



INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE PROCESSO NA FILTRAGEM CERÂMICA
DE POLPAS DE MINÉRIO DE FERRO

Adail Mendes Araujo Junior

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

Orientador: Luís Marcelo Marques Tavares

Rio de Janeiro
Outubro de 2014

INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE PROCESSO NA FILTRAGEM CERÂMICA
DE POLPAS DE MINÉRIO DE FERRO

Adail Mendes Araujo Junior

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS.

Examinada por:

Prof. Luís Marcelo Marques Tavares, Ph.D.

Dr. Henrique Dias Gatti Turrer, D.Sc.

Dr. Silvia Cristina Alves França, D.Sc.

Prof. Ericksson Rocha e Almendra, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
OUTUBRO DE 2014

Araujo Junior, Adail Mendes

Influência das variáveis de processo na filtragem cerâmica de polpas de minério de ferro. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2014.

XV, 90 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Luís Marcelo Marques Tavares

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2014.

Referências Bibliográficas: p. 82-85.

1. Filtragem. 2. Minério de Ferro. 3. Cerâmica. I. Tavares, Luís Marcelo Marques. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. III. Título.

A minha esposa, que com muito carinho e apoio não mediu esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao orientador, Prof. Luís Marcelo, por todos os ensinamentos durante esses três anos de trabalho. Agradeço também pela contribuição para a minha formação acadêmica, profissional e pessoal durante esse período de convívio.

Agradeço à equipe da Anglo American, que realizou os ensaios de bancada e ensaios piloto. Meu especial agradecimento ao Eng. Phillipe Alvarenga e aos Técnicos Reginaldo Motta e Otávio Guimarães, pelo excelente trabalho realizado.

Agradeço ao Gerente de Filtragem Adarlan Silva, por todo o patrocínio e apoio para a conclusão desse mestrado. Sem sua colaboração técnica e profissional esse trabalho não poderia ter sido concluído.

Agradeço aos colegas de trabalho Carlos Augusto, Lúcio Antunes, Mariana Monteiro, Sergio Caldeira, Wallace Martins, Gilmar Bazoni, Aloísio Fonseca e Ronildo Soeiro pela compreensão e apoio.

Agradeço à área de desenvolvimento de processo em planta piloto da Anglo American pelo empenho e dedicação para a geração das amostras que foram utilizadas nos ensaios. Agradeço especialmente ao Dr. Henrique Turrer pelas colaborações técnicas durante a elaboração desse trabalho.

Agradeço a minha família, em especial a minha esposa, pelo apoio e compreensão durante todos esses três anos de trabalho e dedicação ao mestrado.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.).

INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE PROCESSO NA FILTRAGEM CERÂMICA DE POLPAS DE MINÉRIO DE FERRO

Adail Mendes Araujo Junior

Outubro/2014

Orientador: Luís Marcelo Marques Tavares

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Embora seja uma tecnologia recente, a filtração cerâmica está se tornando uma alternativa muito atraente para a separação sólido-líquido na indústria mineral. No caso do minério de ferro, a sua aplicação tem grande potencial de sucesso, mas o entendimento da influência das variáveis na operação é ainda limitado. O presente trabalho investiga, por meio de experimentos fatoriais, a influência do percentual de sólidos, do pH, da temperatura da polpa e da dosagem de reagentes coagulantes e surfactantes no desempenho da filtração cerâmica de polpas de minério de ferro, a partir de ensaios em escala de bancada e piloto. Os resultados mostraram que o percentual de sólidos é a variável que promove maior impacto sobre a filtração cerâmica e que a adição de coagulante pode ser uma forma de aumentar a produtividade do sistema de filtração para menores percentuais de sólidos. Também foi observado que a adição de surfatantes não é recomendada à filtração cerâmica do minério em questão em razão da expressiva redução da produtividade da placa por ela causada.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

INFLUENCE OF PROCESS VARIABLES IN IRON ORE SLURRY FILTRATION
USING CERAMIC FILTERS

Adail Mendes Araujo Junior

October/2014

Advisor : Luís Marcelo Marques Tavares

Department: Metallurgical and Materials Engineering

Although ceramic filtering is a recent technology, it is becoming an attractive alternative for the solid liquid separation in the minerals industry. Regarding iron ore, its application has great potential for success, but understanding the effects of its variables in the performance of filtration is still limited. The present work investigates, using factorial designs, the effects of solids content, pH level, slurry temperature, and dosage of coagulants and surfactants in ceramic filtering performance in solid-liquid separation of iron ore slurries, through lab and pilot scale tests. Results show that solids content is the variable that had the greatest impact in ceramic filtering and that addition of coagulant should be an alternative to increase filtering system productivity at lower solids content. In addition to that, it was observed that the addition of the surfactants studied is not recommended for ceramic filtering the ore in question due to significant reduction in productivity of the plates.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	2
2.1 OBJETIVO GERAL.....	2
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3.1 MECANISMOS DE FILTRAGEM	3
3.1.1 Variáveis que afetam a filtração.....	4
3.1.2 Reagentes auxiliares	14
3.2 TIPOS DE FILTRO.....	24
3.2.1 Filtro de disco a vácuo.....	25
3.2.2 Filtro de tambor	26
3.2.3 Filtro de correia a vácuo	27
3.2.4 Filtro plano	28
3.2.5 Filtro prensa.....	29
3.2.6 Filtro cerâmico.....	30
3.2.6.1 Princípio da capilaridade	31
3.3 PROJETO MINAS-RIO	36
3.3.1 Filtração do projeto Minas-Rio	40
4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	42
4.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	42
4.2 CARACTERIZAÇÃO DO MINÉRIO DE FERRO.....	44
4.3 REAGENTES UTILIZADOS	44
4.4 ENSAIOS DE FILTRAÇÃO EM BANCADA.....	45
4.4.1 Determinação do teor de umidade	49
4.4.2 Determinação da taxa unitária de filtração.....	49
4.5 TESTES DE OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DA FILTRAÇÃO.....	50
4.6 TESTES EM FILTRO PILOTO	51
5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	53
5.1 CARACTERÍSTICAS DAS AMOSTRAS	53
5.2 TESTES EXPLORATÓRIOS	55
5.2.1 Efeito do percentual de sólidos.....	55

5.2.2 Efeito da área superficial específica	57
5.2.3 Efeito do pH.....	58
5.2.4 Efeito da temperatura	59
5.2.5 Efeito da adição de coagulantes	60
5.2.6 Efeito da adição de surfatantes	61
5.2.7 Efeito do nível da bacia	63
5.3 RESULTADOS DA ANÁLISE DA SUPERFÍCIE DE RESPOSTA	64
5.3.1 RESULTADOS DOS TESTES EM FILTRO PILOTO	75
6 CONCLUSÕES	79
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	81
REFERÊNCIAS.....	82

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Filtragem com formação de torta (adaptado de MASSARANI, 2002).....	4
Figura 2 – Desenho representativo de um meio filtrante e uma torta (Adaptado de SILVA, 2006).	6
Figura 3 – Desempenho do filtro COPPE: suspensão aquosa de talco, $A=670 \text{ cm}^2$. (Adaptado de MASSARANI, 1985, <i>apud</i> MASSARANI, 2002).	8
Figura 4 – Relação entre frequência de rotações do filtro e capacidade de filtragem (Adaptado de HALL, 1991).....	9
Figura 5 - Efeito do percentual de sólidos na capacidade do sistema de filtração (Adaptado de HINDSTROM, 1995).	10
Figura 6 – Efeito da área superficial específica e do pH na umidade e produtividade do filtro de disco a vácuo (Adaptado de VALADÃO e PERES, 1997).	11
Figura 7 – Taxa unitária de filtragem (TUF) em função da superfície específica Blaine para várias condições de filtragem industrial de concentrados de minério de ferro (Adaptado de KOBLE e DAHLSTROM, 1979).	12
Figura 8 – Influência da área superficial específica na filtragem (Adaptado de DOELINGER <i>et al.</i> , 2009).	13
Figura 9 – Efeito da temperatura e da concentração de sólidos na capacidade e teor de umidade da filtragem (Adaptado de HÄKKINEN e EKBERG, 2009).	14
Figura 10 – Adsorção de surfatante e influência no grau de hidrofobicidade de partículas (Adaptado de DIAS <i>et al.</i> , 2004).	17
Figura 11 – Influência da adsorção de surfatante no abaixamento da tensão superficial mostrada em um capilar (Adaptado de DIAS <i>et al.</i> , 2004).	17
Figura 12 - Curva de desaguamento em diversas concentrações de flocculante (Adaptado de DIAS <i>et al.</i> , 2004).	18
Figura 13 - Efeito do surfatante sobre a umidade residual da torta e sobre a tensão superficial do filtrado (Adaptado de DIAS <i>et al.</i> , 2004).	18
Figura 14 - Efeito da concentração e do tipo de surfatante no tempo de formação e umidade residual da torta (Adaptado de HOSTEN e SASTRY, 1983).	19
Figura 15 – Teores de umidade das tortas em função da superfície específica dos sólidos no concentrado e do tipo de surfatante, com os surfactantes identificados pelas letras A1 a D1 (DOELINGER <i>et al.</i> , 2009).	20

Figura 16 – Compressão da dupla camada elétrica (Adaptado de KIM <i>apud</i> BRAGANÇA, 2008).	21
Figura 17 – Efeito da adição de reagentes na condição de dispersão das polpas e desempenho na filtração em laboratório (TURRER <i>et al.</i> , 2010).	22
Figura 18 – Taxa de filtração e resistência específica da torta de concentrado de hematita em função do pH (Adaptado de HASELHUHN, SWANSON e KAWATRA, 2012).	23
Figura 19 – Potencial Zeta em função do pH para hematita pura, sílica pura e misturas de sílica e hematita (Adaptado de ESUMI, IDOGAWA E MEGURO, 1988 <i>apud</i> HASELHUHN, SWANSON E KAWATRA, 2012).	24
Figura 20 – Foto de um filtro de discos a vácuo.	25
Figura 21 – Foto de um filtro de tambor.	27
Figura 22 – Desenho esquemático de um filtro correia.	28
Figura 23 – Foto de um filtro plano.	28
Figura 24 – Foto de um filtro prensa de placas horizontais.	30
Figura 25 – Foto de um filtro cerâmico nas instalações da filtração da Anglo American em São João da Barra no Rio de Janeiro.	31
Figura 26 – Desenho representativo da água dentro da placa cerâmica (Adaptado de GÖRRES, SILVA E NUUTINEN, 2008).	32
Figura 27 – Filtrado produzido em um filtro cerâmico.	33
Figura 28 – Representação das fases de operação do filtro cerâmico (Adaptado de LAROX, 2005).	34
Figura 29 – Efeito do tempo de operação na produtividade de um filtro cerâmico (SILVA, 2013).	35
Figura 30 – Foto da válvula de distribuição de um filtro cerâmico.	36
Figura 31 – Fluxograma do processo do projeto Minas-Rio (ANGLO AMERICAN , 2014).	37
Figura 32 – Diagrama esquemático do projeto Minas-Rio (ANGLO AMERICAN, 2014).	38
Figura 33 – Fluxograma do processo da Filtração de São João da Barra (ANGLO AMERICAN, 2014).	39
Figura 34– Filtração do Projeto Minas-Rio.	40
Figura 35 – Fluxograma da preparação das amostras para os ensaios de filtração.	43
Figura 36 – Foto do <i>leaf test</i> utilizado nos ensaios.	47

Figura 37 – Foto de uma torta na etapa de desaguamento.....	48
Figura 38 – Esquema do teste em filtro piloto.	51
Figura 39 – Granulometria a laser das amostras.....	54
Figura 40 – Influência do percentual de sólidos na produtividade da filtração.	55
Figura 41 – Influência do teor de sólidos na espessura e no teor de umidade da torta. .	56
Figura 42 – Efeito do teor de sólidos na vazão específica de filtrado calculada.	57
Figura 43 – Efeito da área superficial específica no teor de umidade e na produtividade da filtração.....	58
Figura 44 – Influência do pH no teor de umidade e na produtividade da filtração.....	59
Figura 45 – Influência da temperatura na umidade e produtividade.	59
Figura 46 – Influência da dosagem de coagulante no teor de umidade e na produtividade.....	61
Figura 47 – Ilustração do efeito do coagulante na dispersão da polpa.	61
Figura 48 – Influência da adição do surfatante 02.....	62
Figura 49 – Influência da adição do surfatante 01 no teor de umidade e na produtividade do filtro.	63
Figura 50 – Influência do nível da bacia no teor de umidade e na produtividade do filtro.	64
Figura 51 – TUF em função da superfície específica para dois pHs, obtida por meio de modelos estatísticos – Cenário 01.	69
Figura 52 – Umidade em função da superfície específica para dois pHs, obtida por meio de modelos estatísticos – Cenário 01.....	69
Figura 53 – TUF em função da superfície específica para dois pHs, obtida por meio de modelos estatísticos – Cenário 02.	70
Figura 54 – Umidade em função da superfície específica para dois pHs, obtida por meio de modelos estatísticos – Cenário 02.....	70
Figura 55 – TUF em função da superfície específica para polpa com pH 7 sem coagulante e polpa com pH 10 com coagulante a 50 g/tms, obtida por meio de modelos estatísticos.....	71
Figura 56 – TUF em função da dosagem de coagulante para dois pHs, obtida por meio de modelos estatísticos – Cenário 03.....	72
Figura 57 – Umidade em função da dosagem de coagulante para dois pHs, obtida por meio de modelos estatísticos – Cenário 03.....	73

Figura 58 – TUF em função da dosagem de coagulante para dois pHs, obtida por meio de modelos estatísticos – Cenário 04.....	73
Figura 59 – Umidade em função da dosagem de coagulante para dois pHs, obtida por meio de modelos estatísticos – Cenário 04.....	74
Figura 60 – TUF em função do percentual de sólidos para dois pHs, obtida por meio de modelos estatísticos – Cenário 05.	74
Figura 61 – Umidade em função do percentual de sólidos para dois pHs obtida por meio de modelos estatísticos – Cenário 05.....	75
Figura 62 – Resultado da TUF em função do tempo nos testes em escala piloto.	76
Figura 63 – Resultado da umidade em função do tempo nos testes em escala piloto....	76
Figura 64 – Comparação entre os resultados dos ensaios piloto para o parâmetro TUF e o modelo estatístico desenvolvido a partir dos ensaios de bancada.	77
Figura 65 – Comparação entre os resultados dos ensaios piloto para o parâmetro umidade e o modelo estatístico desenvolvido a partir dos ensaios de bancada.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados operacionais da filtragem do projeto Minas Rio	41
Tabela 2 – Dados dos reagentes utilizados para os ensaios.....	44
Tabela 3 – Variáveis e níveis nos ensaios de filtragem com a análise de uma variável por vez	46
Tabela 4 – Variáveis e faixas utilizadas nos ensaios fatoriais.....	50
Tabela 5 – Parâmetros adotados nos testes realizados em escala piloto	52
Tabela 6 – Composição química dos concentrados (%).....	53
Tabela 7 – Características físicas das amostras	54
Tabela 8 – Coeficientes e <i>p-value</i> para a taxa unitária de filtragem e teor de umidade em ensaios de filtração com a polpa a pH 7	65
Tabela 9 – Coeficientes e <i>p-value</i> para a taxa unitária de filtragem e teor de umidade em ensaios de filtração com a polpa a pH 10	66
Tabela 10 – Apresentação dos cenários estudados.....	68
Tabela 11 – Resultados dos testes para a superfície de resposta para a polpa com pH 7	86
Tabela 12 – Resultados dos testes para a superfície de resposta para a polpa com pH 10	86
Tabela 13 – Resultados da granulometria a laser das amostras.....	90

LISTA DE SÍMBOLOS

Mt	milhões de toneladas;
t	toneladas;
B	permeabilidade do leito;
Δp	diferença de pressão através do leito;
μ	viscosidade do líquido;
L	espessura do leito;
ε	porosidade do leito;
k	constante de permeabilidade;
S	área superficial específica;
P_c	pressão capilar;
γ_{LA}	tensão superficial na interface líquido ar;
θ_{SL}	ângulo de contato;
K	constante característica da forma da partícula (se esférica, $K=6$);
d_m	diâmetro médio do poro;
D	diâmetro do poro;
P_u	peso úmido da torta;
P_s	peso seco da torta;
TUF	taxa unitária de filtração;
M	peso seco de torta em tms (tonelada métrica seca);
A	área de filtração;
t	ciclo de filtração, dado em horas;
F	fator de conversão de <i>leaf test</i> para filtro industrial;
V	volume de filtrado;
$\langle \alpha \rangle$	resistividade média da torta;
R_m	resistência do meio filtrante;
ρ_F	densidade do fluido;
C	concentração de sólidos na suspensão;
W	vazão mássica de sólidos da polpa.

1 INTRODUÇÃO

A demanda por sistemas eficientes de separação sólido-líquido nas operações de processamento mineral tem crescido nos últimos anos. A busca por sistemas de filtração que permitam atingir baixo teor de umidade no produto, elevada produtividade e baixo consumo energético é cada vez maior na indústria mineral. Dentro desse contexto os filtros cerâmicos estão sendo introduzidos na indústria mineral. Esse tipo de filtro apresenta maior eficiência energética, consumindo cerca de 90% menos energia que filtros de disco a vácuo convencionais.

Visando atingir maior eficiência na etapa de filtração, a Anglo American adotou 12 filtros cerâmicos com 144 m² como parte do sistema projetado para escoar a produção anual de 26,5 Mt de minério no projeto Minas-Rio. O processo de filtração é necessário porque a mina e a usina de beneficiamento do projeto estão localizados no município de Conceição do Mato Dentro, em Minas Gerais, onde é extraído e concentrado o minério de ferro, e há um mineroduto para transporte de polpa até a unidade de filtração localizada no Rio de Janeiro, no município de São João da Barra. Filtração é o processo mais importante da unidade de São João da Barra, uma vez que nela é feita a separação sólido/líquido final do *pellet feed*, o qual será posteriormente empilhado e embarcado.

Assim, compreender como os parâmetros de processo podem influenciar o desempenho da filtração cerâmica é muito importante para prever possíveis reduções de capacidade da filtração e/ou de aumento de umidade residual do *pellet feed*. Além disso, o conhecimento do processo e das interações entre as variáveis permitirá a tomada de decisão sobre a adição de reagentes auxiliares ou o aumento no percentual de sólidos, a fim de manter a filtração cerâmica otimizada.

Para que se alcance um maior entendimento sobre essa tecnologia, relativamente nova para a filtração de minério de ferro, se faz necessário um estudo detalhado sobre as variáveis de processo que têm influência sobre o desempenho dos filtros cerâmicos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

- Estudar a influência das variáveis de processo na produtividade de filtros cerâmicos para a filtração de polpas de minério de ferro a partir de ensaios de bancada e em filtro piloto.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a influência da área superficial específica, do percentual de sólidos, da temperatura, do pH e da dosagem de reagentes (coagulante e surfactante) e de seus efeitos sinérgicos na produtividade e umidade de um sistema de filtração cerâmica, em termos de taxa unitária de filtração e umidade final da torta.
- Estabelecer modelos empíricos que permitam descrever a produtividade do sistema de filtração de forma a promover a sua otimização, bem como a identificação da sua condição robusta de operação.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo apresenta e discute aspectos relacionados ao processo de filtração. Inicialmente será abordado o que é filtração e depois será feita uma revisão sobre os mecanismos de filtração, reagentes auxiliares e tipos de filtros. Logo após será apresentada a filtração cerâmica e os aspectos relacionados ao seu bom desempenho, e, por fim, o processo de beneficiamento estudado.

3.1 MECANISMOS DE FILTRAÇÃO

A filtração pode ser definida como uma operação unitária de separação dos sólidos contidos em suspensão em um líquido, mediante a passagem do líquido através de um meio poroso, que retém as partículas sólidas. O líquido que atravessa esse meio poroso é denominado filtrado e a camada de partículas retidas é chamada de torta.

Um entendimento mais profundo sobre o fenômeno da filtração é obtido a partir do estudo da fluidodinâmica de sistemas particulados. Na seção 3.1.1 será apresentado como as variáveis físicas, como massa específica, concentração de sólidos e viscosidade impactam na produtividade e umidade de um sistema de filtração.

Além desses fatores, o estudo das variáveis físico-químicas responsáveis pela estabilidade das suspensões é de grande importância para a compreensão do comportamento de sistemas de filtração. A adição de reagentes auxiliares coagulantes e surfatantes e o pH são responsáveis por modificar a estabilidade desses sistemas. É feita uma análise de como coagulantes e o CO_2 , por exemplo, usados para correção de pH no contexto do presente trabalho, agem sobre a estabilidade da suspensão, enquanto os surfatantes atuam não somente na interface partícula-fluido, mas também na interface fluido-ar. Na seção 3.2.2 é descrito como esses reagentes influenciam a filtração de polpas de minério de ferro.

3.1.1 Variáveis que afetam a filtração

A “teoria clássica de filtração” foi desenvolvida nos últimos quarenta anos pelas ilustres escolas de Houston, Estados Unidos da América e Nagoya, Japão. Essa teoria conduz à “teoria simplificada”, que é base para o projeto e análise de desempenho de filtros (Massarani, 2002). Essas teorias podem ser explicadas com base na filtração plana com formação de torta, conforme é esquematizado na Figura 1.

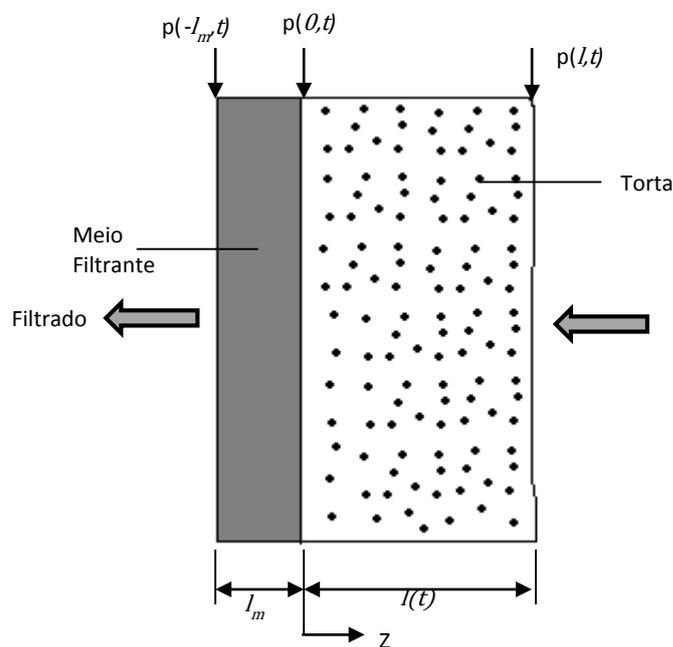


Figura 1 – Filtração com formação de torta (adaptado de MASSARANI, 2002).

A equação simplificada da filtração com formação de torta (Massarani, 2002) pode ser representada da seguinte forma:

$$\frac{dt}{dV} = \frac{\mu_F}{A(\Delta p)} \left[\frac{\langle \alpha \rangle V \rho_F C}{A} + R_m \right] \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Na qual:

V : volume de filtrado;

t : tempo;

μ_F : viscosidade do fluido;
 A : área de filtração;
 Δp : variação de pressão;
 $\langle \alpha \rangle$: resistividade média da torta;
 R_m : resistência do meio filtrante;
 ρ_F : densidade do fluido;
 C : concentração de sólidos na suspensão.

Onde:

$$\langle \alpha \rangle = f(\Delta p) \quad (\text{Eq. 3.2})$$

Ainda segundo Massarani (2002), na maioria das situações de interesse industrial a filtração é conduzida sob perda de carga constante. Portanto, a equação 3.2 poderia ser reescrita da seguinte forma:

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu_F}{A(\Delta p)} \left[\frac{\langle \alpha \rangle V \rho_F C}{2A} + R_m \right] \quad (\text{Eq. 3.3})$$

Utilizando-se, na equação 3.4, $V \rho_F C$ igual a W , vazão mássica de sólidos, obtém-se a equação básica de Poiseuille para a passagem de fluidos por meios porosos:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A \Delta p}{\left[\frac{\langle \alpha \rangle W}{A} + R_m \right]} \quad (\text{Eq. 3.4})$$

Quando se faz a avaliação dessa equação, percebe-se que o fluxo através do leito de filtração é diretamente proporcional à diferença de pressão, inversamente proporcional à resistência do meio filtrante e à resistência da torta, e diretamente proporcional à área de filtração.

Uma descrição alternativa da filtração pode ser feita com base na relação empírica conhecida como “Lei de Darcy”. Considerando a representação da Figura 2 pode-se ter melhor visualização dessa equação, que é expressa em termos da razão entre o volume de filtrado e o produto da área filtrante pelo tempo:

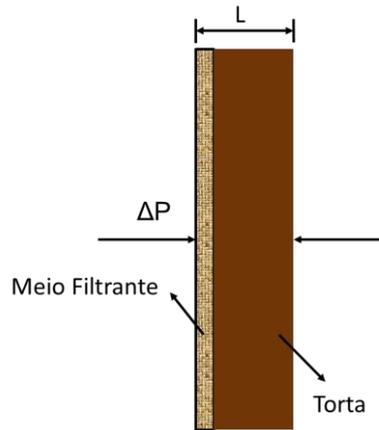


Figura 2 – Desenho representativo de um meio filtrante e uma torta (Adaptado de SILVA, 2006).

$$\text{fluxo através do leito} = \frac{B}{\mu} \cdot \frac{\Delta p}{L} \quad (\text{Eq. 3.5})$$

Na qual:

B é a permeabilidade do leito;

Δp é a diferença de pressão através do leito;

μ é a viscosidade do líquido;

L é a espessura do leito.

Kozeny descreveu a permeabilidade de um leito de partículas (B) pela seguinte relação:

$$B = \frac{1}{k} \cdot \frac{\varepsilon^3}{S^2(1-\varepsilon)^2}, \quad (\text{Eq. 3.6})$$

Na qual:

ε : porosidade do leito;

k : constante, função da porosidade, forma das partículas, orientação das partículas no leito e da distribuição granulométrica;

S : área superficial específica.

Juntando-se as duas equações, chega-se a:

$$\text{fluxo através do leito} = \frac{1}{k\mu s^2} \cdot \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} \cdot \frac{\Delta p}{L} \quad (\text{Eq. 3.7})$$

Segundo Chaves (2004), o exame dessa equação conduz às seguintes conclusões:

- 1- Aumentando o diferencial de pressão através do leito, aumentará o escoamento de fluido através do leito;
- 2- Diminuindo a viscosidade do líquido, o escoamento através do leito aumentará;
- 3- Diminuindo a espessura do leito, aumentará o escoamento através do mesmo;
- 4- Diminuindo a área superficial específica das partículas do leito, aumentará o escoamento;
- 5- Aumentando o índice de vazios do leito haverá aumento do escoamento através do leito.

A velocidade de escoamento do filtrado é, portanto, diretamente proporcional à diferença de pressão e à porosidade da torta, e inversamente proporcional à viscosidade do filtrado, à área específica do minério e à espessura da torta.

A temperatura não aparece de forma explícita, mas implícita, nas equações, por meio do termo da viscosidade. De acordo com Chaves (2004), a temperatura exerce grande influência sobre a velocidade de escoamento do filtrado. Quando a temperatura aumenta de 20°C para 60°C, por exemplo, a vazão de filtrado aproximadamente duplica.

Dentre as variáveis físicas mais estudadas para otimizar e entender o fenômeno de filtração, destaca-se a área superficial específica, o percentual de sólidos da suspensão, a viscosidade do fluido, a temperatura da polpa, a diferença de pressão do sistema de filtração, o tempo de filtração e a espessura da torta. A influência de cada um desses fatores será analisada a seguir de forma resumida, revisando-se as contribuições da literatura sobre o efeito desses parâmetros.

3.1.1.1 Diferencial de pressão

De acordo com a teoria simplificada da filtração com formação de torta, o diferencial de pressão possui relação direta com a capacidade de filtração e drenagem da torta. Häkkinen e Ekberg (2009) estudaram o efeito do diferencial de pressão sobre a filtração cerâmica, e quando foi variada a pressão de vácuo de 0,5 bar para 0,95 bar, houve acréscimo da capacidade do sistema de 1081 kg/m²/h. No caso do teor de umidade, houve decréscimo no valor dessa variável em 1,86%.

Além do efeito direto sobre a perda de carga do sistema de filtração o diferencial de pressão impacta na resistência média da torta. Massarani (2002) mostrou, por meio de ensaios com filtro de bancada COPPE, em 1985, que a resistividade média da torta aumenta com a queda de pressão. A Figura 3 mostra a representação para uma polpa de talco submetida a pressões de 5,8 e 11 atm.

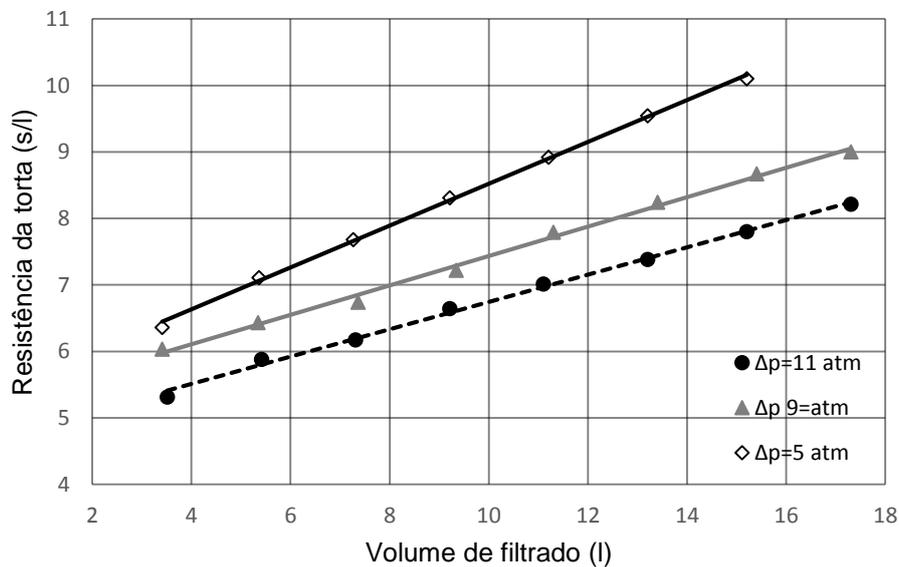


Figura 3 – Desempenho do filtro COPPE: suspensão aquosa de talco, A=670 cm². (Adaptado de MASSARANI, 1985, *apud* MASSARANI, 2002).

3.1.1.2 Tempo do ciclo de filtragem

Hall (1991) analisou o efeito da velocidade de rotação do filtro sobre a capacidade de um sistema de filtragem cerâmico. Para uma polpa com 71% de minério de níquel, observa-se (Figura 4) que, quando a velocidade aumenta, ocorre a elevação da capacidade do sistema de filtragem. Ele também descreveu que, quando a permeabilidade da torta é menor que a permeabilidade da placa cerâmica, o efeito da rotação se torna pronunciado.

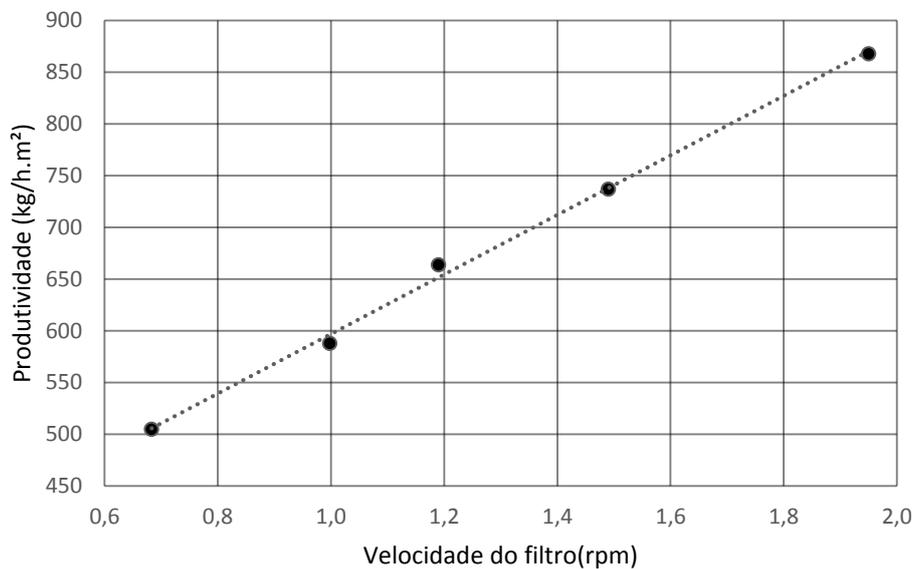


Figura 4 – Relação entre frequência de rotações do filtro e capacidade de filtragem (Adaptado de HALL, 1991).

Por outro lado, quanto maior a velocidade de rotação do filtro, menor será o tempo para desaguamento da torta filtrada. No entanto, a torta filtrada terá espessura menor e, por isso, será possível realizar o desaguamento efetivo em menor tempo. Os dois fatores conflitantes mostram que para a variável umidade há, portanto, um ciclo que minimiza a umidade no processo de filtragem.

3.1.1.3 Percentual de sólidos

De acordo com Hall (1991), como a placa cerâmica apresenta estrutura microporosa, o desempenho desse tipo de filtração depende da capacidade hidráulica de passagem do líquido pela placa. Por esta razão, a capacidade do filtro pode ser fortemente afetada pelo percentual de sólidos da polpa a ser filtrada. Em outras palavras, quanto maior o percentual de sólidos na polpa, menor será a quantidade de água que deverá passar pela placa e, portanto, maior será a capacidade do sistema de filtração.

Hindstrom (1995), avaliando o desempenho de um filtro cerâmico sob pressão, observou o aumento da capacidade de filtração com o aumento do percentual de sólidos na alimentação, como pode ser observado na Figura 5.

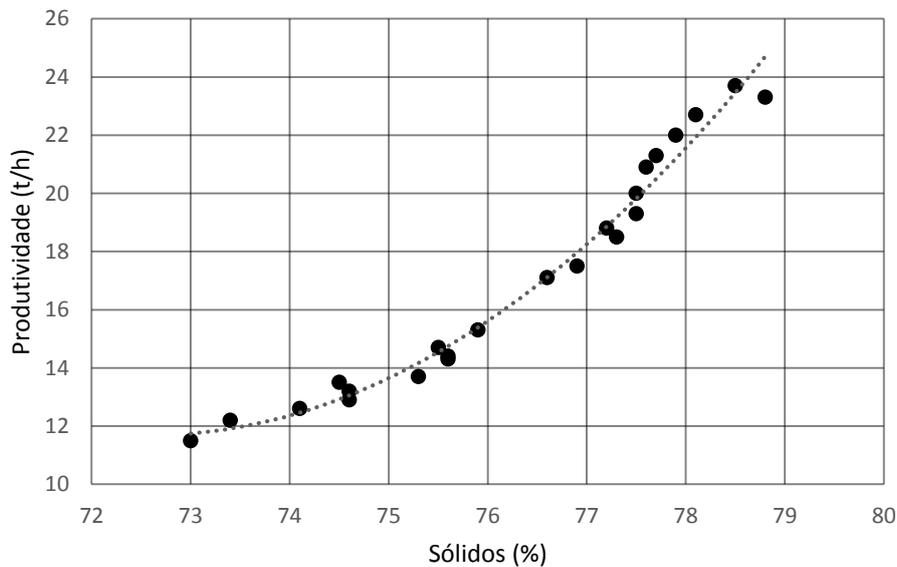


Figura 5 - Efeito do percentual de sólidos na capacidade do sistema de filtração (Adaptado de HINDSTROM, 1995).

Para a filtração a disco, na qual o ciclo de filtração tem tempos de formação e secagem proporcionais ao ciclo de filtração, quanto menor o teor de sólidos na suspensão, menor será a espessura da torta. Portanto, quanto menor a percentagem de

sólidos, menor será a produtividade de um sistema de filtração. A Figura 9 exemplifica essa redução da umidade em função da diminuição da percentagem de sólidos.

3.1.1.4 Área superficial específica

Valadão e Peres (1997) analisaram a área superficial como variável de modelamento de filtragem. O processo avaliado foi a filtragem com formação de torta em filtros a disco convencionais. Para esse teste foi avaliado o ciclo de filtragem de 100 (cem) segundos, tecido multifilamentos, percentual de sólidos de 70% (em massa) e perda de carga (vácuo) de formação e secagem igual a $5,1 \times 10^4$ Pa e $6,4 \times 10^4$ Pa, respectivamente. A Figura 6 mostra os resultados de produtividade e umidade do sistema de filtração para três níveis de superfície específica. Observa-se que o efeito da variável área superficial específica é muito pronunciado para esse tipo de filtragem. Também é possível perceber que a interação entre o pH e a área superficial específica é muito pequena ou inexistente, tendo em vista o aproximado paralelismo das linhas.

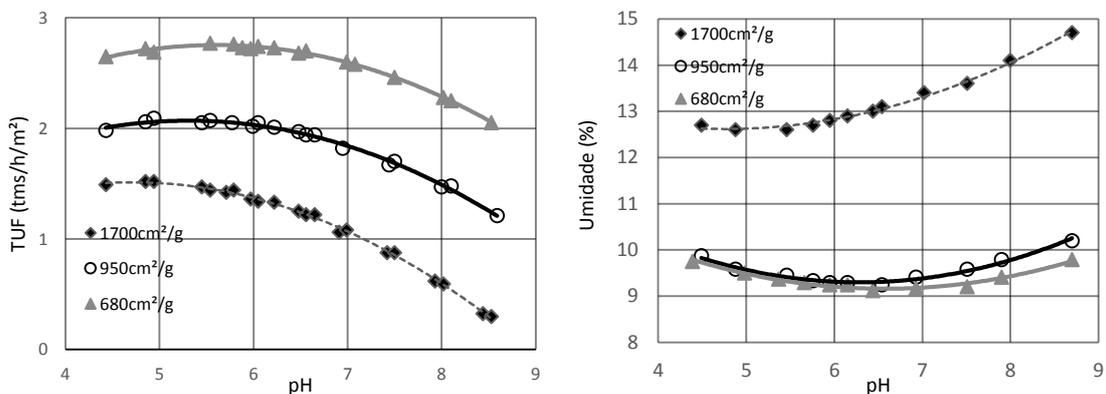


Figura 6 – Efeito da área superficial específica e do pH na umidade e produtividade do filtro de disco a vácuo (Adaptado de VALADÃO e PERES, 1997).

Kobler e Dahlstrom (1979) estudaram o efeito da área superficial específica na taxa unitária de filtragem (TUF), a qual corresponde à capacidade de produção de uma área de um metro quadrado no intervalo de tempo de uma hora. Por meio de avaliação de

processos industriais em diferentes condições de secagem, traçaram uma curva mostrando a relação entre essas duas variáveis. Confirmou-se que a produtividade do sistema de filtragem em estudo era inversamente proporcional à área superficial específica das partículas. Percebe-se que, mesmo utilizando meios severos de secagem de torta, como vapor, maior pressão de vácuo e redução da taxa de alimentação do filtro, não foi possível alcançar teores de umidades iguais à da situação normal para minérios com maior superfície específica.

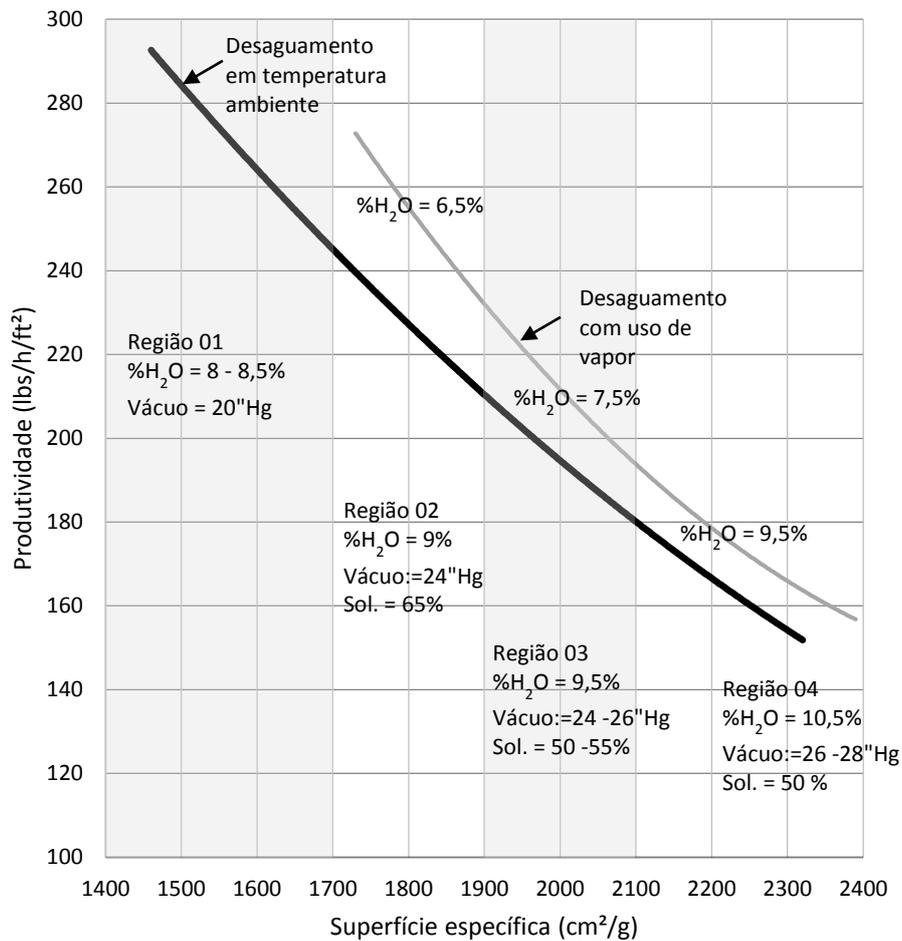


Figura 7 – Taxa unitária de filtragem (TUF) em função da superfície específica Blaine para várias condições de filtragem industrial de concentrados de minério de ferro (Adaptado de KOBLE e DAHLSTROM, 1979).

Doelinger *et al.* (2009) analisaram o efeito da área superficial específica na eficiência da filtragem para polpas de minério de ferro em filtro a disco a vácuo convencional. No estudo, em escala de bancada por meio do teste de folha (*leaf test*), foram utilizadas polpas preparadas de concentrados de minério de ferro com teor ferro de 67% e percentual de sólidos de 68%. O pH utilizado para esse experimento foi de 11,2 e os agentes modificadores de pH foram hidróxido de sódio e hidróxido de cálcio. A Figura 8 apresenta o resultado desses experimentos. Observa-se que o aumento da área superficial específica promoveu elevação no teor de umidade residual do *pellet feed* e redução na capacidade do sistema de filtração.

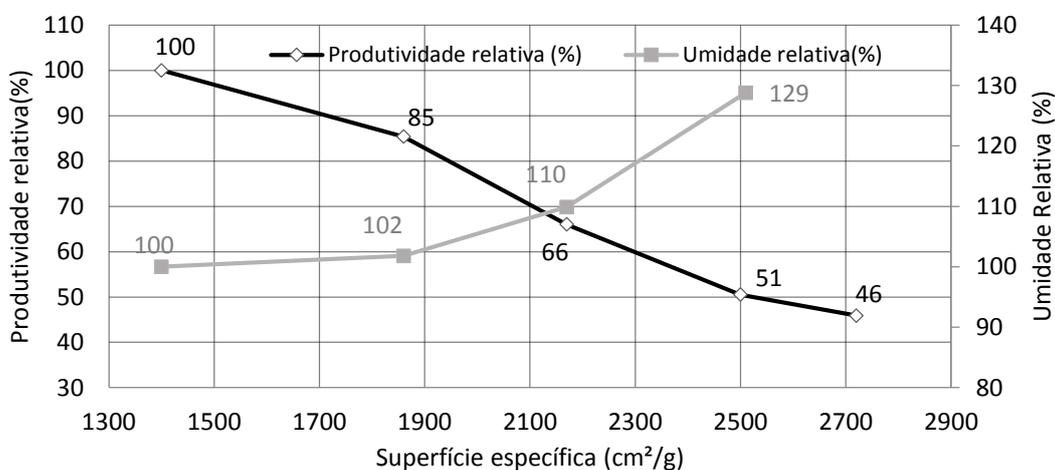


Figura 8 – Influência da área superficial específica na filtragem (Adaptado de DOELINGER *et al.*, 2009).

3.1.1.5 Viscosidade do fluido

A viscosidade de um fluido é a propriedade que o mesmo apresenta em oferecer maior ou menor resistência à deformação quando sujeito ao esforço de escorregamento. No caso de polpas minerais, em geral, o fluido é constituído pelo sistema água/minério.

De acordo com as equações que modelam o processo de filtragem, vistas na seção 3.4.1, o fluxo de filtrado é inversamente proporcional à viscosidade do fluido. O estudo

do efeito da viscosidade sobre sistemas de filtração quase sempre está relacionado à variação da temperatura da polpa.

Häkkinen e Ekberg (2009) estudaram o efeito da temperatura em polpas de minério de ferro filtradas em filtros cerâmicos a partir de ensaios de *leaf test* em bancada, utilizando uma amostra com 90% passante em 82,7 μm , 50% passante em 19,8 μm e com 10% de partículas menores que 6,3 μm . A Figura 9 apresenta os resultados obtidos nas análises apresentadas por esses autores. Quando é avaliada a influência da temperatura da polpa sobre a produtividade da filtração, observa-se que para todos os teores de sólidos analisados houve aumento sobre a produtividade do sistema de filtração cerâmico. Para essa condição pode-se prever o aumento da espessura da torta de filtração, uma vez que o ciclo foi mantido constante em 45 segundos. Mesmo com esse aumento, pode-se observar que a umidade residual no *pellet feed* teve decréscimo. Com isso, conclui-se que a capacidade de drenagem da torta também aumentou com o acréscimo da temperatura da polpa.

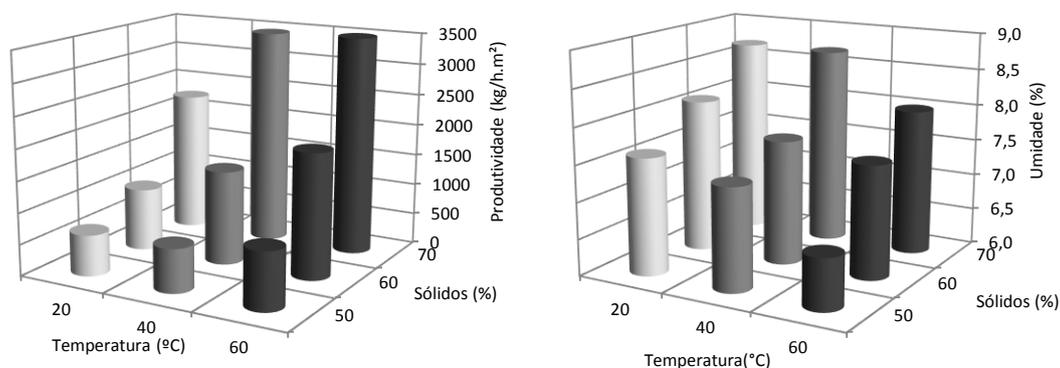


Figura 9 – Efeito da temperatura e da concentração de sólidos na capacidade e teor de umidade da filtração (Adaptado de HÄKKINEN e EKBERG, 2009).

3.1.2 Reagentes auxiliares

Reagentes auxiliares para a filtração de finos vêm se tornando, nos últimos anos, de grande importância para a mineração. Esses reagentes têm o objetivo de tornar os processos mais eficazes e controláveis. Os principais parâmetros de processo

influenciados pelo uso de reagentes são a taxa unitária de filtração (TUF), o teor de umidade e a porosidade da torta.

Segundo Dias *et al.* (2004), um dos primeiros trabalhos em que foram utilizados reagentes auxiliares na filtração foi publicado por Silverblatt e Dahlstrom (1954). Eles mostraram que a adição dos surfatantes Aerosol O.T e Tergitol C.W resultava em tortas com teores de umidade mais baixos.

Amarante *et al. apud* Dias *et al.* (2004), estudando a influência da adição de surfatantes e floculantes em polpas de minério de ferro, mostraram que houve diminuição do tempo de formação da torta com a adição de floculante, bem como diminuição do teor de umidade com o acréscimo de surfatantes.

De acordo com Dias *et al.* (2004), os principais reagentes utilizados em processos de filtração são surfatantes e floculantes, sendo que ambos atuam de forma a diminuir a pressão capilar (pressão mínima para a retirada de água do poro). Esse mecanismo pode ser explicado pela equação de Young Laplace (Eq. 3.8):

$$P_c = \gamma_{LA} \cdot \cos\theta_{SL} \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \right) \left(\frac{K}{d_m} \right) \quad (\text{Eq. 3.8})$$

Onde:

P_c : pressão capilar;

γ_{LA} : tensão superficial na interface líquido ar;

θ_{SL} : ângulo de contato;

ε : porosidade da torta;

K : constante característica da forma da partícula (se esférica, $K=6$);

d_m : diâmetro médio do poro.

A partir da equação de Young - Laplace percebe-se que, para diminuir a pressão capilar, pode-se atuar reduzindo a tensão superficial na interface ou alterando a morfologia do poro. Para exercer influência sobre a tensão superficial podem ser usados surfatantes, e para modificar a morfologia do poro geralmente são utilizados floculantes e coagulantes.

3.1.2.1 Surfatantes

Surfatantes são compostos heteropolares que se caracterizam por um caráter duplo, sendo uma porção hidrofílica (polar) e outra hidrofóbica (apolar). Esses tipos de compostos podem alterar as propriedades da interface de sistemas sólido/líquido e líquido/ar. A maioria dos surfatantes tem a capacidade de reduzir a tensão superficial. Esses compostos podem ser classificados, de acordo com a carga existente na porção polar, em:

- **Catiônicos:** A porção hidrofílica apresenta carga positiva;
- **Aniônicos:** A porção hidrofílica apresenta carga negativa;
- **Zwitteriônicos:** A porção hidrofílica apresenta cargas positivas e negativas que se anulam;
- **Não-iônicos:** Não apresentam carga em sua estrutura.

Existem dois mecanismos principais de atuação dos surfatantes no desaguamento de polpas, relatados a seguir.

O primeiro atua na interface sólido/líquido, tornando a superfície do mineral hidrofóbica. A Figura 10 ilustra uma superfície em que não houve adsorção de surfatante (a) e outra na qual houve adsorção de surfatante (b). A molhabilidade das partículas é diminuída com a adição de surfatantes, enquanto o ângulo de contato é elevado.

O segundo influi sobre a interface líquido/ar, diminuindo a tensão superficial, como ilustrado na Figura 11. Nesse caso, ocorre a redução da intensidade das forças que mantêm a água nos capilares da torta. Esse mecanismo auxilia de forma eficiente a redução do teor de umidade na torta, porém pode impactar de forma negativa na operação subsequente a esse processo, a qual, em tratando de minérios de ferro, geralmente é a operação de aglomeração para sinterização ou pelotamento.

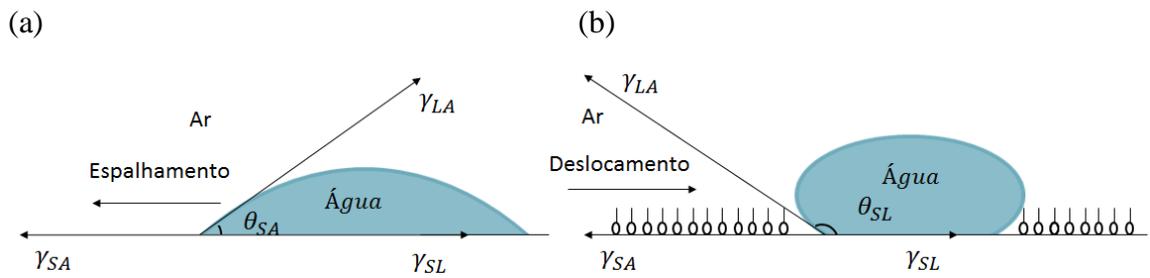


Figura 10 – Adsorção de surfatante e influência no grau de hidrofobicidade de partículas (Adaptado de DIAS *et al.*, 2004).

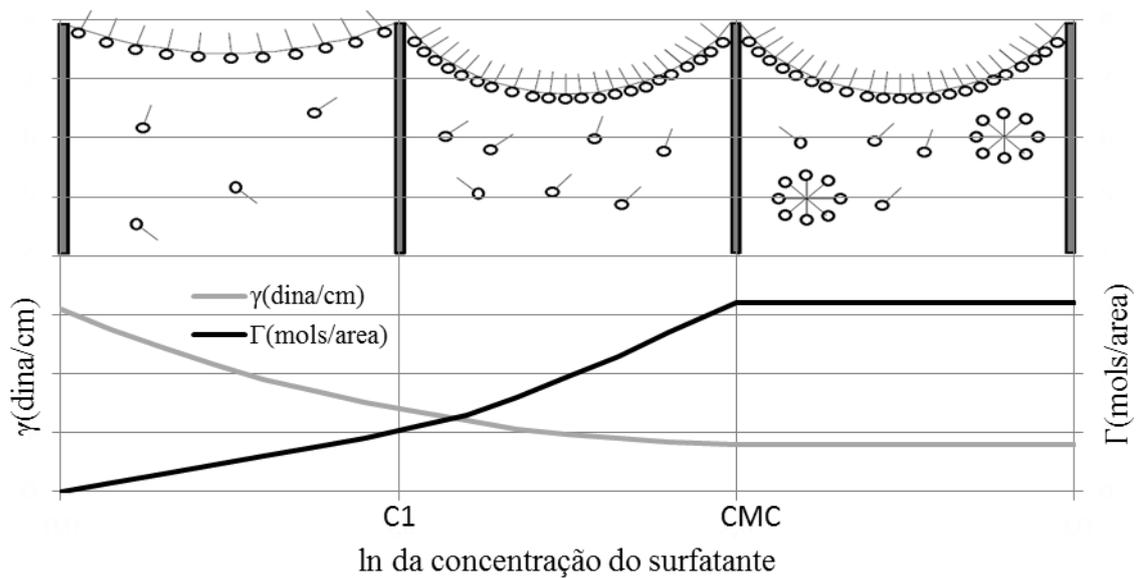


Figura 11 – Influência da adsorção de surfatante no abaixamento da tensão superficial mostrada em um capilar (Adaptado de DIAS *et al.*, 2004).

Dias *et al.* (2004) estudaram o efeito de reagentes flocculantes e surfatantes na filtragem de minério de ferro por meio de ensaios com funil de Büchner. Verificaram que a adição do flocculante reduziu significativamente o tempo de formação da torta, porém causou ligeiro aumento no teor de umidade final da torta, como pode ser observado na Figura 12.

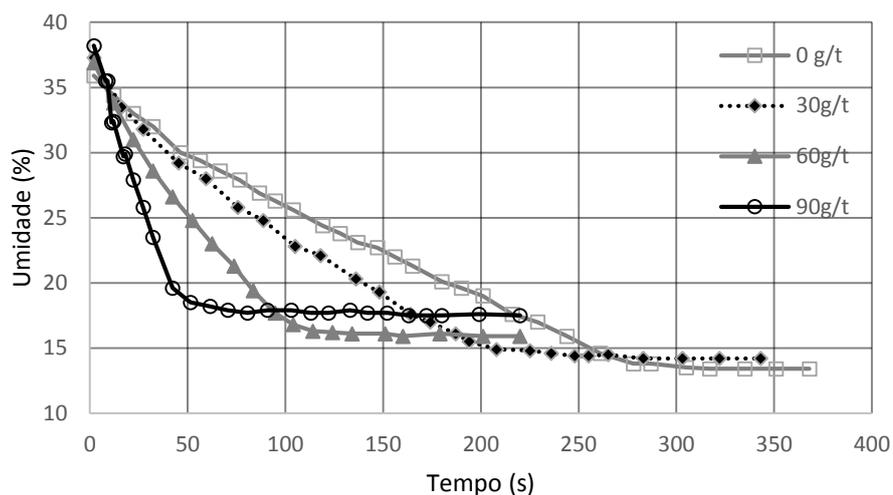


Figura 12 - Curva de desaguamento em diversas concentrações de flocculante (Adaptado de DIAS *et al.*, 2004).

Dias *et al.* (2004) também concluíram que a adição de surfatantes propiciou um abaixamento na tensão superficial do filtrado (Figura 13). Entretanto, não levou à esperada redução significativa da umidade final da torta. Além disso, observou que a adição desse reagente proporcionou aumento do tempo de formação da torta, o que implica em redução na produtividade.

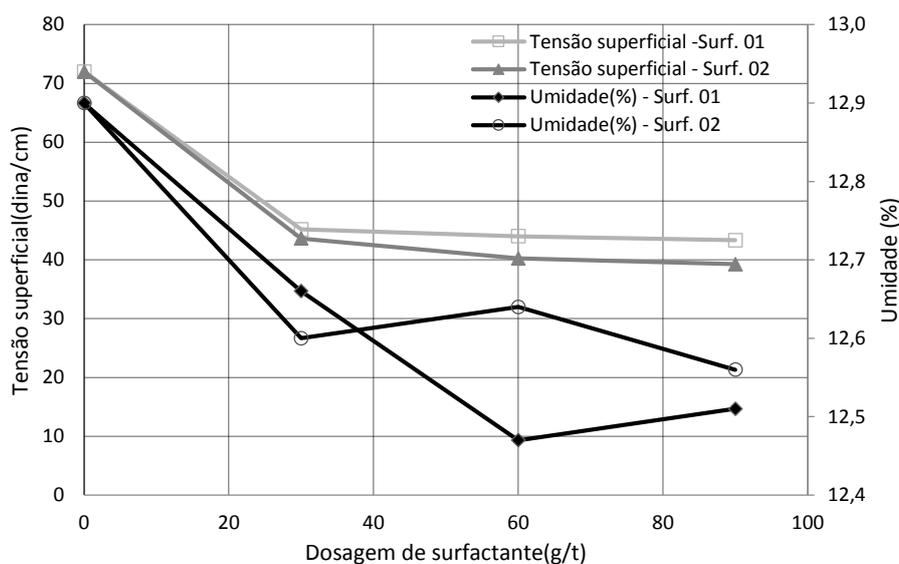


Figura 13 - Efeito do surfatante sobre a umidade residual da torta e sobre a tensão superficial do filtrado (Adaptado de DIAS *et al.*, 2004).

Hosten e Sastry (1983) estudaram em laboratório o comportamento de uma polpa de hematita para ensaios de filtragem em funil de Büchner, quando utilizados os reagentes floculantes e surfatantes. Os pesquisadores concluíram que os floculantes aumentaram a taxa de formação da torta, mas exerciam um efeito muito limitado sobre o teor de umidade do minério. Verificaram, por meio de estudo com três surfatantes, Figura 14, que o uso desse tipo de reagente poderia reduzir em até duas unidades percentuais o teor de umidade da torta. Para essa condição, observou-se aumento no tempo de formação da torta, ou seja, redução da produtividade. Sugeriram, então, como alternativa, a combinação de floculantes e surfatantes. O primeiro sendo adicionado à polpa para reduzir o tempo de formação e o segundo à lavagem da torta. Os resultados para a condição proposta foram maiores taxas de formação de torta e menores valores de umidade residual do *pellet feed*.

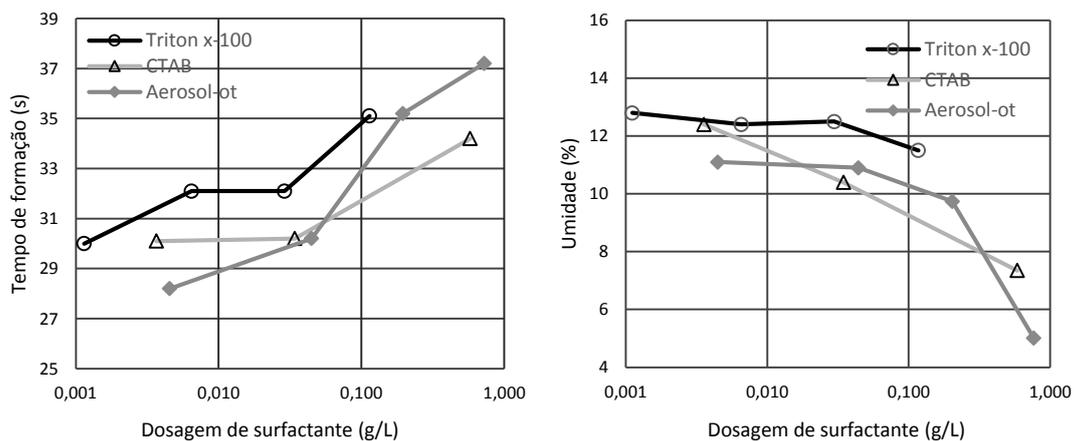


Figura 14 - Efeito da concentração e do tipo de surfactante no tempo de formação e umidade residual da torta (Adaptado de HOSTEN e SASTRY, 1983).

Doellinger *et al.* (2009) avaliaram o efeito da adição de quatro tipos de surfatantes na filtragem de uma polpa de minério de ferro, por meio de ensaios de *leaf test* para filtros de disco a vácuo, para dois níveis de superfície específica e três níveis de dosagem. Para essas condições, pôde-se observar que o surfactante foi capaz de reduzir em 5 a 12% o percentual de umidade do *pellet feed*. Concluíram também que o surfactante teve maior efeito para níveis mais elevados de área superficial específica do minério avaliado, conforme apresentado na Figura 15.

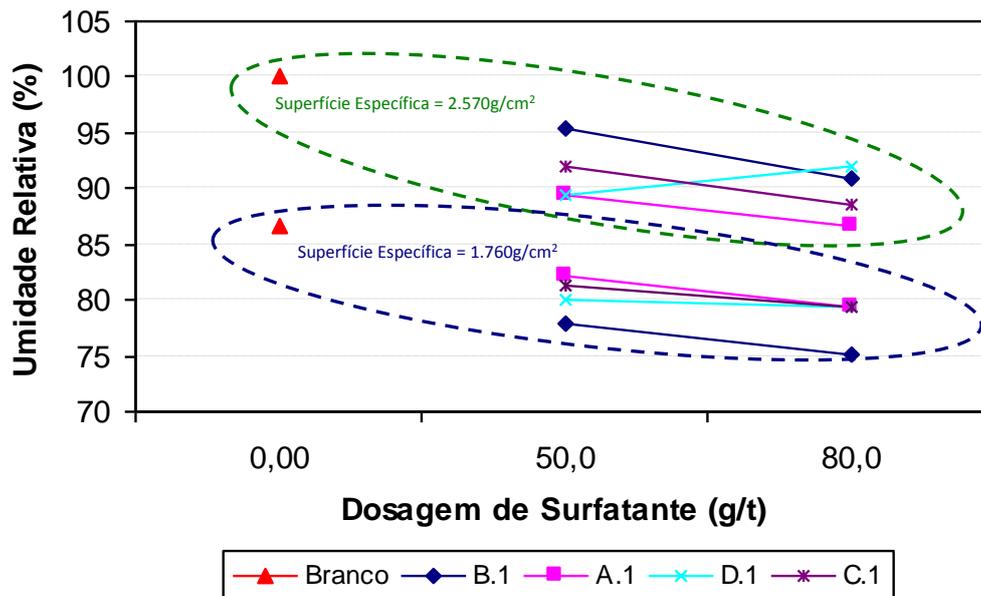


Figura 15 – Teores de umidade das tortas em função da superfície específica dos sólidos no concentrado e do tipo de surfatante, com os surfactantes identificados pelas letras A1 a D1 (DOELINGER *et al.*, 2009).

3.1.2.2 Coagulantes

A coagulação é o resultado da redução da força de repulsão entre as partículas. Ela normalmente é realizada pela adição de eletrólitos que diminuem a repulsão eletrostática e, portanto, fazem prevalecer as forças de Van der Waals. No processo de coagulação, a interação é somente eletrostática. O aumento da intensidade da força iônica da suspensão promove a compressão da camada difusa, como pode ser observado no esquema da Figura 16.

A ocorrência do fenômeno da coagulação é de extrema importância para o processo de filtração. Segundo Chaves (2004), o objetivo fundamental de se utilizar um polímero na filtração é obter uma polpa que forme uma torta com a estrutura aberta, sem finos livres, que coagularam e que não podem mais colmatar nos capilares da torta. Valadão e Peres (1997) também afirmou que a agregação de polpas, principalmente considerando-se aquelas que estejam com granulometria fina ou que contenham

proporções significativas de material fino, é quase sempre desejável, ou mesmo essencial, para a filtração dentro das condições mais favoráveis, ou seja, com melhor fluxo de filtrado, boa formação de torta e sem problemas de cegamento progressivo do meio filtrante.

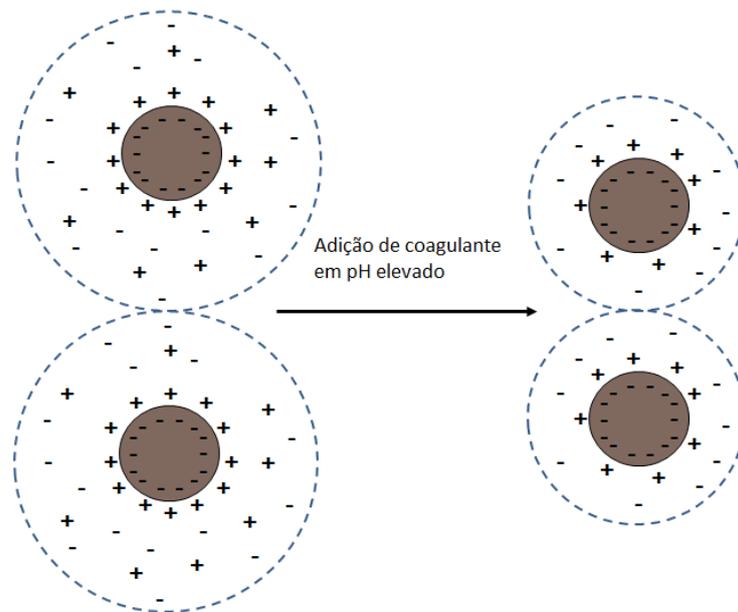


Figura 16 – Compressão da dupla camada elétrica (Adaptado de KIM *apud* BRAGANÇA, 2008).

Turrer *et al.* (2010) analisaram o efeito da adição de coagulantes em ensaios de bancada *leaf test* para filtração de disco a vácuo, para uma polpa bombeada através de um mineroduto de 396 km, com reagente controlador de reologia, cal (CaO), com pH 11,5. Os testes realizados por essa equipe mostraram que a adição de coagulante era uma alternativa tecnicamente viável para a manutenção da produtividade da filtração. Também verificaram que o teor de umidade não era significativamente aumentado para condições de alta estabilidade da polpa (baixa dosagem de cal) e/ou elevada quantidade de finos (alta área superficial específica do material). Em condições de baixa dosagem de cal, a adição de coagulantes causava, ainda, redução significativa no teor de umidade da torta. Os resultados são apresentados na Figura 17.

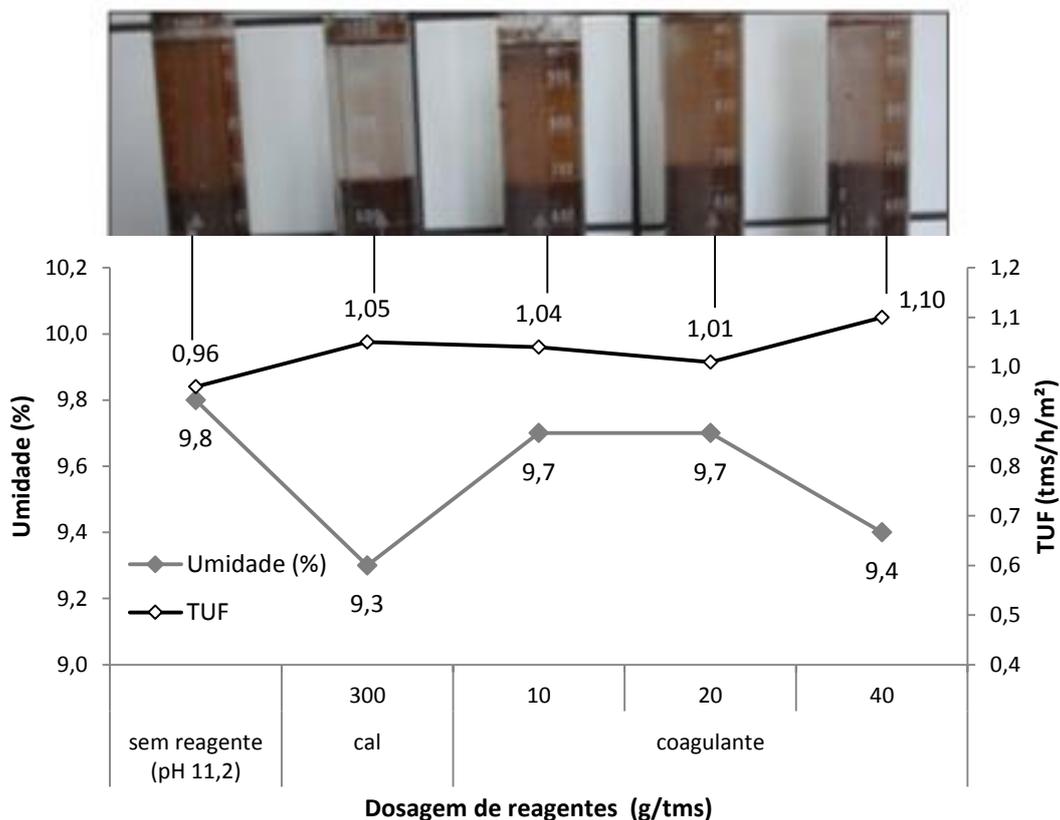


Figura 17 – Efeito da adição de reagentes na condição de dispersão das polpas e desempenho na filtragem em laboratório (TURRER *et al.*, 2010).

3.1.2.3 Efeito do pH na filtragem

Haselhuhn, Swanson e Kawatra (2012) estudaram o efeito da adição de CO₂ no pH de polpas de hematita, usando funil de Büchner. Eles prepararam polpas de hematita de hematita com 50% de sólidos em massa, posteriormente adicionaram hidróxido de sódio até a suspensão atingir o pH de 11, por fim adicionavam CO₂ até o pH desejado para o teste. Na Figura 18 podem ser observados os resultados de medidas de vazão de filtrado para cada pH entre 11 e 6,5. A partir desses resultados os autores perceberam que a adição de CO₂ proporcionava aumento na vazão de filtrado e concluíram que essa elevação de produtividade do sistema de filtração em valores mais baixos de pH é explicado pela redução do potencial zeta da hematita para pHs inferiores ao ponto isoelétrico desse mineral.

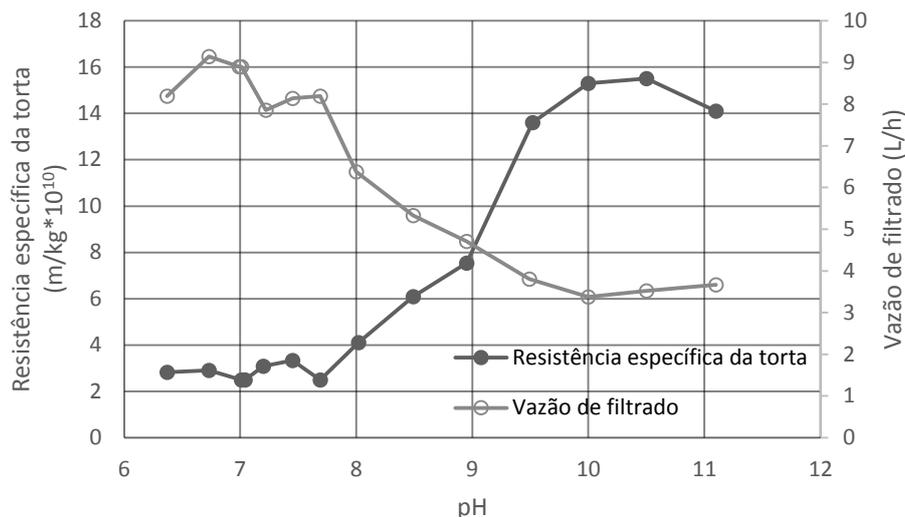


Figura 18 – Taxa de filtração e resistência específica da torta de concentrado de hematita em função do pH (Adaptado de HASELHUHN, SWANSON e KAWATRA, 2012).

Na Figura 19, pode-se observar o comportamento do potencial zeta em função do pH para amostras de hematita pura, sílica pura e amostras nas quais a sílica foi adicionada como impureza. Segundo Haselhuhn, Swanson e Kawatra (2012), a teoria da reversão de cargas, proposta por Esumi, Idogawa e Meguro (1988), afirma que acima do ponto isoelétrico de hematita pura, as partículas de quartzo e hematita carregam uma carga negativa, e portanto, se repelem. Entre os pontos isoelétricos da sílica e da hematita, a sílica possui uma carga negativa e a hematita uma carga positiva, permitindo que as duas espécies se agreguem. Abaixo do ponto isoelétrico do quartzo, no entanto, ambas as espécies transportam uma carga positiva e dispersam novamente.

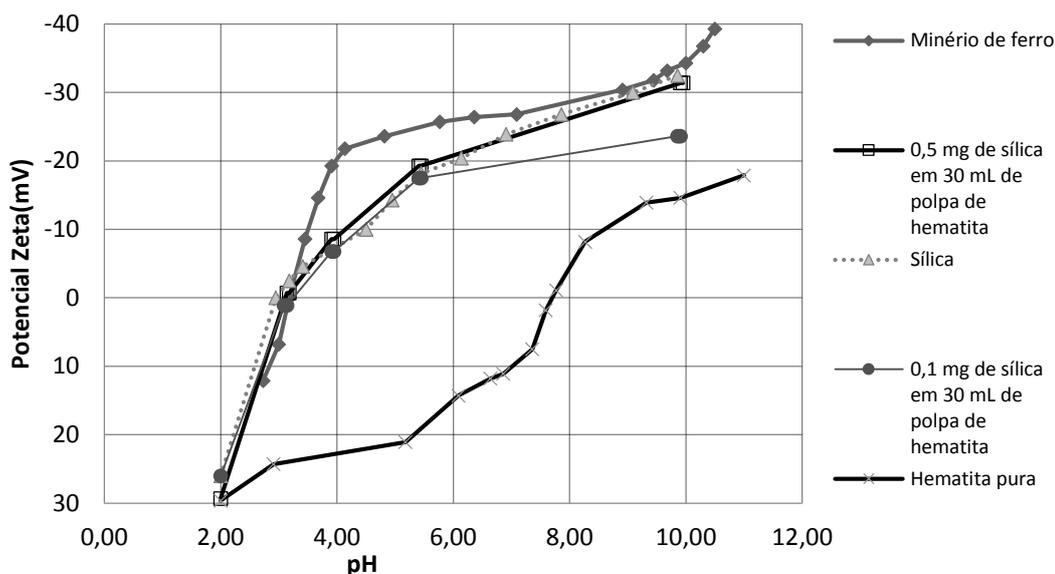


Figura 19 – Potencial Zeta em função do pH para hematita pura, sílica pura e misturas de sílica e hematita (Adaptado de ESUMI, IDOGAWA E MEGURO, 1988 *apud* HASELHUHN, SWANSON E KAWATRA, 2012).

3.2 TIPOS DE FILTRO

Existem atualmente diversos tipos de filtro para a filtragem de minérios. A escolha da tecnologia a ser empregada é feita em função das características dos minerais que compõem o minério e do tipo de processamento desejado. De acordo com Chaves (2004), os principais tipos de filtros utilizados nos processos de beneficiamento de minérios são: filtro tambor, filtro de disco a vácuo, filtro de mesa e filtro correia. Além desses, estão sendo implementados em projetos de mineração recentes os filtros prensa e cerâmico.

As seções seguintes apresentam os tipos de filtro existentes, a fim de facilitar a identificação das principais diferenças entre eles, bem como apresentar as principais aplicações de cada filtro.

3.2.1 Filtro de disco a vácuo

Os filtros a vácuo são os mais utilizados na indústria mineral para processamento de materiais finos que formam polpas estáveis e que possam ser mantidas em suspensão. Segundo Sutherland (2008), esse tipo de filtro possui a vantagem de apresentar maior área de filtragem por área de piso se comparado ao filtro tambor. Eles são, portanto, particularmente adequados para o tratamento de grandes volumes de produtos, como é o caso do beneficiamento de carvão, o tratamento de minérios, e o processamento de polpa de papel.

Ainda de acordo com Sutherland (2008), o princípio de construção de um filtro a disco a vácuo se define pela montagem de discos paralelos sobre o eixo horizontal do filtro. Cada um desses discos é constituído por setores substituíveis, e estes são cobertos por tecidos filtrantes. Na Figura 20 tem-se uma representação desse tipo de filtro.



Figura 20 – Foto de um filtro de discos a vácuo.

A filtragem inicia-se quando os discos são girados e os setores dentro da bacia são submetidos ao vácuo. Nesse momento, o filtrado começa a passar pelo meio filtrante e uma camada de minério começa a ser depositada sobre o tecido. Essa etapa é chamada de

formação da torta. Ao sair da bacia, essa torta depositada sob a ação do vácuo começa a perder umidade na etapa de desaguamento da torta. Por fim, o tecido recebe injeção interna de ar comprimido, que infla o tecido e promove o descarregamento da torta. A torta obtida com esse processo é então direcionada para um sistema de correias para transporte.

Devido à passagem de ar na etapa de desaguamento, os filtros a disco a vácuo requerem sistema de bombas de vácuo com elevada vazão, e, portanto, elevado consumo energético. A capacidade da bomba de vácuo é determinada principalmente pela quantidade de ar que é sugada através da torta durante os períodos de lavagem e secagem, quando, na maior parte dos casos, ocorrerá um fluxo simultâneo de líquido e ar.

3.2.2 Filtro de tambor

O tambor desse tipo de filtro é montado horizontalmente e encontra-se parcialmente submerso na bacia do filtro, dentro da qual a polpa é introduzida e mantida em suspensão por agitadores. A periferia do tambor é dividida em compartimentos, e cada um deles apresenta um número de linhas de drenagem, as quais passam através do interior do tambor, terminando em uma extremidade com um anel de orifícios cobertos por uma válvula rotativa sobre a qual o vácuo é aplicado. O meio filtrante embala a superfície do tambor, que gira à baixa velocidade, normalmente no intervalo entre 0,1 e 0,3 rpm, podendo atingir 3 rpm para materiais facilmente filtráveis.

O meio filtrante geralmente utilizado nesse filtro é um tecido tipo correia, e a formação da torta ocorre quando a bacia está cheia de polpa e a região do tecido sob a ação do vácuo está dentro da bacia. O desaguamento da torta é efetuado na parte fora da bacia, com o vácuo atuando. A descarga da torta nesse tipo de filtro é feita por meio de raspadores. Os filtros tambores tem a vantagem de possibilitar lavagem da torta quando essa etapa é necessária. O desenho de um filtro tambor está apresentado na Figura 21.



Figura 21 – Foto de um filtro de tambor.

3.2.3 Filtro de correia a vácuo

O filtro de correia, mostrado na Figura 22 consiste em uma correia transportadora com um projeto diferente. A polpa é alimentada em uma extremidade e, à medida que se desloca até a outra, vai percorrendo regiões de vácuo e lavagem, até ser desaguada e descarregada. As zonas através das quais um filtro correia passa são alimentação, formação da torta, desaguamento, lavagem e secagem. Conforme a polpa passa nas diferentes regiões de filtragem, existem bandejas deslocando-se com a mesma velocidade da correia. Essas bandejas são direcionadas para a região inferior da correia e apertadas por sucção para garantir a vedação e para promover o vácuo necessário para as operações de formação da torta e desaguamento. Ao final de cada ciclo, o vácuo na bandeja é interrompido e a bandeja volta à posição inicial para realizar um novo ciclo.

De acordo com Chaves (2004), os filtros de correia são indicados para operações nas quais se devem tratar polpas heterogêneas e para processos nos quais a torta deve ser lavada uma ou mais vezes. As principais desvantagens dessa tecnologia são a elevada perda de vácuo, provocada pela configuração do sistema, a grande área necessária para a instalação desses filtros, e, por fim, a deficiência no desaguamento de materiais finos.

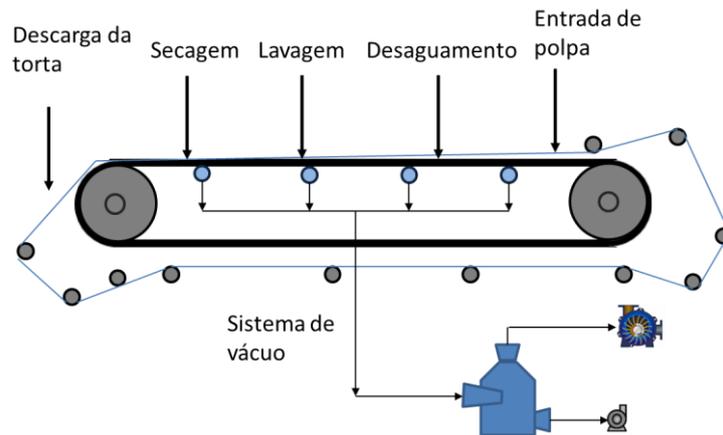


Figura 22 – Desenho esquemático de um filtro correia.

3.2.4 Filtro plano

O filtro plano é basicamente uma estrutura circular e horizontal, composta por vários setores que giram em torno de um eixo vertical. A polpa é alimentada na área sobre o meio filtrante por meio de um distribuidor. As tubulações de vácuo atuam de tal forma que, ao girar, a torta é formada e seca. Quando a torta atinge a posição de descarte o ar comprimido atua, a torta é solta e os poros do tecido são desobstruídos. Geralmente, o descarregamento de um filtro plano é feito por meio de um transportador helicoidal, do filtro até a correia transportadora.



Figura 23 – Foto de um filtro plano.

3.2.5 Filtro prensa

O filtro prensa é o modelo mais simples dos filtros de pressão e o de maior aplicação industrial, principalmente na indústria química e no processamento de minerais industriais. Os filtros prensa mais empregados no tratamento de minérios são os com placas verticais ou horizontais.

Esse filtro consiste de um conjunto alternado de quadros ociosos, onde a torta é retida durante a operação de filtração, e de placas maciças que possuem superfícies preparadas, com sulcos ou furos, que permitem a drenagem do filtrado. O meio filtrante, geralmente um tecido, recobre ambas as faces da placa. O conjunto de placas e quadros é apoiado, verticalmente, sobre um par de suportes paralelos na estrutura do filtro. Para proceder à operação de filtração, as placas e quadros pendurados no suporte são comprimidos até o ponto de se evitar vazamento entre elas.

Os filtros prensa de placas verticais (Figura 24), de acordo com Sutherland (2008), têm princípio de funcionamento igual ao dos filtros de placas verticais, com a vantagem de introduzir a gravidade como uma força motriz. Além disso, as tortas formadas no interior das placas são mais uniformes e livres de trincas.

A operação dos filtros prensa ocorre em regime de batelada. Assim que são fechadas as câmaras, a polpa é introduzida até preenchê-las. Posteriormente, as placas paralelas são prensadas e é injetado o ar comprimido para realizar o desaguamento da torta de filtração. Os tempos de formação, secagem e lavagem são ajustáveis de acordo com a necessidade do processo. Depois da torta ter sido lavada e seca, as câmaras são abertas e ela é descarregada toda ao mesmo tempo. Após essas etapas, o filtro se encontra pronto para iniciar um novo ciclo de filtragem.



Figura 24 – Foto de um filtro prensa de placas horizontais.

3.2.6 Filtro cerâmico

O filtro de disco cerâmico parece com qualquer outro filtro de disco a vácuo convencional, mas com a diferença de o meio filtrante ser feito de cerâmica porosa. Esse material microporoso promove a atração do filtrado e sua passagem através da placa por ação capilar, sob o vácuo aplicado. As placas são produzidas em alumina sinterizada com microporos uniformes com tamanho médio de 1,7 μm , os quais permitem que apenas o líquido atravesse o leito. Apesar da operação de vácuo quase absoluto, o ar não passa pela placa cerâmica. O material do disco é inerte e resistente a quase todos os produtos químicos e temperaturas da polpa, o que torna essa alternativa de filtração versátil para as indústrias de processamento mineral, químicas e metalúrgicas. Uma ilustração desse filtro está mostrada na Figura 25.



Figura 25 – Foto de um filtro cerâmico nas instalações da filtragem da Anglo American em São João da Barra no Rio de Janeiro.

3.2.6.1 Princípio da capilaridade

A ação capilar é um efeito físico causado por interações de um líquido com a parede de um tubo fino. O efeito de capilaridade é função da capacidade de o líquido molhar um material específico. O líquido mais comum com este efeito é a água, porque ela tem a capacidade de promover interações dipolo-dipolo devido à sua forte polaridade.

O filtro cerâmico tem como princípio de funcionamento a formação e secagem da torta por meio do vácuo gerado pela ação capilar nos poros das placas cerâmicas. A ação capilar é uma característica que os fluidos apresentam como consequência da combinação da tensão superficial do fluido e da adesão entre o fluido e o material de contato. No caso da filtragem com placas cerâmicas, o fluido é a água e o material de contato será a membrana da placa de alumina. Como a placa é hidrofílica, ou seja, tem afinidade pela água, e os poros das placas cerâmicas são extremamente pequenos, a ação capilar favorece a passagem da água para o interior da placa. Com os capilares preenchidos pelo líquido, representados na Figura 26, o ar não passará pela placa, uma vez que ele não apresenta nenhuma aderência com a parede dos capilares.

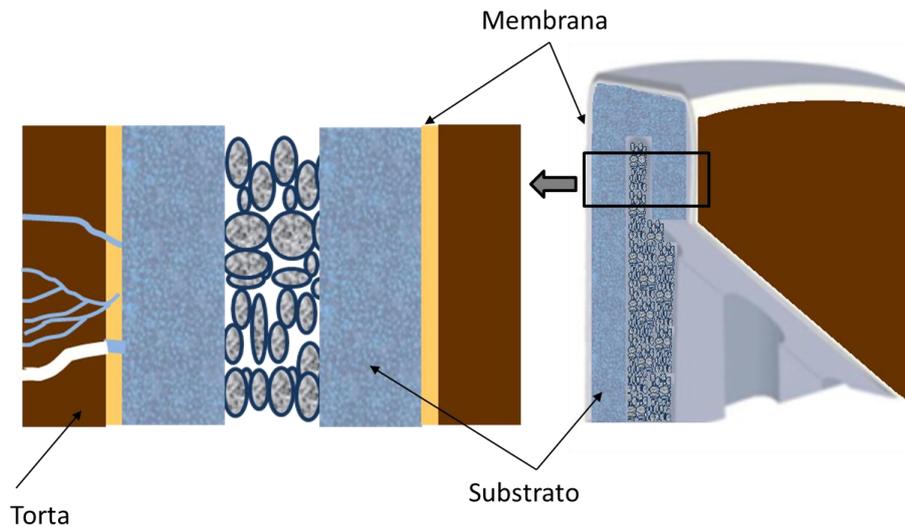


Figura 26 – Desenho representativo da água dentro da placa cerâmica (Adaptado de GÖRRES, SILVA E NUUTINEN, 2008).

Outro fator que influencia o desempenho da placa cerâmica é o diâmetro dos poros, em razão da pressão capilar gerada. Quanto menor o diâmetro do capilar, maior será a coluna de fluido contra a força da gravidade. Dessa forma, quanto menor o tamanho do poro, maior será a ação da força capilar.

De acordo com Görres e Hindström (2007), a equação de Young – Laplace descreve o fenômeno capilar e quantifica como o diâmetro dos poros, a molhabilidade e a tensão superficial interferem na pressão capilar:

$$\Delta p = \frac{4\gamma \cos\theta}{D} \quad (\text{Eq. 3.9})$$

Onde:

Δp : pressão de ponto de bolha;

γ : tensão superficial líquido-ar;

θ : ângulo de contato líquido-sólido;

D : diâmetro do poro.

O filtrado proveniente da filtração cerâmica apresenta turbidez muito baixa quando comparado ao filtrado oriundo do filtro a disco a vácuo convencional, como é

ilustrado na Figura 27. Segundo Görres, Silva e Nuutinen (2008), o percentual de sólidos do filtrado produzido em um filtro a disco convencional é cerca de 1 a 3% em massa, enquanto no filtro cerâmico ele é inferior a 0,002%. Assim, o efluente pode ser diretamente reutilizado no processo.



Figura 27 – Filtrado produzido em um filtro cerâmico.

3.2.6.2 Princípio de funcionamento

Segundo Görres e Hindström (2007), são cinco as principais fases de operação de um filtro cerâmico:

1. Formação da Torta, Figura 28 (a): A torta é formada quando os discos giram dentro da bacia com polpa. Nesse momento, a ação capilar cria um nível de vácuo extremamente elevado, o que atrai líquido através da placa, direcionando para o coletor de filtrado. Os sólidos acumulam-se rapidamente na superfície externa das placas, e a estrutura microporosa impede que os sólidos penetrem na superfície do disco. O filtrado que passa através das placas é removido por uma pequena bomba de vácuo (2,2 kW).

2. Secagem da torta: Com os discos fora da polpa, como pode ser observado na Figura 28 (b), e sob a ação do vácuo, a ação capilar continua de uma forma ininterrupta em toda a superfície do disco até que todo o líquido livre seja removido. Nenhum ar

penetra na superfície do disco e como resultado é obtida uma torta excepcionalmente seca.

3. Descarregamento da torta, Figura 28 (c): No final do ciclo de filtração, a torta já seca é descarregada por meio do uso de raspadores, que direcionam a torta para o chute de descarga dos filtros, posicionado sobre correias transportadoras. Os raspadores são ajustados de forma a deixar uma camada fina de torta sobre a placa para proteção contra abrasão mecânica da placa cerâmica.

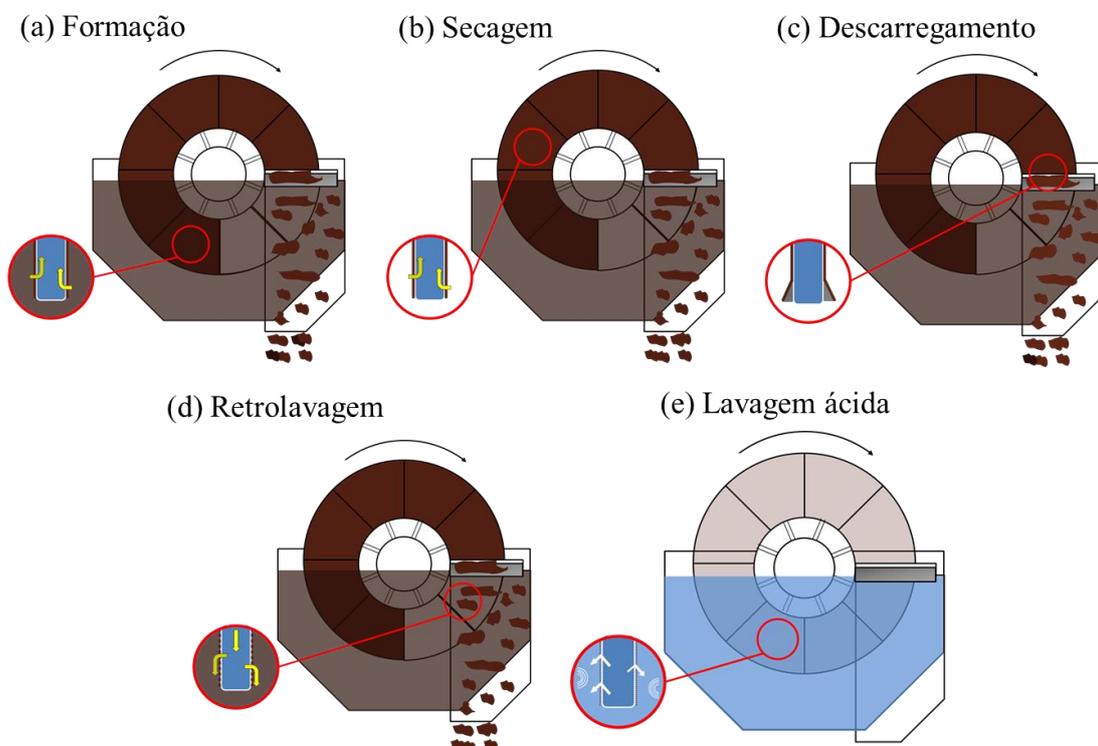


Figura 28 – Representação das fases de operação do filtro cerâmico (Adaptado de LAROX, 2005).

4. Retrolavagem: Parte do filtrado retirado é utilizado para limpar os discos a cada ciclo de filtração. Como pode ser observado na Figura 28 (d), é injetada água em fluxo contrário para realizar a limpeza da placa. Essa operação tem a função de remover a torta residual e limpar a estrutura microporosa, além de promover a ampliação da vida útil das placas cerâmicas, de maneira a manter a produtividade mais elevada por um tempo maior.

5. Regeneração da placa cerâmica: Durante a operação, as placas cerâmicas têm a sua permeabilidade diminuída, como pode ser observado na Figura 29 (SILVA, 2013).

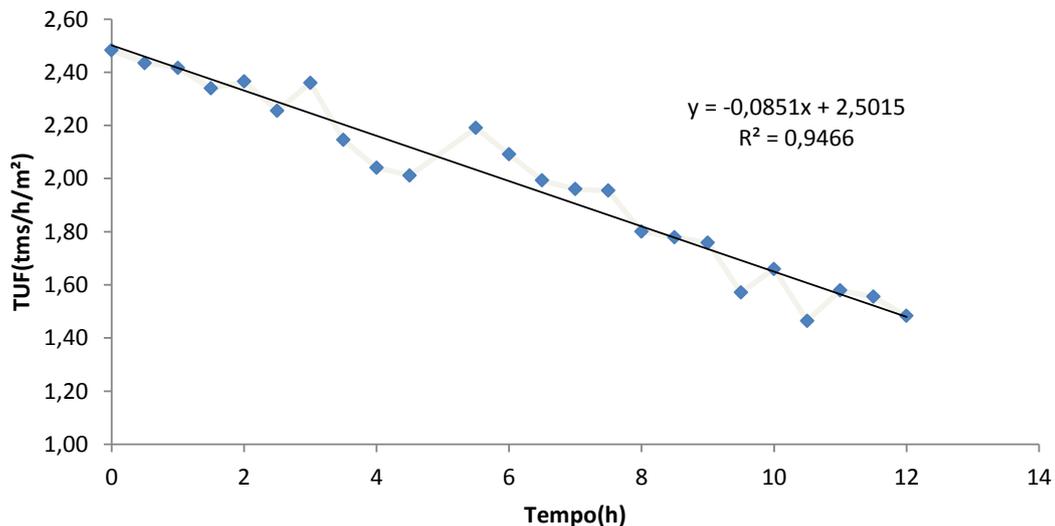


Figura 29 – Efeito do tempo de operação na produtividade de um filtro cerâmico (SILVA, 2013).

Para restaurar a permeabilidade das placas cerâmicas é necessário realizar o processo denominado “regeneração da placa”. Esse processo, representado na Figura 28 (e), consiste da parada do filtro durante o período médio de uma hora para realizar a limpeza ácida. No caso da filtragem de polpas de minério de ferro são utilizados os ácidos oxálico e nítrico. O ácido nítrico tem a função de remover matérias orgânicas residuais de processos anteriores de beneficiamento e de reduzir o pH da água para possibilitar a ação do ácido oxálico, enquanto este último tem a função de remover partículas de óxido de ferro impregnadas na estrutura microporosa da placa. O processo de lavagem também é combinado à utilização do ultrassom para aumentar a eficiência da lavagem.

As diferentes etapas de operação do filtro cerâmico são controladas pela válvula de distribuição de vácuo desse equipamento. A Figura 30 apresenta a válvula de distribuição do filtro com a indicação das regiões do ciclo de filtragem. Esse filtro possui a particularidade de apresentar duas zonas de formação de torta e permitir regular

por meio de válvulas o vácuo nessas duas regiões. Essa flexibilidade possibilita a regulagem da espessura da torta formada.



Figura 30 – Foto da válvula de distribuição de um filtro cerâmico.

3.3 PROJETO MINAS-RIO

No processo estudado do projeto Minas – Rio, a mineração será feita por lavra em uma mina a céu aberto e o transporte do minério será realizado por meio de caminhões com 240 toneladas de capacidade até duas instalações de britagem (Figura 31). As estações de britagem primária e secundária terão a capacidade de reduzir o tamanho máximo de partículas de 850 mm para 25 mm.

Após o processo de britagem, o minério seguirá para prensas de rolos para redução do tamanho das partículas, previamente à moagem. O material cominuído nos moinhos tubulares, com bolas como corpo moedor, será então encaminhado para a estação de deslamagem, para retirada de lamas do minério, tipicamente enriquecidas com sílica. O produto da deslamagem será então enviado para a estação de flotação (Figura 31). A flotação da Anglo American será composta de uma estação de condicionamento, na qual serão adicionados os reagentes amido e amina e será feita a correção de pH. Após o

condicionamento da polpa, esta será enviada para os estágios de flotação *rougher*, *cleaner* 1, *cleaner* 2, *scavenger* 1 e *scavenger* 2.

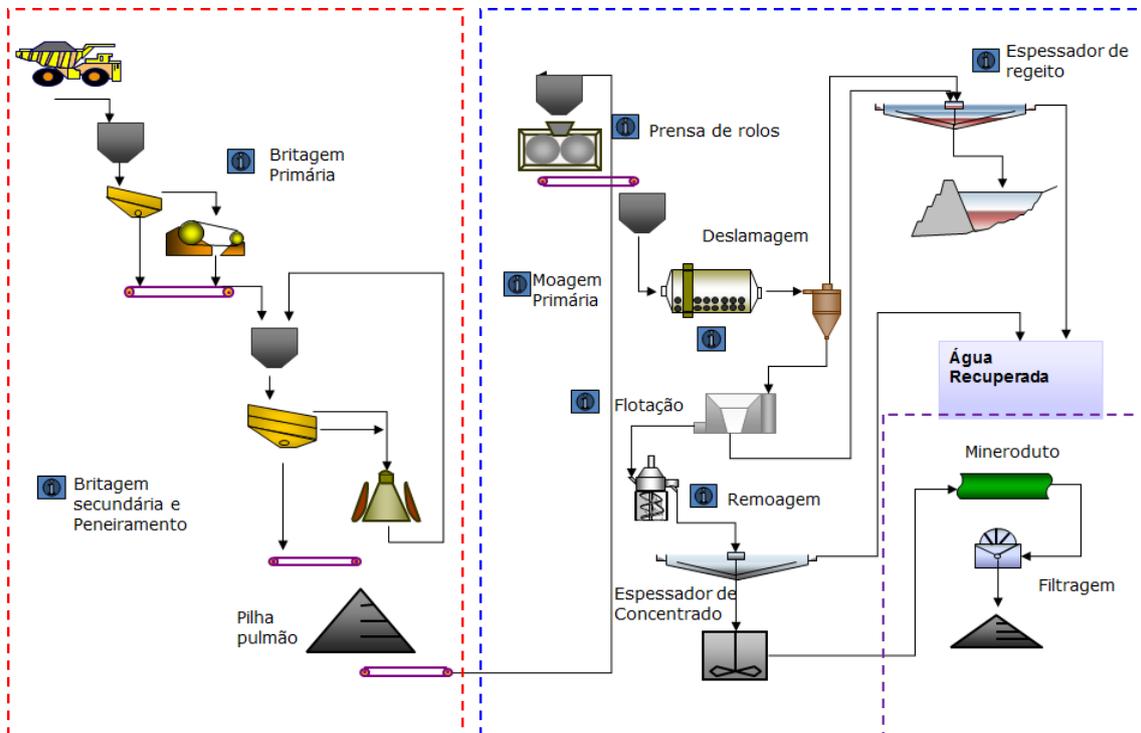


Figura 31 – Fluxograma do processo do projeto Minas-Rio (ANGLO AMERICAN, 2014).

Depois dos estágios de flotação, o concentrado é direcionado para a remoagem para ajuste de granulometria do produto final. Essa granulometria é controlada com o objetivo de atingir aquela necessária para o transporte de polpa, além de atender às especificações estabelecidas pelos clientes.

Depois da etapa de remoagem, o concentrado de minério de ferro, com porcentagem média de sólidos de 37% em massa, será adensado por meio de um espessador com 57 metros de diâmetro. O percentual de sólidos que se objetiva no *underflow* desse espessador é de 68%. Depois do aumento do percentual de sólidos da polpa, esta é enviada para um sistema de tanques de estocagem, a partir dos quais será bombeada para o mineroduto.

O transporte de polpa de Conceição do Mato Dentro, em Minas Gerais, até a estação de São João da Barra, no Rio de Janeiro, será feito por meio de um mineroduto com extensão de 528 km. O diâmetro predominante no duto é de 26 polegadas. Ele terá a capacidade de transportar 24,5 milhões de toneladas de concentrado de minério de ferro por ano. A Figura 32 apresenta um fluxograma esquemático do processo Minas-Rio mostrando a configuração do mineroduto dentro do sistema apresentado.



Figura 32 – Diagrama esquemático do projeto Minas-Rio (ANGLO AMERICAN, 2014).

Para manter os parâmetros reológicos da polpa dentro dos requisitos necessários para bombeamento, e para reduzir o nível de corrosão do mineroduto, serão adicionados os reagentes coagulante orgânico e hidróxido de sódio, respectivamente. O coagulante tem efeito benéfico sobre o processo de filtração porque promove a agregação dos finos; já a soda cáustica promove estabilidade na suspensão e, portanto, torna a filtração mais difícil.

A polpa transportada por meio desse mineroduto chega à unidade de São João da Barra entre 81 e 91 horas após o início de bombeamento. Nessa unidade ocorrem as etapas de separação sólido/líquido de espessamento e filtração. O fluxograma de processo dessa unidade é apresentado na Figura 33. Em operação normal, a polpa proveniente do mineroduto é direcionada para um espessador de 50 metros de diâmetro, cuja função é aumentar o percentual de sólidos de 68% para 72%. O *underflow* desse espessador,

quando atinge essa concentração de sólidos, é então direcionado para os dois tanques de homogeneização e estoque de polpa.

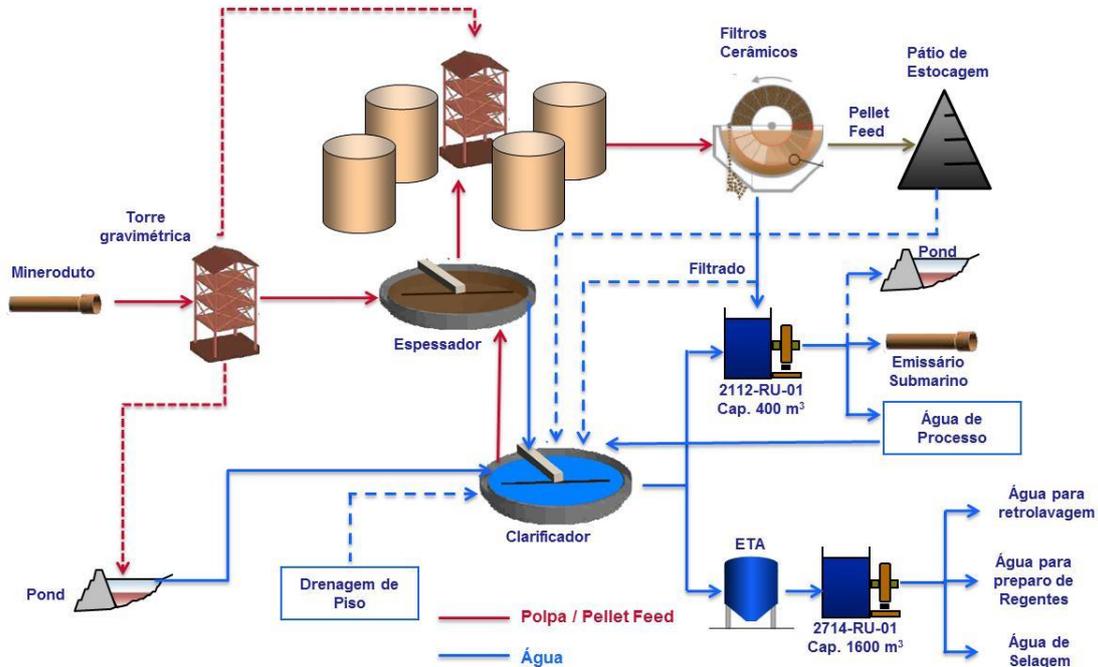


Figura 33 – Fluxograma do processo da Filtragem de São João da Barra (ANGLO AMERICAN, 2014).

Um sistema de bombeamento é responsável por enviar a polpa dos tanques para os três distribuidores da filtragem, e cada um deles remete, por gravidade, a polpa para um conjunto de quatro filtros. Os filtros, por sua vez, fazem a separação sólido/líquido final, tendo como produto principal o *pellet feed* e o efluente do filtro cerâmico, o filtrado, que será enviado para o emissário submarino.

O *pellet feed*, com cerca de 8% de umidade, é direcionado para o pátio de estocagem por meio de um sistema de transportadores de correias para ser empilhado. Em seguida, uma recuperadora faz a retomada do material e o envia para o sistema de embarque de navios no Porto Açú.

3.3.1 Filtragem do projeto Minas-Rio

A Filtragem do Projeto Minas Rio, Figura 34, é composta por 12 filtros cerâmicos com 144 m² de área cada. Essa filtragem será responsável pela produção de 26,5 milhões de toneladas por ano de *pellet feed* com umidade em torno de 8% em massa.



Figura 34 – Filtragem do Projeto Minas-Rio.

A Tabela 1 apresenta os dados principais do sistema de filtragem estudado e as características da polpa que será processada nesse sistema.

Nessa filtragem será possível realizar o controle do percentual de sólidos da polpa, por meio de um espessador, e do pH da polpa, por meio da adição de dióxido de carbono na polpa. De acordo com o projeto de filtragem, o pH da polpa será de 7,0 e o percentual de sólidos será de 72%.

Tabela 1 – Dados operacionais da filtração do projeto Minas Rio

Área de filtração	m ² /filtro	144
Número de discos	und.	12
Número de placas por disco	und.	15
Volume da bacia	m ³	35
Produção anual	Mt (base úmida)	26,5
Taxa unitária	tms/m ² h	2,2
Teor de umidade	%	8,0
Área superficial específica do minério	cm ² /g	1400
<44 µm do minério	%	88,0
Sólidos na polpa (em massa)	%	72

4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A seguir é apresentada a metodologia utilizada para o desenvolvimento das diferentes etapas do estudo. São descritos os procedimentos adotados na preparação das amostras, nas análises químicas e físicas realizadas e na dinâmica de realização de testes. Optou-se pela realização de testes em duas etapas. Na primeira foram realizados testes alterando-se uma variável por vez, enquanto na segunda etapa foi elaborado um plano de experimentos, o qual permite avaliar a interação entre as variáveis de processo.

4.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras utilizadas para os ensaios são representativas da mina nos cinco primeiros anos de operação do projeto Minas-Rio da Anglo American. Elas foram processadas na planta piloto localizada em Conceição do Mato Dentro, em Minas Gerais, no Centro de Caracterização Mineral da Anglo American.

As amostras foram preparadas seguindo o fluxograma apresentado na Figura 35. Inicialmente, a amostra foi britada por meio de um britador de mandíbulas com abertura de 32 mm. Posteriormente, o material britado foi moído em circuito fechado em moinhos de bolas com 60 cm de diâmetro por 90 cm de comprimento. A carga de bolas tem *top size* de 40 mm de diâmetro e o grau de enchimento do moinho foi de 40%, o qual foi operado a 73% da velocidade crítica.

Essa amostra cominuída foi deslamada em hidrociclones de fundo cônico de 50 mm de diâmetro, com apex de 6 mm e vortex finder de 19 mm. A adição de soda foi necessária para controle do pH da suspensão, com o intuito de manter a polpa dispersa. Depois da classificação em hidrociclones, o material, com cerca de 50% de sólidos, foi transferido para um tanque de condicionamento, onde foram adicionados os insumos amido gelatinizado com soda cáustica. O pH foi ajustado para 10,5 com a adição de solução de soda cáustica.

A polpa recebeu, então, amina, e o processo de flotação foi realizado por meio de flotação convencional, reversa catiônica em células tipo CDC, para que fosse atingido o teor de sílica inferior a 1,8% no produto. Depois dessa etapa foi realizada a adequação da granulometria final do produto por meio de uma remoagem realizada por moinhos de bolas horizontais.

O produto da remoagem foi direcionado para uma unidade de adensamento com a finalidade de aumentar a percentagem de sólidos da polpa para 68% em massa.

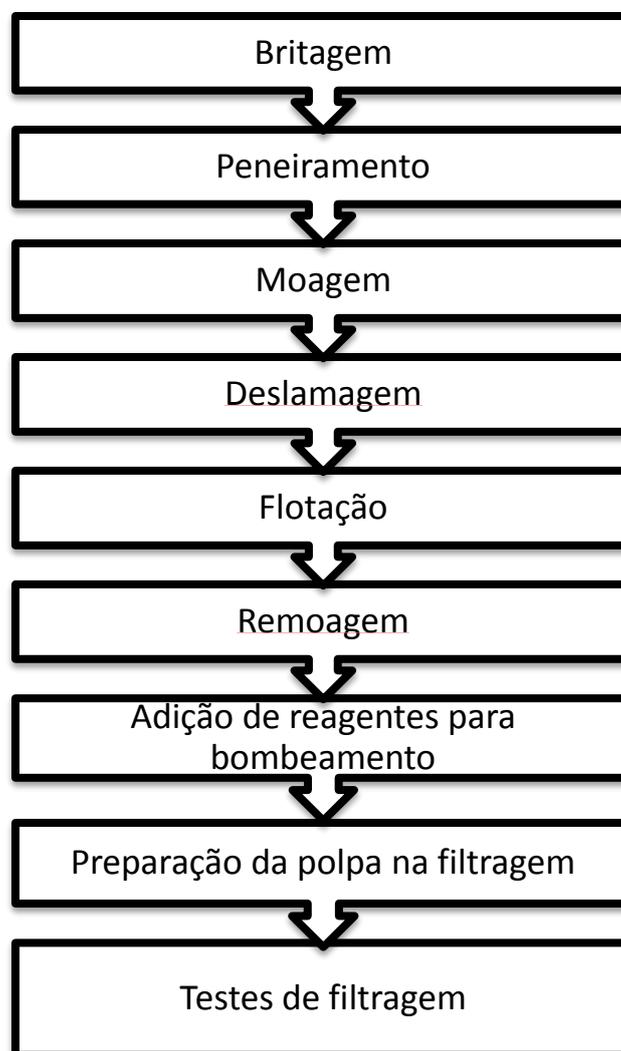


Figura 35 – Fluxograma da preparação das amostras para os ensaios de filtração.

Depois de adensada, a polpa foi filtrada. O minério obtido por meio dessa filtragem foi reservado para que fosse feita a repolpagem e a realização dos testes de filtragem.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO MINÉRIO DE FERRO

A caracterização do minério foi realizada por meio das análises listadas a seguir, com suas respectivas metodologias:

- Análise química: espectrometria de fluorescência de raios-x (Fe, SiO₂, Al₂O₃ e P);
- Área superficial específica: permeabilímetro Blaine;
- Densidade real do sólido: picnômetro;
- Distribuições granulométricas: peneiramento com vibração mecânica para partículas maiores que 37 µm e granulometria a laser.

4.3 REAGENTES UTILIZADOS

Os reagentes utilizados nos ensaios e suas funções estão apresentados na Tabela 2. Com exceção dos surfatantes, os demais reagentes fazem parte do processo da Anglo American e sua utilização industrial é possível com pequenas modificações de processo.

Tabela 2 – Dados dos reagentes utilizados para os ensaios

Reagente	Função	Características
Hidróxido de sódio (NaOH)	Aumento de pH da polpa	Hidróxido de sódio a 50%.

Coagulante orgânico	Auxiliar de filtragem	Polímero catiônico solúvel em água em emulsão.Principais componentes: Acrilamida e monômero acrílico.
Surfatante 01	Auxiliar de filtragem	Surfatante não-iônico /antiespumante - etoxilato de álcool
Surfatante 02	Auxiliar de filtragem	Mistura de surfatantes iônicos e não-iônicos
Dióxido de carbono (CO ₂)	Redução de pH da polpa	Gás industrial

4.4 ENSAIOS DE FILTRAÇÃO EM BANCADA

Os ensaios de filtração seguiram etapas de preparação da polpa e de ensaios de *leaf test*. As etapas utilizadas nesses ensaios foram as seguintes:

1. Determinação do teor de umidade do *pellet feed*;
2. Preparação da polpa em recipientes separados, misturando-se o sólido com água até o teor de sólidos desejado para cada teste;
3. Adição de soda cáustica para aumentar o pH para 10,5, a fim de simular o pH de operação normal do mineroduto;
4. Adição de coagulante orgânico na polpa na dosagem de 200 g/tms;
5. Reserva da polpa por um período de 16 horas, para acondicionamento dos reagentes;
6. Adição dos insumos finais de teste, quando necessário;
7. Realização de *leaf test*;

8. Coleta de amostras para medir o teor de umidade, produtividade e espessura da torta.

Foi realizado um estudo exploratório para cada uma das variáveis definidas como operacionais de teste. Posteriormente, as variáveis de maior relevância foram testadas em conjunto a fim de avaliar o nível de interação entre elas e para otimização do processo de filtragem. A Tabela 3 apresenta os níveis utilizados para investigar cada uma das variáveis de forma independente.

Tabela 3 – Variáveis e níveis nos ensaios de filtragem com a análise de uma variável por vez

Variável	Níveis	Procedimento
pH	10,5 8 7 6,4	Adição de CO ₂
Área Superficial Específica(cm ² /g)	1005 1217 1431	Mistura de duas amostras
Coagulante (g/tms)	100 150 200 250	Adição de reagente a 10%(m/m)
Surfatante (g/tms)	25 50 100 150 200 500	Adição de reagente concentrado
Temperatura (°C)	24 30 40 50 60	Aquecimento da polpa
Sólidos na suspensão em massa (%)	64 66 68 70 72 74	Preparação com diferentes massas

Os ensaios de filtração foram realizados com um *kit* para teste de dimensionamento de filtros cerâmicos. A metodologia utilizada para esses ensaios foi a de testes da empresa projetista dos filtros cerâmicos, a Outotec. A foto do aparato usado para a realização dos ensaios de filtração é apresentada na Figura 36, enquanto o procedimento utilizado para o ensaio encontra-se descrito nessa seção.



Figura 36 – Foto do *leaf test* utilizado nos ensaios.

O equipamento de teste gera o vácuo a partir da entrada de água, com pressão superior a 1,5 bar, no tubo ejetor. Forma-se, nesse tubo, um vácuo entre 0,85 e 0,95 bar.

Para realização dos testes de filtração os capilares da placa cerâmica deveriam estar completamente preenchidos com água. Para tanto, foi adotado o procedimento de manter a placa na água por, no mínimo, 24 horas. Após esse tempo foi verificada a permeabilidade da placa cerâmica, que precisa ser igual a, aproximadamente, 6000 m³/h. Caso a permeabilidade se encontrasse abaixo desse valor, seria necessária a limpeza com o auxílio de ultrassom. Depois dessa etapa, o ensaio ocorreu de acordo com os passos a seguir:

1. Homogeneização manual da polpa;
2. Direcionamento do vácuo para a placa cerâmica;
3. Parada da homogeneização e inserção da placa na polpa, com o vácuo atuando, durante o tempo de 10 segundos;
4. Retirada da placa da polpa e ocorrência de desaguamento por 16 segundos, conforme pode ser observado na Figura 37;



Figura 37 – Foto de uma torta na etapa de desaguamento.

5. Após o tempo citado, realização da raspagem de um dos lados da torta da placa para o recipiente de pesagem, para determinação do teor de umidade e da capacidade;
6. Medição da espessura da torta no outro lado da placa com o uso de um paquímetro;
7. Realização do segundo teste na mesma condição;
8. Limpeza da placa com uso de ultrassom, para a próxima condição de teste.

Para o teste no qual houve a necessidade de controlar a temperatura foi utilizado um recipiente metálico sobre uma chapa aquecedora, com controle de temperatura, e um agitador, para aumentar a transferência de calor e manter a polpa em suspensão. Com o uso de um termômetro era verificada a temperatura da polpa e assim que era atingido o valor de teste mais 1°C, era realizada uma medição da massa específica a fim de verificar se a percentagem de sólidos da polpa estava de acordo com o planejado. Caso não estivesse, uma quantidade adicional de água era introduzida para correção. Quando o teor de sólidos e a temperatura da polpa estavam adequados era realizado o teste a partir do passo 03.

4.4.1 Determinação do teor de umidade

O teor de umidade da torta, em base úmida, é obtido pela relação entre a quantidade de água da torta e a massa úmida da torta. Ela é medida utilizando-se o peso da torta úmida e o peso da torta seca. Esse último é obtido pela pesagem após secagem em estufa a $100^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}$, até que seja observado peso constante da torta entre duas medidas sucessivas. O cálculo do teor de umidade é realizado pelo uso da Equação 4.1.

$$Umidade = \frac{(P_u - P_s)}{P_u} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Onde:

P_u : peso úmido da torta;

P_s : peso seco da torta.

4.4.2 Determinação da taxa unitária de filtração

A taxa unitária de filtração (TUF) é o principal indicador de produtividade de um sistema de filtração. Essa variável corresponde à capacidade de produção de uma área de um metro quadrado no intervalo de tempo de uma hora. É a forma mais utilizada, dentro do meio acadêmico e industrial, para comparar a capacidade de diferentes sistemas de filtração. O cálculo dessa taxa pode ser obtido por meio da Equação 4.2:

$$TUF = \left(\frac{M}{t.A} \right) F \quad (\text{Eq. 4.2})$$

Onde:

TUF : taxa unitária de filtração;

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

A : área útil do setor de teste em m^2 ;

t : ciclo de filtração, dado em horas;

F : fator de conversão de *leaf test* para filtro industrial.

Conforme mostra a equação, para que fosse estimada a produtividade do filtro industrial a partir dos ensaios de bancada foi utilizado o fator de *scale up* de 0,7. Esse fator é o utilizado pela empresa fabricante do filtro.

4.5 TESTES DE OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DA FILTRAGEM

Depois de avaliadas as variáveis de forma independente, foi possível a seleção de variáveis e faixas para a realização de testes, com o objetivo de otimizar as condições de filtragem. As variáveis escolhidas para o estudo foram pH, área superficial específica, percentual de sólidos e dosagem de coagulante.

Os fatores área superficial específica, dosagem de coagulante e percentual de sólidos foram estudados por meio de um experimento fatorial Box-Behnken. Os fatores e faixas utilizados estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Variáveis e faixas utilizadas nos ensaios fatoriais

Variáveis	Faixas
Área Superficial Específica	1005 a 1431 cm ² /g
Dosagem de coagulante	0 a 200 g/tms
% de sólidos em massa	69% a 75%

Conforme apresentado na seção de resultados, nos testes exploratórios foi verificado que o melhor desempenho da filtragem foi alcançado quando a polpa apresentava pH neutro, em torno de 7,0. Portanto, foi realizado o experimento fatorial nesse pH. Além deste, foi proposto outro experimento, em pH 10, para avaliar o efeito da dosagem de coagulante adicional.

4.6 TESTES EM FILTRO PILOTO

Para verificar se os fatores aplicados em ensaios de bancada aproximavam-se dos valores reais de operação foram realizados ensaios pilotos. Ademais, foi possível verificar para condições específicas de processo qual seria o comportamento real de um sistema de filtração.

Foram realizados três testes em filtro piloto com cerca de 1,5 toneladas de minério cada. O filtro utilizado foi o CC01, com 1 metro quadrado de área. Para que fosse possível realizar um teste contínuo com 12 horas de operação, a fim de avaliar a perda de produtividade com o tempo, foi montado um aparato de testes conforme mostra a Figura 38. Esse sistema é constituído por um tanque no qual a polpa é preparada inicialmente. Durante o teste o *pellet feed* e o filtrado retornam para esse tanque de modo que a densidade da polpa seja mantida. Dessa forma, o sistema apresenta sempre a mesma massa de polpa e permite a continuidade do ensaio.

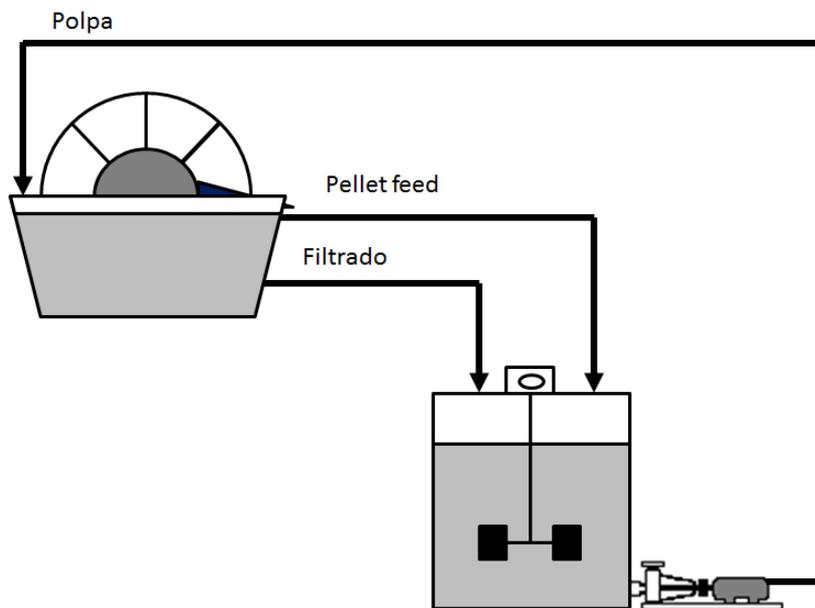


Figura 38 – Esquema do teste em filtro piloto.

A forma de preparação de polpa foi semelhante àquela dos testes de bancada. A polpa foi aprestada com o percentual de sólidos adequado ao teste, dosagem de soda cáustica até atingir o pH de 10, dosagem de coagulante de 200 g/tms e agitação de 24 horas antes do teste. Os parâmetros utilizados nos ensaios piloto podem ser observados na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros adotados nos testes realizados em escala piloto

Número do teste	Sólidos (%)	Coagulante (g/tms)	Área específica (cm²/g)
1	72	0	1390
2	70	0	1390
3	68	50	1390

Para medir a produtividade do sistema de filtração, a cada 30 minutos de teste era realizada uma análise da massa produzida e da umidade do *pellet feed*. Os parâmetros pH e massa específica da polpa foram regulados durante todo o teste, de forma a manter a polpa com as características adequadas ao processo de filtragem.

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados da caracterização das amostras, do estudo de cada uma das variáveis independentes e dos experimentos realizados utilizando a metodologia de superfície de resposta.

5.1 CARACTERÍSTICAS DAS AMOSTRAS

As amostras de minério foram obtidas na Mina do Sapo, em Conceição do Mato Dentro e processadas no Centro de Caracterização Mineral, conforme metodologia descrita no Capítulo 4. O resultado da análise química dessas duas amostras pode ser observado na Tabela 6. Verificou-se que essas amostras apresentavam características de um concentrado padrão para processamento em alto forno.

Tabela 6 – Composição química dos concentrados (%)

Composição	Amostra A	Amostra B
Fe	67,91	67,10
SiO ₂	1,84	2,50
Al ₂ O ₃	0,69	0,42
P	0,018	0,025

As características físicas relativas à área superficial específica e à granulometria estão apresentadas na Tabela 7. Constata-se uma diferença entre as duas amostras de aproximadamente 400 unidades de superfície específica. Quanto à granulometria, foi notada desigualdade entre as duas curvas granulométricas, em especial para o parâmetro percentual passante na peneira de 40 µm, que foi de 78,8% para a amostra mais grosseira (B), e de 88,5% para a amostra mais fina (A).

Tabela 7 – Características físicas das amostras

Características	Amostra A	Amostra B
SE (cm ² /g)	1431	1005
<150 μm (%)	99,9	99,3
<106 μm (%)	99,7	98,3
<75 μm (%)	98,0	94,5
<53 μm (%)	92,5	84,7
<44 μm (%)	88,5	78,8

A fim de confirmar os dados de granulometria foram realizados testes de granulometria a laser. A partir da observação desses resultados, apresentados na Figura 39, pode-se verificar a grande diferença nas granulometrias das duas amostras testadas. Percebe-se, pelo valor do passante em 10 μm, que a amostra A apresenta praticamente o dobro de partículas ultrafinas da amostra B.

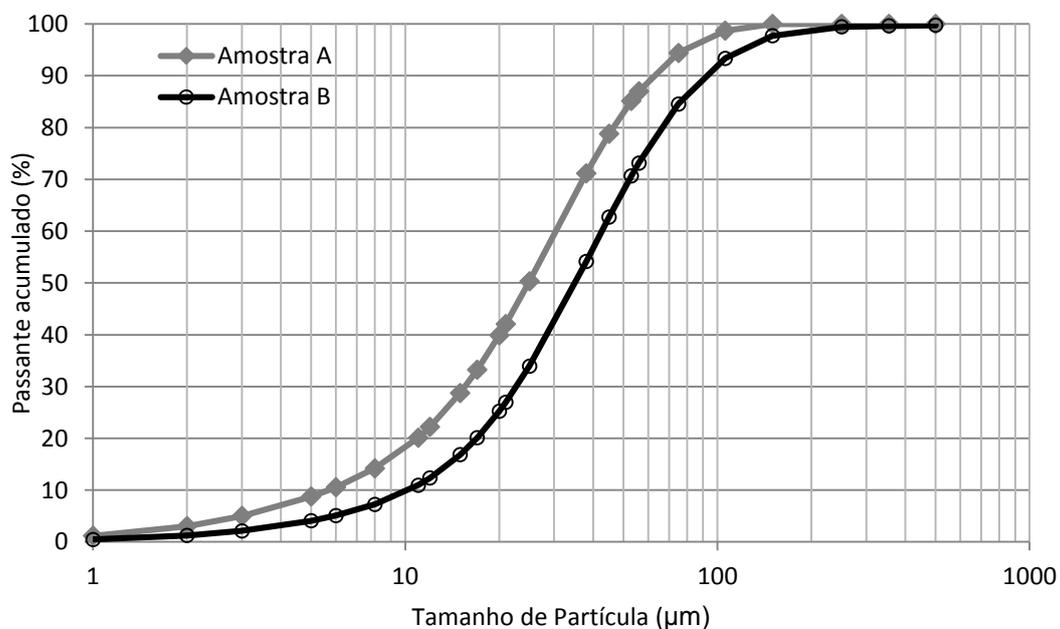


Figura 39 – Granulometria a laser das amostras.

5.2 TESTES EXPLORATÓRIOS

Nesta seção serão apresentados os resultados para cada uma das variáveis independentes. Será realizada uma breve discussão sobre cada uma delas, correlacionando os resultados obtidos e os mecanismos de filtração com filtros cerâmicos.

5.2.1 Efeito do percentual de sólidos

O percentual de sólidos é uma variável de extrema importância na filtração cerâmica. A estrutura da placa cerâmica apresenta capacidade hidráulica limitada e, por isso, quanto maior o teor de sólidos da polpa menor será a quantidade de água que precisará passar através da placa cerâmica. Como pode ser observado na Figura 40, o aumento do teor de sólidos promoveu aumento expressivo na produtividade da filtração cerâmica.

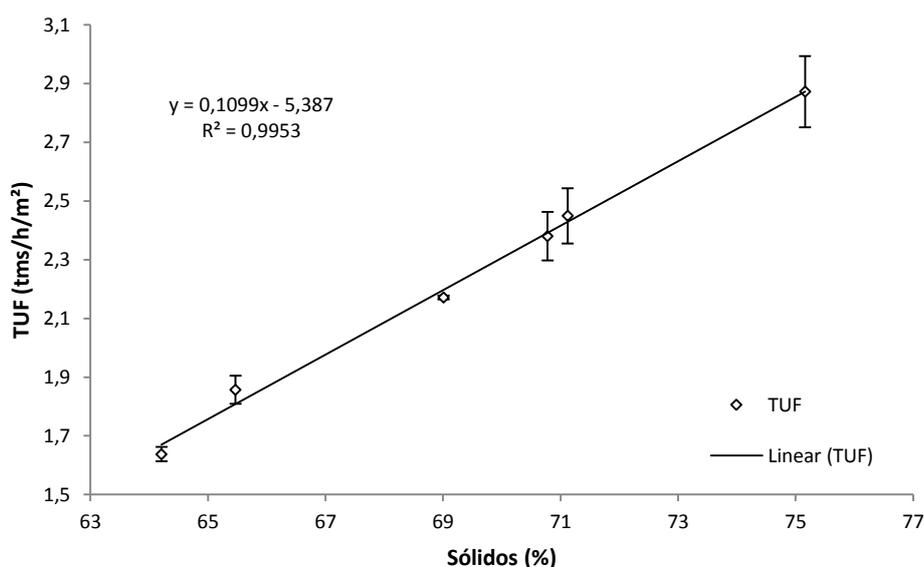


Figura 40 – Influência do percentual de sólidos na produtividade da filtração.

Dentro das faixas operacionais previstas para o espessamento do projeto estudado, o teor de sólidos poderá variar na etapa de filtração de 68% até 72%. Para essa variação, observou-se que a taxa unitária aumenta de 2,09 para 2,53 tms/h/m², ou seja, há um aumento de 21% na produtividade da filtração cerâmica.

Percebe-se que, aumentando o teor de sólidos da polpa para valores acima de 72%, pode-se acrescer a produtividade da filtração cerâmica em cerca de 4% para cada 1% de aumento no teor de sólidos.

Por outro lado, o aumento do teor de sólidos promoveu o aumento indesejado da umidade do *pellet feed*. Conforme pode ser observado na Figura 41, isso ocorreu porque a espessura da torta formada foi maior, e, conseqüentemente, o tempo para desaguamento não foi suficiente para remover a água do interior da torta.

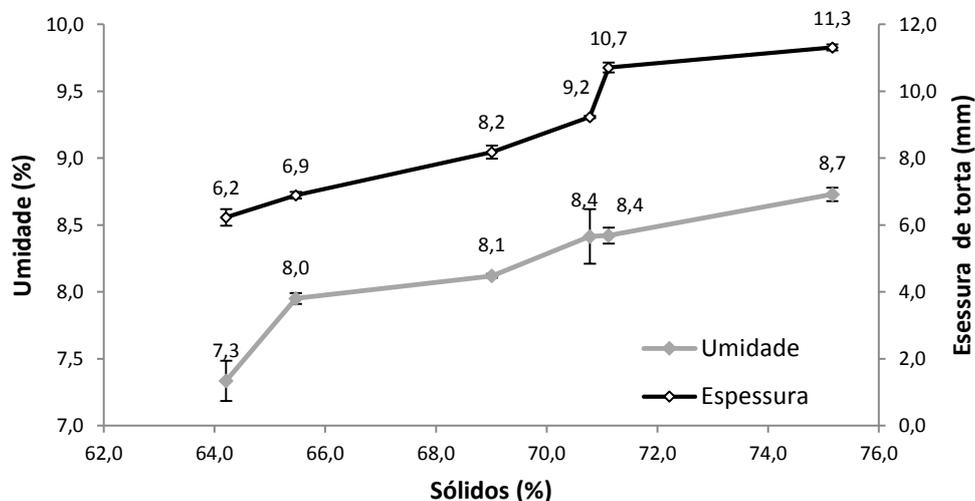


Figura 41 – Influência do teor de sólidos na espessura e no teor de umidade da torta.

Com base nas equações de produtividade e umidade em função do teor de sólidos, foi possível determinar a vazão média de filtrado através da placa cerâmica para diferentes teores de sólidos. Pôde-se observar que, com o aumento do teor de sólidos, a vazão média de filtrado caiu significativamente. Essa queda está relacionada à elevação de resistência

da torta causada pelo aumento de espessura, como pode ser observado na equação de Darcy (Equação 3.5), na qual o fluxo de filtrado é inversamente proporcional à espessura da torta.

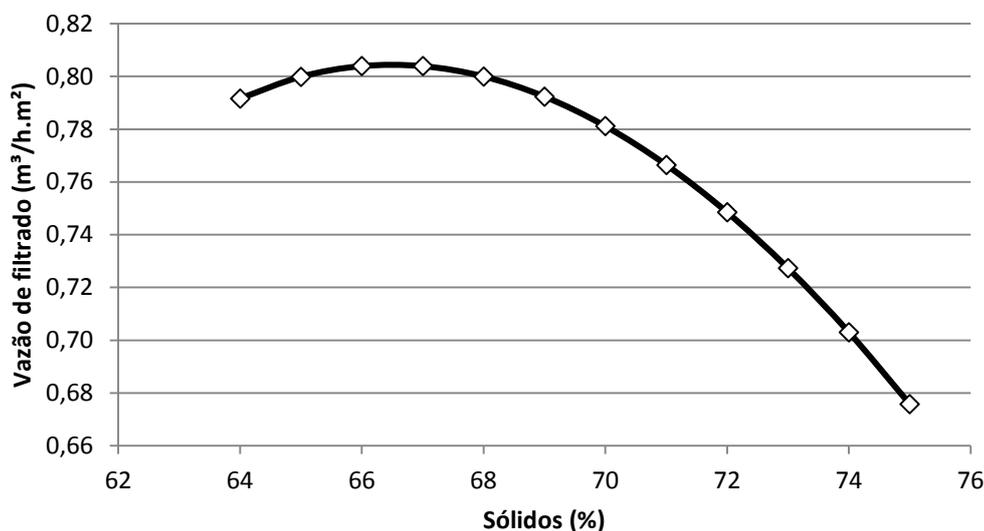


Figura 42 – Efeito do teor de sólidos na vazão específica de filtrado calculada.

5.2.2 Efeito da área superficial específica

A avaliação da influência da área superficial específica é necessária tendo em vista que a unidade industrial de filtração poderá receber polpas com variações desse parâmetro. Foram testadas duas amostras, uma com 1430 cm²/g e outra com 1004 cm²/g. A Figura 43 apresenta o resultado dos testes de filtração para essas duas condições. Observa-se que a redução da área superficial específica promoveu aumento expressivo no valor da produtividade da filtração. Essa elevação de produtividade é justificada pelo aumento da permeabilidade da torta, já previsto pela equação de Kozeny, de acordo com a qual a permeabilidade da torta é inversamente proporcional ao quadrado da área superficial específica.

O teor de umidade da torta foi menor para valores mais baixos de área superficial específica. Nota-se que, mesmo com o aumento na espessura da torta da amostra de menor

área superficial específica, a torta formada estava tão permeável, devido à sua maior porosidade, que foi possível alcançar valores mais baixos de umidade.

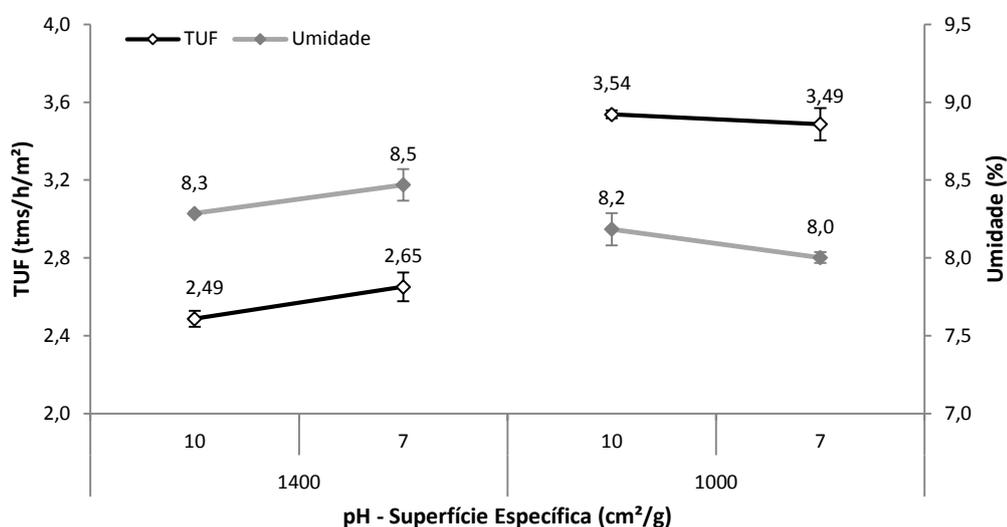


Figura 43 – Efeito da área superficial específica no teor de umidade e na produtividade da filtração.

5.2.3 Efeito do pH

No processo analisado existe um sistema de estocagem de CO₂ para reduzir o pH da polpa antes da filtração. Por isso, no estudo, foi feita a adição prévia desse reagente para avaliar a influência do pH no desempenho da filtração. Os resultados estão apresentados na Figura 44. Nota-se que a redução do pH para valores até 7 aumentou a produtividade do sistema de filtração e diminuiu o teor de umidade do *pellet feed*.

Esse resultado pode ser explicado pelo fato de a diminuição do pH ter permitido que houvesse redução do potencial *zeta*, o que acarretou maior agregação das partículas em razão da diminuição de sua repulsão eletrostática. Porém, quando o pH foi abaixado para 6,4 ocorreu a redução da produtividade, provavelmente em razão da dispersão ocasionada pelo excesso de coagulante nesse pH.

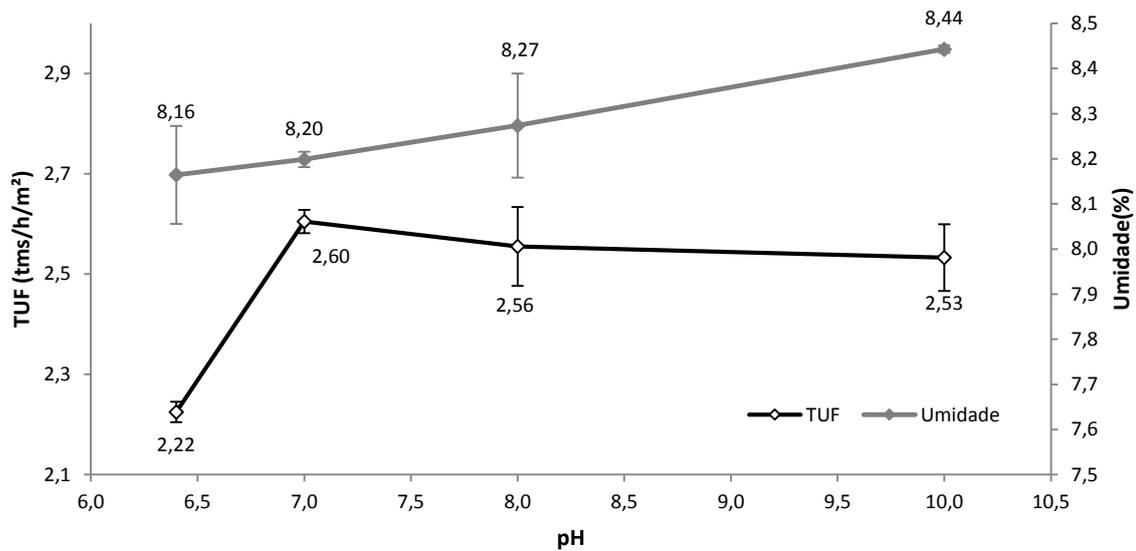


Figura 44 – Influência do pH no teor de umidade e na produtividade da filtragem.

5.2.4 Efeito da temperatura

Como pode ser observado na Figura 45, a elevação da temperatura apresentou-se como uma excelente forma de aumentar a produtividade de um sistema de filtragem cerâmica, e, ao mesmo tempo, reduzir a umidade do *pellet feed*.

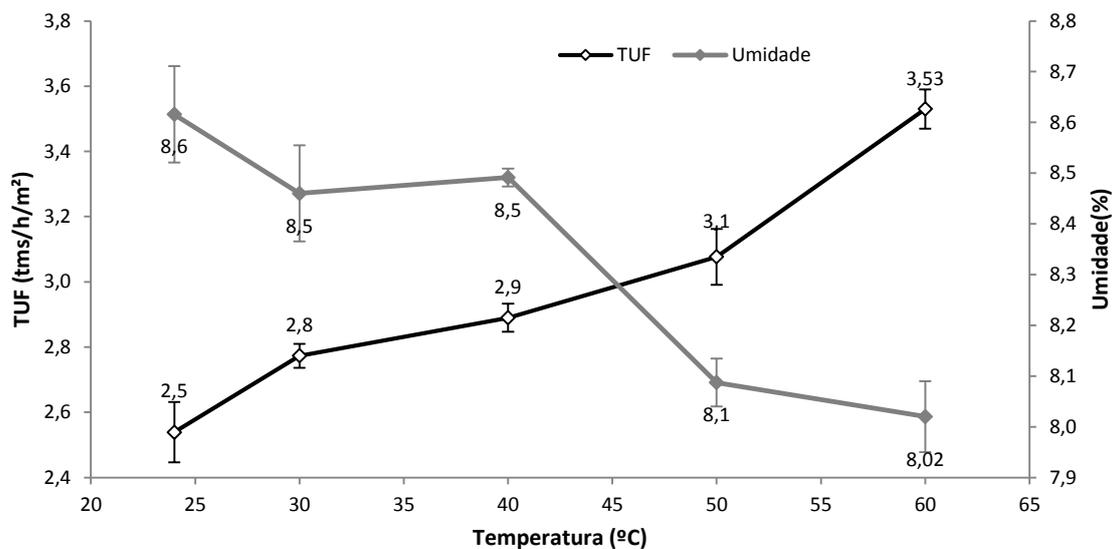


Figura 45 – Influência da temperatura na umidade e produtividade.

A temperatura tem efeito significativo sobre a filtração porque atua na modificação da viscosidade do fluido. O aumento da temperatura reduz a viscosidade do fluido, o que eleva a vazão de filtrado tanto na torta quanto nos capilares cerâmicos, acarretando aumento da produtividade. Em relação à umidade, essa menor viscosidade proporcionará maior velocidade de drenagem da torta e, por consequência, menor umidade do *pellet feed*. A maior espessura da torta não foi suficiente para elevar o teor de umidade do *pellet feed*, uma vez que a menor viscosidade do fluido aumentou a velocidade de escoamento do filtrado.

Além de reduzir a viscosidade do filtrado, o aumento de temperatura proporciona redução da tensão superficial, o que pode ter contribuído para a diminuição da umidade do *pellet feed*. Dentro dos limites estudados, não se observou decréscimo da produtividade em função da redução da tensão superficial.

Para o projeto estudado, estima-se que a temperatura da polpa ficará entre 30 e 40°C em razão do atrito proporcionado pelo transporte da polpa pelo mineroduto de 528 km. Na configuração inicial de projeto não existem sistemas dedicados de aquecimento de polpa. Uma análise mais profunda que contenha estudo de viabilidade financeira deverá ser feita para avaliar a possibilidade de aquecimento de grandes volumes de polpa.

5.2.5 Efeito da adição de coagulantes

Na Figura 46 pode-se verificar o efeito da dosagem adicional de coagulante no desempenho da filtração. Percebe-se que a dosagem adicional desse insumo em até 100 g/tms promoveu aumento na produtividade do sistema de filtração. Dosagens superiores a essa promoveram redução da produtividade, provavelmente em decorrência da reversão de cargas causada pelo excesso de coagulante na suspensão.

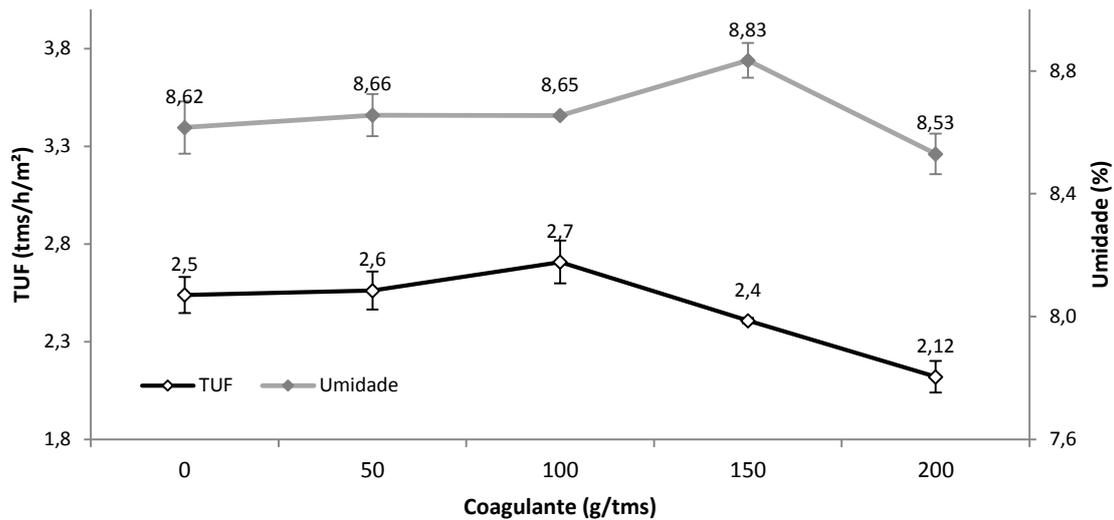


Figura 46 – Influência da dosagem de coagulante no teor de umidade e na produtividade.

A fim de verificar a coagulação e dispersão da polpa, foram realizados ensaios em béqueres (Figura 47) com diferentes dosagens de coagulantes. Observou-se que a utilização desse insumo em quantidades acima de 200 g/tms causava a dispersão do minério.

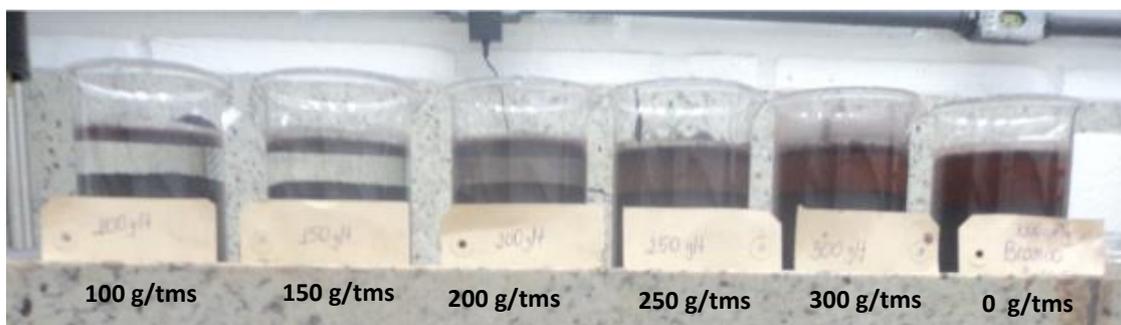


Figura 47 – Ilustração do efeito do coagulante na dispersão da polpa.

5.2.6 Efeito da adição de surfatantes

Foram testados dois surfatantes. O reagente identificado como surfatante 02 apresentou efeito em menores dosagens como pode ser observado na Figura 48. Percebeu-

se que houve redução da produtividade do sistema de filtração com o aumento da dosagem desse surfatante. Houve também a diminuição do teor de umidade residual do *pellet feed*. A queda de produtividade com a adição de surfatantes pode ter ocorrido por dois motivos. Primeiramente, pela redução da tensão superficial do líquido, o que pode ter diminuído a pressão capilar. Em segundo lugar, em razão da adsorção do tensoativo na placa, o que a teria tornado parcialmente hidrofóbica e reduzido o número de capilares com água.

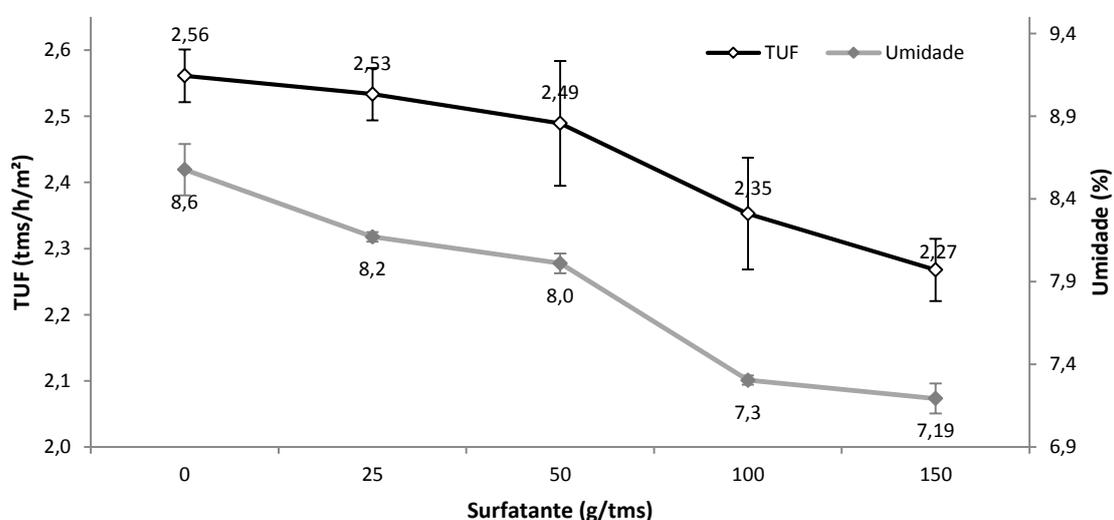


Figura 48 – Influência da adição do surfatante 02.

Quando o surfatante 01 foi testado com as dosagens de 50 e 100 g/tms, resultados na Figura 49, não houve efeito significativo no desempenho da filtração. Para tentar verificar o efeito desse reagente, foi sugerido um terceiro teste, com 500 g/tms. Para este foi possível observar uma queda expressiva na produtividade do sistema de filtração. Após o teste, foi realizado um teste de permeabilidade da placa cerâmica e verificado que a mesma havia perdido permeabilidade. Em um primeiro momento, pensou-se que havia ocorrido a impermeabilização da placa com minério; porém, depois de exaustivas limpezas ácidas e por ultrassom não foi possível reestabelecer a permeabilidade dessa placa. Acredita-se que houve adsorção do coagulante em parte da estrutura da alumina, tornando-a hidrofóbica, o que reduziu a permeabilidade da placa cerâmica.

Havia a hipótese de que a tensão superficial do líquido da polpa havia diminuído e, por isso, reduzido a produtividade do sistema de filtragem. Essa suposição não foi confirmada, uma vez que a produtividade do primeiro teste, com 500 g/tms, foi de 2,34 tms/h/m². No segundo teste, no mesmo recipiente, a produtividade foi de 1,50 tms/h/m². Isso indica que depois da passagem do primeiro líquido pela placa houve a redução expressiva da permeabilidade. Somente foi possível reestabelecer a permeabilidade da placa cerâmica quando foi adicionada uma solução de soda cáustica a 1%.

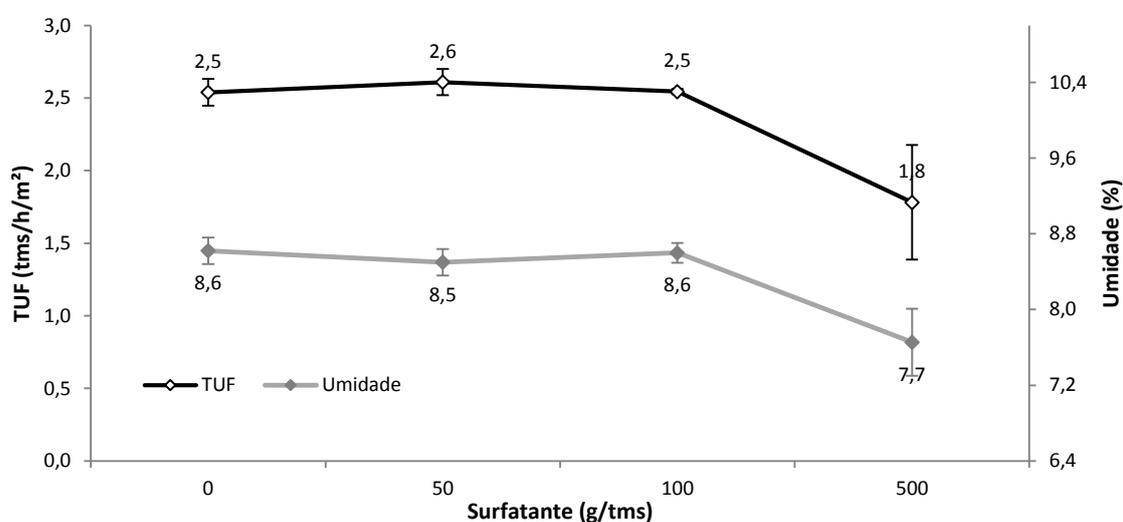


Figura 49 – Influência da adição do surfatante 01 no teor de umidade e na produtividade do filtro.

5.2.7 Efeito do nível da bacia

Foram realizados testes para avaliar a influência do nível da bacia sobre a produtividade e sobre o teor de umidade da torta. Três níveis foram estudados: o primeiro com a bacia cheia (ou com a polpa 200 mm abaixo da borda da bacia); o segundo com a polpa a 400 mm da borda, e o terceiro com a polpa a 600 mm da borda da bacia. Quando ocorre a redução do nível da bacia, a zona de formação da torta é diminuída e a zona de secagem é aumentada. Assim, o que se pode prever para a redução do nível da bacia é que,

quanto mais baixo o nível, menor a produtividade e mais reduzido o teor de umidade do *pellet feed*, conforme pode-se observar na Figura 50.

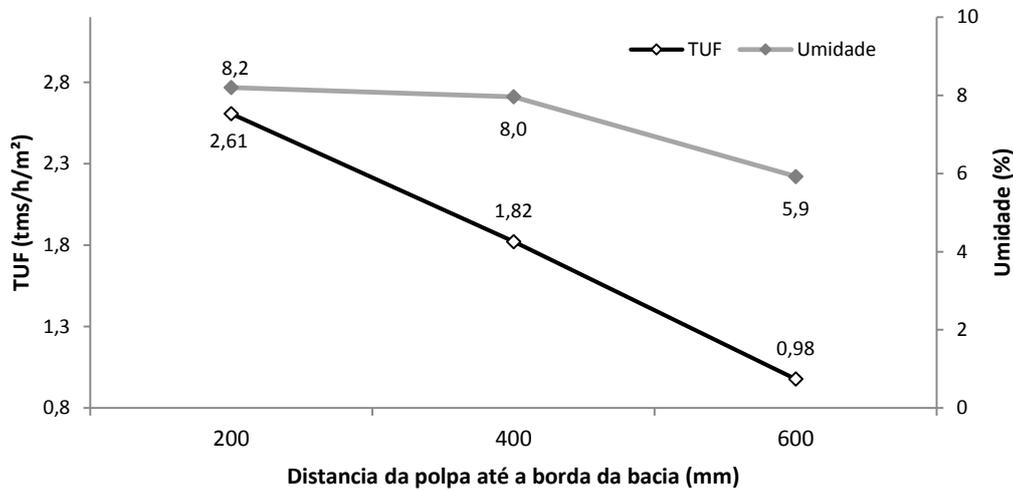


Figura 50 – Influência do nível da bacia no teor de umidade e na produtividade do filtro.

5.3 RESULTADOS DA ANÁLISE DA SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

A análise dos experimentos possibilitou a elaboração de superfícies de resposta para os dois níveis de pH estudados e para as três variáveis estudadas (Tabela 4). Duas variáveis resposta foram monitoradas: teor de umidade da torta e produtividade do filtro.

Na Tabela 8 apresentam-se os dados obtidos pelo software estatístico Minitab®16 para o pH 7. Podem ser observados os parâmetros e coeficientes estabelecidos para a superfície de resposta. Analisando os dados com o nível de significância de 80%, a regressão linear ou a regressão quadrática modela melhor os dados desse teste.

Para esses dados de TUF observou-se que as variáveis mais significantes foram, nessa ordem, percentual de sólidos, percentual de sólidos ao quadrado, superfície específica ao quadrado e, por fim, a dosagem de coagulante ao quadrado. Já para a umidade, as variáveis mais significantes foram o percentual de sólidos e este ao quadrado,

seguido pela dosagem de coagulante ao quadrado. Assim, em nenhum dos casos os efeitos de interação mostraram-se significativos.

Tabela 8 – Coeficientes e *p-value* para a taxa unitária de filtração e teor de umidade em ensaios de filtração com a polpa a pH 7

Variáveis	Coef. TUF pH 7	P	Coef. Umidade pH 7	P
Constante	-1,220E+02	0,03	-2,683E+02	0,004
SE	8,637E-03	0,318	-4,831E-03	0,639
%Sol	3,234E+00	0,031	7,601E+00	0,004
Coagulante	2,372E-03	0,871	6,525E-03	0,724
SE*SE	-3,586E-06	0,08	-9,062E-07	0,664
%Sol*%Sol	-2,153E-02	0,035	-5,236E-02	0,004
Coagulante*Coagulante	-1,363E-05	0,091	-1,288E-05	0,172
SE*%Sol	-1,667E-05	0,865	1,042E-04	0,418
SE*Coagulante	2,625E-06	0,394	-3,000E-06	0,435
%Sol*Coagulante	-8,708E-05	0,66	-3,333E-05	0,892
Análise de variância				
Regressão	-	0,005	-	0,005
Linear	-	0,122	-	0,015
Quadrática	-	0,079	-	0,016
Interação	-	0,768	-	0,686

Na Tabela 9 observam-se os dados de coeficientes das equações e nível de significância para a polpa com pH 10. Avaliando a análise de variância, percebe-se que a regressão quadrática é a que melhor descreve a TUF, bem como a regressão linear e a interação são as que melhor retratam a umidade.

Tabela 9 – Coeficientes e *p-value* para a taxa unitária de filtração e teor de umidade em ensaios de filtração com a polpa a pH 10

Variáveis	Coef. TUF pH10	P	Coef. Umidade pH 10	P
Constante	7,075E+01	0,529	-1,552E+02	0,045
SE	1,899E-02	0,42	4,573E-02	0,015
%Sol	-2,356E+00	0,442	3,664E+00	0,065
Coagulante	-1,855E-02	0,652	3,387E-03	0,874
SE*SE	1,230E-06	0,789	-3,312E-06	0,215
%Sol*%Sol	2,040E-02	0,346	-2,000E-02	0,116
Coagulante*Coagulante	-4,139E-05	0,074	6,250E-06	0,526
SE*%Sol	-3,333E-04	0,263	-5,292E-04	0,017
SE*Coagulante	1,213E-05	0,19	7,000E-06	0,157
%Sol*Coagulante	1,663E-04	0,762	-2,083E-04	0,481
Análise de variância				
Regressão	-	0,068	-	0,022
Linear	-	0,597	-	0,049
Quadrática	-	0,168	-	0,218
Interação	-	0,358	-	0,053

Para a TUF, as variáveis mais significantes foram a dosagem de coagulante ao quadrado e o produto entre a dosagem de coagulante e a superfície específica. Já para a umidade, as variáveis mais significantes foram a superfície específica, o percentual de sólidos, este último ao quadrado, o produto entre sólidos e superfície específica, e o produto entre superfície específica e coagulante. Portanto, distinto do que havia sido verificado no pH 7, no caso do pH 10 foram observados efeitos sinérgicos entre algumas das variáveis estudadas.

A fim de se utilizar as superfícies para verificar as condições de processamento e avaliar quais variáveis controlam a produtividade da filtragem e a umidade, serão usadas as equações obtidas a partir da análise dos experimentos, Eq. 5.1, a 5.4, e criados cenários para identificar as melhores condições de processamento. A ideia é usar os modelos matemáticos para interpretar quais ações poderiam ser realizadas frente a cenários possíveis de operação na unidade de filtração da Anglo American. A Tabela 10 apresenta as variáveis analisadas e as constantes para os 5 cenários apresentados.

As equações 5.1 e 5.2 correspondem aos experimentos da polpa com pH.7. As variáveis respostas dessas equações são, respectivamente, TUF e Umidade.

$$\begin{aligned}
 TUF = & -1,22 \cdot 10^2 + 8,64 \cdot 10^{-3} \cdot SE + 3,23 \cdot \%Sol + 2,37 \cdot 10^{-3} \cdot Coag \\
 & - 3,59 \cdot 10^{-6} \cdot SE^2 - 2,15 \cdot 10^{-2} \cdot \%Sol^2 - 1,36 \cdot 10^{-5} \cdot Coag^2 - 1,67 \cdot 10^{-5} \cdot SE \cdot \%Sol \\
 & + 2,63 \cdot 10^{-6} \cdot SE \cdot Coag - 8,71 \cdot 10^{-5} \cdot \%Sol \cdot Coag
 \end{aligned} \tag{Eq. 5.1}$$

$$\begin{aligned}
 Umidade = & -2,68 \cdot 10^2 - 4,83 \cdot 10^{-3} \cdot SE + 7,60 \cdot \%Sol + 6,53 \cdot 10^{-3} \cdot Coag \\
 & - 9,06 \cdot 10^{-7} \cdot SE^2 - 5,24 \cdot 10^{-2} \cdot \%Sol^2 - 1,29 \cdot 10^{-5} \cdot Coag^2 + 1,04 \cdot 10^{-4} \cdot SE \cdot \% \\
 & - 3,00 \cdot 10^{-6} \cdot SE \cdot Coag - 3,33 \cdot 10^{-5} \cdot \%Sol \cdot Coag
 \end{aligned} \tag{Eq. 5.2}$$

As equações 5.3 e 5.4 correspondem aos experimentos da polpa com pH.10, e suas variáveis respostas são, respectivamente, TUF e Umidade.

$$\begin{aligned}
 TUF = & 70,8 + 1,90 \cdot 10^{-2} \cdot SE - 2,36 \cdot \%Sol - 1,86 \cdot 10^{-2} \cdot Coag + 1,23 \cdot 10^{-6} \cdot SE^2 \\
 & + 2,04 \cdot 10^{-2} \cdot \%Sol^2 - 4,14 \cdot 10^{-5} \cdot Coag - 3,33 \cdot 10^{-4} \cdot SE \cdot \%Sol \\
 & + 1,21 \cdot 10^{-5} \cdot SE \cdot Coag + 1,66 \cdot 10^{-4} \cdot \%Sol \cdot Coag
 \end{aligned} \tag{Eq. 5.3}$$

$$\begin{aligned}
 Umidade = & -1,55 \cdot 10^2 + 4,57 \cdot 10^{-2} \cdot SE + 3,66 \cdot \%Sol + 3,39 \cdot 10^{-3} \cdot Coag \\
 & - 3,31 \cdot 10^{-6} \cdot SE^2 - 2,00 \cdot 10^{-2} \cdot \%Sol^2 + 6,25 \cdot 10^{-6} \cdot Coag^2 - 5,29 \cdot 10^{-4} \cdot SE \cdot \%Sol \\
 & + 7,00 \cdot 10^{-6} \cdot SE \cdot Coag - 2,08 \cdot 10^{-4} \cdot \%Sol \cdot Coag
 \end{aligned} \tag{Eq. 5.4}$$

Tabela 10 – Apresentação dos cenários estudados

Cenário	Variáveis analisadas	Variáveis consideradas constantes
1	pH : 7 e 10 Superfície específica: 1000 a 1390 cm ² /g	Percentual de sólidos: 70% Dosagem de coagulante : 0 g/tms
2	pH : 7 e 10 Superfície específica: 1000 a 1390 cm ² /g	Percentual de sólidos: 70% Dosagem de coagulante : 50 g/tms
3	pH: 7 e 10 Dosagem de coagulante : 0 a 100 g/tms	Percentual de sólidos: 68% Superfície específica: 1400 cm ² /g
4	pH: 7 e 10 Dosagem de coagulante : 0 a 200 g/tms	Percentual de sólidos: 74% Superfície específica: 1400 cm ² /g
5	pH : 7 e 10 Percentual de sólidos : 69 a 74%	Dosagem de coagulante: 100 g/tms Superfície específica: 1400 cm ² /g

No Cenário 01 é avaliada uma polpa com a condição original do projeto da filtragem da Anglo American, qual seja, 70% de sólidos, sem dosagem de coagulante e com possibilidade de dosagem de CO₂ para neutralizar o pH da polpa. Na Figura 51 pode-se avaliar a produtividade. Observou-se que a polpa com pH 7 torna a produtividade mais elevada para todas as faixas de superfície específica estudadas. Também foi possível verificar que o aumento da área superficial específica promoveu redução na produtividade.

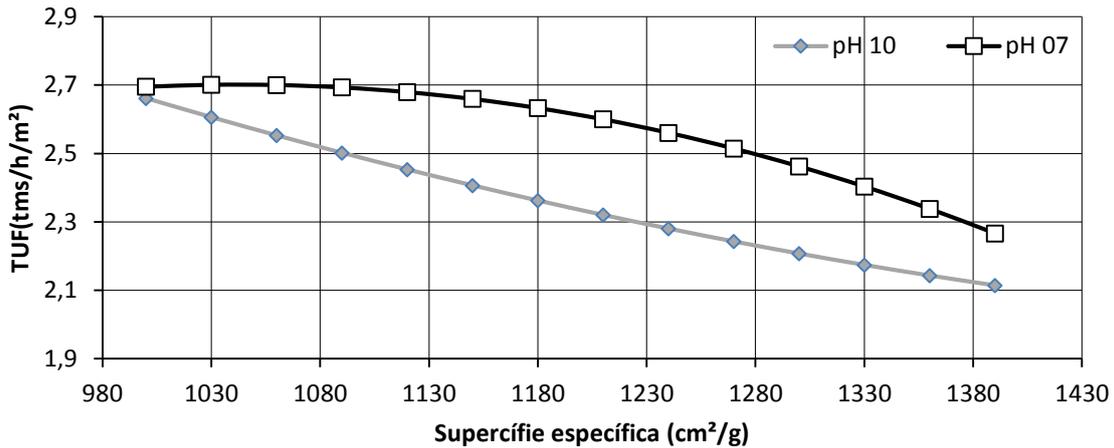


Figura 51 – TUF em função da superfície específica para dois pHs, obtida por meio de modelos estatísticos – Cenário 01.

Por meio da avaliação da umidade na Figura 52, verifica-se que, para superfície específica acima de 1120 cm²/g, a umidade será mais baixa se for adicionado CO₂. Porém, para minérios com superfície específica abaixo desse valor a umidade encontrada foi menor para a polpa sem a adição de CO₂.

Quando é realizada uma análise global da umidade e produtividade, observa-se que para superfícies específicas mais elevadas o controle de pH é mais vantajoso que manter a polpa na condição original de recebimento.

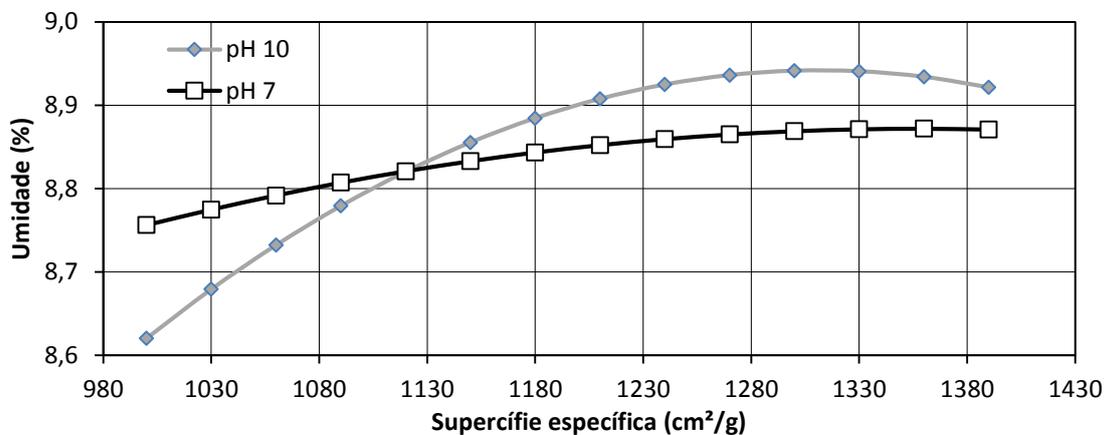


Figura 52 – Umidade em função da superfície específica para dois pHs, obtida por meio de modelos estatísticos – Cenário 01.

O Cenário 02 corresponde ao Cenário 01 com a adição de coagulante, a 50 gramas por tonelada, na polpa, para os dois pHs. Observa-se que a polpa com pH 10 proporcionou maiores valores de TUF, como pode ser observado na Figura 53.

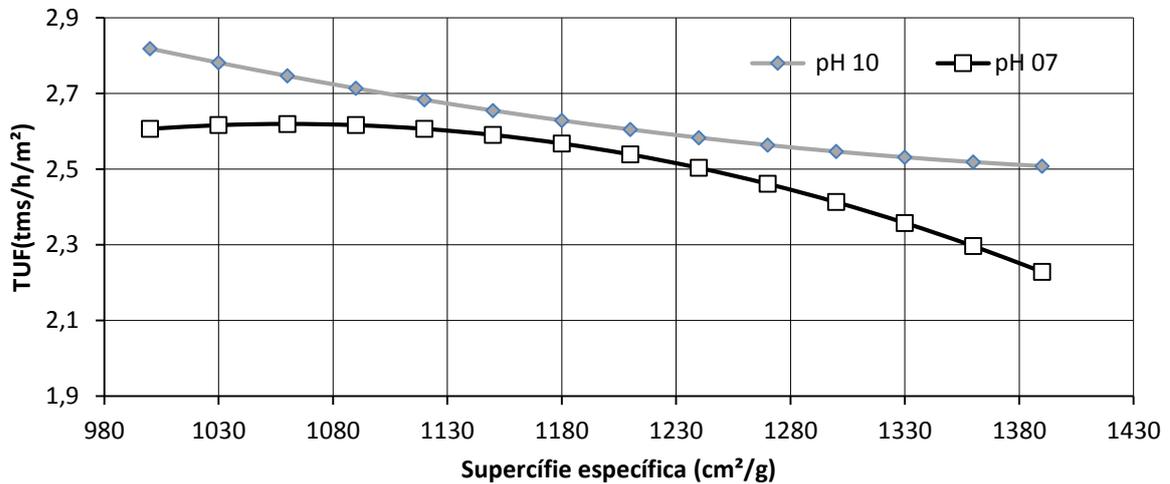


Figura 53 – TUF em função da superfície específica para dois pHs, obtida por meio de modelos estatísticos – Cenário 02.

Na Figura 54 observa-se que o pH 10, com dosagem de coagulante, proporciona menores valores de umidade para superfícies específicas de até 1300 cm²/g. Para os valores testados acima desse observa-se que a umidade ficou similar para os dois pHs.

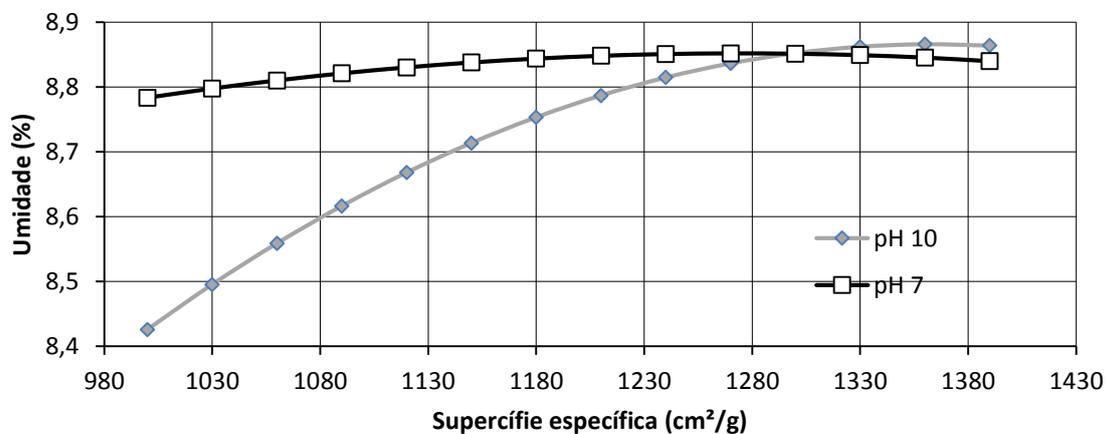


Figura 54 – Umidade em função da superfície específica para dois pHs, obtida por meio de modelos estatísticos – Cenário 02.

Percebeu-se que a adição de coagulante combinada com a redução de pH diminuiu os valores de produtividade da filtração. Portanto, na Figura 55 encontram-se as duas curvas. A com pH 10 representa o caso da polpa com dosagem de 50 g/tms de coagulante, enquanto a com pH 7 não apresenta dosagem de coagulante. Percebe-se que para valores de superfície específica inferiores a 1120 cm²/g e superiores a 1210 cm²/g a condição da polpa com pH 10 e com coagulante adicionado proporciona maiores valores de produtividade. O intervalo entre esses valores apresenta produtividade semelhante para os dois pHs.

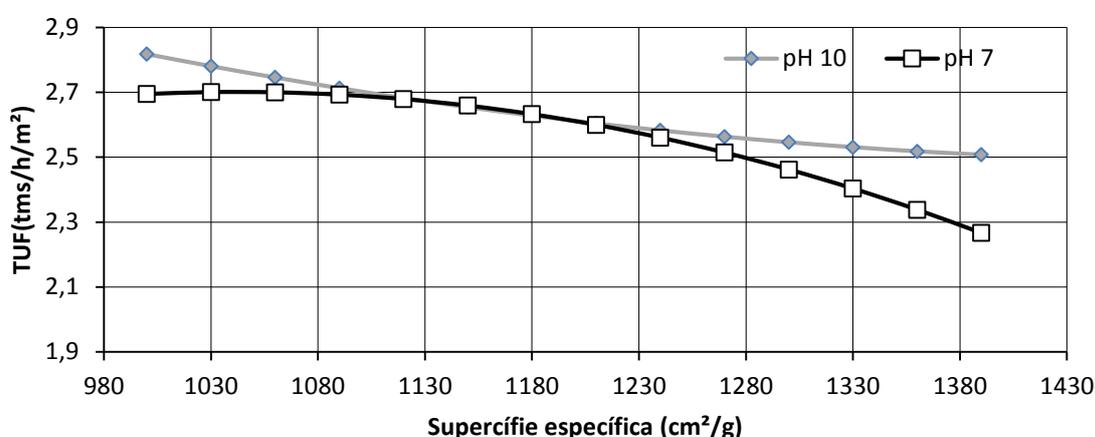


Figura 55 – TUF em função da superfície específica para polpa com pH 7 sem coagulante e polpa com pH 10 com coagulante a 50 g/tms, obtida por meio de modelos estatísticos.

O Cenário 03 corresponde a uma situação em que estão presentes as condições mais severas de processo para a filtração. Nela é considerada a situação na qual o espessador estivesse indisponível, o que poderia resultar na unidade de filtração receber uma polpa contendo 68% de sólidos, concomitantemente ao recebimento de uma polpa com 1400 cm²/g. A variável considerada nesse cenário foi a dosagem de coagulante.

A partir da observação da Figura 56 foi possível verificar que a adição de coagulante proporciona aumento na produtividade do sistema de filtração para a polpa com pH 10. Também pôde-se observar que a polpa com pH 10, para o teor de sólidos de 68%, apresentou melhor desempenho na filtração para qualquer dosagem simulada de coagulante. Esse fato atesta a relevância do uso do coagulante como uma variável de

controle do processo em condições muito particulares da polpa. Quando avaliada a curva da polpa com pH 7,0 verificou-se uma ligeira diminuição na produtividade com o aumento da dosagem de coagulante, o que é explicado pela dispersão da polpa em razão da combinação do uso de coagulante com a redução de pH pela adição de CO₂.

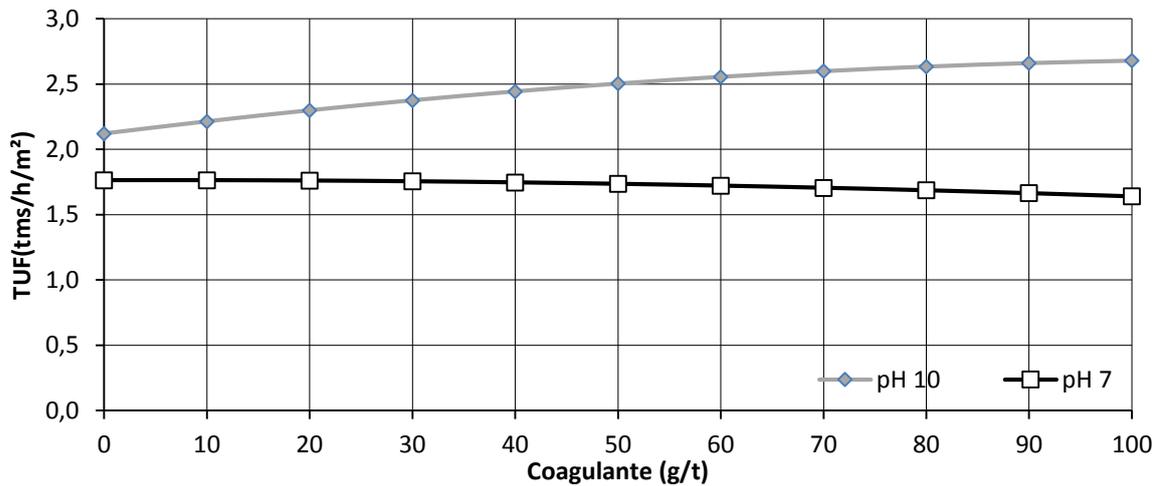


Figura 56 – TUF em função da dosagem de coagulante para dois pHs, obtida por meio de modelos estatísticos – Cenário 03.

Por outro lado, a umidade avaliada foi muito inferior para condições de pH 7. Verificou-se que, em situações de processo nas quais a umidade é limitante, deve ser considerada a adição de CO₂ para a redução de pH. Porém, quando a umidade apresentar-se dentro dos limites, deverá ser utilizado o pH 10, com a adição de coagulante. Essa grande desigualdade no teor de umidade do *pellet feed* é decorrente da expressiva diferença na espessura da torta entre os dois pHs.

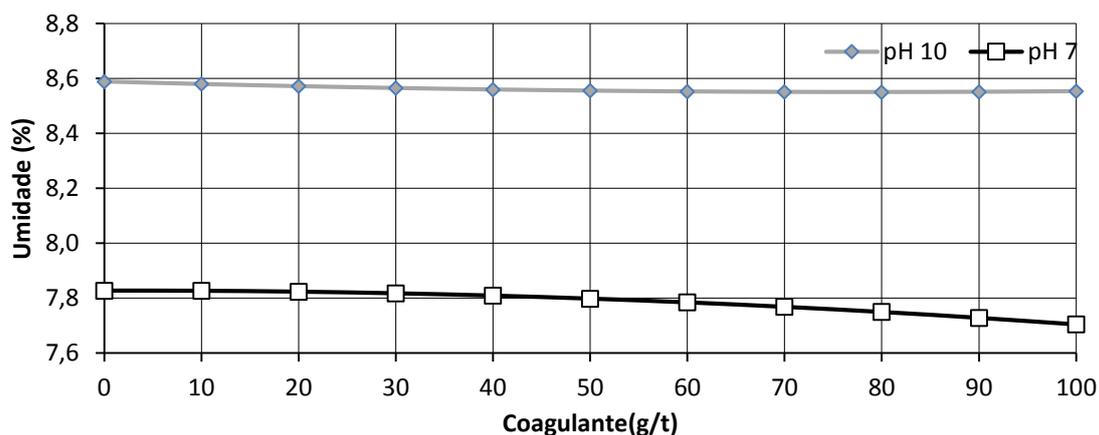


Figura 57 – Umidade em função da dosagem de coagulante para dois pHs, obtida por meio de modelos estatísticos – Cenário 03.

O cenário 04 apresenta a condição que otimiza a filtração cerâmica, qual seja, o aumento no teor de sólidos para 74%. Entretanto, nesse cenário é considerado o caso da maior superfície específica, de 1400 cm²/g. A Figura 58 mostra o cenário no qual a produtividade é otimizada com o aumento da dosagem de coagulante para valores entre 100 e 140 g/tms. Para valores de dosagem superiores a 140 g/t percebeu-se redução da TUF em decorrência da sobredosagem de coagulante, a qual promoveu reversão de cargas e dispersão da polpa. Também foi observado, na Figura 59, que a umidade do sistema de filtração foi menor para essa condição de polpa.

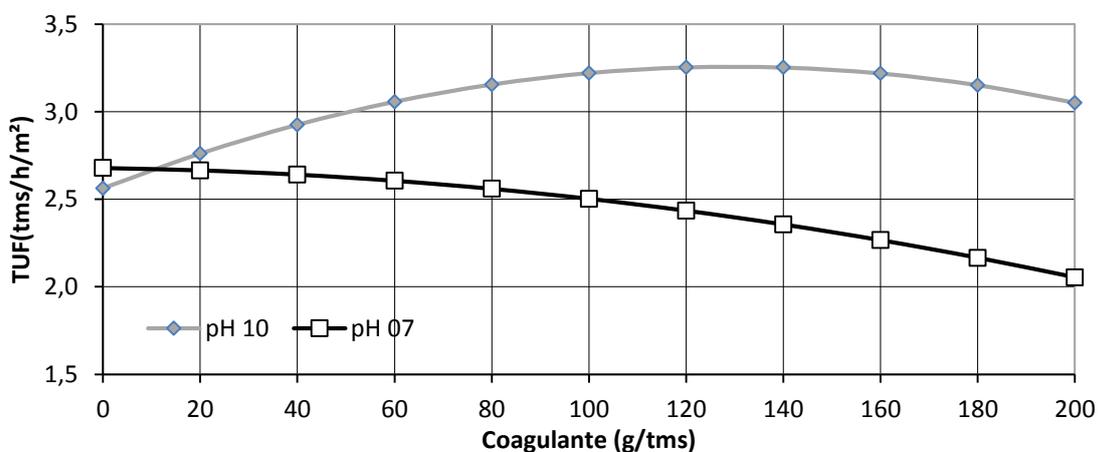


Figura 58 – TUF em função da dosagem de coagulante para dois pHs, obtida por meio de modelos estatísticos – Cenário 04.

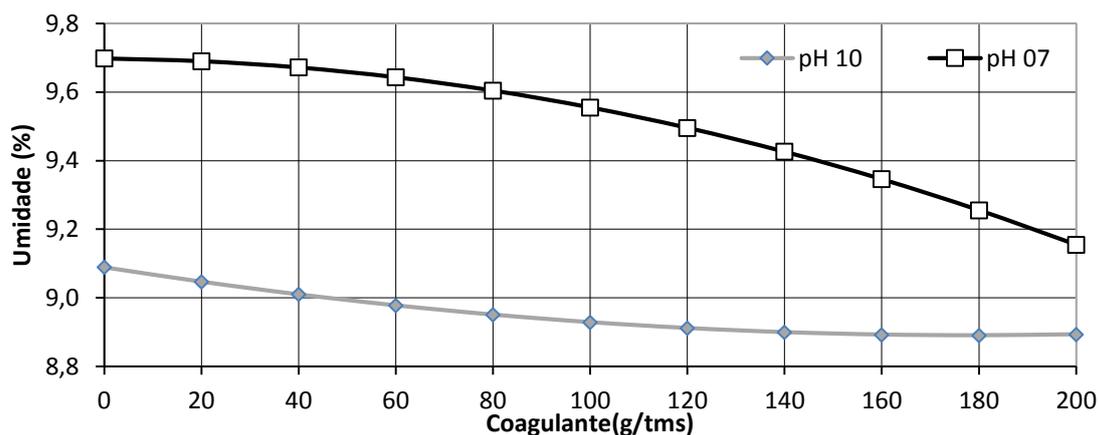


Figura 59 – Umidade em função da dosagem de coagulante para dois pHs, obtida por meio de modelos estatísticos – Cenário 04.

Para o cenário 05 foi avaliada a condição de superfície específica de 1400 cm²/g, com dosagem de coagulante de 100 g/ tms para a polpa de pH 10, e sem dosagem de coagulante para a polpa de pH 7. Observou-se o efeito da variação do percentual de sólidos sobre a taxa unitária de filtragem e a umidade.

Verifica-se na Figura 60 que a adição de coagulante e o pH 10 promoveram maior produtividade no sistema de filtragem para toda a faixa de percentual de sólidos.

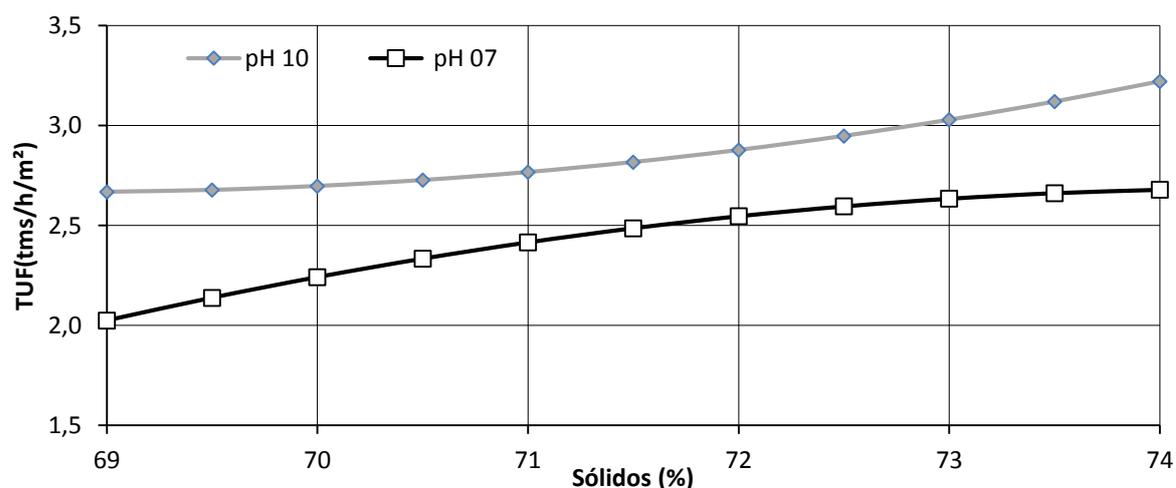


Figura 60 – TUF em função do percentual de sólidos para dois pHs, obtida por meio de modelos estatísticos – Cenário 05.

Quanto à umidade da polpa, percebe-se que para valores superiores a 70% de sólidos a umidade foi mais baixa para a polpa com pH 10 e com adição de coagulante.

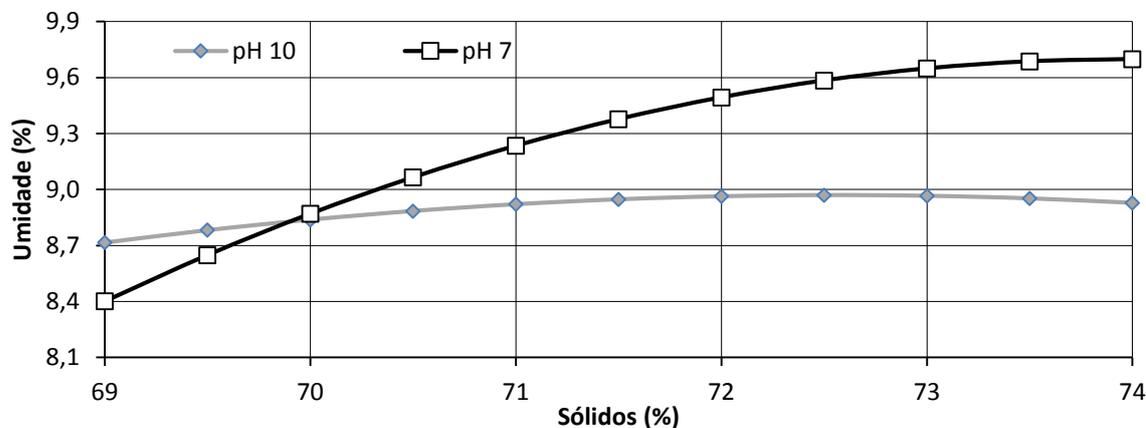


Figura 61 – Umidade em função do percentual de sólidos para dois pHs obtida por meio de modelos estatísticos – Cenário 05.

5.3.1 RESULTADOS DOS TESTES EM FILTRO PILOTO

A fim de parametrizar os testes de bancada, e verificar a eficácia do fator de correção de produtividade de 0,7, foram realizados testes em filtro piloto. Os resultados relativos à TUF e ao teor de umidade para os três testes propostos estão lançados em gráfico na Figura 62 e na Figura 63, respectivamente.

A partir da avaliação dos dados da Figura 62 verificou-se que a maior produtividade foi obtida no teste 01, para a polpa com pH 7,0 e com percentual de sólidos de 72%. O teste 03 correspondeu à produção com o menor percentual de sólidos. Este foi idealizado para verificar a eficácia da dosagem de coagulante na condição na qual deveria ser suprimida uma variabilidade de processo. Para essa condição observou-se que, mesmo com a produtividade mais baixa no início de operação, ao longo das 12 horas de operação a produtividade foi maior que a obtida com o teste 02, cujo teor de sólidos era maior.

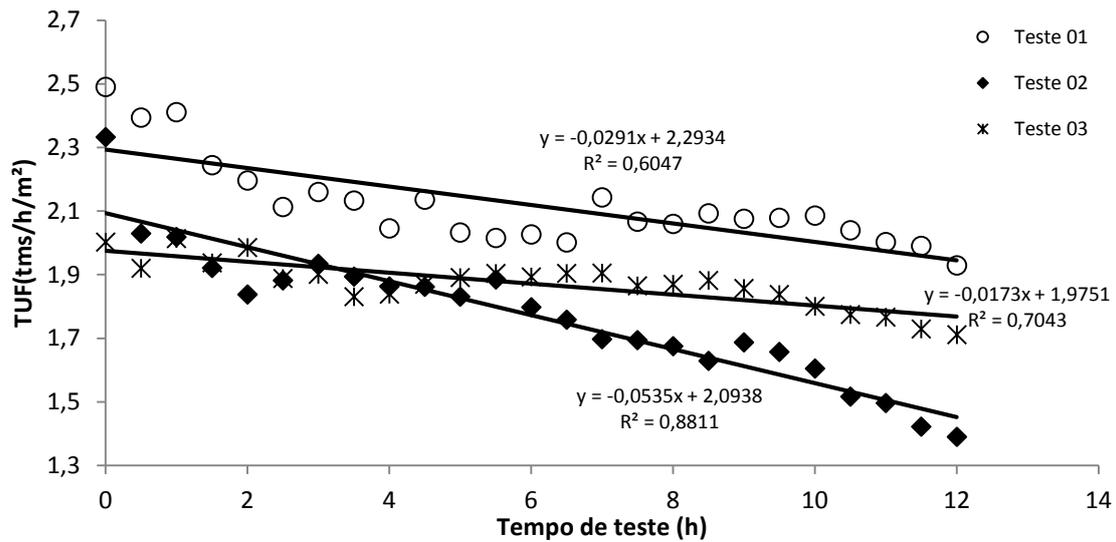


Figura 62 – Resultado da TUF em função do tempo nos testes em escala piloto.

Os resultados de medida de teor de umidade para esses três testes podem ser analisados na Figura 63. Verifica-se que há uma relação direta entre a produtividade e a umidade do *pellet feed*, e que a umidade é reduzida em função da diminuição da espessura da torta. Portanto, nos casos nos quais o tempo proporcionou menor produtividade, ou que foi observada redução no percentual de sólidos, pôde-se notar diminuição da umidade do *pellet feed*.

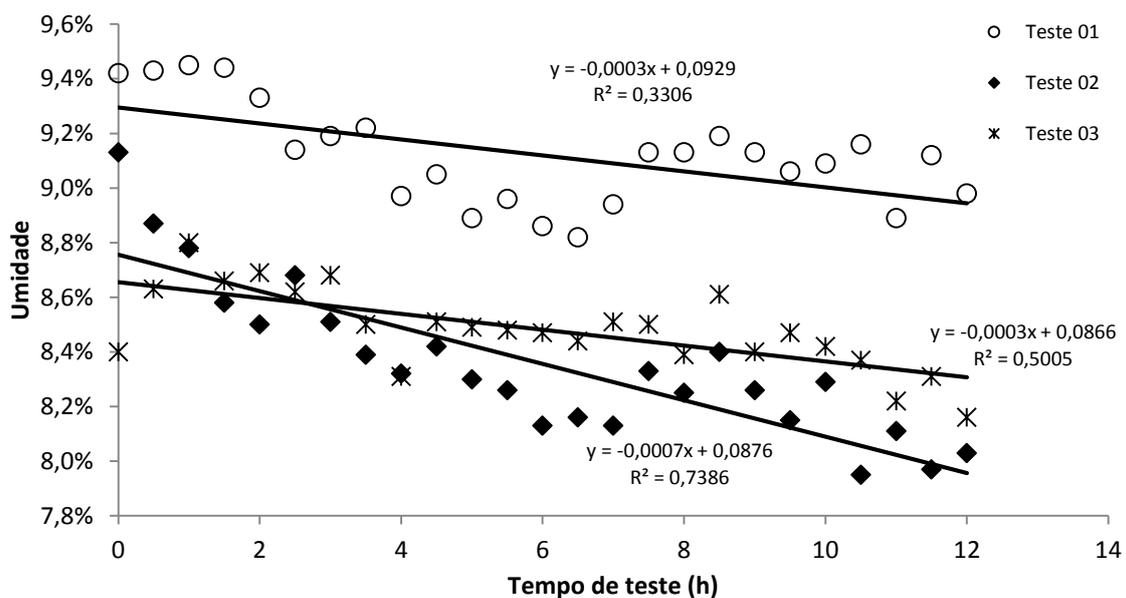


Figura 63 – Resultado da umidade em função do tempo nos testes em escala piloto

A Figura 64 apresenta os dados de TUF para os três ensaios em filtro piloto superpostos aos gráficos que representam os modelos dos ensaios de bancada. Os testes 01 e 02 foram realizados de forma a serem comparados com a curva de TUF de pH 07, enquanto o teste 03 deverá ser cotejado com a curva de pH 10. Para a polpa de pH 7 foi simulada a mesma condição dos ensaios pilotos. A polpa apresentava-se sem a adição de coagulante e com a área superficial específica de 1541 cm²/g. Quando foram lançados em gráfico os pontos dos testes 01 e 02 sobre a curva de pH 07, percebeu-se que o modelo encontra-se adequado para descrever essa curva. Por outro lado, quando foram simulados os dados do ensaio piloto para a polpa de pH 10, com a adição de 50 g/tms de coagulante, observou-se que o ponto está fora da curva. Para essa condição foi proposto um fator de 0,75, apresentado na curva pontilhada do gráfico.

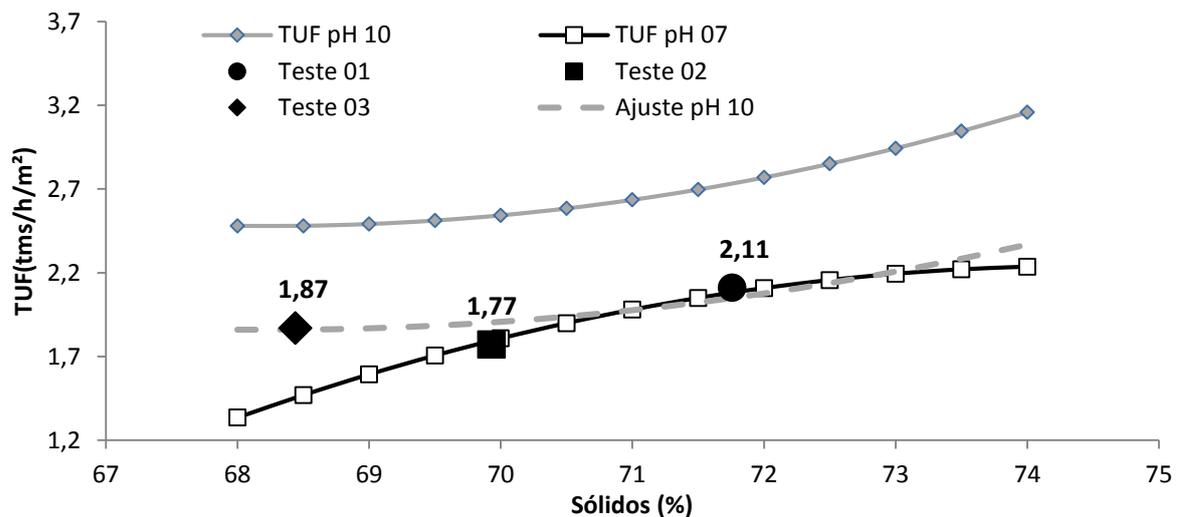


Figura 64 – Comparação entre os resultados dos ensaios piloto para o parâmetro TUF e o modelo estatístico desenvolvido a partir dos ensaios de bancada.

Analogamente, na Figura 65 está apresentada a análise para a variável umidade. Observa-se que o dado do teste 03 encontra-se adequado para a variável umidade na curva de pH 10 e que a curva de umidade para o pH 07 precisa de ajuste. O fator proposto para essa correção foi de 0,96.

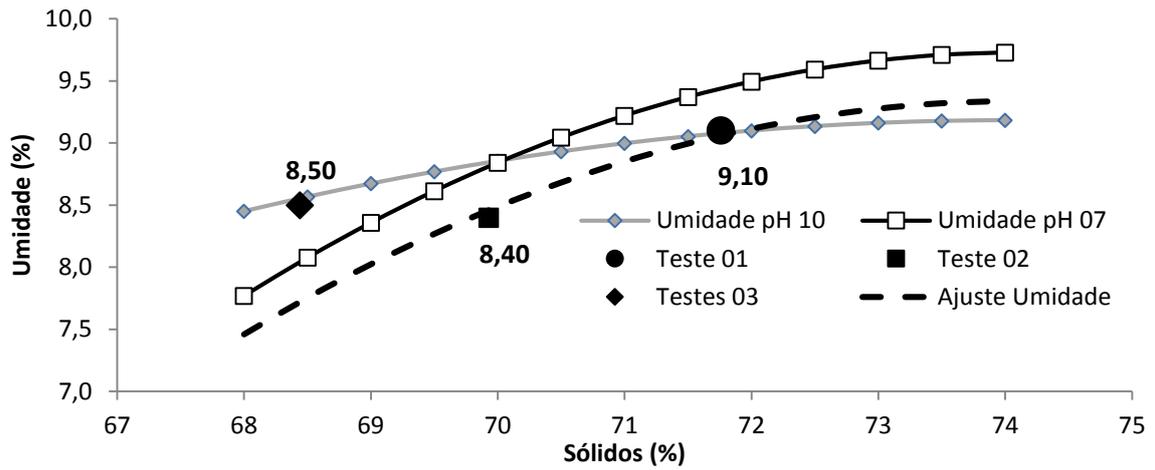


Figura 65 – Comparação entre os resultados dos ensaios piloto para o parâmetro umidade e o modelo estatístico desenvolvido a partir dos ensaios de bancada.

6 CONCLUSÕES

Após a realização dos testes e análise dos resultados, as seguintes conclusões podem ser elencadas para a filtração em filtro cerâmico de polpas de minério de ferro:

1. A adição de surfatantes promoveu redução significativa na produtividade do sistema de filtração. Após o acréscimo desse insumo, a permeabilidade da placa foi comprometida, sendo somente recuperada depois da lavagem da mesma com hidróxido de sódio;
2. A placa cerâmica apresenta capacidade hidráulica limitada. Foi verificado no estudo que o aumento no teor de sólidos proporcionou expressiva elevação na produtividade do sistema de filtração. Percebeu-se também que a umidade é função da espessura da torta. Uma vez que o aumento do percentual de sólidos proporcionou acréscimo na espessura da torta, houve elevação da umidade com esse aumento de produtividade;
3. A adição de coagulante mostrou-se uma boa alternativa para melhorar o desempenho do sistema de filtração. Porém, é necessário que a dosagem esteja dentro dos patamares para os quais o sistema encontra-se no estágio de coagulação. O sistema não poderá estar disperso, ou seja, não deverá apresentar dosagem de coagulante baixa ou elevada, acima do limite que provoca o fenômeno da reversão de cargas;
4. O aumento de temperatura proporciona diminuição na viscosidade do filtrado, o que promove elevação da produtividade do sistema de filtração e redução da umidade do *pellet feed*. Tecnicamente, a alternativa de elevação de temperatura é relevante para a melhora no desempenho para sistemas de filtração, mas é necessário um estudo de viabilidade econômico-financeira a fim de avaliar o custo de implantação e operação de um sistema de aquecimento de polpa;

5. Quando o pH foi avaliado, verificou-se que a redução dessa variável para níveis próximos a 6 promoveu diminuição da produtividade do sistema de filtração em razão da dispersão da polpa;
6. Os fatores redução do pH e adição de coagulante, quando analisados em separado, proporcionaram aumento expressivo na produtividade do sistema de filtração, respectivamente, para faixas ideais de pH e de dosagem de reagente. Contudo, quando realizada a aplicação desses dois insumos em conjunto, foi possível perceber a dispersão da polpa e, conseqüentemente, a redução da produtividade, decorrente da combinação do coagulante com a diminuição do pH;
7. Quando foi avaliada a pior condição de processo para a filtração, com percentual de sólidos da polpa de 69% e superfície específica de 1400 cm²/g, notou-se que a adição de coagulante, na dosagem de 125 g/tms, antes da filtração, foi mais efetiva para o aumento de produtividade da filtração que a redução do pH com CO₂;
8. Com base no presente estudo foi possível estabelecer padrões de análise para o sistema de filtração, de modo a auxiliar a tomada de decisão dentro de variações do processo, com o intuito de determinar quais intervenções proporcionam melhor desempenho;
9. Os modelos obtidos a partir da superfície de resposta para a TUF, para a polpa de pH 7, e para a umidade, para a polpa de pH 10, mostraram-se adequados para descrever os ensaios para os filtros piloto. Para os outros dois modelos foi necessário propor um fator de ajuste, a fim de que fosse possível tornar os dados comparáveis aos dos ensaios piloto.

Ao término do presente trabalho, pode-se concluir que, para otimizar a operação da filtração, é necessário que se tenha um controle industrial efetivo sobre o percentual de sólidos e o estado de agregação da polpa.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O desempenho da placa cerâmica é reduzido pela adição de surfatante e poderá ser estudado de forma mais profunda, a fim de que se possa explicar quais os mecanismos responsáveis pela perda de produtividade da placa.

Em razão do surfatante apresentar características químicas similares às das aminas, poderá ser averiguado o efeito da amina residual do processo de beneficiamento sobre a permeabilidade da placa cerâmica.

Dada a relevância dos resultados de elevação de temperatura da polpa, a criação de alternativas técnicas economicamente viáveis para o aquecimento de polpa deverá ser examinada.

Também poderá ser estudado o efeito de temperaturas superiores a 60°C sobre a produtividade da filtragem cerâmica, uma vez que o aumento de temperatura reduz a tensão superficial, essencial para que a filtragem capilar ocorra.

Por fim, considerando-se a resistência da membrana cerâmica e a avaliação das equações de Darcy e Kozeny, também deverá ser estudado o modelamento matemático da filtragem cerâmica.

REFERÊNCIAS

AMARANTE, S.C.; ARAUJO, A. C.; VALADÃO, G. E. S.; PERES, A. E. C., 2002, “Cake dewatering of some iron ore products industrial”, *Minerals & Metallurgical Processing*, v. 19, n. 3 (Abr), pp. 161-164.

ANGLO AMERICAN, 2014, *Apresentação do Projeto Minas Rio*. Apresentação institucional do Porto do Açú e Filtragem, São João da Barra, RJ.

BRAGANÇA, A. C.C. R., 2008, *Avaliação de reagentes alternativos para substituição da cal em sistema de bombeamento de longa distância de polpa de minério de ferro*. Dissertação de M. Sc., DEMET/UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

CHAVES, A. P., 2004, *Teoria e Prática do Tratamento de Minérios*. 2 ed. São Paulo, Signus.

DIAS, C. L. P.; SILVA, L. M.; PERES, A. E. C.; VALADÃO, G. E. S. 2004, “Utilização de reagentes auxiliares na filtragem”, *Revista da Escola de Minas*, v. 57, n. 4, (Out/Dez), pp. 221-234.

DOELINGER, T. M.; FONSECA, M. C.; ARAUJO JR, A. M.; TURRER, H. D. G.; PEREIRA, P. M.; PASSIGATI, V. P.; PERES, A. C., 2009, “Efeito da adição de reagentes auxiliares na filtragem e suas consequências no pelotamento”. In: *39º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas*. v. 1, pp. 1-8, Ouro Preto, Nov.

ESUMI, K., IDOGAWA, H.; MEGURO, K., 1988, “Mixed Colloidal Dispersions of Silica and Hematite”, *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, v. 61, n. 7, pp. 2287-2290.

GÖRRES, G.; SILVA, J. N. A.; NUUTINEN, J., 2008, “Experiences with modern dewatering technologies in Fine Iron Ore application”. In: *2nd International Symposium on Iron Ore of ABM*, Sao Luis, Sep.

GÖRRES, G; HINDSTRON., 2007, “Some Experiences with Modern Dewatering Technologies in Fine Iron Ore Application”. In: *Iron Ore Conference*, Perth, Aug.

LAROX, 2005, *Soluções de filtração para mineração e metalurgia: Filtros Ceramec de discos de ação capilar*. Larox Corporation.

MASSARANI, G., 1985, “Filtração”, *Revista Brasileira de Tecnologia*, n. especial, pp. 1-69.

MASSARANI, G., 2002, *Fluidodinâmica em sistemas particulados*. 2 ed. Rio de Janeiro, E-Papers Serviços Editoriais.

PALMER, J.; SAFONOV, D.; HÄKKINEN, A.; EKBERG, B; KRASLAWSKI, A., 2010, “Trends in test filtration to respond to decreasing sample size”. In: *XXV International Mineral Processing Congress (IMPC) 2010 Proceedings*, pp. 1085-1098, Brisbane, Sep.

RUSHTON, A.; WARD, A. S.; HOLDICH, R. G., 1996, *Solid-Liquid Filtration and Separation Technology*. 1 ed. Alemanha, Wiley-VCH.

SALMIMIES, R.; HÄKKINEN, A.; EKBERG, B.; KALLAS, J.; ANDREASSEN, J. P.; BECK, R., 2011, “Characterisation of Long-Term Scaling Effects of Ceramic Filter Media Used in the Dewatering of Iron Ore”. In: *Iron Ore Conference*, pp. 521-527, Perth, Jul.

SAVOLAINEN, M.; HUHTANEN, M.; HÄKKINEN, A.; EKBERG, B.; HINDSTRÖM, R.; KALLAS, J., 2011, “Development of testing procedure for ceramic disc filters”, *Minerals Engineering*, v. 24, n. 8 (Jul), pp. 876–885.

SILVA, A. M., 2006, *Caracterização do processo de degradação de uma fibra de poliamida utilizada como meio filtrante na indústria mineral*. Dissertação de M.Sc., DEMET/UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.

SILVA, A. M., 2013, *Teste com o filtro piloto*. Relatório interno apresentado à Anglo American, Belo Horizonte.

SILVERBLATT, C.E., DAHLSTROM, D.A., 1954, “Moisture content of a fine-coal filter cake”, *Industrial & Engineering Chemical Research*, v. 6, n. 6, pp. 1201-1207.

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

TURRER, H. D. G.; DOELINGER, T. M.; ARAUJO JR, A. M.; PERES, A. C.; ZUCHI, M. A., 2010, “Efeito da adição de coagulantes/floculantes na filtração”, *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, v. 7, n. 1-2 (Jul/Dez), pp. 42-48.

VALADÃO, G. E. S., PERES, A. E. C., 1997, “A superfície específica como variável em modelos de filtração”. In: *XXIV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados*, v. 1, pp. 488 – 492, Uberlândia, Out.

APÊNDICE A – Resultados dos testes de superfície de resposta

Tabela 11 – Resultados dos testes para a superfície de resposta para a polpa com pH 7

Variáveis			Respostas pH 07	
Sup. Específica (cm ² /g)	Sólidos (%)	Coagulante (g/tms)	TUF (tms/h/m ²)	Umidade (%)
1000	69	100	2,25	8,42
1400	69	100	1,96	8,31
1000	75	100	2,81	9,26
1400	75	100	2,48	9,40
1000	72	0	3,10	9,20
1400	72	0	2,58	9,46
1000	72	200	2,18	9,04
1400	72	200	1,87	9,06
1200	69	0	2,29	8,40
1200	75	0	3,05	9,65
1200	69	200	1,77	7,88
1200	75	200	2,42	9,09
1200	72	100	2,71	9,35
1200	72	100	2,72	9,36

Tabela 12 – Resultados dos testes para a superfície de resposta para a polpa com pH 10

Variáveis			Respostas pH 10	
Sup. Específica (cm ² /g)	Sólidos (%)	Coagulante (g/tms)	TUF (tms/h/m ²)	Umidade (%)
1000	69	100	2,51	8,07
1400	69	100	2,40	8,73
1000	75	100	4,46	9,32
1400	75	100	3,55	8,71
1000	72	0	3,07	9,11
1400	72	0	2,42	9,11
1000	72	200	2,36	8,51
1400	72	200	2,68	9,07
1200	69	0	2,36	8,61
1200	75	0	3,08	9,66
1200	69	200	2,36	8,27
1200	75	200	3,28	9,07
1200	72	100	2,98	8,94
1200	72	100	3,01	9,10

APÊNDICE B - Resultados da superfície de resposta - Minitab 16®

Response Surface Regression: TUF pH7 versus SE; %Sol; Coagulante

The analysis was done using uncoded units.

Estimated Regression Coefficients for TUF pH7

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-122,027	36,8236	-3,314	0,030
SE	0,009	0,0076	1,140	0,318
%Sol	3,234	0,9912	3,263	0,031
Coagulante	0,002	0,0137	0,173	0,871
SE*SE	-0,000	0,0000	-2,331	0,080
%Sol*%Sol	-0,022	0,0068	-3,149	0,035
Coagulante*Coagulante	-0,000	0,0000	-2,215	0,091
SE*%Sol	-0,000	0,0001	-0,182	0,865
SE*Coagulante	0,000	0,0000	0,954	0,394
%Sol*Coagulante	-0,000	0,0002	-0,475	0,660

S = 0,1101 R-Sq = 97,8% R-Sq(adj) = 93,0%

Analysis of Variance for TUF pH7

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	2,19984	2,199836	0,244426	20,16	0,005
Linear	3	2,00696	0,132313	0,044104	3,64	0,122
Square	3	0,17873	0,178725	0,059575	4,91	0,079
Interaction	3	0,01416	0,014155	0,004718	0,39	0,768
Residual Error	4	0,04849	0,048488	0,012122		
Lack-of-Fit	3	0,04844	0,048443	0,016148	357,84	0,039
Pure Error	1	0,00005	0,000045	0,000045		
Total	13	2,24832				

Response Surface Regression: Umidade pH7 versus SE; %Sol; Coagulante

The analysis was done using uncoded units.

Estimated Regression Coefficients for Umidade pH7

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-268,316	46,3362	-5,791	0,004
SE	-0,005	0,0095	-0,507	0,639
%Sol	7,601	1,2472	6,095	0,004
Coagulante	0,007	0,0172	0,379	0,724
SE*SE	-0,000	0,0000	-0,468	0,664

%Sol*%Sol	-0,052	0,0086	-6,085	0,004
Coagulante*Coagulante	-0,000	0,0000	-1,662	0,172
SE*%Sol	0,000	0,0001	0,902	0,418
SE*Coagulante	-0,000	0,0000	-0,866	0,435
%Sol*Coagulante	-0,000	0,0002	-0,144	0,892

S = 0,1385 R-Sq = 97,9% R-Sq(adj) = 93,1%

Analysis of Variance for Umidade pH7

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	3,51620	3,516196	0,390688	20,35	0,005
Linear	3	2,75723	0,770366	0,256789	13,38	0,015
Square	3	0,72855	0,728546	0,242849	12,65	0,016
Interaction	3	0,03042	0,030425	0,010142	0,53	0,686
Residual Error	4	0,07678	0,076775	0,019194		
Lack-of-Fit	3	0,07673	0,076725	0,025575	511,50	0,032
Pure Error	1	0,00005	0,000050	0,000050		
Total	13	3,59297				

Response Surface Regression: TUF pH10 versus SE; %Sol; Coagulante

The analysis was done using uncoded units.

Estimated Regression Coefficients for TUF pH10

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	70,7514	102,791	0,688	0,529
SE	0,0190	0,021	0,898	0,420
%Sol	-2,3560	2,767	-0,852	0,442
Coagulante	-0,0186	0,038	-0,486	0,652
SE*SE	0,0000	0,000	0,286	0,789
%Sol*%Sol	0,0204	0,019	1,068	0,346
Coagulante*Coagulante	-0,0000	0,000	-2,409	0,074
SE*%Sol	-0,0003	0,000	-1,302	0,263
SE*Coagulante	0,0000	0,000	1,578	0,190
%Sol*Coagulante	0,0002	0,001	0,325	0,762

S = 0,3073 R-Sq = 91,9% R-Sq(adj) = 73,5%

Analysis of Variance for TUF pH10

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	4,26451	4,264506	0,473834	5,02	0,068
Linear	3	3,04826	0,200048	0,066683	0,71	0,597
Square	3	0,81108	0,811076	0,270359	2,86	0,168
Interaction	3	0,40518	0,405175	0,135058	1,43	0,358

Residual Error	4	0,37782	0,377824	0,094456		
Lack-of-Fit	3	0,37742	0,377418	0,125806	309,77	0,042
Pure Error	1	0,00041	0,000406	0,000406		
Total	13	4,64233				

Response Surface Regression: Umidade pH10 versus SE; %Sol; Coagulante

The analysis was done using uncoded units.

Estimated Regression Coefficients for Umidade pH10

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-155,249	53,8971	-2,880	0,045
SE	0,046	0,0111	4,124	0,015
%Sol	3,664	1,4507	2,526	0,065
Coagulante	0,003	0,0200	0,169	0,874
SE*SE	-0,000	0,0000	-1,471	0,215
%Sol*%Sol	-0,020	0,0100	-1,998	0,116
Coagulante*Coagulante	0,000	0,0000	0,694	0,526
SE*%Sol	-0,001	0,0001	-3,940	0,017
SE*Coagulante	0,000	0,0000	1,738	0,157
%Sol*Coagulante	-0,000	0,0003	-0,776	0,481

S = 0,1611 R-Sq = 95,5% R-Sq(adj) = 85,5%

Analysis of Variance for Umidade pH10

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	2,21741	2,21741	0,24638	9,49	0,022
Linear	3	1,54043	0,52223	0,17408	6,70	0,049
Square	3	0,17974	0,17974	0,05991	2,31	0,218
Interaction	3	0,49725	0,49725	0,16575	6,38	0,053
Residual Error	4	0,10387	0,10387	0,02597		
Lack-of-Fit	3	0,09107	0,09107	0,03036	2,37	0,438
Pure Error	1	0,01280	0,01280	0,01280		
Total	13	2,32129				

APÊNDICE C – Distribuição granulométrica a laser das amostras

Tabela 13 – Resultados da granulometria a laser das amostras

Tamanho de Partícula (μm)	Amostra A	Amostra B
1	1,19	0,49
2	3,05	1,26
3	5,01	2,13
5	8,76	4,08
6	10,56	5,1
8	14,21	7,26
11	20,12	10,96
12	22,21	12,33
15	28,77	16,84
17	33,25	20,11
20	39,91	25,24
21	42,08	26,98
25	50,33	33,94
38	71,19	54,15
45	78,79	62,74
53	85,13	70,65
56	86,98	73,15
75	94,43	84,55
106	98,71	93,36
150	99,99	97,72
250	100	99,45
354	100	99,62
500	100	99,76