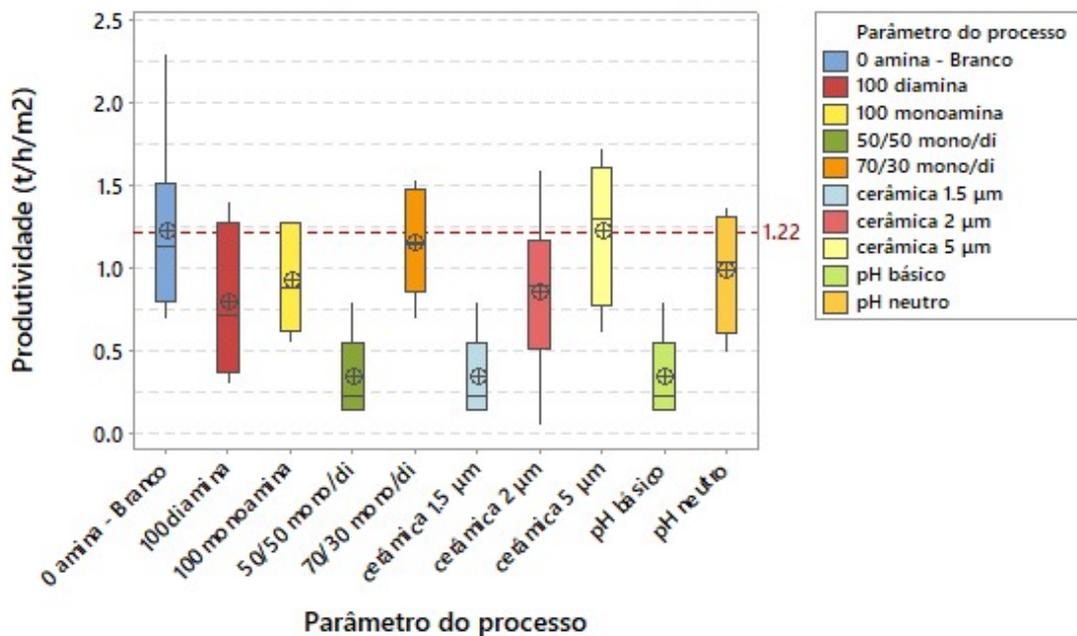


Figura 25 – Boxplot geral de produtividade da segunda etapa de testes.

Embasado nessa associação é possível analisar as variáveis de maior impacto para o novo processo. A Figura 26 retrata os efeitos padronizados desde o maior até o menor efeito. Com o gráfico Pareto é possível determinar quais são os efeitos principais, mas não é possível determinar quais efeitos aumentam ou diminuem o impacto.

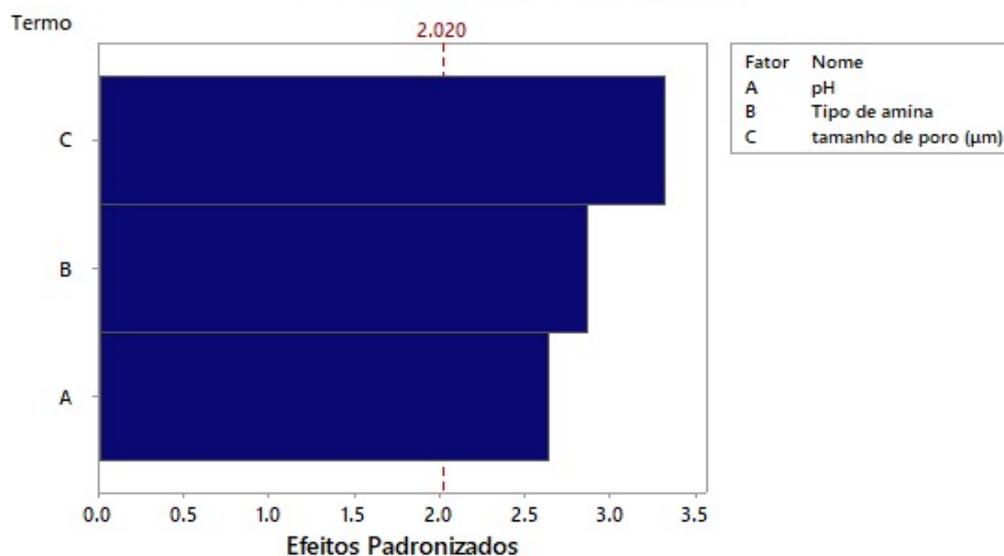


Figura 26 – Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados.

Utilizando todos os valores apresentados anteriormente, pode-se observar que as três variáveis são significantes nos testes, porém o tamanho do capilar é a variável de

maior impacto. Em contrapartida, ainda que significante, o pH é a variável que menos tem influência na produtividade com a adesão do novo processo de flotação.

6 CONCLUSÃO

Com base na primeira etapa de testes foi estabelecida a concentração de 50 g/t como a concentração crítica de amina residual que pode interferir na produtividade do filtro cerâmico.

O tipo de amina residual impactou na produtividade do filtro. E conforme a segunda etapa a proporção 50 % mono/diamina foi a que mais afetou o processo. Porém a combinação de 70% de monoamina e 30% de diamina pode ser promissora para evitar redução da produtividade e manter a umidade na faixa de especificação.

Em pH básico o efeito da amina residual é intensificado e a perda de produtividade é maior. A polpa de minério de ferro, quando filtrada em pH neutro é considerada a melhor condição de filtração.

Ao analisar o impacto da amina residual conforme a alteração da porosidades é possível perceber o ganho de produtividade conforme o aumento dos capilares.

Vale ressaltar que as aminas são compostos oleosos, o que acarreta em maiores necessidades de paradas para revitalizações, diminuindo a utilização dos filtros cerâmicos. Entretanto, parece haver melhores condições e combinações destes reagentes e a polpa que podem ser utilizados com menores prejuízos na produção dos filtros cerâmicos.

7 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ARAUJO JUNIOR, A.M, **Influência das variáveis de processo na filtração cerâmica de polpas de minério de ferro.** Rio de Janeiro, 2014. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

BATISTELI, G.M.B. **Amina residual na flotação catiônica reversa de minério de ferro.** Belo Horizonte, 2007. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais.

CGEE. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos Siderurgia no Brasil. 2010-2025. **Subsídios para tomada de decisão** – Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2010. Série Documentos Técnicos, 9.

CHAVES, A. P. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios.** São Paulo: Signus Editora, vol. 2., 1996, 424p

CHAVES, A.P; LEAL FILHO, L.S; BRAGA, P.F.A. **Tratamento de minérios- 6º Edição. Capítulo 10 – Flotação,** 2004, p. 405-455.

DORR, J. V. N.. **Nature and origin of the high- grade hematite ores of Minas Gerais, Brazil.** Economic Geology, 1965, p 1 – 46.

DORR, J. V. N.. **Supergene iron ores of Minas Gerais, Brazil.** Economic Geology, 1964, p 1203 – 1240.

DE ARAUJO, A. C. & PERES, A. E. C. **Froth flotation: relevant facts and the Brazilian case.** Rio de Janeiro: CETEM/CNPq, 1995. (Tecnologia Mineral, 70).

DIAS, C.L.P; Silva, L.M; Peres, A.E.C; Valadão, G.E.S. **Utilização de reagentes auxiliares na filtração.** Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 57, n. 4, p. 221-234, Dec. 2004.

DIAS, C.L.P; VALADÃO, G.E.S; AMARANTE, S.C; ARAÚJO, A.C. **Características de tortas de filtração em presença de reagentes auxiliares de filtração.** Pernambuco, 2002. XIX ENTMMME.

FILIPPOV, L.O.; SEVEROV, V.V.; FILIPPOVA, L.V. **An overview of the beneficiation of iron ores via reverse cationic flotation.** International journal of mineral processing, 127 (2014), p 62-69.

FRANÇA, S.C.A; CASQUEIRA, R.G, **Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais.** CETEM/MCT. Capítulo 24, p 411- 422.

GÖRRES, G.; SILVA, J.N.A.; NUUTIEN, J. **Experiences with modern dewatering Technologies in fine iron ore application.**

LOPES, G.M. **Flotação direta de minérios de ferro.** Ouro Preto, 2009. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto.

LUZ, A.B; LINS, F.A.F. **Tratamento de minérios- 6° Edição. Capítulo 1 – Introdução ao tratamento de minério,** p. 3-20.

MATOS, V.E. **Seletividade de reagentes na flotação reversa de minério de ferro.** Belo Horizonte, 2017. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais.

NASCIMENTO, D.R. **Flotação aniônica de minério de ferro.** Ouro Preto, 2010. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto.

NEDER, E.E; LEAL FILHO, L.S. **O uso de aminas graxas e seus derivados na flotação de minérios brasileiros.** Natal, 2005. XXI ENTMMME.

PERES, A. E. C., COELHO, E. M., de ARAÚJO, A. C. (1980) **Flotação, espessamento, deslamagem e floculação seletiva.** In: COELHO, E.M. Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia; In Memorian Prof. Paulo Abib Andery. Recife: ITEPCNPq, p. 205-286.

STAPELFELDT, F.; CARVALHO, F.F.; REIS, O.B. **Quantificação, decomposição e reciclagem de aminas nos resíduos de flotação reversa de minério de ferro.** Pernambuco, 2002. XIX ENTMMME.

SILVA, A.M. **Caracterização do processo de degradação de uma fibra de poliamida utilizada como meio filtrante na indústria mineral.** Ouro Preto, 2006. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto.

SILVA, E.C., SOUZA, A.S., 2015. **Desafios Do Processamento Em Umidade Natural / Rotas De Mínimo Consumo De Água,** in: XXVI Encontro Nacional de

Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa.

SILVA, A.Q.N.; MONTENEGRO, L.C.M.; GALERY, R.; TURRER, H.D.G.; MAZZINGHY, D.B.; AQUINO JUNIOR, L.C. **Concentração de minério de ferro itabirítico através de célula de flotação pneumática.** Tecnologia em metalurgia, materiais e mineração, vol.12, p 129-133. São Paulo, 2015.

SOMASUNDARAN, P. **Fine particles processing aggregation.** In. Proceedings of the International Symposium on Fine Particle Processing. Las Vegas, 1980.

SUTHERLAND, K., 2008, **Filters and Filtration Handbook.** 5 ed. Hungria, Elsevier.

ULIANA, A. **A célula pneumática e sua aplicabilidade à flotação reversa do minério de ferro itabirítico.** São Paulo, 2017. Dissertação – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Minas e Petróleo.

VALADÃO, G.E.S; SILVA, J.C.F; AMARANTE, S.C. **Tortas de filtragem simuladas em 3D.** Rio de Janeiro, 2001. VI SHMMT/XVIII ENTMMME.