



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO**  
**Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto**  
**Departamento de Engenharia de Minas**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral – PPGEM**

---

## **CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE RESÍDUOS DE OFICINAS DE ARTESANATO DE PEDRA SABÃO DA REGIÃO DE OURO PRETO**

Autor: Michael Leonardo Marques Rodrigues

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Rosa Malena Fernandes Lima

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mineral.

Área de concentração: Tratamento de  
Minérios

Ouro Preto – maio de 2010.

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

Pós-Graduação em Engenharia Mineral

Michael Leonardo Marques Rodrigues

**CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE RESÍDUOS DE OFICINAS DE  
ARTESANATO DE PEDRA SABÃO DA REGIÃO DE OURO PRETO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Mineral da Universidade Federal de Ouro Preto

Área de concentração: Tratamento de Minérios  
Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Rosa Malena Fernandes Lima

Ouro Preto, maio de 2010

Escola de Minas

*Dedico esta dissertação aos meus exemplos de vida, meus pais, Jurandir Rodrigues (in memoriam) e Isa Marques Rodrigues (in memoriam), que sempre me estimularam a dar este grande passo com imensurável amor e dedicação. À minha irmã, Ana Cláudia (in memoriam), por toda a paz e amor incondicional em minha vida.*

## Agradecimentos

À minha orientadora Prof. Dr<sup>a</sup>. Rosa Malena Fernandes Lima pela orientação e pelo conhecimento adquirido, sem deixar de mencionar e agradecer a toda a compreensão e apoio dedicados por ela durante os momentos em que se fizeram necessários.

Aos professores Carlos Alberto e José Aurélio pelo incentivo e conhecimentos transmitidos.

Aos alunos de iniciação científica, Mayronn e Renato, pelo companheirismo e dedicação.

Ao corpo técnico pelos serviços prestados e pelas valiosas sugestões durante a execução dos ensaios.

A todos os meus amigos, amigas e familiares que sempre estiveram presentes, me aconselhando e incentivando com carinho e dedicação.

Enfim, a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa concedida durante o mestrado e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo financiamento do projeto.

## Resumo

Na região de Santa Rita de Ouro Preto, distrito da cidade de Ouro Preto-MG, existem diversas oficinas de artesanato em pedra-sabão que através da utilização de tornos de madeira fabricam painéis e diversos objetos de adorno. O processo de fabricação desses objetos resulta na produção de uma grande quantidade de finos que, normalmente, são depositados próximo às oficinas sem nenhuma forma de controle. Este projeto se propôs em efetuar a caracterização tecnológica destes resíduos, bem como ensaios de purificação visando o aproveitamento econômico dos mesmos. A determinação da distribuição granulométrica dos resíduos foram efetuadas por peneiramento a úmido e análise em granulômetro a laser, para a fração granulométrica abaixo de 37  $\mu\text{m}$ . Verificou-se que o  $d_{80}$  das amostras ensaiadas variou entre 550 a 1575  $\mu\text{m}$ . Na caracterização mineralógica dos finos utilizou-se a difração de raios X pelo método do pó total. As principais fases cristalinas identificadas foram: talco, tremolita, nimita, ilmenita, dolomita, magnetita, magnesita e quartzo na amostra proveniente de Cachoeira do Brumado. Já as amostras da região de Santa Rita de Ouro Preto, além do talco e da nimita, também foram detectados os minerais caulinita e clorita-serpentina. As análises químicas por ICP-OES detectaram a presença de elevados teores de impurezas tais como  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nas amostras analisadas impossibilitam o uso dos resíduos de pedra sabão, sem prévia purificação, para destinações industriais mais nobres. Com base nas análises dos dados, pode-se deduzir a presença de: calcopirita, rodocrosita e arsenopirita. O resíduo de pedra-sabão (amostra global) e fração granulométrica abaixo de 74  $\mu\text{m}$  possuem especificações químicas para serem usados na fabricação de inseticidas, têxteis, fertilizantes e rações (veículo). O potencial zeta do talco puro apresentou o PZC em um pH de 2,3. Com relação aos métodos de purificação, utilizaram-se as técnicas de separação magnética de alta intensidade, mesa vibratória, flotação e alvejamento químico. Utilizaram-se ferramentas estatísticas do software MINITAB a fim de se analisar variáveis que possam apresentar influências significativas nesses processos. Dentre esses, os processos de flotação utilizando querosene (coletor), metassilicato de sódio (depressor) e MIBC (espumante) e alvejamento com HCl apresentaram os melhores valores de alvura, gerando concentrados de 71,81% (ISO) e 86,5% (ISO) respectivamente e adequando também estes produtos às especificações para tintas (espalhador), papel (carga), de plásticos (carga e reforço) e plásticos antiaderentes.

**PALAVRAS-CHAVE:** Pedra sabão, talco, caracterização, purificação, concentração.

## Abstract

Around the Santa Rita de Ouro Preto - MG region there are several soap stones handmade's workshops that manufactures souvenirs and pans. The large amount of wastes produced is thrown away without any control. This project is proposed to develop the technological characterization of waste, and tests of concentration and purification in order to its economic exploitation. It was also characterized a fine sample of soapstone of a crafts workshop in soapstone, who was working with a rock from Cachoeira do Brumado-MG. To determine the size distribution of these residues, wet screening and particle size analysis were used by laser for particle size fraction below 37 micrometers. It was found that the  $d_{80}$  of the test samples ranged from 550 to 1575 $\mu\text{m}$ . The main crystalline phases identified were: talc, tremolite, nimite, ilmenite, dolomite, magnetite, magnesite and quartz in the sample from Cachoeira do Campo. In the Santa Rita' samples were identified the following phases: talc, nimita, kaolinite and chlorite-serpentine. The chemical characterization by the instrumental technique of ICP-OES identified the presence of high levels of impurities such as  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  in the samples. Based on prior analysis, can deduce the presence of calcopirita, rhodochrosite e arsenopyrite. The zeta potential of pure talc had a PZC of 2,3. Regarding the methods of concentration and purification, it was used the techniques of high intensity magnetic separation, table, flotation and chemical bleaching. It was used the software MINITAB 15 to analyze variables that may have influences in these processes. Among these, the flotation process using kerosene (collector), sodium metasilicate (depressor) and MIBC (frother) and bleaching with HCl showed the best of brightness, producing concentrates of 71.81% (ISO) and 86.5% (ISO) respectively.

**KEYWORDS:** Soapstone, talc, characterization, purification, concentration.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura cristalográfica do mineral talco ( <a href="http://www.luzenac.com/mineralogy.htm">www.luzenac.com/mineralogy.htm</a> ).....	10
Figura 2: Titulação potenciométrica de um talco de Nova Iorque (Burdukova et al., 2007).....	12
Figura 3: Proposta de distribuição de cargas superficiais do talco de Nova Iorque. (Burdukova et al., 2007) .....	12
Figura 4: Efeito do pH na flotabilidade natural, ângulo de contato e potencial zeta do talco. (Yehia e Al-Wakeel, 1999).....	15
Figura 5: Influência do pH na flotação do talco e tempo de indução em 0,002M de KNO <sub>3</sub> sem a adição de um coletor, e depressão do talco por 8,1mg/L de dextrina. (Fuerstenau et al., 2007).....	16
Figura 6: Efeito da concentração de querosene sobre a recuperação e alvura do talco. Concentração de polietileno glicol (espumante): 50g/t. (Petter et al., 2007) .....	18
Figura 7: Efeito da concentração e tipo de espumantes sobre a recuperação do talco. (Petter et al., 2007) .....	18
Figura 8: Efeito da concentração de sólidos sobre a recuperação do talco. Concentração de querosene: 800g/t. Concentração de espumante: 50g/t (óleo de pinho). (Petter et al., 2007).....	19
Figura 9: Efeito da concentração de polipropileno Glicol (AF 65) na flotação de talco em pH 6.8. (Yehia e Al-Wakeel, 1999) .....	20
Figura 10: Efeito do pH na flotação de talco com polipropileno glicol. (Yehia e Al-Wakeel, 1999).....	21
Figura 11: Efeito do tempo na recuperação de quatro frações de talco: ◆, -180 + 125 µm; □, -125 + 90 µm; ■, -90 + 38 µm; ●, -38 µm. (Yekeler e Sonmez, 1997) .....	22



Figura 12: Efeito do tempo na recuperação de misturas de talco e calcita em granulometria abaixo 38 $\mu\text{m}$ : ●, 100% de talco; ■, 75% de talco; □, 50% de talco; ◆, 25% de talco; ○, 00% de talco. (Yekeler e Sonmez, 1997).....	22
Figura 13: Localização geográfica das oficinas de artesanato de Santa Rita de Ouro Preto. (©2010 Google – Dados cartográficos) .....	26
Figura 14: Fluxograma referente à metodologia aplicada para a caracterização e purificação de resíduos de pedra sabão.....	27
Figura 15: Distribuição granulométrica da amostra FPS01 .....	42
Figura 16: Distribuição granulométrica da amostra FPS02 .....	42
Figura 17: Distribuição granulométrica da amostra FPS03 .....	43
Figura 18: Distribuição granulométrica da amostra FPS04 .....	43
Figura 19: Distribuição granulométrica da amostra FPS05 .....	44
Figura 20: Distribuição granulométrica da amostra FPS06 .....	44
Figura 21: Distribuição granulométrica da fração abaixo de 37 $\mu\text{m}$ da amostra FPS01.....	45
Figura 22: Distribuição granulométrica da fração abaixo de 37 $\mu\text{m}$ da amostra FPS02.....	45
Figura 23: Distribuição granulométrica da fração abaixo de 37 $\mu\text{m}$ da amostra FPS03.....	46
Figura 24: Distribuição granulométrica da fração abaixo de 37 $\mu\text{m}$ da amostra FPS04.....	46
Figura 25: Distribuição granulométrica da fração abaixo de 37 $\mu\text{m}$ da amostra FPS05.....	47
Figura 26: Gráfico do Potencial Zeta do talco puro .....	52
Figura 27: Recuperação em massa e alvura dos resíduos de pedra sabão acima de 200# (+74 $\mu\text{m}$ ) purificados por separação magnética.....	53

Figura 28: Recuperação em massa e alvura dos resíduos de pedra sabão abaixo de 200# (-74 $\mu$ m) purificados por separação magnética.....	53
Figura 29: Gráfico de Pareto dos efeitos principais sobre recuperação em massa da mesa vibratória.....	67
Figura 30: Gráfico de Pareto dos efeitos principais sobre alvura da mesa vibratória.....	67
Figura 31: Influência dos efeitos principais sobre a recuperação em massa da mesa vibratória.....	68
Figura 32: Influência dos efeitos principais sobre a alvura da mesa vibratória.....	59
Figura 33: Interações entre os efeitos principais sobre a alvura da mesa vibratória.....	59
Figura 34: Interações entre os efeitos principais sobre a recuperação em massa da mesa vibratória.....	60
Figura 35: Gráfico do cubo para os resultados da resposta recuperação em massa da mesa vibratória.....	61
Figura 36: Gráfico do cubo para os resultados da resposta alvura.....	61
Figura 37: Curva de contorno para a recuperação em massa da mesa vibratória.....	62
Figura 38: Curva de contorno para a alvura da mesa vibratória.....	63
Figura 39: Otimização conjunta para alvura e recuperação em massa da fração leve da mesa vibratória.....	66
Figura 40: Gráfico de Pareto dos efeitos principais para a recuperação em massa dos ensaios de flotação.....	70
Figura 41: Gráfico de Pareto dos efeitos principais para alvura dos ensaios de flotação.....	70
Figura 42: Gráfico dos efeitos principais, dosagem de MIBC e porcentagem de sólidos, sobre a recuperação em massa dos ensaios de flotação.....	71

Figura 43: Gráfico dos efeitos principais, dosagem de MIBC e porcentagem de sólidos, sobre a alvura dos ensaios de flotação .....	71
Figura 44: Interação entre os efeitos, porcentagem de sólidos e dosagem de MIBC, sobre a recuperação em massa dos ensaios de flotação.....	72
Figura 45: Gráfico das interações entre os efeitos porcentagem de sólidos e dosagem de MIBC para alvura referente aos ensaios de flotação .....	73
Figura 46: Gráfico do cubo, porcentagem de sólidos vs dosagem de MIBC, para a recuperação em massa dos ensaios de flotação .....	73
Figura 47: Gráfico do cubo, porcentagem de sólidos vs dosagem de MIBC, para a alvura dos ensaios de flotação .....	74
Figura 48: Curva de contorno para a recuperação em massa em função da dosagem de MIBC e porcentagem de sólidos dos ensaios de flotação .....	75
Figura 49: Curva de contorno para a alvura em função da dosagem de MIBC e porcentagem de sólidos dos ensaios de flotação .....	75
Figura 50: Otimização conjunta para alvura e recuperação em massa do produto concentrado dos ensaios de flotação .....	76
Figura 51: Resultados dos ensaios de flotação otimizados .....	80
Figura 52: Resultados dos ensaios rougher e duas etapas cleaner para alimentação deslamada.....	82
Figura 53: Resultados dos ensaios rougher e duas etapas cleaner para polpa com 10% de sólidos e 150g/t de MIBC.....	84
Figura 54: Gráfico de Pareto dos efeitos, dosagem de ditonito de sódio, porcentagem de sólidos e pH no alveamento dos resíduos de pedra sabão .....	86
Figura 55: Gráfico dos efeitos principais, dosagem de ditonito de sódio, porcentagem de sólidos e pH no alveamento dos resíduos de pedra sabão .....	87
Figura 56: Gráfico das interações entre os Efeitos para a alvura referente aos ensaios de alveamento com ditonito de sódio.....	87
Figura 57: Gráfico do cubo para os resultados da alvura referente aos ensaios de alveamento com ditonito de sódio .....	88

Figura 58: Curva de contorno para a alvura em função da dosagem de ditionito de sódio (g/t) e porcentagem de sólidos em pH 3,5.....	89
Figura 59: Curva de contorno para a alvura em função da dosagem de ditionito de sódio (g/t) e porcentagem de sólidos em pH 5.....	89
Figura 60: Otimização conjunta para alvura do produto alvejado dos ensaios de alvejamento com ditionito de sódio.....	90
Figura 61: Resultados de alvura para o alvejamento com ditionito de sódio.....	92
Figura 62: Gráfico de Pareto dos efeitos sobre a alvura dos ensaios de alvejamento com ácido clorídrico.....	94
Figura 63: Gráfico dos efeitos principais sobre a alvura dos ensaios de alvejamento com ácido clorídrico.....	94
Figura 64: Gráfico das interações entre os efeitos concentração de HCl, temperatura e tempo de reação sobre a alvura referente aos ensaios de alvejamento com ácido clorídrico.....	95
Figura 65: Gráfico do cubo para os resultados da alvura referente aos ensaios de alvejamento com ácido clorídrico.....	96
Figura 66: Curva de contorno da resposta alvura em função da concentração de HCl (M) e temperatura (C°) em um tempo de reação de 30 minutos.....	96
Figura 67: Curva de contorno da resposta alvura em função da concentração de HCl (M) e temperatura (C°) em um tempo de reação de 60 minutos.....	97
Figura 68: Otimização conjunta das variáveis concentração de HCl, temperatura e tempo de reação para alvura do produto alvejado dos ensaios de alvejamento com ácido clorídrico.....	97
Figura 69: Resultados de alvura para o alvejamento com HCl.....	98
Figura 70: Ganhos de alvuras relativos aos processos de purificação.....	99

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais usos e especificações do talco (Pontes e Almeida, 2005).....	4
Tabela 2: Fórmulas químicas e massas específicas de minerais presentes na pedra sabão da região de Bandeiras.....	10
Tabela 3: Efeito do pH na flotação do talco (Yehia e Al-Wakeel, 1999). ....	20
Tabela 4: Resultados finais da análise química dos constituintes do talco, recuperação mássica, alvura e PCC na alimentação, no concentrado final da flotação e produto da lixiviação.....	24
Tabela 5: Identificação das amostras de resíduos de pedra sabão.....	27
Tabela 6: Níveis e variáveis do planejamento fatorial de experimentos para a mesa vibratória.....	33
Tabela 7: Níveis e variáveis do planejamento fatorial de experimentos para os ensaios de flotação .....	35
Tabela 8: Níveis e variáveis do planejamento fatorial de experimentos para alvejamento com ditonito de sódio.....	38
Tabela 9: Níveis e variáveis do planejamento fatorial de experimentos de alvejamento com HCl.....	40
Tabela 10: Superfície específica dos finos de pedra sabão .....	41
Tabela 11: $D_{80}$ e frações abaixo de 37 e 10 $\mu\text{m}$ .....	47
Tabela 12: Análise granuloquímica das amostras de finos de pedra sabão.....	50
Tabela 13: Resultados da análise química do talco .....	51
Tabela 14: Resultados da análise química dos produtos não magnéticos do resíduo de pedra sabão (FPS06) .....	55
Tabela 15: Resultados das variáveis respostas dos ensaios de concentração em mesa vibratória .....	56

Tabela 16: Resultados da análise química do planejamento fatorial dos produtos purificados por mesa vibratória.....	65
Tabela 17: Resultados referentes ao processo de mesa vibratória otimizado.....	66
Tabela 18: Resultados da análise química referentes aos ensaios otimizados de mesa vibratória.....	67
Tabela 19: Resultados das variáveis resposta dos ensaios de flotação segundo planejamento fatorial de experimentos.....	69
Tabela 20: Teores dos produtos purificados dos ensaios de flotação.....	78
Tabela 21: Resultado das análises químicas para os concentrados das etapas <i>rougher e cleaner</i> da flotação otimizada.....	81
Tabela 22: Resultado das análises químicas dos concentrados das etapas <i>rougher e cleaner</i> da flotação otimizada com alimentação deslamada.....	83
Tabela 23: Resultado das análises químicas da flotação otimizada e alimentação com 10% de sólidos.....	84
Tabela 24: Resultados do planejamento fatorial de experimentos da fração abaixo de 74 $\mu$ m dos resíduos de pedra sabão com ditionito de sódio.....	85
Tabela 25: Teores do produto alvejado com ditionito de sódio para a amostra abaixo de 74 $\mu$ m.....	91
Tabela 26: Resultados das variáveis respostas dos ensaios de alvejamento com ácido clorídrico segundo planejamento fatorial de experimentos.....	93
Tabela 27: Resultado das análises químicas do alvejamento químico com ácido clorídrico.....	100
Tabela 28: Distribuição granulométrica da amostra FPS01.....	107
Tabela 29: Distribuição granulométrica da amostra FPS02.....	108
Tabela 30: Distribuição granulométrica da amostra FPS03.....	109
Tabela 31: Distribuição granulométrica da amostra FPS04.....	110

Tabela 32: Distribuição granulométrica da amostra FPS05 .....	111
Tabela 33: Distribuição granulométrica da amostra FPS06 .....	112
Tabela 34: Balanço de massa da separação magnética de alta intensidade.....	113
Tabela 35: Balanço de massa da mesa vibratória.....	113
Tabela 36: Balanço de massa dos ensaios de flotação do planejamento fatorial.....	114
Tabela 37: Balanço de massa dos ensaios de flotação otimizada.....	115
Tabela 38: Balanço de massa dos ensaios de flotação otimizada com duas etapas cleaner.....	115
Tabela 39: Balanço de massa dos ensaios de flotação otimizada com polpa de alimentação deslamada .....	116
Tabela 40: Balanço de massa dos ensaios de flotação otimizada com polpa de alimentação deslamada e duas etapas cleaner.....	116
Tabela 41: Teores dos afundados dos ensaios de flotação .....	117
Tabela 42: Resultado das análises químicas dos afundados das etapas <i>rougher e cleaner</i> da flotação otimizada .....	119
Tabela 43: Resultado das análises químicas dos afundados das etapas <i>rougher e cleaner</i> da flotação otimizada com alimentação deslamada.....	120

## SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO.....	14
1.2 - Usos e especificações do mineral talco .....	2
2 – RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA .....	7
3 – OBJETIVOS.....	<b>8</b>
4 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
4.1 – Pedra Sabão .....	9
4.2 – O mineral talco .....	10
4.2.1 – Mineralogia.....	10
4.2.2 – Propriedades superficiais do talco .....	11

4.3 – Purificação de Talco .....	13
4.3.1 – Flotação .....	13
4.3.2 – Alvejamento Químico.....	23
5 – MATERIAIS E METODOLOGIA .....	26
5.1 – Homogeneização e Quarteamento .....	28
5.2 – Caracterização Granulométrica, Determinação de Massa Específica e Área Superficial....	29
5.3 – Caracterização Mineralógica .....	30
5.4 – Caracterização Química.....	30
5.5 – Potencial Zeta .....	30
5.6 – Determinação de Alvura .....	31
5.7 – Ensaio Tecnológico de Purificação .....	32
5.7.1 – Separação magnética de alta intensidade.....	32
5.7.2 – Mesa vibratória .....	33
5.7.3 – Flotação .....	34
5.7.4 – Deslamagem .....	37
5.7.5 – Preparo das soluções de reagentes.....	37
5.7.6 – Alvejamento Químico.....	38
5.7.6.1 – Ditionito de Sódio ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ ).....	38
5.7.6.2 – Ácido clorídrico (HCl).....	39
6 – RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	42
6.1 – Determinação de Massa Específica, Área Superficial e Caracterização Granulométrica....	42
6.2 – Caracterização Mineralógica por Difractometria de Raios X.....	49
6.2.1 – Amostra de resíduo de pedra sabão de Cachoeira do Brumado.....	49
6.2.2 – Amostra de resíduo de pedra sabão de Bandeiras.....	49
6.3 – Caracterização Química.....	49
6.4 – Potencial Zeta .....	53
6.5 – Ensaio Purificação.....	54
6.5.1 – Separação magnética de alta intensidade.....	54
6.5.2 – Mesa vibratória .....	57
6.5.3 – Flotação .....	69
6.5.4 – Alvejamento químico.....	86
6.5.4.1 – Alvejamento químico com ditionito de sódio ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ ).....	86
6.5.4.2 – Alvejamento químico com ácido clorídrico (HCl) .....	93



7 – CONCLUSÃO.....	102
8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	105
9 – APÊNDICES .....	108
9.1 – Apêndice I: Resultados das análises granulométricas das amostras de resíduos de pedra sabão .....	108
9.2 – Apêndice II: Balanços de massa dos ensaios de purificação .....	114
9.3 – Apêndice III: Teores dos ensaios de purificação .....	118

## 1 – INTRODUÇÃO

### 1.1 - Generalidades

A palavra talco provém do termo “talc”, da língua árabe e foi usada pela primeira vez em 869. As rochas de talco são classificadas como rochas industriais, abrangendo todas as rochas não-metálicas utilizadas nos processos industriais. Pertence a um grupo de minerais e rochas que têm propriedades semelhantes e destinações industriais comuns (Kuzvart, 1984 e Pinheiro, 1973).

O mineral talco é um silicato de magnésio hidratado de fórmula geral  $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ , cristalizado no sistema monoclinico e hábito laminar, radiado, tabular ou compacto. Quando puro, apresenta composição química teórica de  $MgO = 31,7\%$ ;  $SiO_2 = 63,5\%$  e  $H_2O = 4,8\%$ . É um mineral de origem secundária, formado pela alteração de silicatos de magnésio e anfibólios. Pode ocorrer associado à clorita, serpentina, calcita, quartzo, tremolita, dolomita, hematita e magnesita. É encontrado tanto em rochas ígneas como em metamórficas, sendo que, nesta última, ocorre de forma granular e/ou criptocristalina, denominada esteatito (pedra sabão), formando quase toda a massa da rocha. O esteatito é uma variedade de talco que também recebe a denominação de saponito ou talco compacto. Deve possuir, no máximo, 1,5% de CaO e 1,5% de  $FeO + Fe_2O_3$  e seu ponto de fusão é em torno de  $1320^\circ C$  (Dana e Hurlbult, 1984, Pinheiro, 1973 e Lefond, 1975).

As jazidas de talco e esteatito (pedra sabão) do estado de Minas Gerais são produtos de metamorfismo de basaltos, diabásios e anfibólitos. Na região de Ouro Preto, estes depósitos derivam de derrames básicos que formaram, por metamorfismo, pacotes de talco xisto, onde se individualizam camadas de talco compacto. Estão encaixados em quartzitos Itacolomi, apresentando orientação preferencial este-oeste com mergulho moderado para sul. A espessura das camadas talcosas situa-se em torno de 0,80 a 1m (Pinheiro, 1973).

Segundo Lefond (1975), a exploração de talco, geralmente se utiliza de equipamentos em pequena escala. A forma de adequação às especificações industriais se limita a uma secagem seguida de moagem para reduzir a granulometria do mineral.

Na região de Bandeiras, localizada no distrito de Santa Rita de Ouro Preto, Município de Ouro Preto, as pedreiras produzem blocos de esteatito que são extraídos e

exportados para a Europa onde são utilizados na fabricação de ornatos em cantaria e utilizados no revestimento interno de lareiras. As pedreiras são pequenas e com exploração feita a céu aberto através de lavra seletiva e catação manual. O talco, o qual ocorre em bolsões, e uma rocha de qualidade inferior e de menor valor agregado também são produzidos e vendidos para o artesanato (fabricação de painéis, objetos de adorno, etc.), e para a indústria cerâmica.

## 1.2 - Usos e especificações do mineral talco

O talco é um mineral extremamente versátil e o seu uso tem se tornado cada vez mais abrangente na indústria devido às suas principais propriedades tecnológicas: alvura, leveza, baixo teor de umidade, suavidade ao tato, brilho intenso, baixa condutibilidade elétrica e térmica, alto poder de lubrificação e deslizamento, alta capacidade de absorção de óleos e graxas, alta área de superfície, boa retenção como carga e inércia química (Dana e Hurlbult, 1984 e Kuzvart, 1984).

Os mais importantes segmentos industriais que utilizam o talco como matéria - prima são (Pinheiro, 1973 e Lefond, 1975):

*Cosméticos:* o talco é um dos materiais mais importantes e a porcentagem empregada nessa indústria é maior do que a de qualquer outro ingrediente. Devido à sua absorção e fluidez, o talco é de fundamental importância como suporte para pigmentos orgânicos e inorgânicos. Em diferentes proporções e formas, o talco é usado em sabonetes, cremes, pomadas, pós, etc. Contudo, em comparação com seus outros usos, a quantidade em cosméticos é muito pequena.

*Tintas:* O talco é muito usado na fabricação de tintas para aplicações externas em superfícies expostas à abrasão. Encontra também bastante emprego em tintas de baixa visibilidade, tornando-se assim um material de estratégia militar. Não é apropriado para compor tintas de brilho intenso, pois possui um efeito de assentamento sobre a película da tinta.

*Borrachas:* na indústria de borrachas o talco é usado como agente de pulverização para lubrificar os moldes e evitar que as superfícies se liguem durante a manufatura dos produtos. O talco tem também entrado na composição de certas borrachas semiduras para válvulas.

*Papel:* as indústrias de papel consomem grande quantidade de talco para proporcionar elevada retenção e suficiente opacidade ao produto por um baixo custo.

*Cerâmica:* de um modo geral, o emprego de talco na indústria cerâmica é relativamente amplo, sendo usado em massas cerâmicas para a fabricação de diversos produtos cerâmicos como: azulejos, pisos, isolantes elétricos, porcelana doméstica, louça doméstica, refratários de elevada resistência ao choque térmico, refratários resistentes ao ataque de álcalis dentre outros.

*Têxteis:* o talco é empregado na indústria têxtil para dar peso e alvejar tecidos de algodão, cordoalha, barbantes e fios. Para uso na indústria têxtil é necessário que o talco possua cor clara e ausência de materiais duros, como quartzo e calcita que desgastam as agulhas e facas das máquinas operantes na indústria têxtil.

*Inseticidas:* principalmente as pirofilitas são utilizadas como carga inerte na preparação de inseticidas encontrados no mercado. Caracterizam-se pela fluidez, não decantando e não diminuindo a ação dos produtos químicos.

Segundo Pontes e Almeida (2005), as especificações de talco apresentadas na Tabela 1 são resultantes de contatos com produtores e consumidores do talco como matéria prima para os diferentes usos industriais devido a uma não padronização internacional.

O índice de alvura é definido de acordo com suas propriedades óticas segundo dois parâmetros: aquelas relacionadas às faixas que dizem respeito a todo o espectro, e aquelas relacionadas com faixas de absorção específica. Assume-se que o índice de alvura depende, não só da mineralogia do mineral (especialmente as impurezas), mas também de parâmetros morfológicos (Filipov et al., 1999).

Tabela 1: Principais usos e especificações do talco (Pontes e Almeida, 2005)

Usos	Tintas (Espalhador)	Tintas (Pigmentos)	Cosméticos (Carga)	Papel (Cobertura)	Cerâmica (Branca)
Tamanho	100% < 200# 96,5% < 325#	100% < 325#	99,6% < 325#	98,8 a 99,9% < 325 #	97% < 325# 100% < 200#
Composição Química	SiO <sub>2</sub> +MgO ≥75% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ≤2% H <sub>2</sub> O+M.Vol. ≤1% Perda ao Fogo ≤7%	SiO <sub>2</sub> : 50 a 65% MgO: 24 a 32 % MgO + SiO <sub>2</sub> ≥ 88 % CaO ≤ 9 %; CO <sub>2</sub> ≤ 1 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ≤ 6 % H <sub>2</sub> O + MV ≤ 1 % Perda ao Fogo ≤ 7 %	Chumbo < 20 ppm Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> < 0,75 Solução Ac. < 2 % Sol. H <sub>2</sub> O < 0,2 % As < 3 ppm pH : 6,5 até 9,5 % Sol.CaO < 1,5 % Perda Fogo: 3 a 8 %	CaCO <sub>3</sub> < 4 % Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ≤ 2% MgO: 30,7 a 31,7 % SiO <sub>2</sub> : 47,4 a 58,2 % CaO: 0,3 a 1 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 0,4 a 1 % PF: 6,9 a 20,3 %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ≤ 1,5 % CaO ≤ 1,5 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ≤ 4 %
Alvura (ISO)*	65 - 87	77 - 87	82 – 89,5	74 - 84	> 77
Mineralogia	Partículas lamelares	Partículas fibrosas (tremolítico)	Ausência tremolita e carbonatos	Isento de tremolita	Minerais que não o talco: máx. 5 a 10%
Propriedades	Inércia química, Hidrofobicidade, Alvura	Alvura, Inércia química, Adsorção de óleos 27 a 31%	Hidrofobicidade natural, Leveza, Lisura, Maciez, Inércia química, Alvura	Hábito placóide, Inércia química, Alvura	Fundente MgO : o mais alto possível
Outros	Peso específico 2,8 a 2,9.	Peso específico 2,8 a 2,9.	X	Peso específico 2,8 a 2,9. Partículas lamelares	$\frac{4}{4}$

Tabela 1: Principais usos e especificações do talco (continuação)

Usos	Borracha (lubrificante)	Sabão 1ª linha Sabão 2ª linha	Inseticida	Têxteis	Papel (carga)	Rações (veículo)	Fertilizantes
Tamanho	99% < 325#	99% < 325#	90% < 325#	sem resíduos arenosos	95% < 400#	95% < 200#	95% < 200#
Composição Química	SiO <sub>2</sub> = 60 a 63 % MgO = 26 a 33 % Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ≤ 2 % Mn < 0,01 % Cu < 0,002 % Perda são fogo = 5 %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = 5 % MgO ≥ 30,6 % SiO <sub>2</sub> = 54 % Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = 0,8 % CaO = 0,1 %	pH 8	X	X	X	X
Alvura (ISO)*	Branco	claro (1ª linha) escuro (2ª linha)	X	X	54 a 75	X	X
Mineralogia	X	X	X	Sem minerais de alta dureza	X	Sem minerais de dureza > 4	X
Propriedades	Hidrofobicidade, Inércia química	Inércia química, Alvura	Inércia química	Alvura	Inércia química, hidrofobicidade	Inércia química	Inércia química
Outros	Umidade 3%	Umidade < 1%. Perda ao fogo 3%	Adsorção	X	X	Umidade 3 a 5 %	Umidade 3 a 5 %

Tabela 1: Principais usos e especificações do talco (continuação)

Usos	Plástico (carga e reforço)	Plástico (anti-aderente)
Tamanho	100% < 200#	100% < 325#
Composição Química	X	X
Alvura (ISO)*	≥ 74	≥ 74
Mineralogia	Talco ou pirofilita	Talco ou pirofilita
Propriedades	Inércia química, alvura	Inércia química, alvura
Outros	Isento de umidade	Acidez baixa

\*(ISO) – International Standard Organisation

## **2 – RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA**

As pedreiras da região de Ouro Preto, especialmente as de Bandeiras, região de Santa Rita de Ouro Preto, extraem a pedra sabão como rocha ornamental a qual é vendida para a Europa e Estados Unidos. Nessas pedreiras, o talco ocorre em bolsões, que também são extraídos e vendidos como subprodutos para a indústria de cerâmica, principalmente. As rochas de qualidade inferior e os fragmentos de menores dimensões que não se adéquam às especificações para a exportação são destinados às oficinas de artesanato.

Na região de Ouro Preto-MG existem diversas oficinas de artesanato em pedra sabão que, através da utilização de tornos, fabricam painéis e diversos objetos de adorno, cujo processo de fabricação resulta na produção de uma grande quantidade de resíduos de diversas granulometrias. Muito embora a pedra sabão seja uma rocha constituída de um alto percentual de talco, estes resíduos gerados são normalmente depositados próximo às oficinas sem nenhum controle, causando um grande impacto ambiental como o assoreamento de leitos dos cursos de água próximos às oficinas.

Logo, a caracterização tecnológica e purificação desses resíduos serão de grande importância do ponto de vista ambiental e econômico, uma vez que possibilitará a redução do volume de material descartado além do emprego dos produtos purificados para algum segmento industrial o qual utilize o talco como material prima.



### **3 – OBJETIVOS**

Este trabalho teve como objetivo a caracterização tecnológica de resíduos (finos) gerados nas oficinas de artesanato de pedra sabão da região de Bandeiras, Santa Rita de Ouro Preto, visando seu aproveitamento industrial.

Os objetivos específicos foram:

1. Efetuar a caracterização granulométrica;
2. Efetuar a caracterização mineralógica;
3. Efetuar a caracterização química;
4. Efetuar ensaios de purificação.

## 4 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 – Pedra Sabão

Jordt-Evangelhista e Silva (2005) realizaram estudos relacionados à petrogênese de rochas metaultramáficas do tipo pedra sabão/serpentinó de Lamin, sul do Quadrilátero Ferrífero (QF) – MG. Estas rochas em questão, constituem um dos importantes bens minerais do QF e são amplamente exploradas nessa região. Verificou-se que essas rochas apresentam altos teores de MgO (em torno de 31%), baixos teores de álcalis (0,20% de  $K_2O + Na_2O$ ), Cr e Ni em altas concentrações (1829 e 1976 ppm respectivamente) e CaO e  $Al_2O_3$  na razão de 0,35. Nas amostras analisadas foram identificados os minerais anfibólios (60 a 80%), olivina (5 a 30%) e os minerais secundários clorita, carbonatos, serpentina e talco em volumes menores. Os minerais opacos identificados foram: magnetita, ilmenita e pirita, os quais se apresentam como acessórios.

Um estudo realizado por Lima et al. (2008) efetuou a caracterização tecnológica de amostras de pedra sabão comercializadas para artesanato e talco de quatro pedreiras de Bandeiras, região de Santa Rita de Ouro Preto. Na caracterização mineralógica das amostras de pedra sabão foram identificados os seguintes minerais: magnesita, dolomita, calcita (em maiores proporções), além de talco, pirita, magnetita e pentlandita. As fórmulas químicas de tais minerais e suas respectivas massas específicas estão apresentadas na Tabela 2. Os teores de  $Fe_2O_3$  estavam acima de 1,5% em várias amostras analisadas. Ressalta-se ainda a presença dos elementos Ni e Cu, em concentrações adequadas à indústria de cosméticos, e também a do elemento As. Os minerais opacos pirita, calcopirita, pentlandita, magnetita e arsenopirita foram identificados por MEV/EDS. Os índices físicos determinados para as amostras de pedra sabão tiveram como resultado os seguintes valores: peso específico variando entre 2,725 a 2,853  $g/cm^3$ , porosidade aparente entre 0,3 e 0,4 e absorção aparente de água entre 0,06 a 0,7%.

Tabela 2: Fórmulas químicas e massas específicas de minerais presentes na pedra sabão da região de Bandeiras

Mineral	Fórmula química	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )
Magnesita	MgCO <sub>3</sub>	2,9 - 3,1
Dolomita	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	2,86 - 3,10
Calcita	CaCO <sub>3</sub>	2,6 - 2,8
Talco	Mg <sub>3</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	2,7 - 2,8
Pirita	FeS <sub>2</sub>	5,1
Magnetita	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	5,15
Pentlandita	((Fe, Ni) <sub>9</sub> S <sub>8</sub> )	4,6 – 5,0

#### 4.2 – O mineral talco

##### 4.2.1 – Mineralogia

O talco é um mineral silicatado que consiste de estruturas octaédricas de hidróxido de magnésio situadas entre camadas tetraédricas de silício-oxigênio. Estas camadas são mantidas unidas por forças de atração do tipo van der Waals. Como resultado, o talco é um mineral anisotrópico (minerais que não possuem uma distribuição de cargas superficiais uniformes) e suas partículas exibem diferentes extremidades e planos basais. A Figura 1 mostra a estrutura do mineral talco, chamando a atenção para a estrutura química dos planos basais e das bordas.

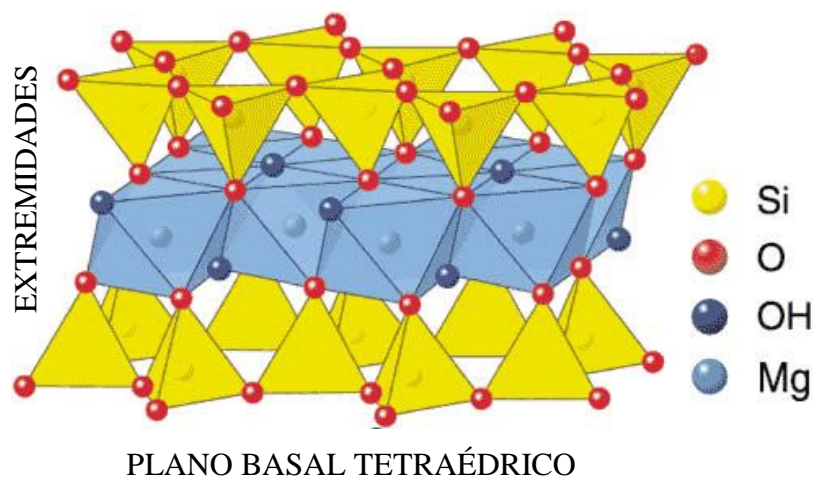


Figura 1: Estrutura cristalográfica do talco ([www.luzenac.com/mineralogy.htm](http://www.luzenac.com/mineralogy.htm))

O talco é geralmente encontrado em seu estado natural em uma ou mais de suas três principais formas, lamelar, granular e acicular, dependendo de sua localização geográfica. O talco mais adequado para muitos usos comerciais é o de forma lamelar.

#### 4.2.2 – Propriedades superficiais do talco

Comumente, é afirmada em várias publicações a compensação das cargas no plano basal do talco, levando a um mineral livre de cargas. Por outro lado, as extremidades são consideradas como possuindo cargas negativas devido às rupturas nas ligações iônicas e covalentes no plano octaédrico. A carga superficial de partículas de talco é geralmente estimada por medidas eletroforéticas (potencial zeta), tendo o seu ponto isoelétrico comumente estabelecido em  $\text{pH} \approx 2,5$  (Fuerstenau et al., 1988).

Contudo, se o mineral é anisotrópico e lamelar, a situação torna-se mais complexa e o ponto isoelétrico pode não ser precisamente determinado usando medidas de potencial zeta devido às complexidades hidrodinâmicas. A fim de se verificar se este valor corresponde ou não ao ponto de carga zero do mineral, Burdukova et al. (2007) fizeram uso da técnica de titulação potenciométrica realizada utilizando-se o método Roberts-Mular. Segundo estes pesquisadores, o ponto isoelétrico eletroforético não deve ser usado como representação adequada do verdadeiro ponto isoelétrico de minerais anisotrópicos e sim, referido como um ponto isoelétrico aparente. Como pode ser visto pela Figura 2, o ponto de carga zero ocorre em  $\text{pH} 7,7 \pm 0,45$ , o qual é significativamente diferente do ponto isoelétrico eletroforético do talco ( $\text{pH} \approx 2,5$ ). Esta disparidade é causada pela complexidade hidrodinâmica das partículas anisotrópicas lamelares durante a eletroforese, resultando em diferentes medidas eletroforéticas e de titulação. As medidas de potencial zeta fazem uso da equação de Smoluchowki, contudo, esta equação é usada para partículas esféricas ou próximas da esfericidade.

Uma representação esquemática para a proposta de distribuição de cargas superficiais do talco é mostrada na Figura 3. É, entretanto, importante salientar que nenhum estudo tem sido efetuado a fim de se quantificar a magnitude dessas cargas, tanto no plano basal quanto nas extremidades do talco (Burdukova et al., 2007).

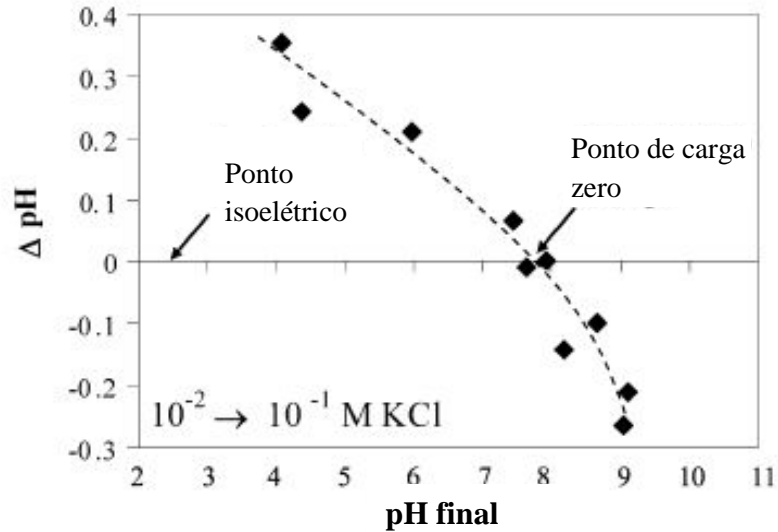


Figura 2: Titulação potenciométrica de um talco de Nova Iorque (Burdukova et al., 2007)

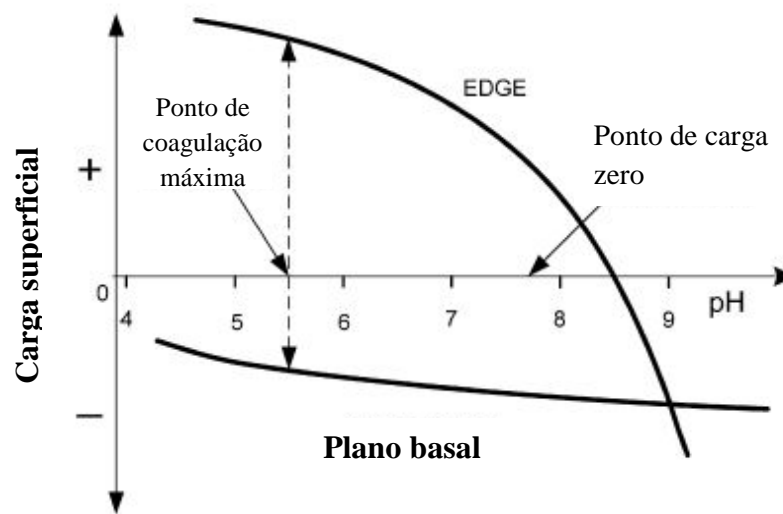


Figura 3: Proposta de distribuição de cargas superficiais do talco de Nova Iorque (Burdukova et al., 2007)

Burdukova et al. (2007) também analisaram amostras de talco de Nova York por microsonda eletrônica de varredura com a finalidade de determinar o grau de substituição dos íons  $\text{Si}^{4+}$  por íons alumínio e titânio, fato este responsável pela geração de cargas negativas no plano basal tetraédrico. Este grau de substituição apresentou-se relativamente pequeno ( $0,38 \pm 0,21\%$ ), contudo, este valor foi suficiente para afetar de forma significativa

o comportamento das partículas de talco em suspensão aquosa. Desta forma, o ponto de coagulação máximo dessas partículas é diferente dos pontos de carga zero e do ponto isoelétrico eletroforético.

#### 4.3 – Purificação de Talco

Os principais minerais de ganga presentes no talco são carbonatos, magnesita, dolomita, calcita serpentina e clorita, os quais contribuem para as diversas características indesejáveis durante sua aplicação industrial. Os minerais traço mais comuns incluem a magnetita, a pirita, o quartzo e a tremolita (Kuzvart, 1984 e Lefond, 1975). As porcentagens de alguns constituintes no talco tais como os óxidos de alumínio, cálcio e ferro determinam a qualidade da amostra para a demanda de mercado.

Mesas concentradoras são usadas na remoção de impurezas de alta densidade tais como minerais contendo níquel, cobalto e ferro. Flotação, separação magnética e uma combinação de flotação e separação magnética de alta intensidade podem ser aplicadas na remoção de minerais ferrosos.

Roe e Lawrence (1973) realizaram testes para a purificação de um talco proveniente da região sudeste da Califórnia-E.U.A. visando à separação da forma lamelar e demais impurezas. O minério foi britado a certa granulometria (1/8 a 1 polegada) para evitar a oclusão do talco no interior do mineral carbonatado. Feita a polpa, com adição de água deionizada, efetuou-se a separação do talco lamelar por sedimentação. O overflow apresentou um maior teor de talco lamelar livre de tremolita e com uma redução substancial (44%) dos minerais carbonatados.

##### 4.3.1 – Flotação

A flotação é a técnica de concentração preferencial para a remoção de impurezas do talco. Os vários fatores que controlam a flotação do talco incluem tamanho de partículas, pH, densidade de polpa, dosagem de coletor, de depressor e de espumante.

Segundo Leja (2004), o talco, por se tratar de um mineral com características hidrofóbicas, pode ser flotado utilizando-se apenas espumante, no entanto, para uma melhora na cinética de flotação, faz-se necessária a utilização de coletores apolares, os

quais sofrem interações do tipo van der Waals com as partículas de talco. Querosene e óleo de pinho tem sido a combinação mais adequada de reagentes para a flotação de talcos, bem como a utilização de silicato de sódio como depressor dos minerais de ganga.

Segundo Filipov et al. (1999), através da flotação seletiva do talco, relacionada à sua hidrofobicidade natural, é possível alcançar concentrados com teores de talco acima de 90% apenas com o uso de um espumante e/ou depressores em numerosas amostras. De acordo com a composição mineralógica do minério e dos propósitos requeridos, permite uma boa separação do talco de outros minerais (clorita, dolomita e quartzo). Um grande número de aplicações industriais requer, contudo, índices adequados de alvura além de pureza mineralógica. No entanto, existe uma relação entre o índice de alvura do talco cominuído e a forma das partículas, promovendo influências nas propriedades óticas das partículas em pó. Através de tal estudo, constatou-se que, quanto mais complexa a forma das partículas e quanto maior a fração de finos gerados no processo de cominuição (moinho cerâmica de bolas a úmido), mais baixos foram os valores de alvura em relação à moagem seca (Forplex).

A Figura 4 descreve o ângulo de contato, potencial zeta e flotabilidade de um talco puro em função do pH. É observado que não há correlação entre o ângulo de contato, potencial zeta e a flotação do talco. Uma variação na flotabilidade e no potencial zeta com o pH não é acompanhada por uma variação na molhabilidade. Tal fato deve-se às características anisotrópicas do mineral talco, formadas pela ruptura de interações do tipo van der Waals no plano basal formando faces hidrofóbicas e, rupturas das ligações iônicas ou covalentes, levando a extremidades hidrofílicas (Yehia e Al-Wakeel, 1999).

Segundo Fuerstenau et al. (1988), estudos eletrocinéticos e de microflotação indicam que a superfície apolar (face) e polar (extremidades) do talco são afetadas diferentemente pela adsorção de cátions metálicos hidrolisados. Em uma concentração de  $1 \times 10^{-4}$  M das espécies hidrolizadas  $Al^{3+}$ ,  $Cr^{3+}$  e  $Fe^{3+}$ , o talco muda seu sinal de negativo para positivo através de uma forte adsorção destas espécies complexas sobre as superfícies polares a medida em que se aumenta o pH, enquanto a hidrofobicidade natural do talco é inalterada. A carga superficial é devida à adsorção dessas espécies nas extremidades polares. A respeito da precipitação dos cátions a hidróxidos metálicos, as superfícies apolares são hidrofílicas em pH abaixo do PZC (ponto de carga zero) destes hidroxidos,

provavelmente, devido à heterocoagulação do metal precipitado em ambas as superfícies polares e apolares, resultando em uma perda na flotabilidade natural do talco.

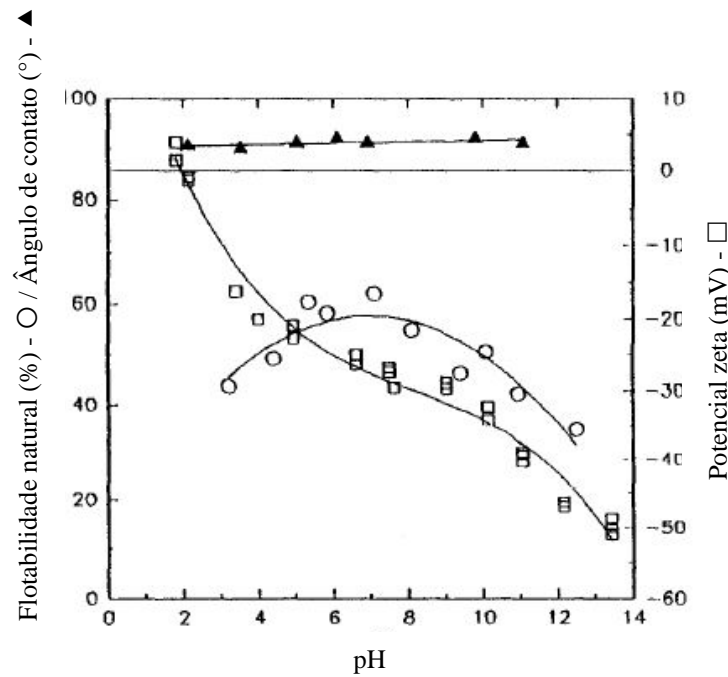


Figura 4: Efeito do pH na flotabilidade natural, ângulo de contato e potencial zeta do talco (Yehia e Al-Wakeel, 1999)

Na Figura 5 é apresentada a flotabilidade natural do talco em função do pH sem a adição de coletores e com adição de dextrina como depressor. Segundo Fuerstenau et al. (2007), em  $\text{pH} = 1$ , o potencial zeta apresenta um valor de +20 mV e -30 mV na faixa de pH que vai de 4 até 8. Acima de  $\text{pH} = 10$ , o potencial zeta torna-se novamente negativo (-50 mV), fazendo com que a flotabilidade do talco seja comprometida. O talco pode ser deprimido pela adição de polímeros hidrofílicos os quais possibilitam a ocorrência de ligações de hidrogênio entre as moléculas de água e o polímero depressor.



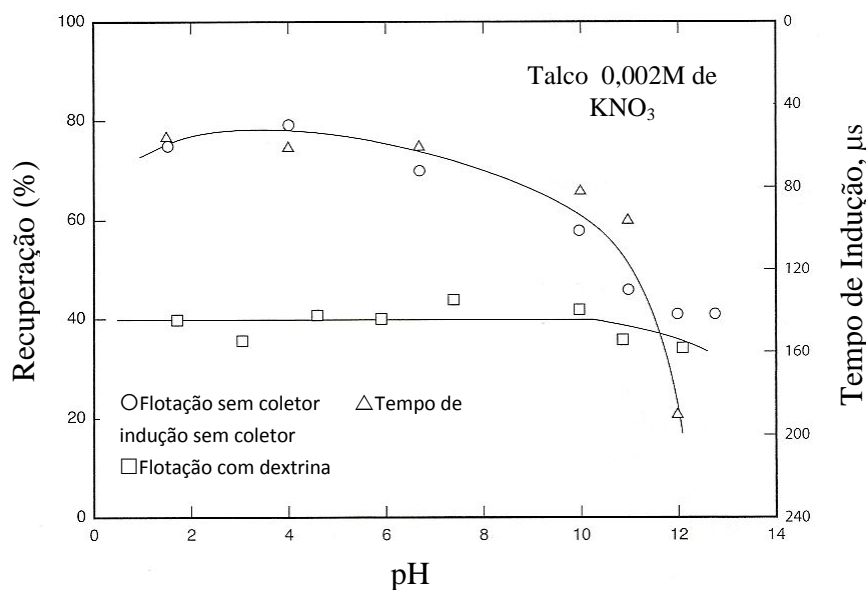


Figura 5: Influência do pH na flotação do talco e tempo de indução em 0,002 M de KNO<sub>3</sub> sem a adição de um coletor, e depressão do talco por 8,1 mg/L de dextrina (Fuerstenau et al., 2007)

Pontes e Leal Filho (2005) realizaram estudos de flotação direta de talco do Paraná em pH = 9,5 através do uso de silicato de sódio como depressor da ganga silicatada (quartzo, caulinita, tremolita e clorita), e flotanol D-14 ou óleo de pinho como espumante. Alcançaram-se alvuras da ordem de 76-80% (ISO) e recuperações em massa variando de 28 a 33%. Das variáveis estudadas no processo de flotação, apenas a aeração e o pH se mostraram capazes de influenciar significativamente o desempenho do processo.

Ahmed et al. (2007) realizaram testes para avaliar a influência do pH, dosagens de coletor e depressor e densidade da polpa na flotação de talco egípcio composto principalmente por 54,10% de SiO<sub>2</sub>, 29,90% de MgO, 8,20% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e 5,50% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:

a) Fazendo-se o uso de 1,0 kg/t de coletor aniônico (ácido oléico em igual proporção de querosene), 0,8 kg/t do depressor hexametáfosfato de sódio (SHMP) e polpa com 200 g/l observou-se que: os teores de SiO<sub>2</sub> e MgO (os maiores constituintes do talco) presentes no concentrado decresceram à medida em que se aumentou o pH de 4 para 12, ao passo que, os teores de CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (as principais impurezas do talco) diminuíram. O efeito do pH na recuperação mássica do concentrado mostrou um aumento de 53,0 para

84,5% mediante à elevação do pH de 4 para 11. Sendo assim, assegurou-se que o valor mais adequado para a flotação do talco em questão foi o de pH 11.

b) Utilizando-se de 1,0 kg/t de depressor (SHMP), densidade da polpa = 200g/L e pH = 11, realizaram testes experimentais referentes aos efeitos da dosagem do coletor (ácido oléico), variando-se sua dosagem de 0,6 a 1,4 kg/t em uma mistura de mesma proporção de querosene. Através de tais experimentos, verificou-se uma diminuição nas porcentagens de SiO<sub>2</sub> e MgO (constituintes de interesse) e um aumento nas de CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mediante a um aumento na dosagem do coletor de 0,6 para 1,4 kg/t, bem como um aumento na recuperação mássica (92,4%) no concentrado.

c) Observou-se também uma diminuição nos teores de SiO<sub>2</sub>, MgO e CaO à medida em que se aumentou a dosagem do depressor de 0,4 para 1,2 kg/t, bem como um decréscimo nos teores de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> para valor de pH 11. Percebeu-se um aumento na recuperação em massa à medida que se foi aumentada a dosagem do depressor de 0,4 para 1,0 kg/t, entretanto, uma dosagem superior causa um decréscimo em tal recuperação. Estes dados afirmam uma condição ótima de dosagem de depressor igual a 1,0 kg/t.

d) O efeito da densidade da polpa foi efetuado fixando o pH em 11 e as dosagens de coletor (ácido oléico/querosene) e depressor (SHMP) em 1,2 e 1,0 kg/t respectivamente. Pode-se constatar uma diminuição dos principais constituintes do talco, SiO<sub>2</sub> e MgO, a medida em que se aumenta a densidade da polpa de 100 para 300 g/L. Em relação à recuperação mássica do concentrado, bem como a recuperação metalúrgica do SiO<sub>2</sub> e do MgO, observou-se um aumento significativo a medida que se variava a densidade da polpa nas mesmas proporções anteriores. Desta forma, estabeleceu-se como 200 g/L a melhor densidade de polpa para o talco em questão.

Petter et al. (2007) também realizaram estudos a fim de avaliar a influência do pH, tipo e dosagem de espumantes e porcentagem de sólidos para uma amostra de talco com a seguinte composição química: 59,4% de SiO<sub>2</sub>, 30,8% de MgO, 4,48% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e 1,26% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Em tais estudos verificou-se que:

a) Com relação à variação do pH, não foram encontradas diferenças significativas na recuperação do talco em estudo. Tais recuperações foram de 63,3% para pH 4 e 56,6% para pH 10.

b) Constatou-se uma melhor recuperação em massa para dosagens de querosene superiores a 800 g/t, onde a alvura não sofreu variações significativas (60 a 65%). Veja figura 6.

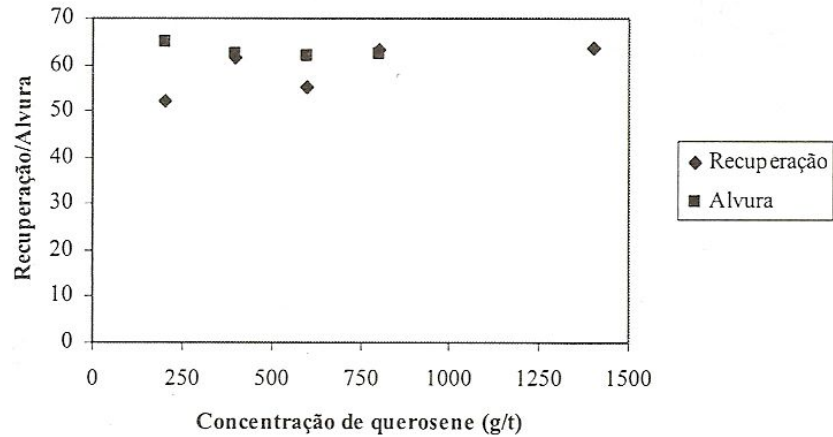


Figura 6: Efeito da concentração de querosene sobre a recuperação e alvura do talco.  
Concentração de polietileno glicol (espumante): 50 g/t (Petter et al., 2007)

c) Com o uso dos espumantes óleo de pinho e polietilenoglicol 400 observou-se um aumento na recuperação em massa, especialmente para o óleo de pinho, alcançando uma recuperação de 90% (Figura 7).

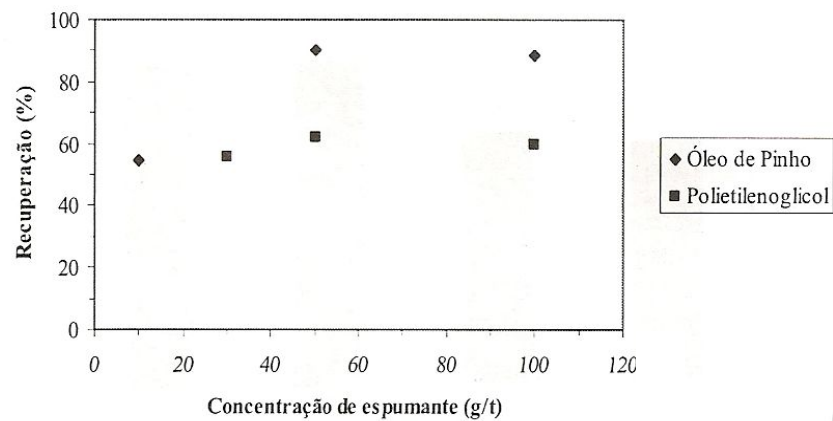


Figura 7: Efeito da concentração e tipo de espumantes sobre a recuperação do talco.  
(Petter et al., 2007)

d) Verificou-se a possibilidade da utilização de polpas com concentração de sólidos que variam em 15-40%. Para o talco estudado, a recuperação em massa variou com a concentração de sólidos mostrando um ponto de recuperação máxima ao redor de 20%, como apresentado na Figura 8.

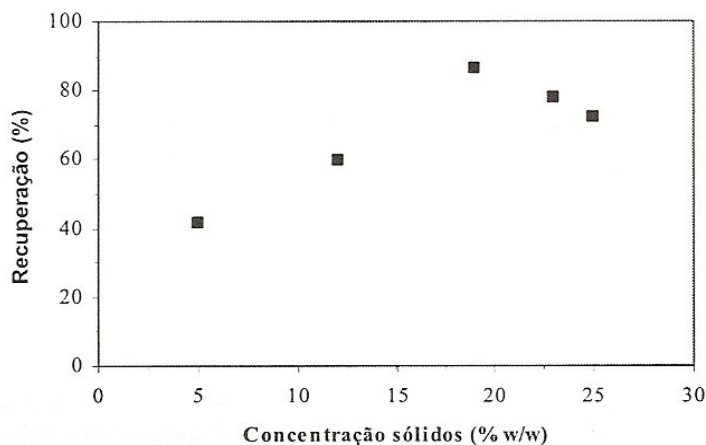


Figura 8: Efeito da concentração de sólidos sobre a recuperação do talco. Concentração de querosene: 800g/t. Concentração de espumante: 50g/t (óleo de pinho) (Petter et al., 2007)

Segundo Yehia e Al-Wakeel (1999), uma mais alta flotabilidade natural do talco é obtida na faixa neutra de pH, enquanto um decréscimo, em diferentes graus, ocorre nas soluções ácidas e alcalinas. Contudo, em soluções alcalinas, o grau de flotabilidade é menor quando comparado às ácidas. Em soluções ácidas e alcalinas, as moléculas de água hidratam as regiões carregadas negativamente ( $\text{SiO}^-$ ) nas extremidades e a superfície do talco se torna mais hidrofílica. Em pH neutro, a superfície do mineral apresenta baixa afinidade pelas moléculas de água e as bolhas de ar deslocam prontamente qualquer molécula de água fracamente adsorvida na superfície não carregada. Realizaram-se estudos referentes ao efeito do pH na flotação natural do talco, bem como o efeito do espumante polipropileno Glicol (AF 65):

a) O efeito do pH na flotação natural do talco é mostrado na Tabela 3, onde foi utilizada uma dosagem de 0,1 kg/t do espumante AF 65. Como pode ser visto, a recuperação máxima na fração concentrada é de aproximadamente 90% com um teor de 60% de talco em pH 7.

Tabela 3: Efeito do pH na flotação do talco talco (Yehia e Al-Wakeel, 1999)

pH	Concentrado			Rejeito		
	Talco		Carbonatos	Talco	Carbonatos	
	Teor (%)	Recuperação (%)	Teor (%)	Teor (%)	Recuperação (%)	Teor (%)
3	70	86	30	16	84	66
5	66	88	34	16	84	64
7	60	90	40	15	85	45
10	45	62	55	18	82	67
12	65	5	35	45	55	96

b) A Figura 9 mostra o resultado da flotação natural de talco em função da concentração do espumante AF 65 em pH  $6,8 \pm 0,2$  (pH ótimo de flotabilidade natural). Como poder ser visto, a flotabilidade do talco aumentou com o aumento da concentração do espumante até um nível de 12 ppm onde se estabilizou.

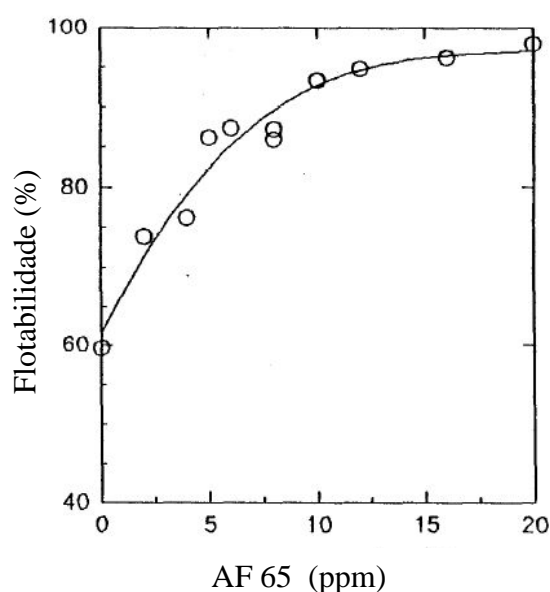


Figura 9: Efeito da concentração de polipropileno Glicol (AF 65) na flotação de talco em pH 6.8 (Yehia e Al-Wakeel, 1999)

c) Investigou-se, também, o efeito do polipropileno glicol na flotação natural do talco em diferentes valores de pH e em diferentes concentrações do espumante. É interessante

notar uma tendência similar no comportamento do talco em presença do polipropileno glicol quando comparada à flotabilidade natural do talco. Contudo, os valores de recuperação são mais altos na presença do espumante (Figura 10).

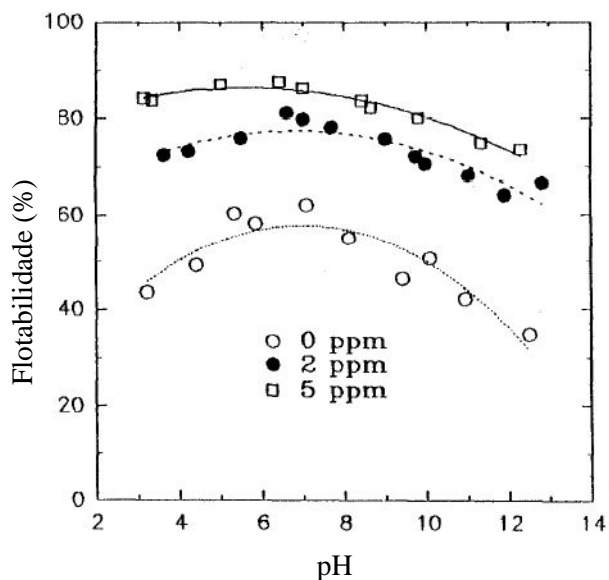


Figura 10: Efeito do pH na flotação de talco com polipropileno glicol (Yehia e Al-Wakeel, 1999)

Lima (1995) realizou estudos de flotação em coluna utilizando-se uma amostra de talco proveniente da região de Ponta Grossa – PR usando querosene como coletor, silicato de sódio como depressor e flotanol D-14 como espumante. Produziram-se concentrados com alvura de até 69,1% (etapa *hougher* da flotação em coluna), valor este suficiente para adequá-lo às especificações de talco para tintas. Tal valor de alvura também foi alcançado após três etapas *cleaner* da flotação convencional em escala piloto.

Yekeler e Sonmez, (1997) pesquisaram o efeito da granulometria na flotação em coluna efetuada com amostra de talco pura e em uma mistura de talco e calcita, cujos resultados estão apresentados na Figura 11 e 12. Para o talco puro, a recuperação máxima foi de 97,53% para partículas de  $-38 \mu\text{m}$ , enquanto a mínima recuperação obtida foi de 11,07% para a fração de  $-180 +125 \mu\text{m}$ . A fim de se quantificar a resposta da flotação de uma fração hidrofóbica em presença de uma fração hidrofílica, Yekeler e Sonmez (1997) utilizaram diferentes frações em massa de talco (hidrofóbico) e calcita (hidrofílica) misturando-os e flotando-os para a obtenção do comportamento da flotação. A Figura 12

mostra uma tendência similar à flotação do talco em diferentes frações granulométricas. A fração utilizada foi a de  $-38 \mu\text{m}$ , uma vez que foi a de melhor resultado atingido na flotação do talco puro.

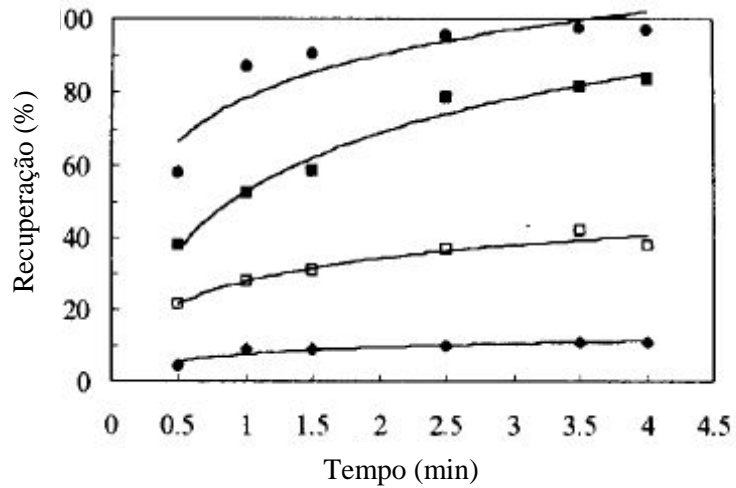


Figura 11: Efeito do tempo na recuperação de quatro frações de talco:  $\blacklozenge$ ,  $-180 + 125 \mu\text{m}$ ;  $\blacksquare$ ,  $-90 + 38 \mu\text{m}$ ;  $\square$ ,  $-125 + 90 \mu\text{m}$ ;  $\bullet$ ,  $-38 \mu\text{m}$  (Yekeler e Sonmez, 1997)

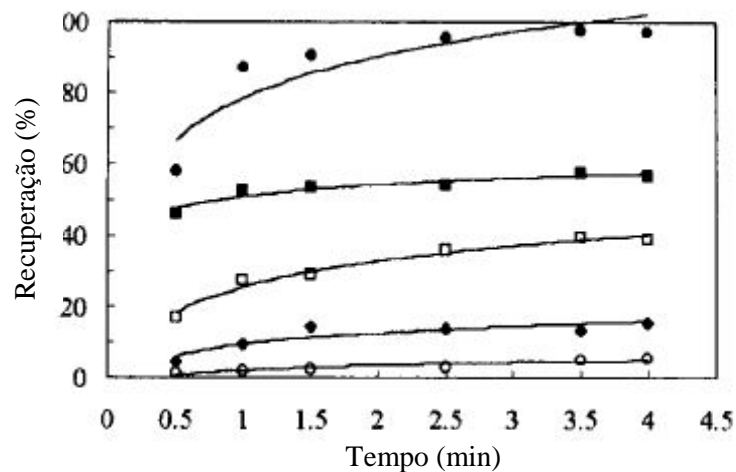


Figura 12: Efeito do tempo na recuperação de misturas de talco e calcita em granulometria abaixo  $38 \mu\text{m}$ :  $\bullet$ , 100% de talco;  $\blacksquare$ , 75% de talco;  $\square$ , 50% de talco;  $\blacklozenge$ , 25% de talco;  $\circ$ , 00% de talco (Yekeler e Sonmez, 1997)

Segundo Roe e Lawrence (1973), o processo de purificação do talco por meio da flotação apresenta algumas desvantagens:

1- Para que se tenha uma satisfatória separação do talco lamelar é necessário a cominuição de grande parte das partículas do minério à granulometrias de aproximadamente 10-15  $\mu\text{m}$ , o que leva a uma redução das partículas lamelares. Como a propriedade lubrificante do talco é função do raio e da espessura da superfície lamelar, uma diminuição nas dimensões planares acarreta um decréscimo da propriedade lubrificante desejável.

2- A cominuição necessária ao processo de flotação reduz também as partículas de minerais de ganga gerando uma quantidade apreciável de seus superfinos, fato este que torna a separação mais difícil.

3- A adição de agentes espumantes, além de aumentar os custos do processo, requer ainda um processo posterior de lavagem para assegurar as especificações exigidas em determinados usos comerciais.

4- A diluição da polpa é uma outra desvantagem do método. Uma baixa concentração de talco é alimentada na célula de flotação, numa faixa que vai de 8% de sólidos, para um minério com alta porcentagem de talco lamelar, até 13%, para minérios com baixa porcentagem. Esta grande quantidade de água aumenta os custos de produção desde que se deve removê-la subsequentemente nos processos de secagem.

#### 4.3.2 – Alvejamento Químico

O processo de lixiviação pode ser aplicado em etapas de purificação do talco e um aumento consequente do seu teor. A base desta técnica é o fato de que o talco é inerte perante uma gama enorme de reagentes químicos e os compostos ferrosos presentes podem ser reduzidos de  $\text{Fe}^{3+}$  para  $\text{Fe}^{2+}$ . Embora o ferro presente possa ser reduzido, a viabilidade econômica desse tratamento deve ser avaliada pelo balanço entre os custos de operação e os diferentes preços dos reagentes químicos (Sarquis e Gonzalez, 1998).

Yehia e Al-Wakeel (1999) apontam para a possibilidade de redução ou remoção do ferro pelo tratamento do concentrado final com ácido clorídrico diluído (10%) e  $\text{SnCl}_2$



(300 ppm). Neste caso, o produto final pode alcançar as especificações necessárias para diferentes propósitos industriais, tais como na área de plásticos, papéis, tintas, cosméticos e borrachas.

Ahmed et al., (2007) obtiveram uma melhora no que se diz respeito à qualidade do talco pelo uso da lixiviação. Tal método consistiu na utilização de ácido clorídrico diluído (10%) e uma temperatura de 60°C por um período de 30 minutos. Para tanto, foi usado um agitador e uma relação sólido/líquido de 1:2. Os resultados da lixiviação, bem como os das demais análises realizadas por estes pesquisadores, encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4: Resultados finais da análise química dos constituintes do talco, recuperação mássica, alvura e PPC (perda por calcinação) na alimentação, no concentrado final da flotação e produto da lixiviação

Produto	Teores (%)					PPC	Alvura (ISO)	Recuperação mássica (%)
	SiO <sub>2</sub>	MgO	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			
Alimentação	54,1	29,9	0,8	5,5	8,2	6,64	75,4	100
Concentrado final de flotação	54,94	31,76	0,42	3,11	7,24	5,21	83,7	92,4
Concentrado lixiviado	58,96	31,73	0,38	3,01	3,12	4,03	88,5	85
Material dissolvido	8,76	32,1	0,88	4,26	54,56	-	-	7,4

Pontes e Leal Filho (2005) realizaram um alvejamento químico de um concentrado de flotação de alvura (ISO) aproximada de 78%. Utilizando-se de ditionito de sódio e zinco ou alumínio metálico na presença de SO<sub>2</sub> como agentes redutores dos oxidados de ferro, realizou-se um planejamento fatorial para o estudo das variáveis dosagem do agente redutor (kg/t), pH, tempo de alvejamento (minutos) e porcentagem de sólidos. O ditionito apresentou os melhores resultados de alvura nos produtos alvejados, além de se mostrar menos sensível perante as variações dos fatores considerados como variáveis (pH, tempo de alvejamento e porcentagem de sólidos). Partindo-se do concentrado de flotação em questão, foi possível um aumento de 7,4 pontos percentuais.

Segundo Huege e Fred, (1974), determinados depósitos de talco apresentam impurezas metálicas tais como ferro, níquel, bismuto e arsênio na forma de sulfetos. O arsênio, presente como sulfeto complexo, não pode ser suficientemente removido pelas técnicas hidrometalúrgicas convencionais e separações gravíticas não se enquadrando, portanto, às especificações da indústria cosmética. Uma simples lixiviação do talco com ácidos minerais, soluções cáusticas ou mesmo água, pode remover uma quantidade limite de arsênio. Estudaram-se, então, o efeito da lixiviação na remoção de arsênio total em amostras de talco contendo 67 ppm de tal impureza. O método utilizado consistiu na acidificação da polpa a pH abaixo de 2 por meio do uso de ácidos sulfúrico e clorídrico e uma posterior adição de uma agente oxidante (peróxido de hidrogênio, ozônio ou clorato de potássio). O potencial de oxidação não deve ser maior que -1,0 volts, garantindo a solubilização do arsênio e sua conseqüente remoção pela lavagem da polpa, o que gerou assim, um produto final com aproximadamente 2 ppm de arsênio total.

## 5 – MATERIAIS E METODOLOGIA

O principal enfoque deste trabalho foi a caracterização e purificação de resíduos de uma oficina de artesanato que trabalhava exclusivamente com a rocha proveniente da região de Bandeiras, localizada em Santa Rita de Ouro Preto, distrito do município de Ouro Preto-MG, previamente caracterizada por Lima e outros (2008) e cuja localização está apresentada no mapa de localização da Figura 13 (Ponto A). Além dos resíduos da região de Bandeiras, foram efetuados também estudos preliminares de caracterização de uma amostra de finos de uma oficina de artesanato de Cachoeira do campo, distrito de Ouro Preto, que estava trabalhando com uma rocha proveniente da região de Barro Branco, localizada em Cachoeira do Brumado, distrito do município de Mariana-MG.



Figura 13: Localização geográfica das oficinas de artesanato de Santa Rita de Ouro Preto. (©2010 Google – Dados cartográficos)

Na Tabela 5 estão apresentadas as identificações das amostras de finos de pedra sabão submetidas à caracterização granulométrica, mineralógica e química e ensaios de purificação.

Tabela 5: Identificação das amostras de resíduos de pedra sabão

Amostra	Massa (kg)	Localização da oficina	Origem da pedra sabão
FPS01	37,8	Cachoeira do Campo	Cachoeira do Brumado
FPS02	13,4	Santa Rita de Ouro Preto	Santa Rita de Ouro Preto
FPS03	25,6		
FPS04	11,8		
FPS05	24,3		
FPS06	425,2		

Para os ensaios de purificação (separação magnética de alta intensidade, mesa vibratória, flotação e alvejamento químico) foram coletados na mesma oficina cerca de 350 kg de resíduos que foram juntados às amostras FPS02, FPS03, FPS04 e FPS05. A metodologia utilizada na caracterização e purificação destes resíduos de pedra sabão foi realizada de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 14.

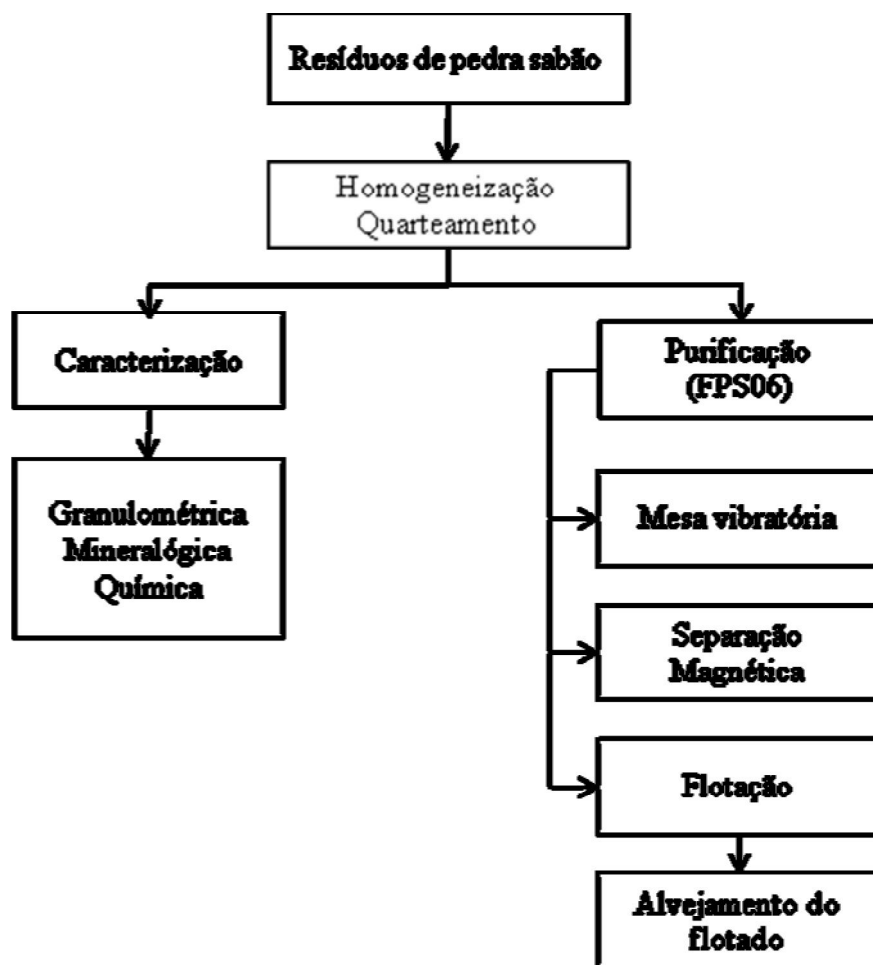


Figura14: Fluxograma referente à metodologia aplicada para a caracterização e purificação de resíduos de pedra sabão

### 5.1 – Homogeneização e Quarteamento

A fim de se alcançar amostras finais representativas das amostras globais dos resíduos de pedra sabão (FPS01, FPS02, FPS03, FPS03, FPS04, FPS05 e FPS06), no que diz respeito às características de interesse, utilizaram-se diferentes técnicas de homogeneização e quarteamento.

O trabalho de preparação de cada amostra foi iniciado com a homogeneização através da técnica da pilha cônica. Mediante a formação de uma pilha cônica primária, o material foi retirado desta no sentido da base ao topo por meio de uma pá, formando-se a seguir uma segunda pilha cônica. As sucessivas retiradas foram realizadas, em sentido anti-horário, até que se retirasse todo o material da mesma. A redistribuição para formar a pilha subsequente foi feita de forma lenta e contínua, o mais próximo possível do topo a fim de se evitar a perda de material ultrafino. Por se tratar de uma amostra global formada por uma significativa fração de finos, a operação em questão foi repetida por 10 vezes

tomando-se o devido cuidado de se minimizar a segregação de partículas durante a formação das pilhas.

Em uma etapa posterior, realizou-se a homogeneização por pilha longitudinal para um subsequente quarteamento. A partir da última pilha cônica, formada na etapa anterior, realizou-se a sua redistribuição para a formação da pilha longitudinal. As retiradas foram realizadas por meio de uma pá, de forma a se manter uma mesma massa capaz de ser distribuída por toda a extensão da pilha. Em seguida, a pilha foi dividida ao meio em seu sentido longitudinal e, utilizando-se de uma trena, dividida transversalmente em partes iguais. O quarteamento foi então realizado formando-se duas pilhas menores. Uma das pilhas foi arquivada, sendo a outra submetida novamente ao processo de homogeneização por pilha longitudinal. A última pilha formada foi quarteada em sub-amostras de 1 kg cada que foram armazenadas em sacos plásticos devidamente identificados. Acondicionaram-se os arquivos da mesma forma, reservando-os para uma eventual necessidade.

As sub-amostras foram quarteadas por um quarteador Jones ou pelo processo de lona de bancada, de acordo com a necessidade de massa requerida em cada ensaio.

## 5.2 – Caracterização Granulométrica, Determinação de Massa Específica e Área Superficial

A caracterização granulométrica das amostras de finos das diversas oficinas de artesanato de pedra sabão foi efetuada em duplicata por peneiramento a úmido utilizando-se amostras previamente homogeneizadas e quarteadas por quarteador Jones. O processo de peneiramento foi realizado com peneiras segundo a série Tyler a partir da peneira de 1700  $\mu\text{m}$  (10#). A fração abaixo de 37  $\mu\text{m}$  (400#) foi analisada no granulômetro a laser CILAS 1064 do Laboratório de Propriedades Interfaciais do Departamento de Engenharia de Minas (DEMIN/UFOP). Em seguida, as frações granulométricas foram homogeneizadas, quarteadas pelo processo de lona de bancada e pulverizadas. O produto pulverizado foi então enviado para as análises mineralógicas por difratometria de raios X e análises químicas.

A determinação de densidade dos finos (amostra global), homogeneizados e quarteados por lona de bancada, foi realizada por picnômetro a hélio (modelo

Ultapycnometer 1000) do Laboratório de Valorização de Materiais e Minerais do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (DEMET/UFOP).

A medida de área superficial das amostras de resíduos, previamente homogeneizadas e quarteadas pelo método da lona de bancada, foi realizada em um Analisador de Adsorção Gasosa (modelo Nova 1200e) do laboratório de Propriedades Interfaciais do DEMIN/UFOP, sob atmosfera de nitrogênio com fluxo de 30 mL.min<sup>-1</sup> a 77,3 K. Para a determinação da área superficial específica usou-se o método BET. As condições de pré-tratamento foram 200 °C sob vácuo por 16 h.

### 5.3 – Caracterização Mineralógica

O estudo da mineralogia das diferentes frações granulométricas das amostras de resíduos de pedra sabão, convenientemente escolhidas, foi realizado por difratometria de raios X, pelo método do pó total, utilizando-se o difratômetro de raios X do Departamento de Geologia (DEGEO/UFOP) e do Departamento de Química (ICEB/UFOP).

### 5.4 – Caracterização Química

As análises químicas de todas as amostras foram realizadas pelo laboratório de Geoquímica Ambiental DEGEO/UFOP por plasma de acoplamento indutivo (Spectro modelo Ciro/CCD). Determinaram-se os teores de: MgO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, As, Zn, Cu e Pb. A sílica (SiO<sub>2</sub>) presente nos finos foi calculada por diferença (100 - PPC e teores de elementos maiores).

### 5.5 – Potencial Zeta

A amostra de talco utilizada na determinação do potencial zeta foi coletada através de catação seletiva manual na pedreira de Bandeiras, região de Santa Rita de Ouro Preto.

A metodologia utilizada para a determinação do potencial zeta do talco em água deionizada e em solução de 0,1M de KCl é apresentada a seguir, usando o zetâmetro Malvern, modelo NanoZetasizer, do Laboratório de Propriedades interfaciais do DEMIN/UFOP:

- Pulverizou-se uma amostra de talco em um almofariz de porcelana, obtendo-se um produto pulverizado de granulometria 80% abaixo de 14,83  $\mu\text{m}$ .

- Adicionava-se 0,125 g destes finos em um béquer contendo 25 ml de água deionizada ou solução de KCl a 0,1 M. Dispersava-se a polpa formada em agitador magnético por 2 minutos.

- Ajustava-se o pH da solução através dos controladores KOH e HCl.

- Com o auxílio de uma seringa, injetavam-se, individualmente, as dispersões na cubeta eletroforética com o cuidado de se evitar a formação de bolhas de ar no interior da mesma.

- Colocava-se a cubeta no suporte do zetâmetro, dando início às medições do potencial zeta.

O procedimento em questão era realizado, individualmente e em duplicata, para os seguintes valores de pH: 2, 4, 6, 8, 10 e 12.

#### 5.6 – Determinação de Alvura

A aplicabilidade do talco dentro dos diferentes segmentos industriais é determinada, dentre outros fatores, pela sua alvura. Sendo assim, torna-se necessário adequá-la às diferentes especificações exigidas pelos consumidores. Índices elevados de alvura são primordiais quando destinados, principalmente, à indústria de cosméticos, cerâmica branca, plásticos (antiaderente, carga e reforço), tintas (pigmentos) e cobertura para papel.

As alvuras das amostras foram determinadas pelo espectômetro Color Touch modelo PC do Laboratório de Propriedades Interfaciais do DEMIN/UFOP de acordo com a escala ISO (International Standard Organisation). A metodologia utilizada é apresentada a seguir:

- Desagregaram-se as amostras a serem analisadas em pulverizador de painéis de tungstênio, sendo em seguida, homogeneizadas e quarteadas a uma massa final de aproximadamente 10 g.

- Secaram-se as amostras em vidro de relógio, a uma temperatura de 105 °C, em estufa.

- Transferiram-se, individualmente, cada amostra para um cilindro conformador de pastilhas situado sobre uma placa lisa de vidro.



- Colocou-se o conjunto cilindro conformador, placa de vidro e amostra sobre uma balança usada para medir a pressão de conformação da pastilha. Uma pressão de 80 psi foi então exercida sobre a amostra por um pistão encaixado no cilindro conformador.

- A pastilha formada pela amostra compactada foi levada ao medidor de alvura para a determinação da alvura correspondente. Realizaram-se as medições das amostras previamente secas e em duplicata.

Cabe ressaltar aqui que, em testes realizados preliminarmente, a utilização do pulverizador em questão não promoveu efeitos negativos em termos de alvura.

## 5.7 – Ensaios Tecnológicos de Purificação

Após as caracterizações granulométrica, mineralógica e química das amostras, realizaram-se os ensaios de purificação da amostra global FPS06, usando para tanto: separação magnética de alta intensidade, mesa vibratória, flotação em bancada e alvejamento químico.

A amostra FPS06 foi submetida a um corte granulométrico em 74  $\mu\text{m}$  (200#). O fracionamento foi realizado a úmido em um peneirador, sendo o passante em 74  $\mu\text{m}$  armazenado em baldes. Esta fração de finos foi então filtrada e secada em estufa a 105 °C bem como o material retido na peneira de 74  $\mu\text{m}$ . Posteriormente, os produtos obtidos foram homogeneizados e quarteados conforme o tópico 5.1 – Homogeneização e quarteamento.

### 5.7.1 – Separação magnética de alta intensidade

O processo de purificação por separação magnética de alta intensidade, tanto da fração abaixo, como acima de 74  $\mu\text{m}$ , dos finos de pedra sabão, foi realizado via úmida e utilizando-se uma polpa (20% de sólidos) com 100 g de material. A alimentação manual do separador magnético foi efetuada de forma lenta e controlada, fazendo com que a passagem das partículas minerais através do campo magnético ocorresse de forma a não acarretar a formação de oclusões de minerais não magnéticos e um possível arraste de partículas fracamente magnéticas. A cada faixa granulométrica aplicaram-se diferentes campos magnéticos referentes a três respectivas intensidades de corrente elétrica (3A, 5A e 7A) e utilizando-se de esferas de ferro, como matrizes entre os pólos do eletroímã, a fim de

se produzir uma maior área do campo de alta intensidade. Em uma etapa seguinte, as partículas aderidas à matriz foram lavadas por um fluxo de água e recolhidas em uma bandeja onde se coletou o concentrado não magnético. A última etapa do processo consta do desligamento do campo magnético e do recolhimento das partículas ferromagnéticas.

A fim de se promover uma melhor separação, cada concentrado foi submetido a três etapas *cleaners* consecutivas na mesma intensidade de corrente. Cada etapa foi realizada em duplicata e os produtos, concentrado (fração não magnética) e rejeito (fração magnética), secados em estufa a 105 °C e pesados. Os produtos da separação magnética de alta intensidade foram homogeneizados e quarteados pelo processo de lona de bancada e então pulverizados. Realizou-se, como última etapa, a determinação da alvura do concentrado não magnético, bem como a análise química dos produtos magnéticos e não magnéticos.

#### 5.7.2 – Mesa vibratória

Objetivou-se remover os minerais de maior densidade, como é o caso de sulfetos e óxidos de ferro. O ensaio foi realizado em uma mesa vibratória de laboratório tipo Wiffley, do Laboratório de Tratamento de Minérios do DEMIN/UFOP, em bateladas de 2 kg de resíduos de pedra sabão. Utilizou-se para este estudo a amostra FPS06 com granulometria +74 µm, uma vez que a eficiência do equipamento cai drasticamente para a fração abaixo de 74 µm.

A alimentação de sólidos foi realizada de forma a atender uma vazão pré-definida e constante de finos, levando-se em consideração ser importante, para o processo, que a porcentagem de sólidos seja a mesma ao longo do tempo.

A vazão de água foi feita de modo a atender ao balanço da porcentagem de sólidos na polpa formada e mantê-la constante durante todo o processo. Por meio do ajuste do sistema de canaletas vazadas, estabeleceu-se um regime de fluxo laminar sobre a superfície da mesa.

A amplitude e a frequência, variáveis independentes, foram ajustadas de forma a estabelecer um regime no qual a separação das frações densas fosse a mais satisfatória possível.

Um planejamento fatorial 2<sup>3</sup>, com réplica, foi utilizado para estudar o efeito das variáveis consideradas mais influentes no processo, utilizando-se para tanto o software estatístico “MINITAB 15”. Tais variáveis foram estudadas em 2 níveis, máximo (+) e mínimo (-), sendo elas: Vazão da polpa de alimentação (kg/h), ângulo de inclinação da mesa (°) e porcentagem de sólidos da polpa (Tabela 6).

Tabela 6: Níveis e variáveis do planejamento fatorial de experimentos para a mesa vibratória

Variáveis	Identificação	Níveis	
		-	+
Vazão (kg/h)	A	4	10
Ângulo de inclinação (°)	B	3	5
Porcentagem de sólidos (%)	C	15	25

O número de testes foi igual a 16, considerando-se as réplicas, de acordo com a equação 01:

$$N^{\circ} \text{ testes} = n^{\circ} \text{ níveis}^{n^{\circ} \text{ variáveis}} \quad (01)$$

Após os ensaios do planejamento fatorial, uma análise estatística foi realizada a fim de se otimizar os parâmetros utilizados. O ensaio otimizado foi feito em triplicata, sendo os produtos mistos submetidos a uma etapa *scavenger*.

Os produtos dos ensaios, referentes ao planejamento fatorial e otimizado, foram secados em estufa a 105 °C. Posteriormente, as réplicas foram homogeneizadas pelo processo de lona de bancada, quarteadas e pulverizadas para as análises químicas e de alvura.

### 5.7.3 – Flotação

Os ensaios de flotação em bancada foram realizados com amostras de resíduos de pedra sabão, de granulometria inferior a 74 µm (200#), previamente homogeneizadas pelo

método de lona de bancada e quarteadas em quarteador Jones de bancada. A flotação foi efetuada em uma célula mecânica, modelo Denver, com cuba inox e capacidade de 2,0 litros, do Laboratório de Flotação do DEMIN/UFOP. Como ponto de partida para o estudo da flotação investigou-se as variáveis e faixas de trabalho mais promissoras em estudos anteriores. Realizaram-se, em seguida diversos, testes preliminares a fim de se avaliar o comportamento destes fatores, bem como as faixas de aplicabilidade de cada um perante o material em questão. Os seguintes reagentes se mostraram promissores: querosene em emulsão (coletor), silicato de sódio (depressor) e MIBC (espumante). O HCl (ácido clorídrico) e o NaOH (hidróxido de sódio) foram utilizados como reguladores de pH.

Nesta primeira etapa determinaram-se os níveis máximos e mínimos para as variáveis a seguir: dosagem de querosene, metassilicato e MIBC, pH da polpa, porcentagem de sólidos, rotação da célula de flotação e tempo de condicionamento com o coletor e depressor. As variáveis respostas de tais ensaios foram avaliadas em termos de recuperação em massa e alvura (ISO) final dos concentrados. A etapa seguinte constou-se de um planejamento fatorial de experimentos, apresentado na Tabela 7.

Os ensaios de flotação em bancada foram realizados de acordo com a seguinte metodologia:

- Alimentava-se a cuba de flotação com os finos de pedra sabão adicionando-se em seguida, água de torneira a fim de se chegar à porcentagem de sólidos desejada.
- A polpa era então condicionada, sob a agitação desejada, por um tempo de 2 minutos.
- Efetuava-se a adição do depressor condicionando-o pelo tempo correspondente. Em seguida ajustava-se o pH para 7.
- Adicionava-se o coletor deixando-o condicionar pelo tempo desejado, conferindo o pH da polpa logo após.
- Adicionava-se o espumante condicionando-o pelo tempo desejado.
- A válvula de ar era então aberta efetuando-se a flotação. A raspagem da espuma era realizada de forma cadenciada até a completa exaustão da mesma (tempo de flotação = 6 minutos).
- Filtravam-se os produtos da flotação (flotado e afundado) secando-os em estufa a 105°C pesando-os em seguida a fim de se obter a recuperação em massa.

- Em seguida, homogeneizavam-se e pulverizavam-se os produtos para serem analisados quimicamente (após o processo de pulverização, o produto pulverizado também era homogeneizado e quarteado).

Tabela 7: Níveis e variáveis do planejamento fatorial de experimentos para os ensaios de flotação

Variáveis	Identificação	Níveis	
		-	+
Dosagem de Querosene (g/t)	A	500	1000
Dosagem de Metassilicato (g/t)	B	500	1000
Dosagem de MIBC (g/t)	C	75	150
pH	D	7	11
Porcentagem de sólidos (%)	E	10	20
Rotação (rpm)	F	800	1200
Tempo de condicionamento do coletor (min.)	G	5	10
Tempo de condicionamento do depressor (min.)	H	5	10

Após a otimização do planejamento fatorial de experimentos pelo software MINITAB 15, foram efetuados os seguintes ensaios:

- Flotação *rougher* para a confirmação dos resultados obtidos pelo software na condição otimizada.
- Flotação *rougher* seguida de duas etapas *cleaner* na condição otimizada.
- Flotação *rougher* seguida de duas etapas *cleaner* na condição otimizada com alimentação deslamada.
- Flotação *rougher* a 10% de sólidos seguida de duas etapas *cleaner* na condição otimizada.

Aos concentrados *rougher* submetidos às etapas *cleaner* eram adicionados 150 g/t de espumante (MIBC) sob 2 minutos de condicionamento.

A condição otimizada se refere à utilização das variáveis nos seguintes níveis: dosagens de 150 g/t do espumante (MIBC), 500 g/t de coletor (querosene), 500 g/t de depressor (metassilicato de sódio), porcentagem de sólidos de 14%, pH neutro, rotação de 1200 rpm, tempo de condicionamento do depressor de 5 minutos, tempo de condicionamento do coletor de 5 minutos.

#### 5.7.4 – Deslamagem

A deslamagem dos resíduos de pedra sabão era realizada com amostras de granulometria inferior a 74  $\mu\text{m}$  (200#). Tal processo teve como finalidade a eliminação da fração argilosa prejudicial ao processo de flotação, bem como da fração ultrafina, responsável por uma menor velocidade de flotação, consumo de reagentes relativamente mais elevado e um maior arraste mecânico das partículas contaminantes em direção ao produto flotado. O processo de deslamagem descrito a seguir, foi realizado em três etapas utilizando-se uma porcentagem de sólidos de 15%. Utilizou-se uma célula mecânica modelo DENVER para o condicionamento da amostra, com cuba acrílica de 4 litros de capacidade do laboratório de Flotação do DEMIN-UFOP. A descrição do processo de deslamagem em questão é descrito a seguir:

- A cuba de flotação era alimentada com os finos de pedra sabão e água de torneira em proporções tais, para que se obtivesse uma polpa com 15% de sólidos.
- A polpa era então condicionada sob agitação de 1200 rpm por 3 minutos.
- Interrompia-se então a agitação permitindo que as partículas de maior densidade e diâmetro se sedimentassem. O tempo de sedimentação era de 10 minutos.
- Efetuava-se o sifonamento do sistema retirando a lama e as partículas ultrafinas em suspensão.
- Permanecendo com o produto deslamado na cuba, adicionava-se água em quantidade suficiente para que se obtivesse uma polpa de 15% de sólidos e pudesse novamente ser deslamado.
- Repetia-se esse processo por duas vezes. Após a deslamagem o produto era então filtrado, secado em estufa a 105 °C e pesado.
- Uma flotação otimizada foi realizada utilizando-se o produto deslamado como alimentação, para tanto, o mesmo foi previamente homogeneizado e quarteado.

#### 5.7.5 – Preparo das soluções de reagentes

- A emulsão de querosene foi feita a partir da adição de 2,5 g de querosene em um béquer contendo cerca de 150ml de água mediante uma posterior emulsificação através de um agitador mecânico, durante 2 minutos. Em seguida, 350ml de água eram adicionados à emulsão, mediante 2 minutos de nova agitação. A emulsão então formada era transferida

para um balão volumétrico de 500ml tendo o seu volume aferido, chegando a uma emulsão com concentração final de 0,5% p/v.

- As soluções de metassilicato de sódio e espumante foram preparadas na concentração de 0,5% p/v e 0,25% p/v, respectivamente.

#### 5.7.6 – Alveamento Químico

O objetivo do alveamento químico se concentra na importante remoção ou redução de impurezas à base de compostos ferruginosos, os quais se destacam como os mais danosos à alvura do talco. Sendo assim, uma redução de tais contaminantes, mesmo que em pequenas proporções, proporciona um branqueamento do produto e um consequente ganho de alvura.

Os ensaios laboratoriais de alveamento e medidas de alvura foram efetuados no Laboratório de Propriedades Interfaciais do DEMIN/UFOP. A análise química dos produtos alvejados foi realizada pelo Laboratório de Geoquímica Ambiental DEGEO/UFOP.

##### 5.7.6.1 – Ditionito de Sódio ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ )

Uma das formas de redução de compostos oxidados ferro é através do uso de agentes redutores, como o ditionito de sódio (hidrossulfito de sódio), capazes de reduzir o  $\text{Fe}^{3+}$  a  $\text{Fe}^{2+}$ , sendo este último solúvel e passível de separação através de uma operação de filtragem do produto lixiviado (Equação 02).



O processo de alveamento partiu de uma amostra de finos de pedra sabão de alvura (ISO) de 51,57% e granulometria inferior a 74  $\mu\text{m}$  (200#). Um planejamento fatorial foi realizado com o objetivo de se avaliar o comportamento das seguintes variáveis na resposta alvura: dosagem do agente redutor ditionito de sódio (kg/t), pH da polpa e porcentagem de sólidos. Este planejamento estatístico exigiu a realização de 8 diferentes ensaios e suas respectivas réplicas, chegando a um total de 16 testes. A Tabela 8 apresenta estas variáveis estudadas bem como os seus níveis máximos e mínimos.

Tabela 8: Níveis e variáveis do planejamento fatorial de experimentos para alveamento com ditionito de sódio

Variáveis	Identificação	Níveis	
		-	+
Dosagem de Ditionito (kg/t)	A	1,5	2,5
Porcentagem de sólidos (%)	B	20,0	30,0
pH da polpa	C	3,5	5,0

Mediante o seguinte procedimento realizou-se o alveamento químico dos resíduos:

- Adicionava-se em um béquer, os finos de pedra sabão e água deionizada formando uma polpa com 15% de sólidos.
- A polpa era condicionada por um tempo de 2 minutos sob agitação em um agitador magnético à temperatura ambiente.
- Ajustava-se o pH com ácido sulfúrico (5% v/v) ao valor desejado.
- Adicionava-se à polpa a dosagem predefinida da solução de ditionito de sódio (1% p/v). O tempo de reação era de 120 minutos em agitação constante.
- Efetuava-se uma filtração a vácuo, em funil de Buchner, do produto alvejado lavando-o em seguida com água deionizada. A torta era então secada em estufa a 105 °C, pesada, pulverizada, homogeneizada e quarteada em lona de bancada.
- Realizava-se a medição da alvura e análise química do produto alvejado.

#### 5.7.6.2 – Ácido clorídrico (HCl)

O ataque químico dos resíduos de pedra sabão por ácido clorídrico tem como objetivo a redução do teor de ferro presente nas amostras **mediante as seguintes reações químicas (03 e 04):**





Segundo Sarquis Gonzalez (1998), o tratamento ácido em questão também apresenta condições de reduzir carbonatos como dolomita, magnesita e calcita, bem como a redução dos índices de perda por calcinação (PPC).

O alvejamento químico, através do uso de ácido clorídrico, foi realizado em um concentrado de flotação otimizada de alvura inicial igual a 63,45% (ISO). Utilizando-se de um planejamento fatorial de experimentos com três variáveis (tempo, concentração de HCl e temperatura) a dois níveis (Tabela 9), estudou-se o comportamento destas em função da variável resposta alvura. Foram realizados então 16 ensaios levando-se em consideração suas respectivas réplicas.

Os ensaios referentes ao ataque químico em questão seguiram a seguinte metodologia:

- Em um béquer, adicionavam-se os finos de pedra sabão e água deionizada formando uma polpa com 15% de sólidos.
- Condicionava-se a polpa formada por 2 minutos na temperatura desejada. Utilizava-se para tanto, um agitador magnético com placa de aquecimento. A temperatura da polpa era controlada através de um termômetro.
- Adicionava-se a solução de HCl na concentração desejada permitindo-se um tempo de reação predefinido.
- Realizava-se uma operação de filtração a vácuo do produto alvejado lavando-o em seguida com água deionizada em funil de Buchner. Secava-se então o material filtrado a 105 °C em estufa e pesava-se o produto seco. Em seguida executava-se a pulverização, homogeneização e quarteamento em lona de bancada.
- Realizava-se a medição da alvura e análise química dos produtos alvejados.

Tabela 9: Níveis e variáveis do planejamento fatorial de experimentos de alvejamento com HCl

Variáveis	Identificação	Níveis	
		-	+
Concentração de HCl (M)	A	2,0	4,0
Temperatura (°C)	B	50,0	80,0
Tempo (minutos)	C	30,0	60,0



## 6 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 – Determinação de Massa Específica, Área Superficial e Caracterização Granulométrica

Na Tabela 10 estão apresentadas as áreas superficiais e massas específicas dos resíduos de Cachoeira do Brumado (FPS01) e Bandeiras (FPS02 a FPS05), onde se observa que a área superficial e a massa específica da amostra FPS01 foram ligeiramente maiores do que das amostras de Bandeiras.

Tabela 10: Superfície específica dos finos de pedra sabão

Amostra	Área superficial (m <sup>2</sup> /g)	Massa específica (g /cm <sup>3</sup> )
FPS01	2,397	2,952
FPS02	1,014	2,729
FPS03	0,816	2,730
FPS04	0,944	2,837
FPS05	0,469	2,734

As distribuições granulométricas das amostras de resíduos de pedra sabão estão apresentadas nas Tabelas 11 a 16 do Apêndice I, por meio das quais, traçaram-se os respectivos gráficos de tamanho médio de abertura das peneiras versus porcentagem retida e passante acumuladas (Figuras 15 a 20). As distribuições granulométricas das frações abaixo de 37 µm das amostras estão apresentadas nas Figuras de 21 a 25.

Cabe ressaltar aqui que a amostra FPS06 foi obtida pela homogeneização das amostras FPS02 a FPS05 com mais 350 kg de resíduos coletados na mesma oficina e em época posterior à coleta dos resíduos FPS02 a FPS05.

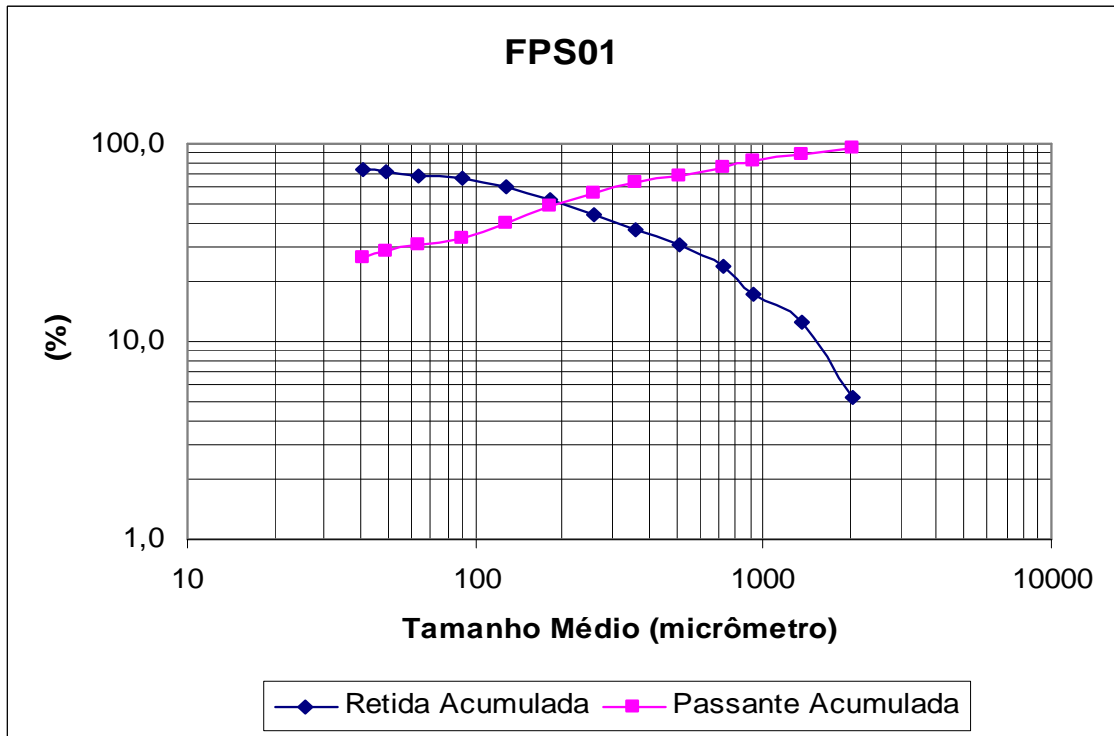


Figura 15: Distribuição granulométrica da amostra FPS01

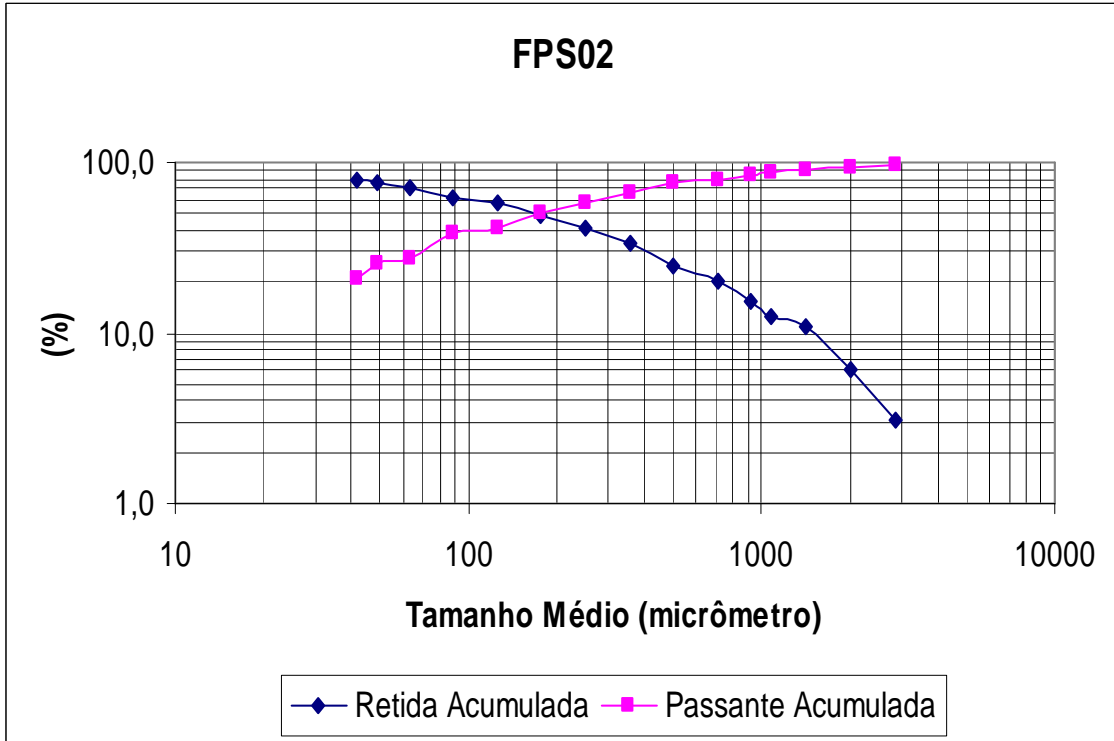


Figura 16: Distribuição granulométrica da amostra FPS02

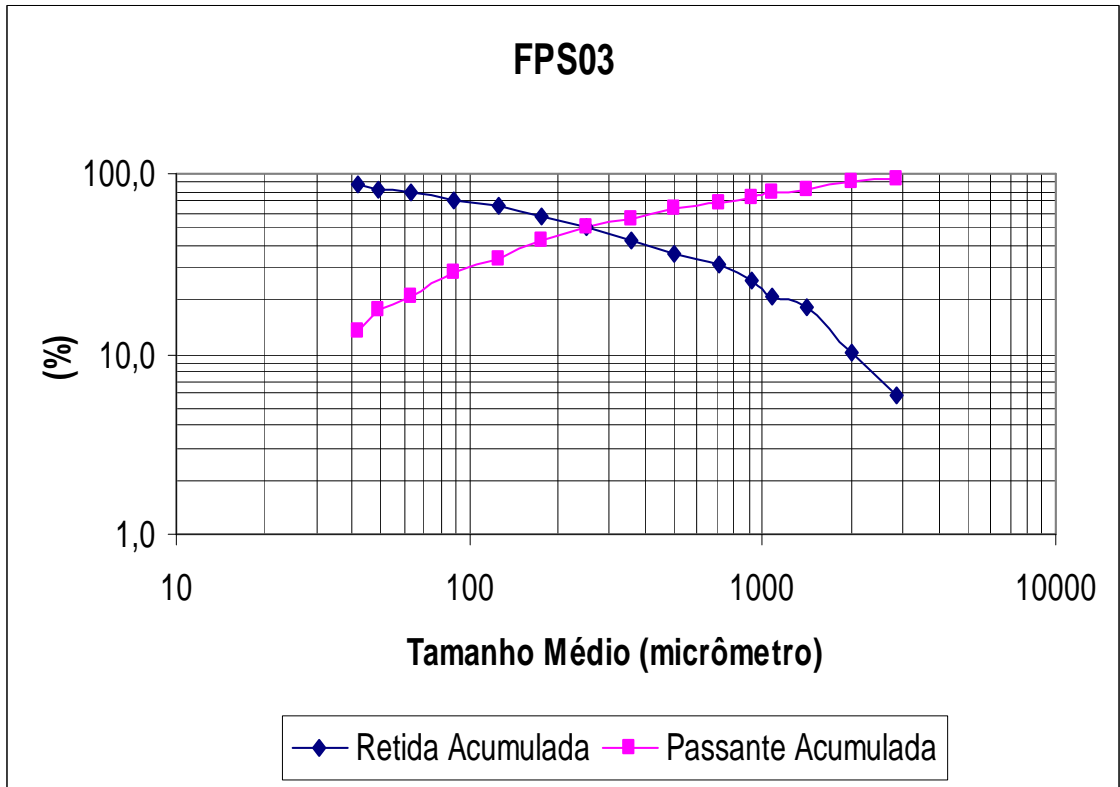


Figura 17: Distribuição granulométrica da amostra FPS03

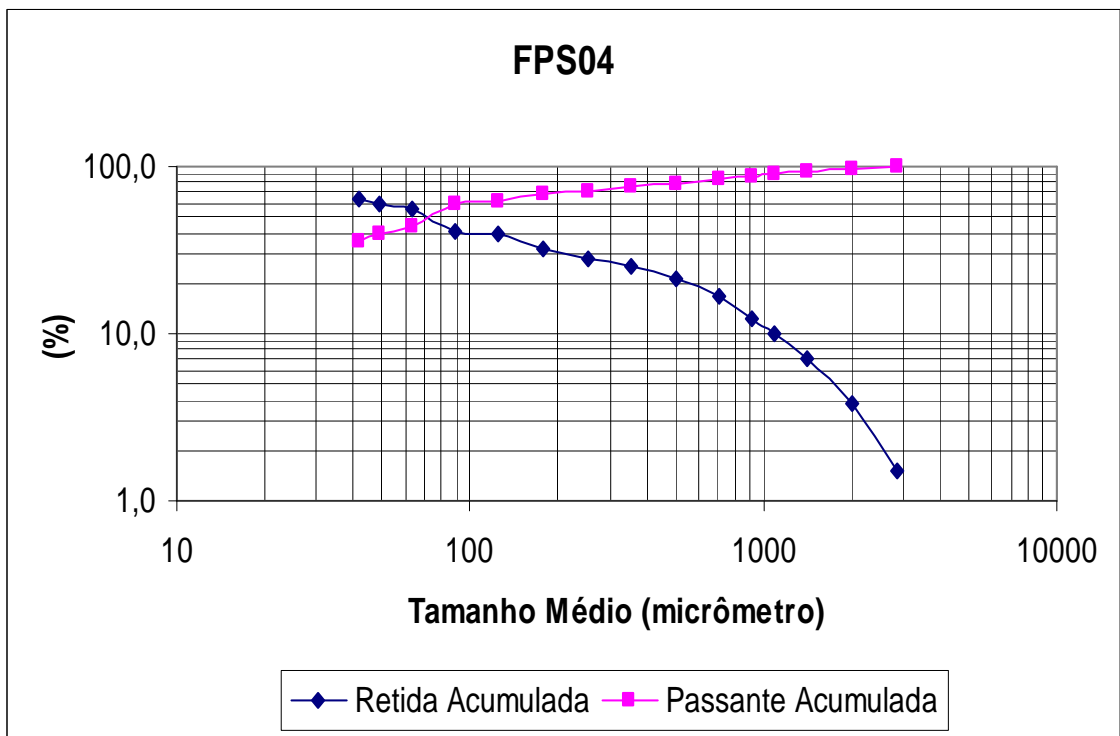


Figura 18: Distribuição granulométrica da amostra FPS04

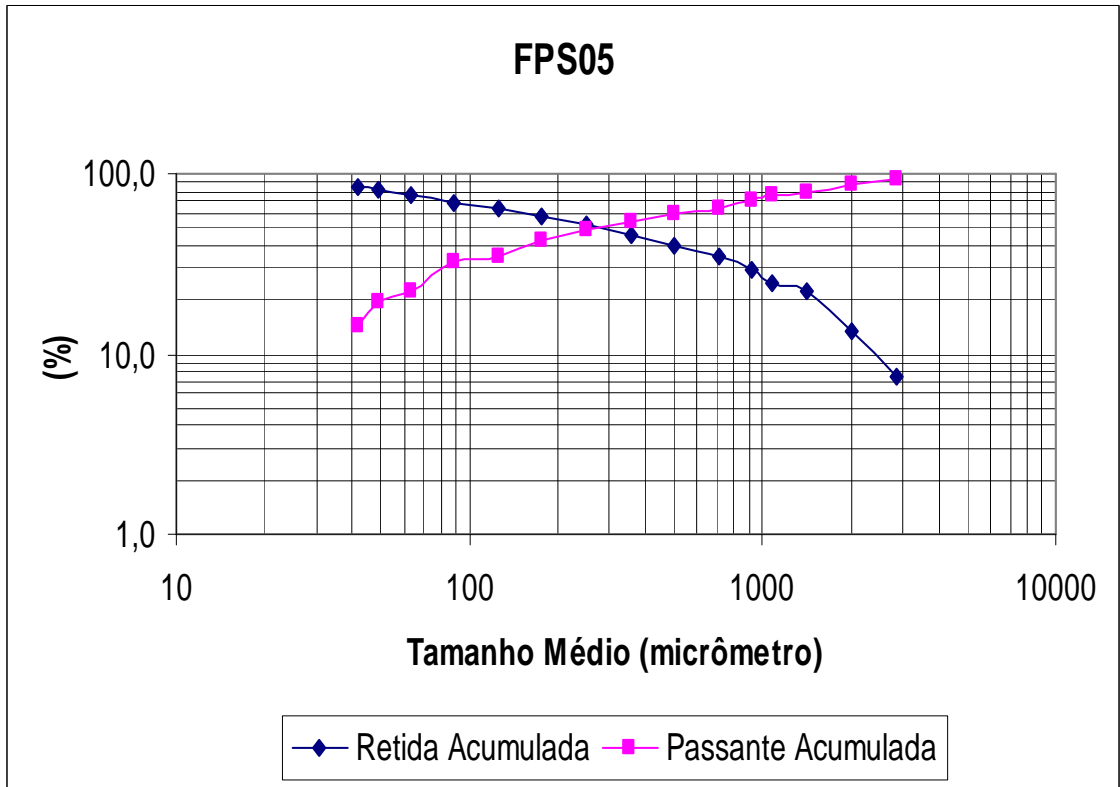


Figura 19: Distribuição granulométrica da amostra FPS05

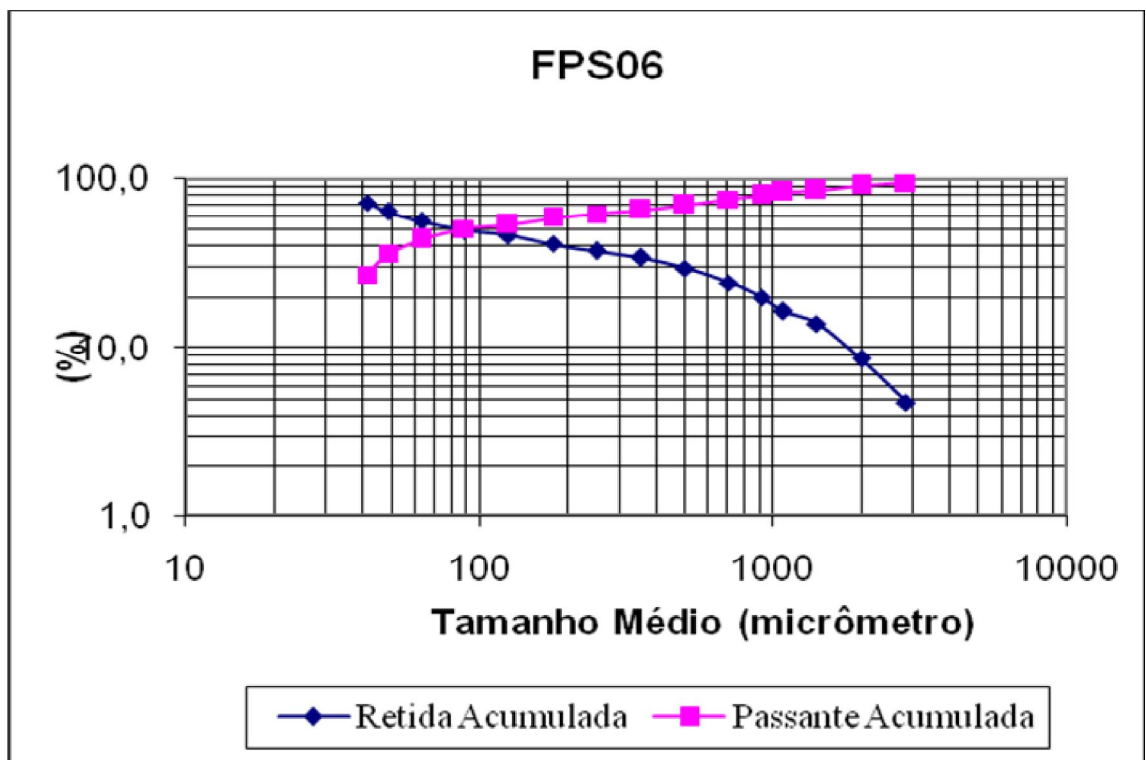


Figura 20: Distribuição granulométrica da amostra FPS06

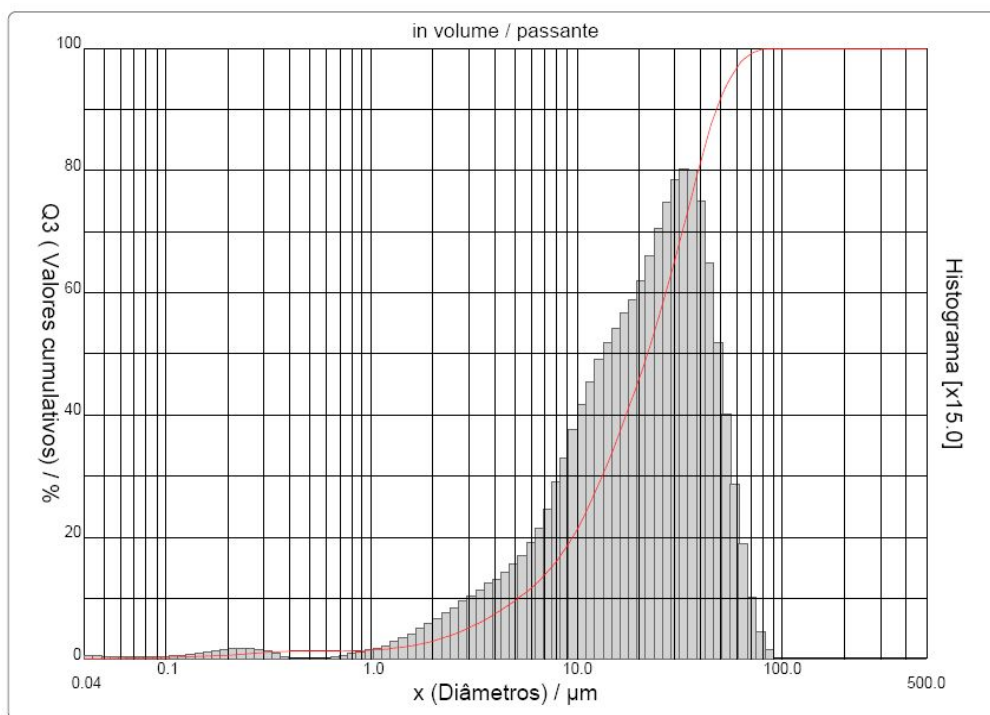


Figura 21: Distribuição granulométrica da fração abaixo de 37 μm da amostra FPS01

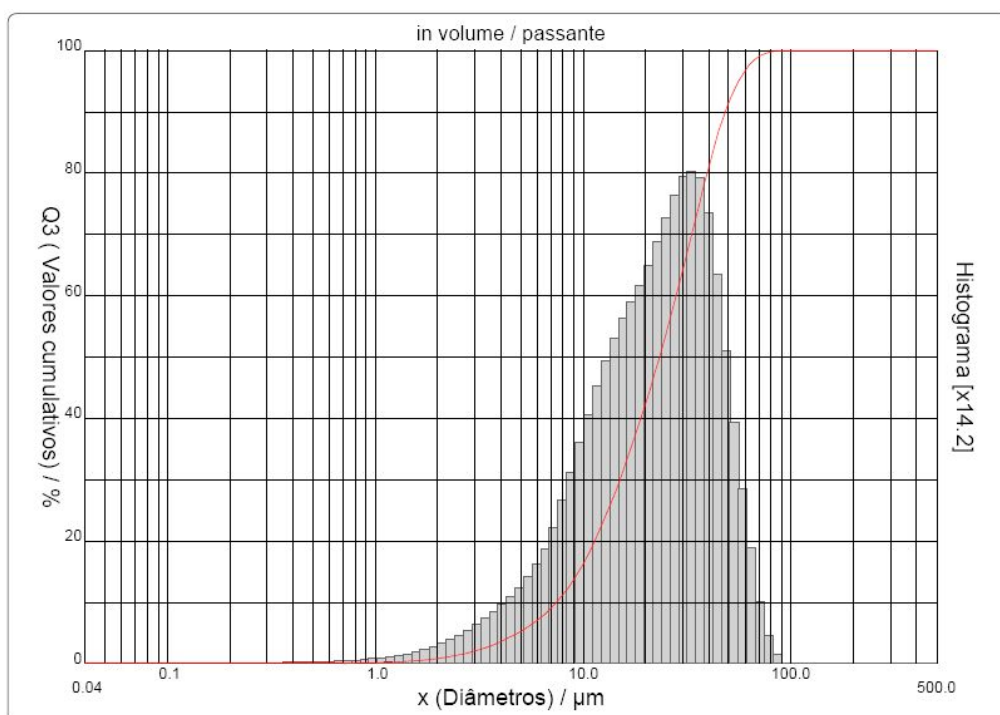


Figura 22: Distribuição granulométrica da fração abaixo de 37 μm da amostra FPS02

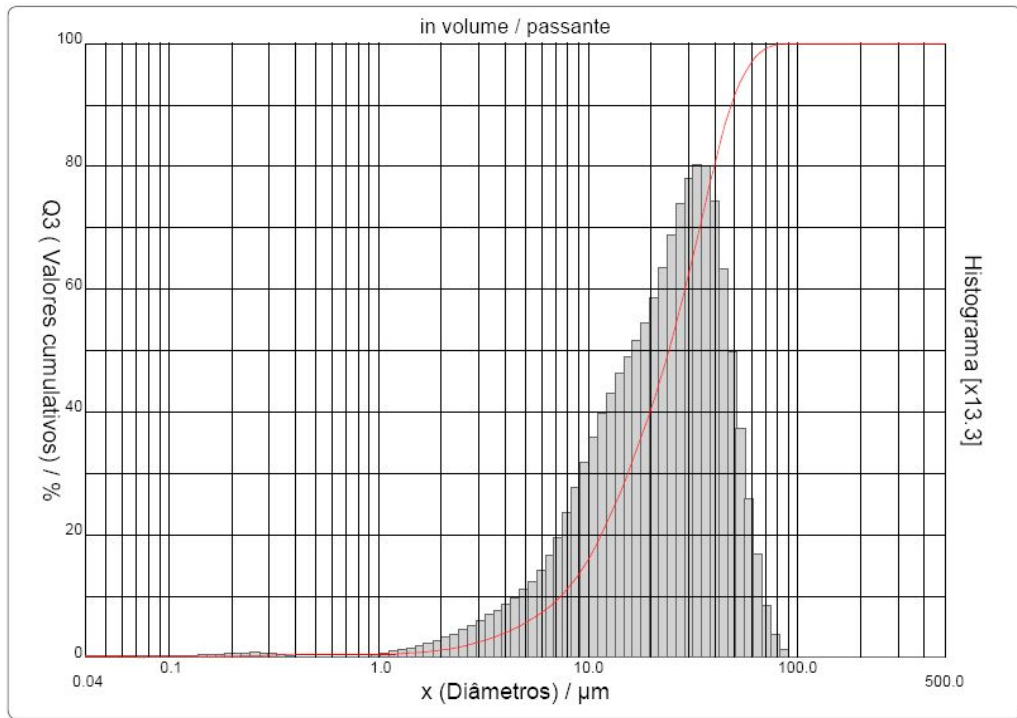


Figura 23: Distribuição granulométrica da fração abaixo de 37  $\mu\text{m}$  da amostra FPS03

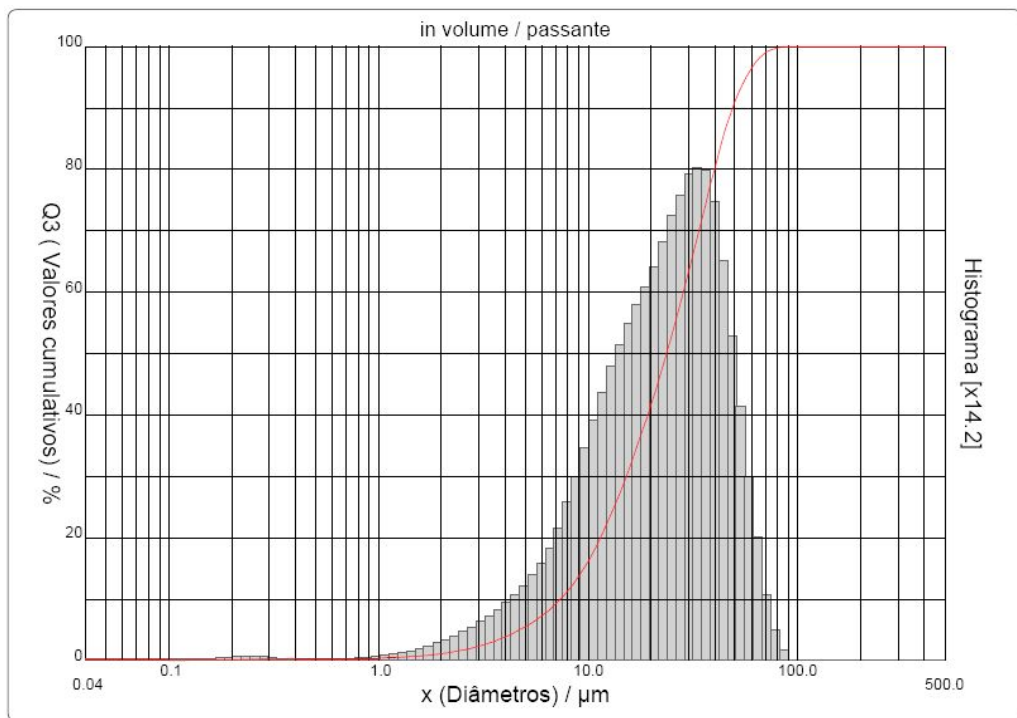


Figura 24: Distribuição granulométrica da fração abaixo de 37  $\mu\text{m}$  da amostra FPS04



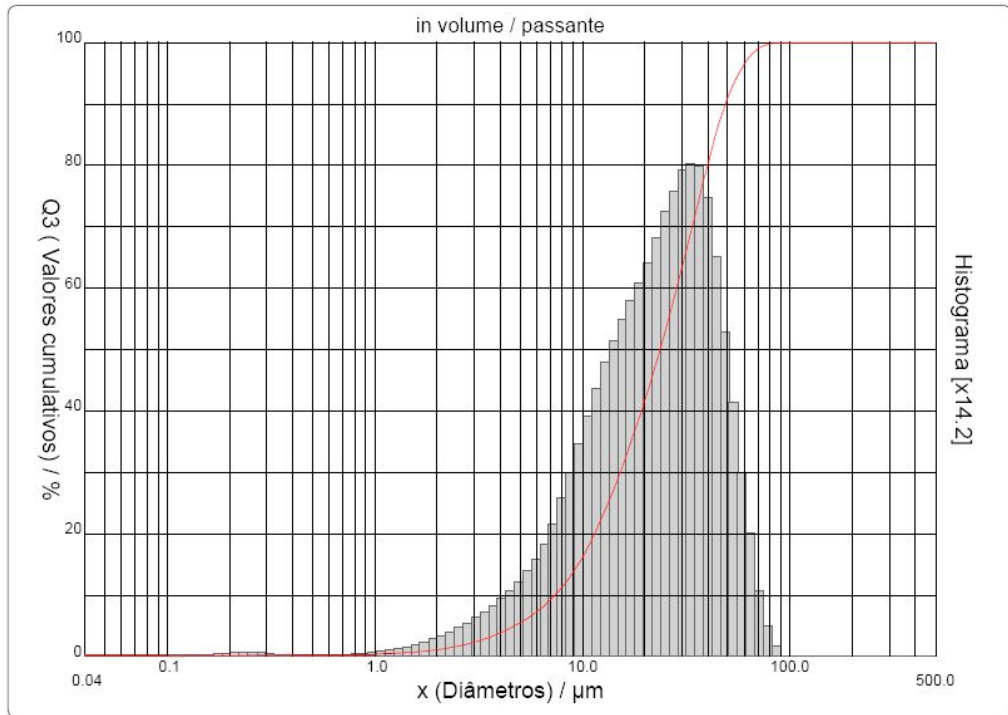


Figura 25: Distribuição granulométrica da fração abaixo de 37 μm da amostra FPS05

Na Tabela 11 estão apresentadas, de forma resumida os valores de  $D_{80}$ , porcentagem abaixo de 37 e 10 μm para as amostras de resíduos de pedra sabão estudadas.

Tabela 11:  $D_{80}$  e frações abaixo de 37 e 10 μm

Amostra	$D_{80}$ (μm)	Fração -37 μm (%) Peneiramento a úmido	Fração -10 μm (%) Granulômetro a laser
FPS01	742	26,4	5,26
FPS02	710	20,8	3,48
FPS03	1084	13,5	2,19
FPS04	558	36,2	5,63
FPS05	1575	14,4	2,36
FPS06	719	27,3	-

## 6.2 – Caracterização Mineralógica por Difractometria de Raios X

### 6.2.1 – Amostra de resíduo de pedra sabão de Cachoeira do Brumado

Observou-se uma predominância dos seguintes minerais em todas as faixas granulométricas analisadas: talco ( $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ), tremolita ( $\text{Ca}_2, \text{Mg}_5(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$ ), dolomita ( $\text{Ca}, \text{Mg}(\text{CO}_3)_2$ ), magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), ilmenita ( $\text{FeTiO}_3$ ), magnesita ( $\text{MgCO}_3$ ) e nimita ( $(\text{Ni}, \text{Mg}, \text{Al})(\text{Si}, \text{Al})\text{O}(\text{OH})$ ). O mineral quartzo foi identificado nas frações granulométricas menores que  $149 \mu\text{m}$  (100#).

### 6.2.2 – Amostra de resíduo de pedra sabão de Bandeiras

Para as amostras FPS02, FPS03, FPS04 e FPS05 analisadas por difratometria de raios X (método do pó total), foram identificados os minerais talco ( $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ), caolinita ( $\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ), clorita-serpentina ( $(\text{Mg}, \text{Al})_6(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ ) e nimita ( $(\text{Ni}, \text{Mg}, \text{Al})(\text{Si}, \text{Al})\text{O}(\text{OH})$ ) em todas as faixas granulométricas.

A diferença marcante em termos mineralógicos da amostra de Cachoeira do Brumado em relação às amostras de Bandeiras diz respeito à identificação de quartzo na amostra FPS01.

## 6.3 – Caracterização Química

A análise granuloquímica de todos os resíduos estudados de pedra sabão encontra-se na Tabela 12, sendo a  $\text{SiO}_2$  calculada por diferença (100 - teores de elementos maiores). Pela análise dos resultados obtidos deduz-se a presença de calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), rodocrosita ( $\text{MnCO}_3$ ) e arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ), sendo esta última, presente apenas na amostra FPS01, muito embora não tenha-se identificado tais minerais na difratometria de raios X. Fato este que pode ser explicado pela baixíssima proporção dos mesmos nas amostras (menor que 5% em peso), uma vez que os teores dos elementos químicos Mn, Cu, e As estão em ppm. O mesmo pode ser dito em relação ao Pb, possivelmente devido à presença de galena ( $\text{PbS}$ ) na amostra. A presença de CaO na análise química está relacionada com o mineral dolomita. No caso do  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , o mesmo é proveniente de óxidos/hidróxidos de ferro além da presença de sulfetos (pirita e calcopirita).

A amostra de Cachoeira do Brumado (FPS01) apresentou maiores teores dos óxidos de alumínio, magnésio, cálcio e silício, em relação às amostras de Bandeiras (FPS02, FPS03, FPS04, FPS05 e FPS06), nas quais, os teores destes óxidos se mantiveram semelhantes, uma vez que as mesmas eram provenientes da mesma pedreira. Um destaque deve ser dado ao CaO presente na FPS01, com um teor de aproximadamente 50 vezes menor que nas demais amostras. O As foi identificado apenas na amostra FPS01, podendo estar presente nas demais amostras, porém, abaixo do nível de detecção do equipamento. O Pb está presente em todas as amostras, apresentando uma distribuição maior nas frações mais finas, entretanto, na FPS01, se encontra apenas na fração abaixo de 37  $\mu\text{m}$ . O elemento Cu se encontra em todas as amostras e possui uma distribuição mais elevada nas frações abaixo de 37  $\mu\text{m}$ . Com relação ao elemento Mn, também presente em todas as amostras analisadas, este possui um teor na FPS01 muito abaixo do encontrado nas demais amostras.

A composição química da amostra de talco puro, coletado por catação manual está apresentada na Tabela 13.

Com base nos resultados obtidos na caracterização tecnológica, avaliou-se seus possíveis usos industriais. A fração do resíduo ROM (run of mine) abaixo de 74 $\mu\text{m}$  (200#) possui alvura (ISO) de 51,30% e atende às especificações para ser usado na fabricação de inseticidas, têxteis e fertilizantes rações (veículo). A fração superior a 74 $\mu\text{m}$  (200#), devido a sua alvura de 59,54%, atende também às especificações exigidas para a sua utilização como carga para papel. Tais utilizações se devem ao fato de que as especificações para estes usos industriais dizem respeito, principalmente, à granulometria do material, a qual pode ser adequada por métodos de cominuição e peneiramento.

Tabela 12: Análise granulométrica das amostras de resíduos de pedra sabão

Amostra	Fração granul. (#)	Frequencia Simples (%)	Teor									Distribuição								
			%					ppm				%					ppm			
			Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	As	Cu	Mn	Pb	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	As	Cu	Mn	Pb
FPS01	-10 +16	12,6	6,31	33,15	3,74	9,48	64,39	6,28	33,79	0,11	<LQ	13,19	12,32	13,98	12,59	12,63	15,65	7,14	11,77	<LQ
	-16 +35	18,1	6,6	33,95	3,17	9,71	63,65	6,86	32,68	0,11	<LQ	19,82	18,12	17,02	18,52	17,85	24,57	9,92	16,91	<LQ
	-35 +100	20,9	6,09	33,84	3,08	10,78	64,21	6,94	50,4	0,12	<LQ	21,12	20,86	19,09	23,74	20,46	28,70	17,67	21,30	<LQ
	-100 +200	15,1	6,52	35,23	3,68	9,98	63,30	5,61	76,7	0,12	<LQ	16,34	15,69	16,48	15,88	14,27	16,76	19,43	15,39	<LQ
	-200 +400	6,9	6,24	32,83	4,09	9,90	46,92	2,77	76,8	0,17	<LQ	7,14	6,68	8,37	7,20	6,86	3,78	8,89	9,96	<LQ
	-400	26,4	5,11	33,81	3,2	7,94	49,93	2,02	83,4	0,11	16,26	22,38	26,33	25,06	22,09	27,93	10,54	36,94	24,66	100
	Total	100,0	6,03	33,91	3,37	9,49	59,03	5,05	59,60	0,12	4,29	100	100	100	100	100	100	100	100	100
FPS02	+28	20,2	2,21	28,63	0,08	5,04	64,03	<LQ	16,0	212	12,9	17,86	20,90	18,99	19,12	21,18	<LQ	2,91	17,47	10,58
	-28 +65	21,3	2,50	27,83	0,07	5,57	64,04	<LQ	17,5	226	10,7	21,26	21,42	15,86	22,26	21,18	<LQ	3,36	19,67	9,28
	-65 +400	37,7	2,55	27,48	0,10	5,42	64,46	<LQ	36,3	252	16,0	38,38	37,43	40,12	38,37	37,73	<LQ	12,37	38,74	24,63
	-400	20,8	2,71	26,95	0,11	5,19	65,05	<LQ	433	284	65,5	22,50	20,25	25,03	20,24	20,00	<LQ	81,36	24,12	55,52
	Total	100,0	2,50	27,67	0,09	5,33	64,40	0	110,75	245	24,54	100	100	100	100	100	0	100	100	100
FPS03	+28	31,4	2,56	28,28	0,08	5,77	63,31	<LQ	19,0	266	37,9	29,33	31,85	24,26	31,27	31,27	<LQ	3,96	28,37	33,06
	-28 +65	18,7	2,76	28,03	0,08	6,08	63,04	<LQ	35,7	291	12,9	18,84	18,80	15,64	19,63	18,54	<LQ	4,42	18,45	6,70
	-65 +400	36,5	2,69	27,75	0,10	5,65	63,81	<LQ	58,2	285	20,0	35,84	36,33	35,25	35,60	36,63	<LQ	14,07	35,27	20,29
	-400	13,5	3,24	26,91	0,19	5,79	63,87	<LQ	867	391	106	15,99	13,03	24,85	13,49	13,56	<LQ	77,55	17,91	39,95
	Total	100,1	2,74	27,89	0,10	5,79	63,58	0,00	150,93	294	35,96	100	100	100	100	100	0	100	100	100
FPS04	+28	16,6	2,31	28,19	0,09	5,04	64,36	<LQ	14,0	214	18,1	15,95	17,54	14,89	16,12	16,28	<LQ	1,82	11,00	7,55
	-28 +200	24,2	2,30	23,57	0,09	5,28	68,75	<LQ	31,2	235	18,3	23,13	21,38	20,84	24,61	25,36	<LQ	5,92	17,59	11,17
	-200 +400	23,0	2,28	27,86	0,10	5,18	64,57	<LQ	42,6	440	26,5	21,81	24,02	21,28	22,95	22,63	<LQ	7,69	31,35	15,33
	-400	36,2	2,60	27,31	0,12	5,21	64,76	<LQ	298	358	72,3	39,11	37,05	42,98	36,31	35,73	<LQ	84,57	40,06	65,95
	Total	100,0	2,41	26,68	0,10	5,19	65,62	0	127,51	323	39,69	100	100	100	100	100	0	100	100	100

Tabela 12: Análise granuloquímica das amostras de finos de pedra sabão (continuação)

Amostra	Fração granul. (#)	Frequencia Simples (%)	Teor										Distribuição							
			%					ppm					%					ppm		
			Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	As	Cu	Mn	Pb	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	As	Cu	Mn	Pb
FPS05	+28	35,2	2,36	27,80	0,05	5,40	64,39	<LQ	15,9	222	13,3	33,28	34,88	23,21	35,71	35,39	<LQ	6,26	33,94	19,61
	-28 +65	16,4	2,63	27,98	0,06	5,68	63,65	<LQ	23,2	223	10,6	17,23	16,36	12,55	17,50	16,30	<LQ	4,27	15,88	7,28
	-65 +400	34,0	2,53	28,02	0,08	5,17	64,21	<LQ	31,3	230	23,4	34,40	33,96	34,61	33,00	34,08	<LQ	11,94	33,93	33,16
	-400	14,4	2,62	28,82	0,16	5,09	63,30	<LQ	480	260	66	15,10	14,80	29,63	13,79	14,23	<LQ	77,53	16,26	39,94
	Total	100,0	2,50	28,05	0,08	5,32	64,05	0	89,12	230	23,94	100	100	100	100	100	100	100	100	100
FPS06	+14	14,0	2,35	27,9	0,05	5,20	58,47	<LQ	11,8	261	10,1	14,27	14,02	9,67	14,55	13,86	<LQ	10,08	12,20	5,46
	-14 +28	10,4	2,42	28,2	0,05	5,31	58,04	<LQ	12,5	270	<LQ	10,95	10,58	6,82	11,10	10,28	<LQ	7,99	9,43	0,00
	-28 +65	13,3	2,93	27,6	0,07	5,70	57,64	11,00	15,7	327	<LQ	16,86	13,17	13,33	15,14	12,97	62,86	12,79	14,55	0,00
	-65 +200	11,8	2,25	27,3	0,09	5,46	58,95	<LQ	23,6	436	11,5	11,50	11,56	15,78	12,88	11,78	<LQ	17,03	17,21	5,23
	-200 +270	6,9	1,80	27,8	0,10	4,73	59,86	<LQ	12,5	317	24,8	5,35	6,86	9,35	6,51	6,98	<LQ	5,28	7,29	6,59
	-270 +325	7,6	1,92	28,3	0,06	4,47	59,71	<LQ	9,78	241	26,5	6,32	7,71	6,77	6,79	7,69	<LQ	4,55	6,13	7,79
	-325 +400	8,8	2,57	27,2	0,07	4,76	59,37	9,80	44,7	315	65,9	9,81	8,61	9,28	8,39	8,86	37,14	24,10	9,27	22,45
	-400	27,3	2,11	28,0	0,07	4,51	59,48	<LQ	10,9	261	49,6	24,94	27,48	29,00	24,64	27,57	<LQ	18,17	23,92	52,49
Total	100,0	2,30	27,80	0,07	4,99	58,91	2,32	16,30	298	25,82	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Tabela 13: Resultados da análise química do talco

Talco Puro	Teor									
	ppm			%						
Constituinte	Cu	Ni	Zn	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	TiO <sub>2</sub>	PPC	SiO <sub>2</sub> (*)
	6,22	1950	64,2	0,07	0,0241	2,11	29,4	0,0133	5,05	63,4
LQ	0,923	2,35	0,55	0,00676	0,00232	0,0105	4,6E-05	0,00021	-	-
<i>LQ= Limite de Quantificação</i>										

#### 6.4 – Potencial Zeta

As curvas do potencial zeta em função do pH, para o talco em solução aquosa e na presença de 0,1 M de KCl, está apresentada na Figura 26. Como pode ser observado, o talco puro possui o ponto isoelétrico em  $\text{pH} = 2,3$ . Tais valores do ponto isoelétrico das partículas de talco em solução aquosa, tanto na presença ou não de KCl, se encontram entre aqueles pontos encontrados por Yehia e Al-Wakeel (1999) e Fuerstenau et al. (1988), ou seja, em  $\text{pH}$ 's entre 2 a 2,5 respectivamente. Os valores de potencial zeta acima do  $\text{pH}$  10 também condizem com os resultados obtidos por Fuerstenau et al. (1988), assumindo valores abaixo de  $-50\text{mV}$ . Na solução de 0,1 M de KCl, a distância relativa entre o plano de cisalhamento e a superfície das partículas de talco torna-se menor, causando assim uma aumento nos valores de potencial zeta. Embora se observe, de maneira geral, esta elevação na curva do potencial, o  $\text{pH}$  do ponto isoelétrico permanece praticamente inalterado.

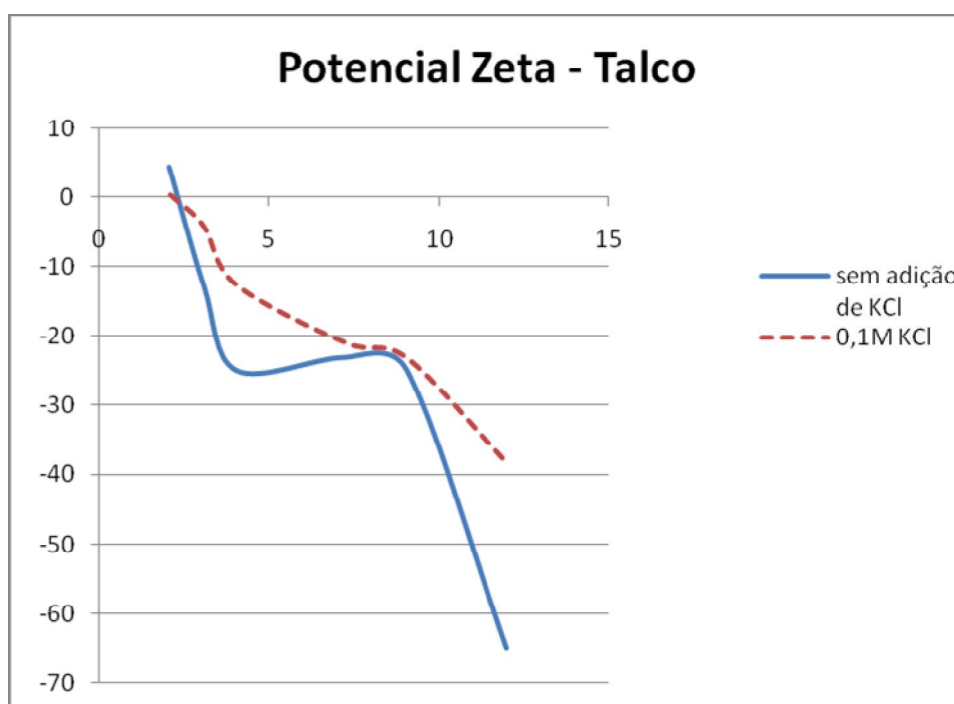


Figura 26: Gráfico do potencial Zeta do talco puro

## 6.5 – Ensaios Purificação

### 6.5.1 – Separação magnética de alta intensidade

Nas figuras 27 e 28 estão apresentadas a recuperação em massa e alvura (ISO) dos resíduos de pedra sabão (FPS06) purificados por separação magnética de alta intensidade, cujos balanços de massa estão apresentados na Tabela 37 do Apêndice II.

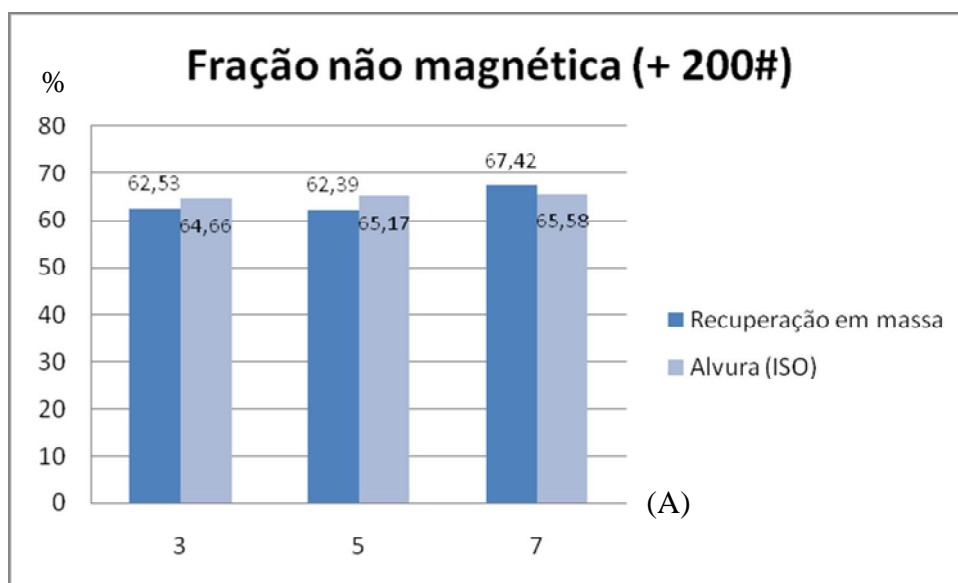


Figura 27: Recuperação em massa e alvura dos resíduos de pedra sabão acima de +74 $\mu$ m (200#) purificados por separação magnética

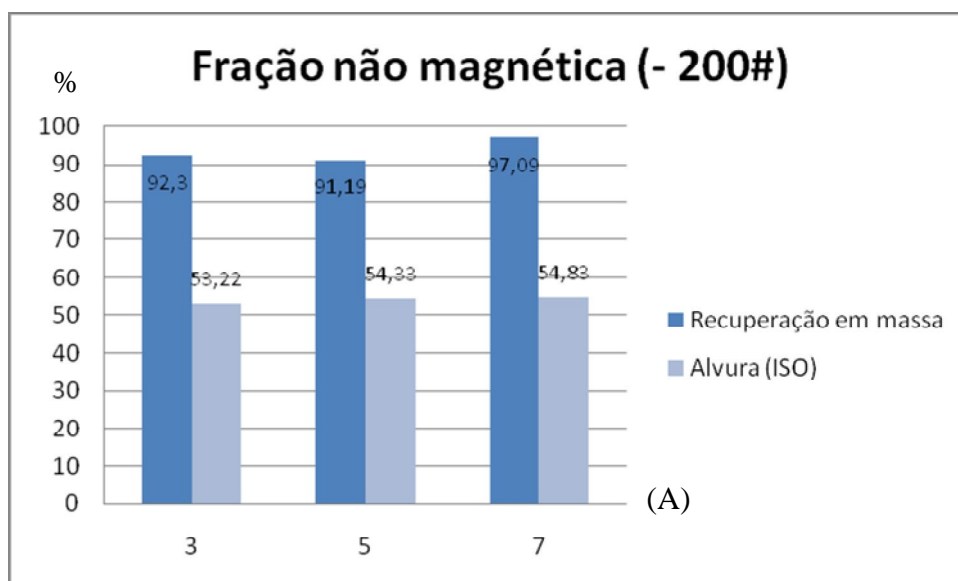


Figura 28: Recuperação em massa e alvura dos resíduos de pedra sabão abaixo de -74 $\mu$ m (200#) purificados por separação magnética

Observa-se que, com relação à fração granulométrica abaixo de  $74\mu\text{m}$  (200#), não houve um ganho significativo de alvura comparativamente ao ROM, cujo valor era igual a 51,30%. O maior valor de alvura encontrado (54,83%) se refere aos ensaios de separação magnética usando uma corrente corrente de 7A. No que diz respeito à recuperação mássica dos resíduos de pedra sabão, a corrente de maior intensidade (7A) também promoveu um melhor resultado. Para a fração granulométrica maior que  $74\mu\text{m}$  (200#), cuja alvura era de 59,54%, o campo magnético gerado pela corrente de 7A promoveu um aumento na alvura de aproximadamente 6 pontos percentuais, porém não apresentou diferenças consideráveis com relação aos campos gerados por 3A e 5A. Uma melhor recuperação mássica também pode ser observada para a corrente de 7A. A baixa recuperação em massa da fração maior que  $74\mu\text{m}$  (200#) pode ser explicada devido às inclusões de partículas oxidadas de ferro nos grãos de talco os quais foram, conseqüentemente, também atraídos pelo campo magnético gerado, veja Figura 27.

Os resultados referentes às análises químicas dos produtos da separação magnética de alta intensidade, para as duas faixas granulométricas, estão apresentadas na Tabela 14. Como era de se esperar, verificou-se a redução dos teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{TiO}_2$  em ambas as faixas granulométricas, o que está relacionado com a remoção de magnetita e ilmenita (óxidos de ferro e titânio) presentes nas mesmas. O aumento na alvura dos produtos purificados está relacionado à redução destes teores.

O processo de separação magnética de alta intensidade para a fração de resíduos de pedra sabão abaixo de  $74\mu\text{m}$  (200#) não gerou concentrados capazes de se adequar a especificações industriais diferentes das obtidas pelas amostras ROM sem prévia purificação, ou seja, é possível a sua utilização na fabricação de inseticidas, têxteis, fertilizantes e rações (veículo). A fração acima de  $74\mu\text{m}$  (200#), devido à sua alvura final mais elevada (acima de 65%), atende também às especificações para o uso nas indústrias de papel (carga) e tintas (espalhador). Veja Tabela 1 de especificações de talco para diversas aplicações.



Tabela 14: Resultados da análise química dos produtos não magnéticos do resíduo de pedra sabão (FPS06)

Fração	Amostra	ppm					%						
		As	Cu	Ni	Pb	Zn	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	TiO <sub>2</sub>	PPC	SiO <sub>2</sub> *
+200#	3A	<LQ	7,57	1944	<LQ	77	2,13	0,0554	3,78	30,4	0,0454	5,97	57,6
	5A	<LQ	8,56	1965	<LQ	68,6	2,12	0,049	3,86	29,8	0,0441	5,98	58,2
	7A	<LQ	7,35	1977	<LQ	67,7	2,14	0,0571	3,97	29,4	0,0426	5,9	58,5
	Alimentação	<LQ	9,59	1941	<LQ	79,5	2,53	0,0463	5,40	28,5	0,0642	6,01	57,5
-200#	3A	<LQ	14,7	1955	<LQ	108	2,02	0,0553	3,74	27,7	0,0199	5,99	60,4
	5A	<LQ	11,7	1962	<LQ	93,5	1,94	0,0546	3,55	27,6	0,019	6,14	60,7
	7A	<LQ	12,4	1959	<LQ	90	2,11	0,0564	3,64	27,9	0,0191	6,05	60,2
	Alimentação	11,1	13,4	1956	<LQ	85,8	2,27	0,0580	4,70	27,7	0,0513	5,98	59,2
<i>LQ</i>		9,45	0,923	2,35	8,3	0,55	0,00676	0,00232	0,0105	4,6E <sup>-05</sup>	0,00021	-	-
<i>LQ= Limite de Quantificação; (3A, 5A,7A) = fração não magnética; (3AM, 5AM,7AM) = fração magnética</i>													
<i>(*) SiO<sub>2</sub> foi calculado por diferença (100 - PPC e teores de elementos maiores)</i>													

### 6.5.2 – Mesa vibratória

Os resultados dos ensaios de purificação dos resíduos de pedra sabão (FPS06) por mesa vibratória, referentes à fração granulométrica acima de  $74\mu\text{m}$  (200#), foram avaliados quanto à alvura, recuperação mássica e composição química da fração leve (produto purificado). Todos os testes foram realizados em duplicata, cujos balanços de massa estão apresentados na Tabela 38 do Apêndice II. Os resultados obtidos no planejamento fatorial de experimentos, em termos de alvura e recuperação mássica, estão apresentados na Tabela 15. As variáveis respostas correspondem à média dos ensaios em duplicata.

Tabela 15: Resultado das variáveis respostas dos ensaios de concentração em mesa vibratória

Ensaio	Matriz de planejamento			Variáveis respostas	
	A	B	C	RM%	Alvura (ISO)
1	4	3	15	15,25	63,21
2	10	3	25	14,10	62,44
3	10	5	25	16,50	64,00
4	10	3	15	11,65	62,47
5	4	3	25	15,70	63,39
6	4	5	15	19,00	63,53
7	10	5	15	14,35	61,11
8	4	5	25	16,65	66,50
<i>RM% = Recuperação em massa</i>					

- A: Vazão de sólidos (kg/h)
- B: Ângulo de inclinação da mesa (°)
- C: Porcentagem de sólidos (%)

A partir dos resultados do teste fatorial apresentados na Tabela 24, efetuou-se uma análise estatística, utilizando-se para tanto, o software MINITAB 15. Realizou-se a análise em questão em termos de alvura e recuperação em massa (RM%) do concentrado.

Os gráficos de Pareto apresentados nas Figuras 29 e 30 mostram quais fatores afetaram significativamente as variáveis respostas estudadas (recuperação em massa e alvura). Pode-se verificar que as variáveis que afetaram significativamente a recuperação em massa foram: vazão de sólidos, ângulo de inclinação da mesa e

porcentagem de sólidos. Com relação à alvura, somente a vazão e a porcentagem de sólidos foram significativas.

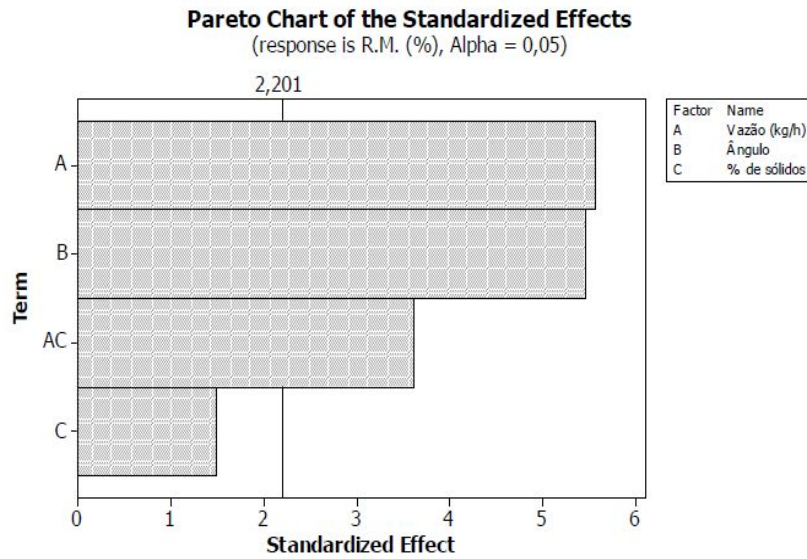


Figura 29: Gráfico de Pareto dos efeitos principais sobre recuperação em massa da mesa vibratória

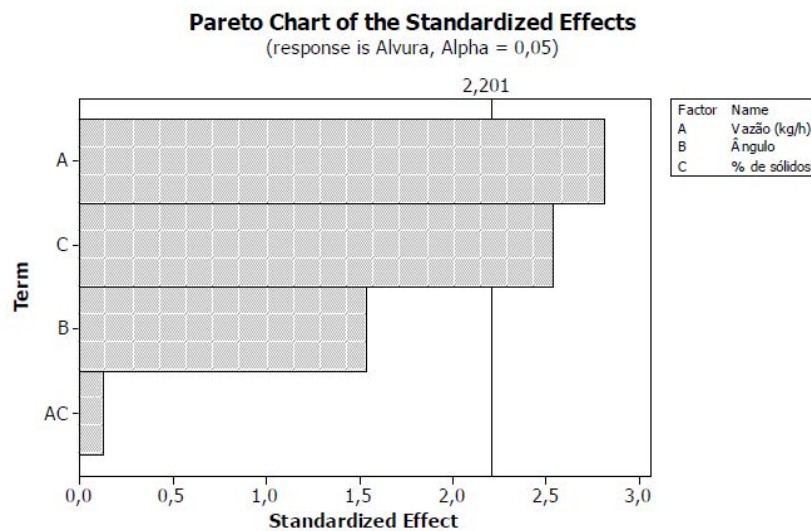


Figura 30: Gráfico de Pareto dos efeitos principais sobre alvura da mesa vibratória

No gráfico dos efeitos principais (vazão de sólidos, porcentagem de sólidos e ângulo de inclinação) apresentado na Figura 31 pode-se observar que a porcentagem de sólidos teve menor influência na variável resposta recuperação em massa, pois a linha

que conecta os valores médios para o nível baixo e o nível alto tem inclinação menos íngreme quando comparada aos demais efeitos principais. Já as variáveis vazão de sólidos (kg/h) e ângulo de inclinação possuem efeitos mais expressivos quando analisados de maneira análoga à variável porcentagem de sólidos e, como se observa, contrários entre si. Ou seja, houve uma diminuição da recuperação em massa do nível menor (4 kg/h) para o maior (10 kg/h) da vazão de sólidos, tendo o inverso ocorrido para o ângulo de inclinação de 3° para 5°.

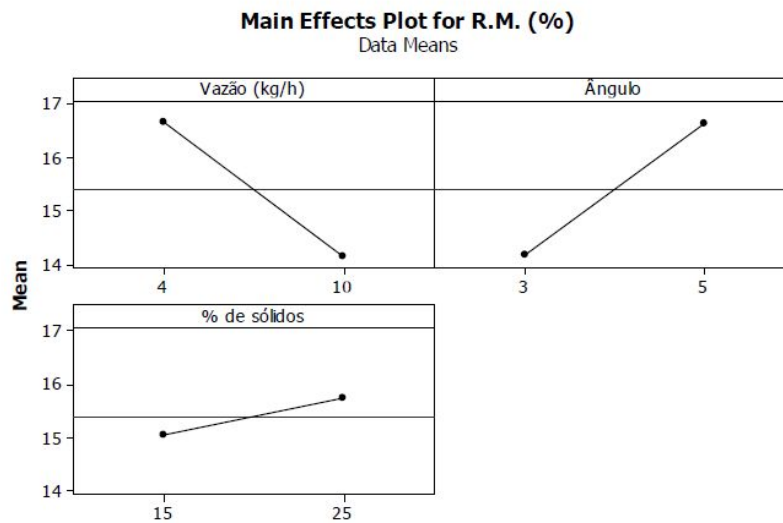


Figura 31: Influência dos efeitos principais sobre a recuperação em massa da mesa vibratória

Com relação à variável resposta alvura, observa-se pelo gráfico da Figura 32 um menor efeito relativo para a variável ângulo de inclinação, onde um menor ângulo resulta em um menor valor de alvura. No que se diz respeito à vazão, um maior valor desta variável implica em uma alvura cerca de 1,5% menor. Para a variável porcentagem de sólidos observa-se que em seu nível máximo a alvura sofre um aumento, alcançando um valor de aproximadamente 64%.

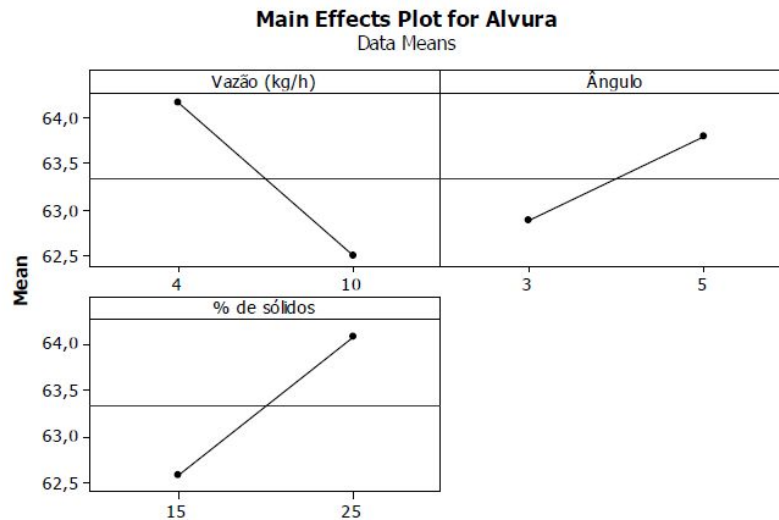


Figura 32: Influência dos efeitos principais sobre a alvura da mesa vibratória

Os gráficos de interação entre os efeitos principais (vazão de sólidos, porcentagem de sólidos e ângulo de inclinação da mesa) apresentados nas Figuras 33 e 34 mostram a influência da interação dos fatores (dois a dois) sobre as variáveis respostas alvura e recuperação em massa (RM%).

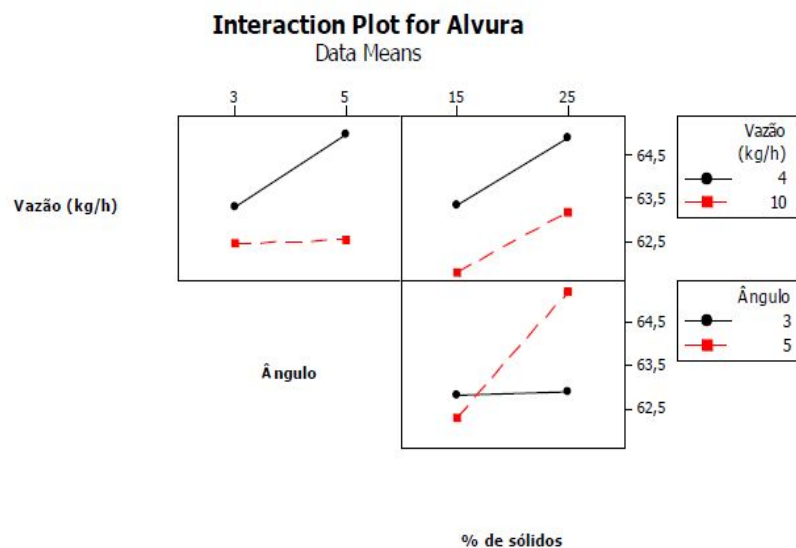


Figura 33: Interações entre os efeitos principais sobre a alvura da mesa vibratória

No gráfico da Figura 33, observa-se que o ângulo de inclinação da mesa e a porcentagem de sólidos, em seus níveis máximos, é a interação que causa maior efeito positivo na alvura, levando em consideração a reta ser crescente. Sendo assim, caso se

deseje alterar os índices da alvura, deve-se ter uma atenção maior para com os níveis do ângulo de inclinação e da porcentagem de sólidos. Já os níveis máximos dos fatores mencionados acima (ângulo, 5° e porcentagem de sólidos, 25%) apresentam o maior valor de alvura. Com relação ao gráfico referente aos fatores vazão de sólidos e porcentagem de sólidos, as linhas aproximadamente paralelas sugerem que não existe interação entre eles. Nota-se também que a vazão influencia a alvura, mas não de forma tão significativa quanto o ângulo de inclinação da mesa e a porcentagem de sólidos.

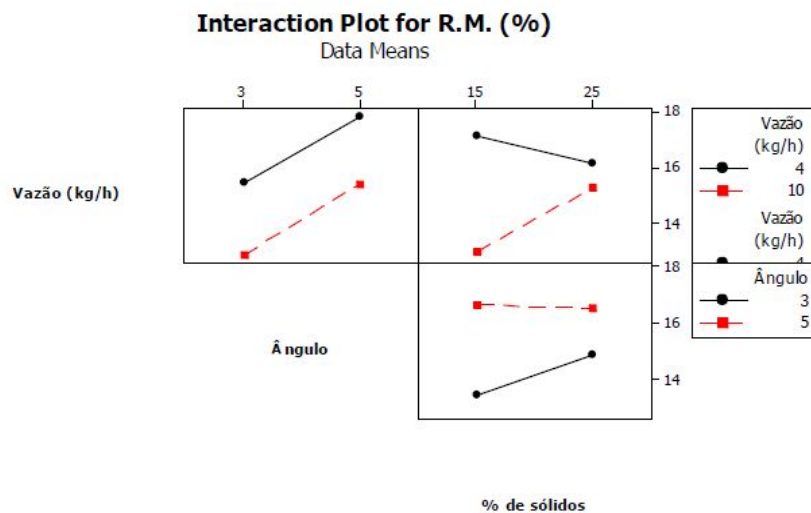


Figura 34: Interações entre os efeitos principais sobre a recuperação em massa da mesa vibratória

Pela Figura 34 observa-se que a vazão de sólidos e o ângulo de inclinação da mesa (ambos, tanto no nível mínimo quanto no máximo) causam maior efeito positivo na variável resposta recuperação em massa, sendo que a vazão de sólidos no nível mínimo e o ângulo no nível máximo apresentam a maior e melhor resposta. É interessante notar neste gráfico que, a vazão de sólidos no nível mínimo quando interagindo com o aumento de porcentagem de sólidos causa um efeito negativo, ou seja, neste nível de vazão à medida que aumenta a porcentagem de sólidos, a recuperação em massa diminui. Já a vazão de sólidos, interagindo com o mesmo fator porcentagem de sólidos, em um nível mais elevado causa um efeito contrário, ou seja, uma influência positiva. Uma análise análoga à feita na Figura 33 mostra uma não interação entre os fatores vazão de sólidos e ângulo, a qual é sugerida pelo gráfico com linhas aproximadamente paralelas.

Os gráficos do cubo apresentados nas Figuras 35 e 36 mostram as demais interações entre os fatores.

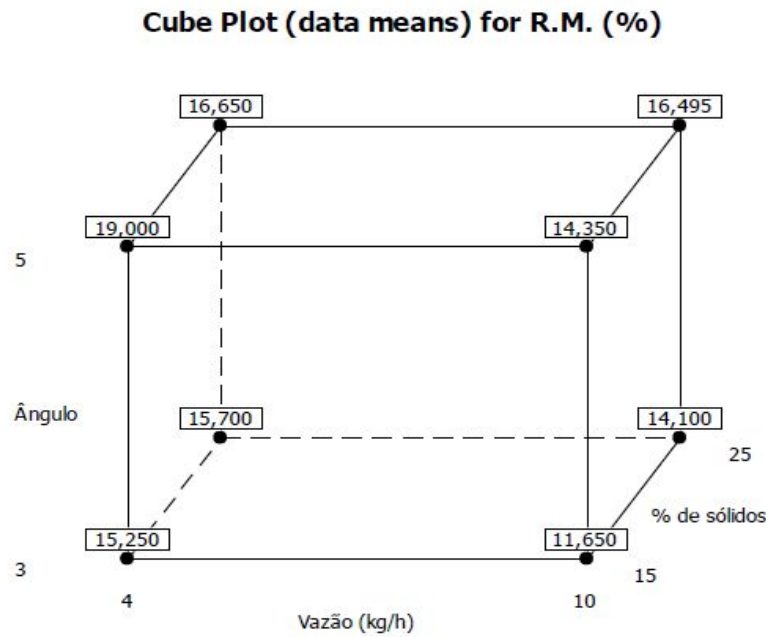


Figura 35: Gráfico do cubo para os resultados da resposta recuperação em massa da mesa vibratória

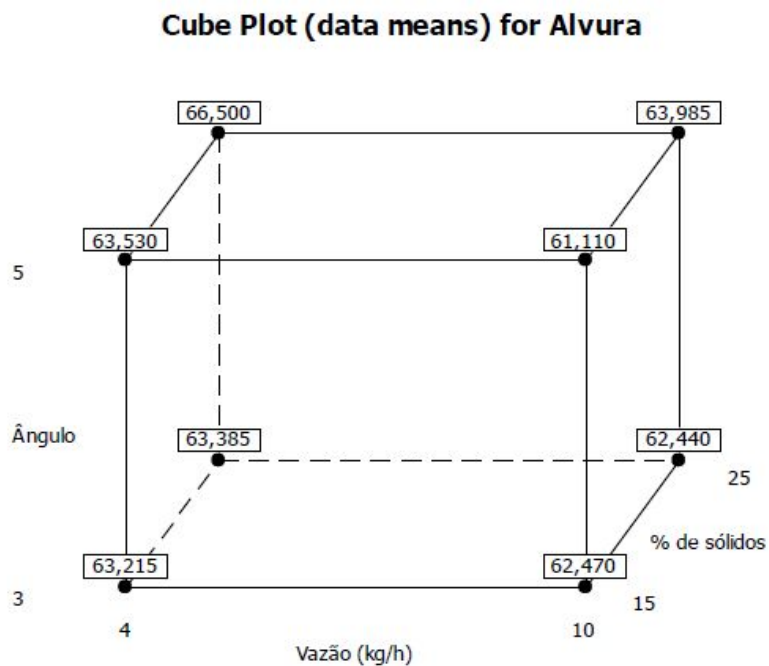


Figura 36: Gráfico do cubo para os resultados da resposta alvura da mesa vibratória

Pode-se observar que o maior valor de recuperação em massa obtido foi de 19,0%, o qual se referiu à utilização do maior ângulo de inclinação da mesa, a vazão mínima de sólidos e a menor porcentagem de sólidos, confirmando as análises efetuadas anteriormente. De forma análoga, o menor valor de recuperação é referente às variáveis porcentagem de sólidos em seu nível mínimo, vazão máxima e menor ângulo (Figura 35).

O valor de alvura foi máximo com as variáveis ângulo de inclinação da mesa e porcentagem de sólidos em seus níveis máximos e com vazão de sólidos mínima, alcançando um valor de 66,5% (ISO). O menor valor de alvura obtido se refere às variáveis ângulo e vazão máximos e nível mínimo de porcentagem de sólidos (Figura 36).

Nas Figuras 37 e 38 estão apresentadas as curvas de contorno para a Recuperação mássica e alvura.

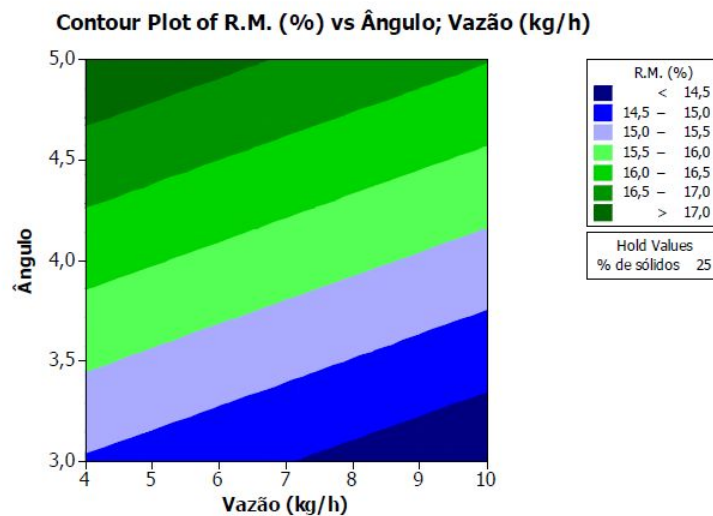


Figura 37: Curva de contorno para a recuperação em massa da mesa vibratória



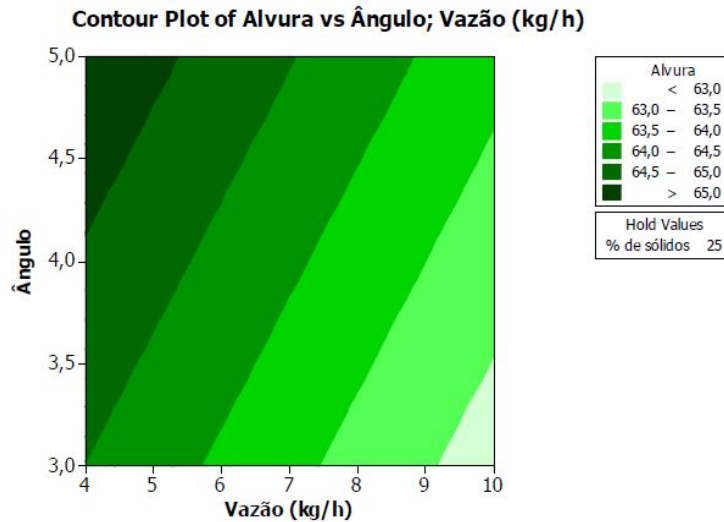


Figura 38: Curva de contorno para a alvura da mesa vibratória

Observa-se que, para as variáveis vazão de sólidos e ângulo de inclinação da mesa, com valores inferiores a 7 kg/h e superiores 4,6°, respectivamente, tem-se a maior recuperação mássica, cujos valores ultrapassam os 17% (Figura 37). Com relação à resposta alvura, esta apresenta melhores índices com valores superiores a 65%, para valores de ângulo superiores 4,1° e de vazão inferior a 6 kg/h (Figura 38). De maneira análoga, os resultados de menor expressão para as respostas alvura e recuperação mássica são referentes aos intervalos de área compreendidos entre os menores valores de ângulo de inclinação da mesa e maiores valores de vazão de sólidos.

A Tabela 16 apresenta os resultados da análise química dos produtos purificados do planejamento fatorial. Os teores correspondem à média dos respectivos ensaios. Como pode ser observado, a análise química mostrou uma redução dos contaminantes insuficiente para elevar substancialmente a alvura dos produtos concentrados. De um modo geral, não houve alterações significativas nos teores dos componentes em relação aos diferentes testes realizados.

O óxido férrico, que é o composto mais prejudicial à alvura do talco, sofreu uma redução de aproximadamente 26% em seu teor em relação à alimentação, o que promoveu um aumento máximo de 10% na alvura do concentrado. Os óxidos de alumínio e titânio sofreram ambos, reduções superiores a 50%. Os demais componentes não apresentaram reduções em seus teores que possam ser consideradas significativas, tanto para um aumento expressivo de alvura quanto para as especificações industriais.

Já os componentes de interesse, SiO<sub>2</sub> e MgO, apresentaram elevações sutis em seus teores.

Após a sequência de experimentos da qual resultou os dados analisados anteriormente, realizou-se um estudo das variáveis utilizadas e seus respectivos resultados objetivando-se a otimização dos parâmetros (Figura 39).

A otimização dos parâmetros foi feita em função da alvura e da recuperação massa e, como observado na Figura 39, os seguintes parâmetros foram utilizados em um experimento confirmatório e realizado em triplicata: vazão de 4,0 kg/h, ângulo de 5° e porcentagem de 15% de sólidos. Como resultado, obtiveram-se os valores teóricos de 18,35% de recuperação mássica e 63,82% de alvura (ISO).

Os resultados práticos e confirmatórios referentes ao ensaio otimizado de mesa vibratória estão apresentados na Tabela 17. Nela estão apresentados os valores de recuperação em massa, teores e alvura dos produtos leve, mistos e rejeito da mesa vibratória para as seguintes condições otimizadas pelo software MINITAB 15: vazão de sólidos igual a 4 kg/h; ângulo de inclinação da mesa de 5° e polpa com 15% de sólidos. Ressalta-se que a alimentação da etapa *scavenger* foi proveniente de um produto misto da etapa *rougher* otimizada.

Tabela 16: Resultados da análise química do planejamento fatorial dos produtos purificados por mesa vibratória

Ensaio	A	B	C	ppm				Porcentagem (%)						
				Cu	Ni	Pb	Zn	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	TiO <sub>2</sub>	PPC	SiO <sub>2</sub> *
1	4	3	15	5,78	1982	<LQ	72,1	1,47	0,0399	4,05	29,1	0,0363	5,62	59,7
2	10	3	25	5,90	1969	<LQ	69,2	1,41	0,0307	3,95	26,7	0,0364	5,53	62,4
3	10	5	25	5,59	1982	<LQ	68,6	1,31	0,0294	3,95	29,5	0,0381	5,42	59,8
4	10	3	15	5,91	1991	<LQ	74,0	1,2	0,0365	3,92	29,2	0,0343	5,4	60,2
5	4	3	25	6,49	1982	<LQ	65,6	1,44	0,0309	4,05	29,3	0,0368	5,39	59,8
6	4	5	15	6,02	1989	<LQ	66,7	1,42	0,0315	4,06	30,3	0,0366	5,43	58,8
7	10	5	15	5,91	1979	<LQ	69,3	1,31	0,0296	4,07	29,1	0,0363	5,3	60,2
8	4	5	25	5,80	1997	11,4	70,0	1,25	0,0313	4,03	29,5	0,0353	5,32	59,9
Alimentação				9,59	1941	<LQ	79,5	2,53	0,0463	5,40	28,5	0,0642	6,01	57,5
<i>LQ</i>				<i>0,923</i>	<i>2,35</i>	<i>8,30</i>	<i>0,550</i>	<i>0,00676</i>	<i>0,00232</i>	<i>0,0105</i>	<i>0,000046</i>	<i>0,00021</i>	-	-
<i>LQ= Limite de Quantificação</i>														
<i>(*) SiO<sub>2</sub> foi calculado por diferença (100 - PPC e teores de elementos maiores)</i>														

- A: Vazão de sólidos (kg/h)
- B: Ângulo de inclinação da mesa (°)
- C: Porcentagem de sólidos (%)

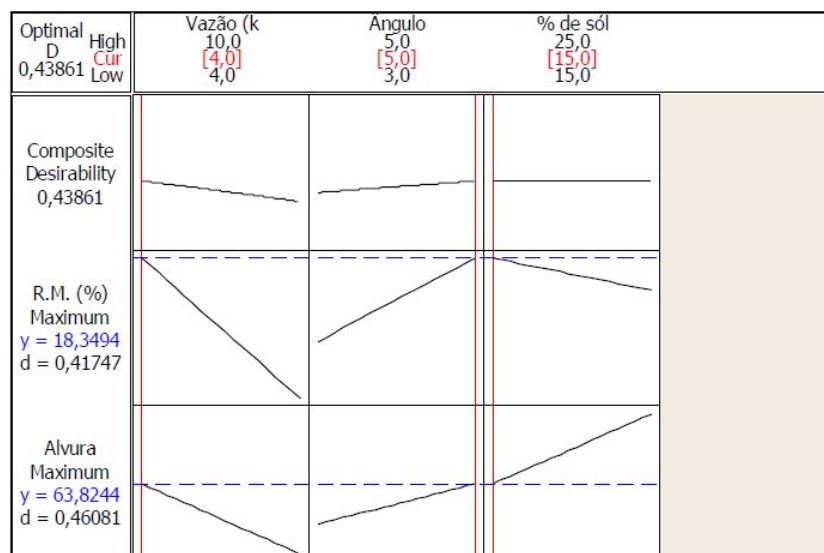


Figura 39: Otimização conjunta para alvura e recuperação em massa da fração leve da mesa vibratória

Tabela 17: Resultados referentes ao processo de mesa vibratória otimizado

Etapa	Rejeito		Misto		Leve	
	RM%	Alvura (ISO)	RM%	Alvura (ISO)	RM%	Alvura (ISO)
<i>Rougher</i>	62,3	57,5	15,2	60,72	22,5	67,50
<i>Scavenger</i>	51,14	59,78	17,27	61,01	31,59	67,95
<i>RM% = recuperação em massa / Leve = concentrado</i>						

Os resultados obtidos para os ensaios otimizados superaram os valores teóricos pré-estabelecidos na otimização dos parâmetros (Figura 39). O concentrado *rougher* alcançou valores médios de alvura de 67,50% (ISO) e 22,5% para a recuperação em massa, respectivamente. Com relação ao produto misto, os valores de alvura medidos indicaram que uma etapa *scavenger* seria viável em se tratando de um ganho em seu índice de alvura. Como pode ser observado na Tabela 26, a alvura alcançada pelos concentrados das etapas *rougher* e *scavenger* foram equivalentes. A recuperação em massa foi aumentada em 4,8 pontos percentuais, resultando em uma recuperação final de 27,3%. No entanto, esse valor é consideravelmente menor do que a recuperação em massa da separação magnética de alta intensidade (acima de 67%) e cuja alvura era ligeiramente menor (65,6%).

Como observado na Tabela 18, os resultados da análise química do ensaio otimizado é confirmado com relação aos teores analisados no ensaio do planejamento

fatorial. Como esperado, nota-se um gradual aumento dos contaminantes,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  principalmente na fração mista e rejeito, bem como uma maior concentração de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{MgO}$  no produto purificado (leve). Nota-se também uma concentração do As, provavelmente relacionado à arsenopirita, no produto misto. O produto misto da etapa *scavenger* apresentou maiores teores de Cu, Pb, Zn,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e CaO bem como menores teores  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{TiO}_2$  em relação aos teores do produto misto da etapa *rougher*. A etapa *scavenger* realizada com a fração mista da etapa *rougher*, mostrou-se tão eficiente quanto à etapa *rougher* otimizada em relação aos teores dos componentes e alvura final atingida.

Tabela 18: Resultados da análise química dos ensaios otimizados da mesa vibratória

Teor	Constituinte	<i>Rougher</i>		<i>Scavenger</i>		LQ
		Misto	Leve	Misto	Leve	
ppm	Cu	7,66	6,56	8,97	6,71	0,923
	Ni	1963	1982	1966	1981	2,35
	Pb	21,9	<LQ	50,4	20,9	8,3
	Zn	70,5	70,2	80,2	73	0,55
%	$\text{Al}_2\text{O}_3$	2,59	1,56	3,31	1,66	0,00676
	CaO	0,0481	0,0319	0,0655	0,036	0,00232
	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	4,62	4,17	4,71	3,97	0,0105
	MgO	29,3	29,1	30	30,2	4,6E-05
	$\text{TiO}_2$	0,0483	0,0384	0,0486	0,0375	0,00021
	PPC	6,05	5,82	6,4	5,84	-
	$\text{SiO}_2^*$	57,4	59,3	55,5	58,3	-
<i>LQ= Limite de Quantificação</i>						
<i>(*) SiO<sub>2</sub> foi calculado por diferença</i>						

A purificação da fração de resíduos de pedra sabão, acima de  $74\mu\text{m}$  (200#) por mesa vibratória, gerou um produto purificado (fração leve) adequado às especificações para os seguintes usos industriais: inseticidas, têxteis, fertilizantes, rações, (veículo), papel (carga), tintas (espalhador).

### 6.5.3 – Flotação

O planejamento fatorial de experimentos descrito a seguir teve como finalidade a análise de variáveis do sistema e a avaliação de suas possíveis combinações e variações visando a uma condição otimizada de flotação em termos de recuperação em massa e alvura (ISO).

Embora seja possível a flotação natural do talco, avaliou-se a influência de oito variáveis buscando uma melhor seletividade das partículas de talco. Os ensaios de flotação dos resíduos de pedra sabão, com granulometria abaixo de  $74\mu\text{m}$  (200#) da amostra FPS06, foram realizados em duplicata, sendo os seus concentrados finais avaliados quanto à alvura e a recuperação em massa. O processo visa uma redução dos principais constituintes contaminantes, com o devido destaque aos óxidos de ferro e alumínio e os elementos químicos Cu, Ni, Pb e As. Os balanços de massa completos com as respectivas alvuras dos afundados encontram-se na Tabela 39 do Apêndice II. Na Tabela 19 estão apresentados os resultados referentes aos ensaios do planejamento fatorial fracionado de experimentos.

- A : Dosagem de Querosene (g/t)
- B : Dosagem de Metassilicato (g/t)
- C : Dosagem de MIBC (g/t)
- D : pH
- E : Porcentagem de sólidos (%)
- F : Rotação (rpm)
- G : Tempo de condicionamento do coletor (min.)
- H : Tempo de condicionamento do depressor (min.)

Tabela 19: Resultados das variáveis respostas dos ensaios de flotação segundo planejamento fatorial de experimentos

Ensaio	Matriz de planejamento								Variáveis respostas	
	A	B	C	D	E	F	G	H	RM%	Alvura (ISO)
1	1000	1000	150	7	20	1200	5	5	86,62	61,95
2	1000	500	75	7	10	1200	10	10	67,29	65,12
3	1000	500	75	11	10	1200	5	5	72,7	64,12
4	500	500	150	11	20	1200	10	5	88,85	59,03
5	1000	1000	75	11	10	800	10	10	68,21	65,8
6	500	1000	75	11	20	1200	5	5	90,16	62,49
7	1000	500	75	7	20	1200	10	5	85,67	62,04
8	500	1000	150	11	20	800	5	10	83,68	61,24
9	1000	1000	75	7	20	800	5	10	79,99	62,3
10	500	500	75	11	20	800	10	10	79,76	61,2
11	1000	1000	150	11	10	1200	10	5	81,09	67,63
12	500	500	150	7	10	1200	5	5	78,3	67,18
13	500	500	75	7	10	800	5	10	69,42	68,2
14	1000	1000	150	7	10	1200	5	10	75,81	68,24
15	500	1000	75	7	10	1200	10	5	75,85	65,16
16	1000	500	150	11	20	800	5	5	83,62	62,12
17	1000	1000	75	11	20	800	10	5	80,74	61,37
18	500	1000	150	7	10	800	10	10	76,45	67,32
19	500	1000	150	11	10	800	5	5	69,87	65,85
20	1000	500	75	11	20	1200	5	10	80,46	60,23
21	1000	1000	75	7	10	800	5	5	72,67	65,16
22	500	1000	75	7	20	1200	10	10	80,03	62,45
23	500	500	75	11	10	800	10	5	67,25	65,02
24	1000	500	150	11	10	800	5	10	74,85	64,73
25	500	500	150	11	10	1200	10	10	79,11	65,81
26	500	500	75	7	20	800	5	5	82,44	59,09
27	500	1000	75	11	10	1200	5	10	72,45	68,71
28	500	500	150	7	20	1200	5	10	88,93	61,15
29	1000	500	150	7	20	800	10	10	83,83	60,98
30	1000	1000	150	11	20	1200	10	10	77,57	62,75
31	500	1000	150	7	20	800	10	5	84,3	61,29
32	1000	500	150	7	10	800	10	5	77,32	64,25

*RM% = Recuperação em massa; Flotado = Concentrado*

Pelos gráficos de Pareto apresentados nas Figuras 40 e 41 observa-se que a porcentagem de sólidos foi significativa tanto para a recuperação em massa quanto para a alvura e que, a dosagem de espumante (MIBC) foi significativa somente para a recuperação em massa.

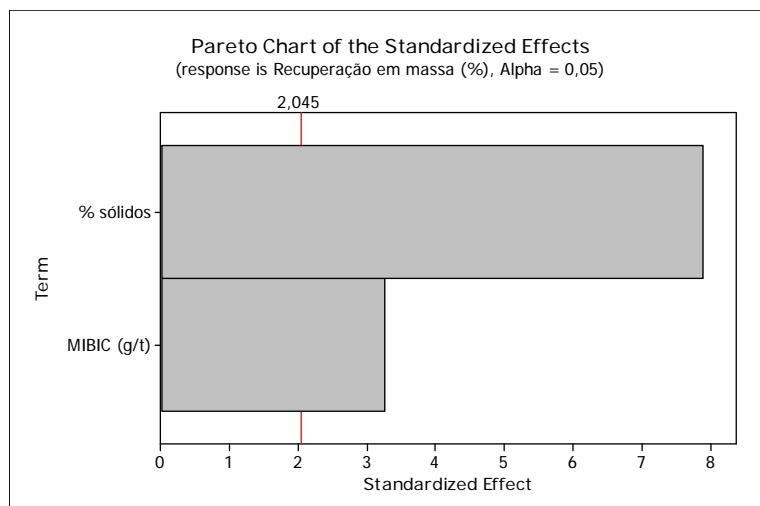


Figura 40: Gráfico de Pareto dos efeitos principais para a recuperação em massa dos ensaios de flotação

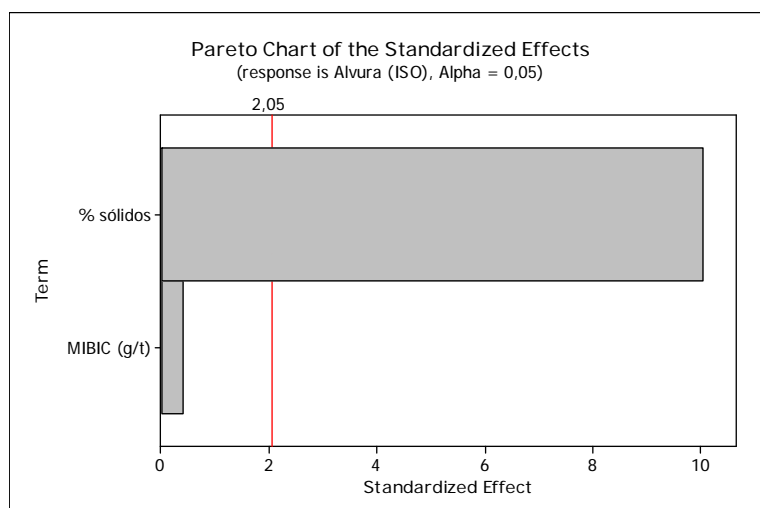


Figura 41: Gráfico de Pareto dos efeitos principais para alvura dos ensaios de flotação



A variabilidade das respostas finais, recuperação em massa e alvura, como consequência de cada variável analisada isoladamente é apresentada nos gráficos de efeitos principais (Figuras 42 e 43).

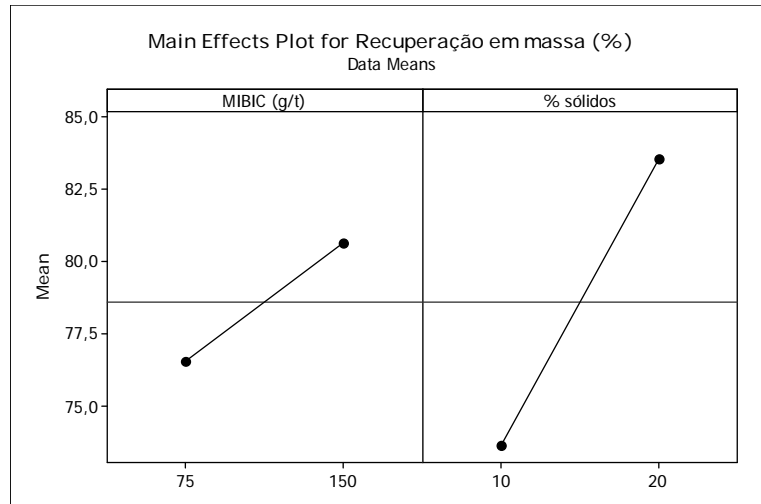


Figura 42: Gráfico dos efeitos principais, dosagem de MIBC e porcentagem de sólidos, sobre a recuperação em massa dos ensaios de flotação

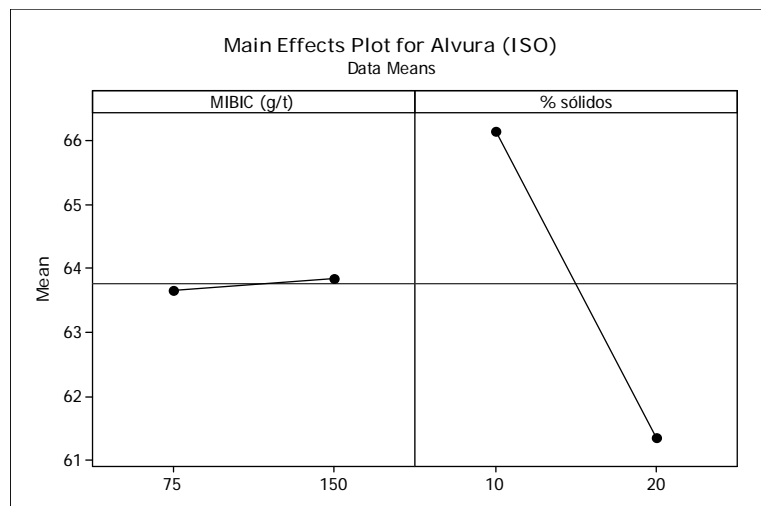


Figura 43: Gráfico dos efeitos principais, dosagem de MIBC e porcentagem de sólidos, sobre a alvura dos ensaios de flotação

Como observado pelas figuras 44 e 45, a reta da variável porcentagem (MIBC) de sólidos possui uma maior inclinação quando comparada à variável dosagem de

espumante (MIBC). Este fato indica um maior efeito principal positivo agindo em relação à recuperação em massa e um efeito principal negativo para a alvura, ou seja, a utilização da variável porcentagem de sólidos, em seu nível máximo, propicia um ganho na recuperação e uma conseqüente diminuição na alvura. Assim sendo, um aumento de 10 pontos percentuais em massa na polpa de alimentação acarreta um ganho aproximado de 10 pontos percentuais na recuperação em detrimento a uma diminuição em torno de 5 pontos em termos de alvura.

Levando-se em consideração a variável dosagem de espumante, esta não apresenta um efeito principal relevante para a alvura, porém observa-se um ganho aproximado de 4 pontos percentuais na recuperação frente a um aumento de 75 g/t do espumante para 150 g/t.

As influências das interações entre os fatores porcentagem de sólidos e dosagem de espumante (MIBC), em termos da recuperação em massa e alvura estão apresentadas, respectivamente, nas Figuras 44 e 45.

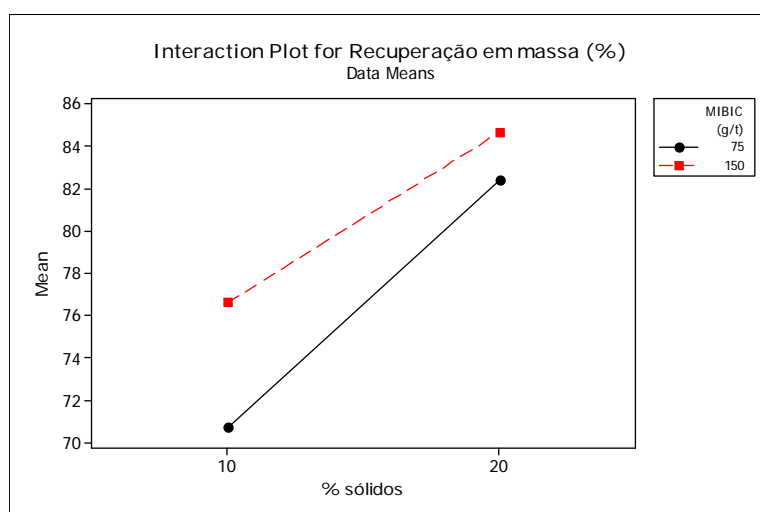


Figura 44: Interação entre os efeitos, porcentagem de sólidos e dosagem de MIBC, sobre a recuperação em massa dos ensaios de flotação

Como se pode observar, as retas relativamente paralelas indicam pouca interação entre os fatores em questão. A Figura 44 mostra que, independente da dosagem do espumante, uma porcentagem mais alta de sólidos promove maior recuperação mássica dos resíduos, tendo a dosagem de 150 g/t de MIBC alcançado uma recuperação de aproximadamente 2 pontos percentuais acima daquela alcançada utilizando-se 75 g/t.

Em termos de alvura (Figura 45), causam um efeito negativo apresentando valores equivalentes de alvura quando se utiliza 20% de porcentagem de sólidos. Por haver uma interação irrelevante entre os fatores relacionados, opta-se pela dosagem mínima de MIBC por questões econômicas.

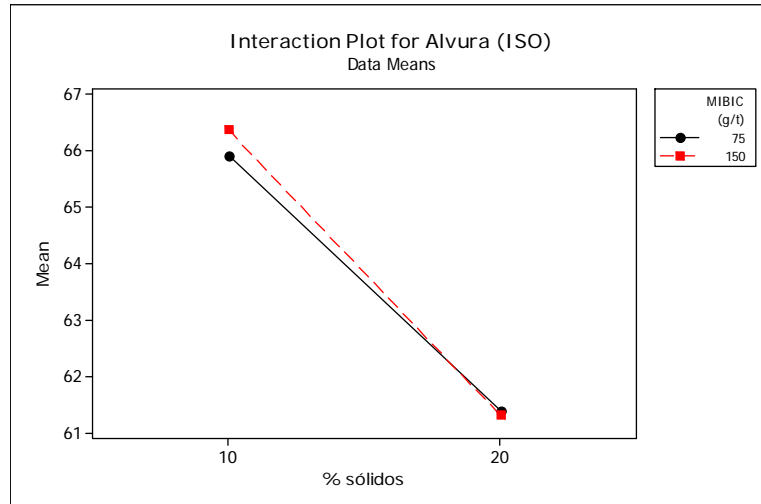


Figura 45: Gráfico das interações entre os efeitos porcentagem de sólidos e dosagem de MIBC para alvura referente aos ensaios de flotação

Observando-se os gráficos do cubo, pode-se visualizar o efeito das configurações dos níveis para ambos os fatores simultaneamente, e assim, as condições mais favoráveis para a recuperação e alvura do concentrado da flotação (Figuras 46 e 47).

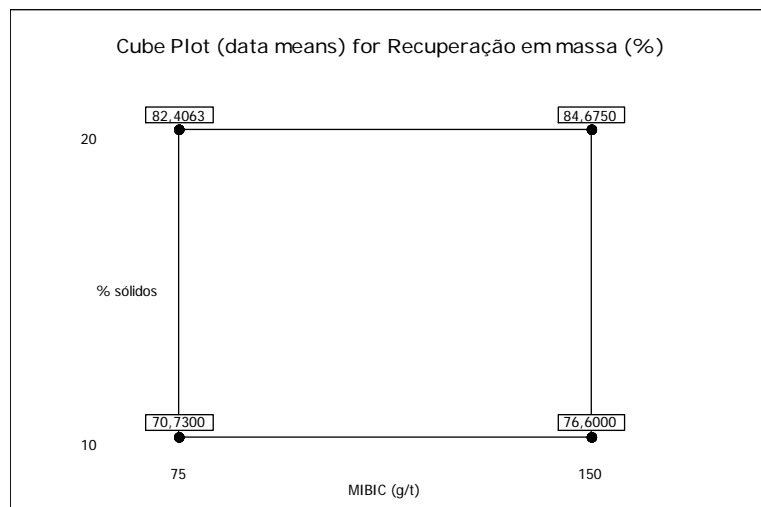


Figura 46: Gráfico do cubo, porcentagem de sólidos vs dosagem de MIBC, para a recuperação em massa dos ensaios de flotação

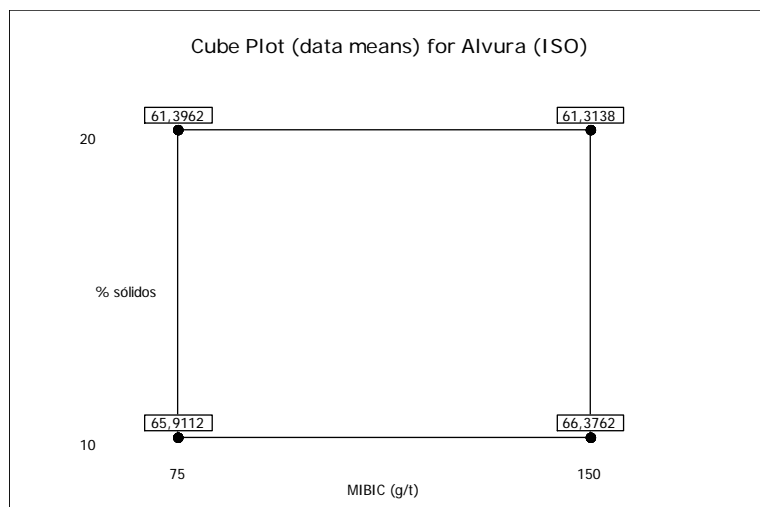


Figura 47: Gráfico do cubo, percentagem de sólidos vs dosagem de MIBC, para a alvura dos ensaios de flotação

Observando-se a Figura 46 pode-se visualizar que a maior recuperação em massa (84,68%) ocorreu quando a dosagem de espumantes foi de 150 g/ e a percentagem de sólidos foi utilizada em seu nível máximo (20%). Já para a alvura (Figura 47), o seu valor máximo foi atingido utilizando-se uma percentagem de sólidos de 10% acompanhada de uma dosagem de 150 g/t de espumante (MIBC).

Para se obter a faixa da dosagem do espumante e percentagem de sólidos a qual resultará em uma maior recuperação em massa, bem como maiores alvuras, são apresentados os gráficos de curvas de contorno nas Figuras 48 e 49. A partir destes dados torna-se possível uma otimização preliminar para o processo de flotação dos finos de pedra sabão.

A partir das curvas de contorno (Figura 48), verifica-se que as faixas ótimas para a obtenção de uma maior recuperação mássica (>84%) são de aproximadamente 121 a 150 g/t para a dosagem de MIBC e de 18,5 a 20% de percentagem de sólidos. Sendo assim, torna-se possível realizar a combinação mais adequada para se atingir a recuperação mássica adequada, visto que esta influencia diretamente a alvura do concentrado final.

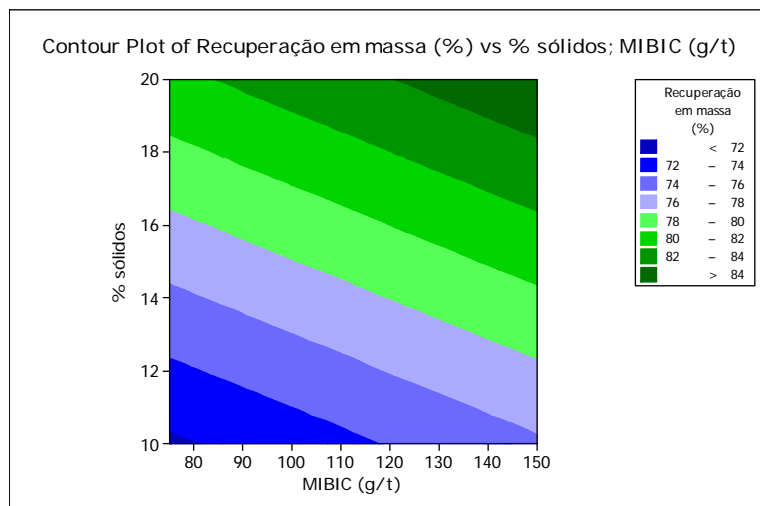


Figura 48: Curva de contorno para a recuperação em massa em função da dosagem de MIBC e porcentagem de sólidos dos ensaios de flotação

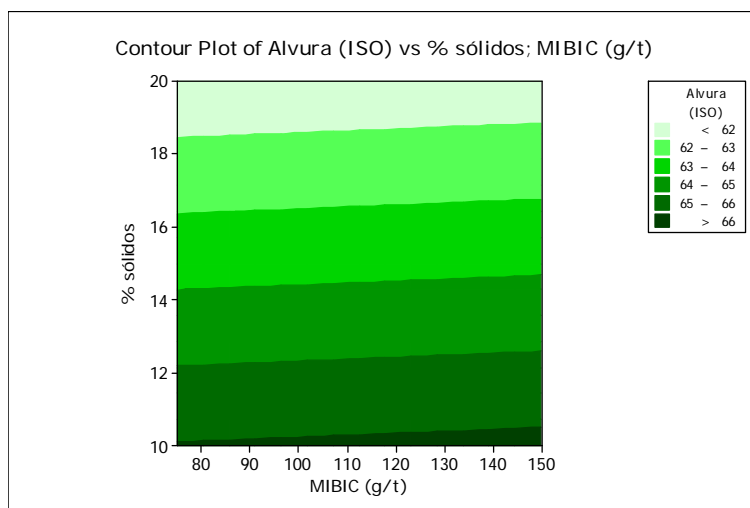


Figura 49: Curva de contorno para a alvura em função da dosagem de MIBC e porcentagem de sólidos dos ensaios de flotação

Observando-se o gráfico de curva de contorno apresentado na Figura 49, verifica-se que os valores de porcentagem de sólidos e dosagem do espumante (MIBC) para a obtenção da máxima alvura estão dentro da faixa de aproximadamente 10,1 a 10,5% de sólidos para dosagem de 75 a 150 g/t de MIBC. Desta forma, verifica-se que para valores de alvura maiores que 66% (ISO), esta é influenciada somente pela porcentagem em massa dentro da faixa estudada. De uma maneira geral, a dosagem de espumante não influencia na alvura final do concentrado da flotação. Com estes dados, é possível

realizar a combinação mais adequada para a obtenção da alvura mais adequada para cada especificação industrial.

A fim de se estabelecer uma otimização específica para os ensaios de flotação, utilizou-se a ferramenta estatística resposta otimizada do MINITAB 15 (Figura 50), com a qual é possível otimizar as variáveis e seus níveis para a obtenção de uma resposta desejada. A resposta otimizada para a recuperação em massa e alvura dos ensaios de flotação efetuados foram obtidos para 20% de sólidos e dosagem de 150g/t de MIBC.

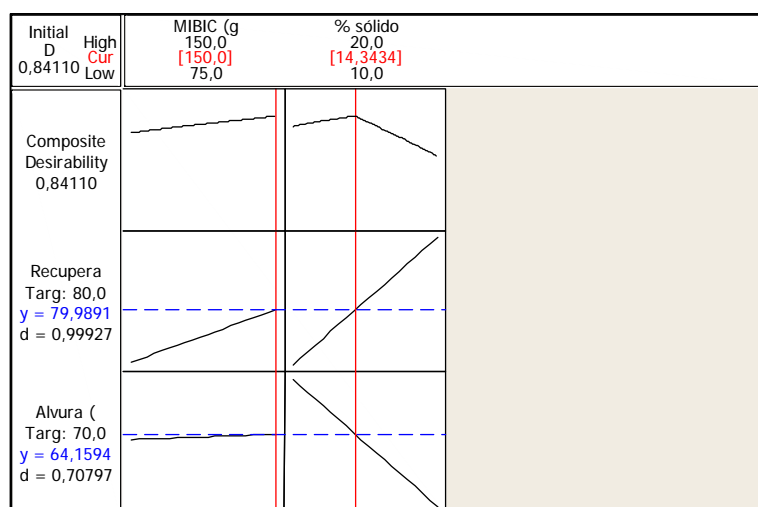


Figura 50: Otimização conjunta para alvura e recuperação em massa do produto concentrado dos ensaios de flotação

Desta forma, estabeleceram-se os parâmetros ótimos para a obtenção dos valores predefinidos das variáveis respostas alvura e recuperação em massa. Os valores para os parâmetros otimizados referentes às variáveis que apresentaram significância nas variáveis alvura e recuperação em massa foram:

- Dosagem de 150 g/t do espumante (MIBC);
- Porcentagem de sólidos de 14% (polpa contendo 245g de finos de pedra sabão).

Com relação às demais variáveis não significativas dentro do intervalo de variação adotado, definiram-se os valores referentes aos seus respectivos níveis mínimos objetivando-se um menor custo de operação. São eles:

- Dosagem de 500 g/t de coletor (querosene);
- Dosagem de 500 g/t de depressor (metassilicato de sódio);
- pH neutro;

- Rotação de 1200 rpm;
- Tempo de condicionamento do depressor de 5 minutos;
- Tempo de condicionamento do coletor de 5 minutos.

A análise química dos flotados referentes aos ensaios do planejamento fatorial é apresentada na Tabela 29. A composição química dos afundados encontram-se na Tabela 44 do Apêndice III.

Como observado na Tabela 29, para o constituinte As, constata-se sua presença em apenas 7 dos concentrados, sendo válido ressaltar que, os baixos teores do elemento em questão se encontram bem próximos do limite de quantificação do instrumento (ICP-OES) e abaixo do limite editado pela CETESB (2000) que é de 50 ppm.

De uma forma geral, os constituintes Cu, CaO e TiO<sub>2</sub> apresentaram reduções médias em seus teores de 41,0, 25,1 e 24,9%, respectivamente, nos concentrados quando comparados a seus valores iniciais na amostra global abaixo de 74µm (200#). Com relação ao Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e o Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, as reduções médias foram de 45,8 e 15,0%, respectivamente. Vale ressaltar que, um sensível aumento nos teores destas impurezas é observado nos ensaios referentes à porcentagem de sólidos em seu nível máximo, ou seja, de 20% de sólidos. Este fato se deve a um maior arraste de impurezas quando se utiliza uma polpa com maior porcentagem de sólidos. Já quando se toma como referência apenas os ensaios referentes ao nível mínimo de porcentagem de sólido (10%), as reduções médias chegam a 52,9% para o Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e 17,5% para o Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Os principais constituintes, MgO e SiO<sub>2</sub>, não apresentaram variações significativas em seus teores quando relacionados entre si nos 32 ensaios realizados.

Com base na otimização dos parâmetros, a partir dos ensaios do planejamento fatorial, estabeleceu-se as condições ótimas visando uma recuperação em massa e alvura teóricas de 80,0% e 64,2% respectivamente. Os resultados práticos dos ensaios, em duplicata, foram condizentes, tendo a recuperação em massa alcançado um valor médio de 85,65%, ou seja, acima do esperado. A alvura média do concentrado foi de 63,5%. Realizou-se também uma flotação otimizada com duas etapas *cleaner*, o que promoveu uma recuperação em massa e alvura final de médias de 64,01 e 68,57%, respectivamente. Os balanços de massa referentes às flotações otimizadas, *rougher* e *cleaner*, em questão estão apresentados nas Tabelas 40 e 41 do Apêndice II.

Tabela 20: Teores dos produtos purificados dos ensaios de flotação

Ensaio	ppm					%						
	As	Cu	Ni	Pb	Zn	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	TiO <sub>2</sub>	PPC	SiO <sub>2</sub> *
1	9,77	7,75	2047	33,6	67,7	1,38	0,0406	3,98	28,4	0,0404	5,36	60,8
2	9,53	7,01	2097	16,7	67,7	1,03	0,0345	3,83	28,6	0,0350	5,23	61,3
3	<LQ	9,52	2030	17,5	68,6	1,56	0,0415	4,14	28,2	0,0442	5,79	60,2
4	9,49	7,28	2101	15,6	65,9	1,01	0,0305	3,82	27,9	0,0354	6,04	61,1
5	<LQ	8,23	2085	11,8	69,6	1,25	0,0389	4,05	28,3	0,0367	5,31	61,0
6	9,93	8,15	2102	11,9	67,9	1,25	0,0364	3,94	28,0	0,0367	5,41	61,3
7	<LQ	8,39	2117	13,6	70,5	1,36	0,0357	4,14	27,6	0,0394	5,92	60,9
8	<LQ	7,06	2114	17,7	66	1,01	0,0344	3,75	28,3	0,0335	5,74	61,2
9	<LQ	7,74	2132	12,5	67,4	1,02	0,031	3,85	28,4	0,0375	4,96	61,7
10	<LQ	8,58	2123	17,2	71,7	1,42	0,0421	4,23	28,7	0,0404	5,29	60,3
11	<LQ	7,42	2115	13,7	66,3	1,07	0,0331	3,87	28,5	0,0361	6,12	60,4
12	<LQ	7,28	2144	12,9	72,3	1,03	0,0306	3,78	28,8	0,0353	5,21	61,1
13	<LQ	6,93	2134	13,6	85,1	0,99	0,0317	3,88	28,1	0,0350	5,22	61,8
14	<LQ	8,26	2090	13,1	68,5	1,35	0,0347	4,09	27,9	0,0389	5,91	60,7
15	<LQ	8,45	2136	11,9	69,9	1,4	0,0416	4,03	27,8	0,0378	5,4	61,3
16	<LQ	7,83	2122	15,6	69,3	1,29	0,0366	3,98	28,4	0,0379	5,39	60,9
Alimentação	11,1	13,4	1956	<LQ	85,8	2,27	0,058	4,7	27,7	0,0513	5,98	59,2
<i>LQ</i>	<i>9,45</i>	<i>0,923</i>	<i>2,35</i>	<i>8,3</i>	<i>0,55</i>	<i>0,00676</i>	<i>0,00232</i>	<i>0,0105</i>	<i>0,0</i>	<i>0,00021</i>	-	-
<i>LQ= Limite de Quantificação \ Flotado = concentrado</i>												
<i>(*) SiO<sub>2</sub> foi calculado por diferença (100 - PPC e teores de elementos maiores)</i>												



Tabela 20: Teores dos produtos purificados dos ensaios de flotação (continuação)

Ensaio	ppm					%						
	As	Cu	Ni	Pb	Zn	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	TiO <sub>2</sub>	PPC	SiO <sub>2</sub> *
17	<LQ	7,48	2102	15,1	67,9	1,09	0,0317	3,89	28,0	0,0375	5,96	61,0
18	<LQ	7,96	2112	15,2	67,8	1,16	0,0343	4,02	28,2	0,0383	6,73	59,9
19	<LQ	7,12	2114	13,4	66,7	0,99	0,0334	3,79	28,0	0,0342	5,21	61,9
20	9,47	7,09	2111	11,9	69,4	1,12	0,0363	3,92	28,1	0,0367	5,85	61,0
21	<LQ	7,13	2132	13,6	67,4	1,08	0,0317	3,86	28,3	0,0370	5,33	61,4
22	<LQ	8,69	2107	40	106,1	1,47	0,0367	4,27	27,9	0,0443	5,49	60,8
23	<LQ	8,53	2213	10,5	73,5	1,47	0,0361	4,22	29,1	0,0410	5,42	59,7
24	<LQ	8,28	2144	11,8	69,7	1,38	0,0367	4,11	28,3	0,0399	5,41	60,7
25	<LQ	8,7	2127	13,5	69	1,36	0,0354	4,1	28,7	0,0390	5,25	60,6
26	9,78	7,35	2131	18,7	79,5	1,1	0,0366	3,98	28,3	0,0637	5,24	61,2
27	<LQ	7,81	2122	16,1	68	1,05	0,0319	3,9	28,5	0,0350	5,85	60,7
28	<LQ	8,49	2143	14,3	72	1,43	0,0365	4,21	28,3	0,0408	5,48	60,5
29	<LQ	7,1	2086	15	66,5	0,97	0,0299	3,76	27,9	0,0333	5,85	61,5
30	<LQ	8,76	2131	11,1	71,6	1,48	0,0404	4,19	28,0	0,0407	5,48	60,8
31	9,85	8,43	2135	13,7	69,8	1,45	0,0366	4,26	28,1	0,0437	5,33	60,8
32	<LQ	7,22	2133	13,9	67,1	1,11	0,0304	3,9	28,6	0,0352	5,34	61,0
Alimentação	11,1	13,4	1956	<LQ	85,8	2,27	0,058	4,7	27,7	0,0513	5,98	59,2
LQ	9,45	0,923	2,35	8,3	0,55	0,00676	0,00232	0,0105	4,6E-05	0,00021	-	-
<i>LQ= Limite de Quantificação \ Flotado = concentrado</i>												
<i>(*) SiO<sub>2</sub> foi calculado por diferença (100 - PPC e teores de elementos maiores)</i>												

Na figura 51 estão apresentados os valores de recuperação em massa e alvura para a condição otimizada pelo software MINITAB 15 e do ensaio experimental efetuado nas condições otimizadas, bem como da amostra -74 $\mu$ m. Como pode ser observado, os resultados obtidos (RM% = 86,65 e alvura = 63,5%) foram coerentes com os valores preditos pela otimização.

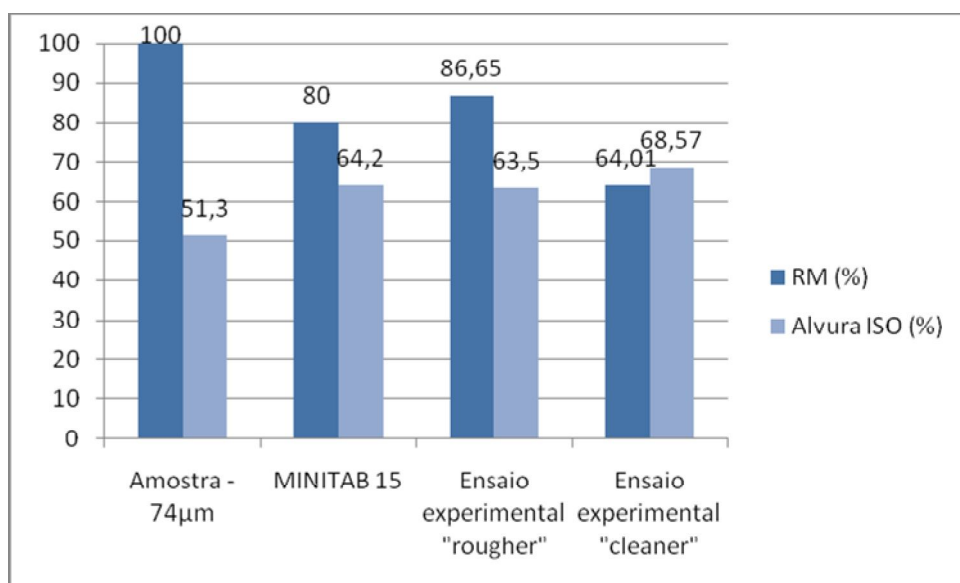


Figura 51: Resultados dos ensaios de flotação otimizados

A Tabela 21 apresenta os resultados referentes à composição química média dos flotados da etapa *rougher* e *cleaner* dos ensaios efetuados na condição otimizada do planejamento de experimentos. Como se pode observar, para a etapa *cleaner* a redução média do  $Fe_2O_3$  foi de 24%, chegando a valores significativos para o  $Al_2O_3$  e o  $CaO$ , cujos teores sofreram reduções médias de 66,2% e 69,0%, respectivamente. O constituinte  $Cu$  também merece destaque com apenas 0,926 ppm de concentração, valor este que equivale a um percentual médio de redução de 93%. Os teores dos afundados se encontram na Tabela 45 do Apêndice III.

Tabela 21: Resultado das análises químicas para os concentrados das etapas *rougher* e *cleaner* da flotação otimizada

Teor	Constituinte	Alimentação	<i>Rougher</i>	<i>Cleaner</i>	LQ
ppm	As	11,1	<LQ	<LQ	9,45
	Cu	13,4	3,45	0,926	0,923
	Ni	1956	2096	2126	2,35
	Pb	<LQ	<LQ	8,80	8,30
	Zn	85,8	67,0	64,4	0,550
%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,27	1,21	0,767	0,00676
	CaO	0,0580	0,0260	0,0180	0,00232
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,70	4,00	3,57	0,0105
	MgO	27,7	28,3	27,7	0,000046
	TiO <sub>2</sub>	0,0513	0,0383	0,0304	0,000212
	PPC	5,98	5,27	5,20	-
	SiO <sub>2</sub> (*)	59,2	61,1	62,7	-
<i>LQ= Limite de Quantificação \ Flotado = concentrado</i>					
<i>(*) SiO<sub>2</sub> foi calculado por diferença (100 - PPC e teores de elementos maiores)</i>					

Três etapas de deslamagem foram realizadas a fim de se eliminar a fração argilosa dos finos de pedra sabão prejudicial à flotação. Através de uma etapa de deslamagem, com 94% de recuperação em massa, obteve-se um produto deslamado de alvura mais elevada acompanhado de uma lama mais escura, com alvuras ISO de 59% e 33% respectivamente. Com um aumento de 7,7 pontos percentuais na alvura, a fração deslamada foi então submetida a duas etapas distintas de flotação nas condições otimizadas pelo software MINITAB 15. Os resultados estão apresentados nos histogramas da Figura 54.

- O processo *rougher* apresentou concentrados com alvura média de 67,17% de alvura, um ganho médio de 3,7 pontos percentuais com relação ao concentrado *rougher* da flotação otimizada não deslamada e recuperação em massa de 86,11%. Levando-se em consideração a massa da lama perdida na deslamagem dos finos de pedra sabão, a recuperação em massa foi de 81,0%. O balanço de massa, bem como as alvuras dos afundados estão apresentados nas Tabelas 42 do Apêndice II.

Com relação aos teores dos constituintes presentes no concentrado (Tabela 31), não houve variações significativas quando comparados aos constituintes da flotação otimizada *rougher* com alimentação não deslamada (Tabela 30), salvo apenas o Cu e o

$\text{Al}_2\text{O}_3$  com reduções relativas de 47,8% e 18% respectivamente. O Pb, diferentemente dos outros testes, não foi detectado neste concentrado, podendo este estar presente em concentração inferior ao limite de detecção.

- O processo *cleaner*, realizado em 2 etapas, promoveu um ganho de alvura alcançando um valor médio de 70,77%. A recuperação em massa foi de 60,85%, considerando também a perda de massa ocorrida na etapa de deslamagem. O balanço de massa, bem como as alvuras dos afundados se encontram nas Tabela 43 do Apêndice II.

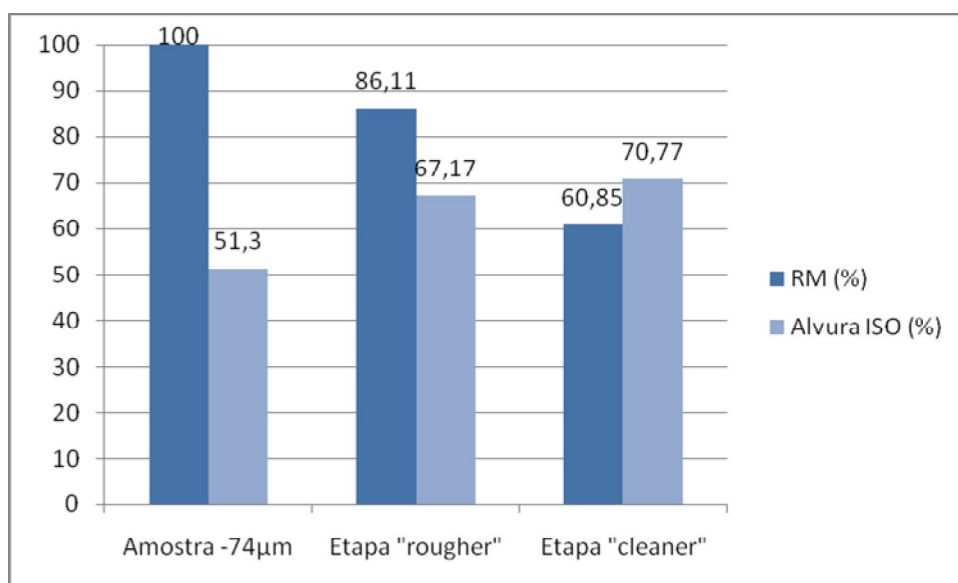


Figura 52: Resultados dos ensaios rougher e duas etapas cleaner para alimentação deslamada

Como apresentado na Tabela 22, observa-se uma redução nos teores de alguns dos contaminantes considerados como impurezas e um conseqüente aumento do constituinte MgO, alcançando um teor 29,1%. Com relação aos constituintes Cu,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , cada um sofreu reduções respectivas de 84,40, 64,54 e 24,04% quando comparados aos teores da alimentação. A composição química referente aos afundados das etapas rougher e cleaner estão apresentados na Tabela 46 do Apêndice III.

Tabela 22: Resultado das análises químicas dos concentrados das etapas *rougher* e *cleaner* da flotação otimizada com alimentação deslamada

Teor	Constituinte	Alimentação	<i>Rougher</i>	<i>2º Cleaner</i>	LQ
ppm	As	11,1	<LQ	<LQ	9,45
	Cu	13,4	1,80	2,09	0,923
	Ni	1956	2089	2097	2,35
	Pb	<LQ	<LQ	10,2	8,30
	Zn	85,8	68,0	62,4	0,550
%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,27	0,99	0,805	0,00676
	CaO	0,0580	0,0247	0,0157	0,00232
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,70	4,03	3,57	0,0105
	MgO	27,7	27,9	29,1	0,000046
	TiO <sub>2</sub>	0,0513	0,0432	0,0328	0,000212
	PPC	5,98	5,33	5,16	-
	SiO <sub>2</sub> (*)	59,2	61,7	61,3	-
<i>LQ= Limite de Quantificação</i>					
(*) SiO <sub>2</sub> foi calculado por diferença (100 - PPC e teores de elementos maiores)					

Na Figura 53 estão apresentados os resultados dos ensaios de flotação otimizada efetuados com polpa a 10% de sólidos, porcentagem na qual o arraste de partículas contaminantes pelas bolhas de ar em ascensão é relativamente reduzido. A flotação foi realizada em 2 etapas *cleaner*, sendo os testes realizados em duplicata. A recuperação mássica média foi de 61,7% alvura, tendo a alvura final do concentrado alcançado o valor de 71,7%, sendo este o concentrado de maior alvura dentre os demais testes realizados. Os teores dos constituintes presentes no flotado da etapa *cleaner* da flotação com polpa de alimentação de 10% de sólidos, são mostrados na Tabela 23. Os constituintes Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e TiO<sub>2</sub> apresentaram as maiores reduções quando comparadas aos demais ensaios realizados. Os valores médios de redução para os óxidos de Al, Fe e Ti foram de 68,9, 26,2 e 44,24% respectivamente. Já o óxido de magnésio apresentou o maior valor dentre os ensaios de flotação.

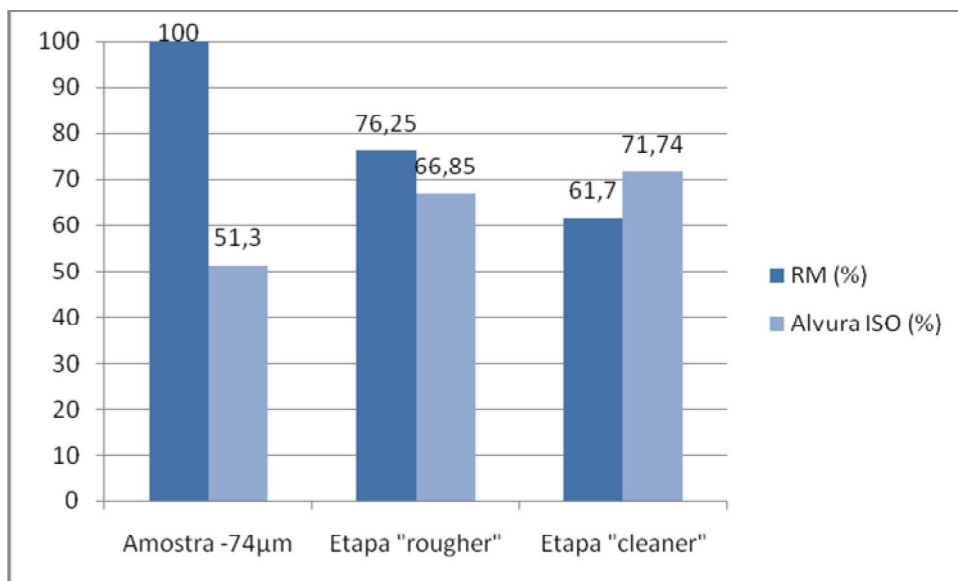


Figura 53: Resultados dos ensaios rougher e duas etapas cleaner para polpa com 10% de sólidos e 150g/t de MIBC

Tabela 23: Resultado das análises químicas da flotação otimizada e alimentação com 10% de sólidos

Teor	Constituinte	Alimentação	Flotado	LQ
ppm	As	11,1	<LQ	9,45
	Cu	13,4	1,95	0,923
	Ni	1956	2102	2,35
	Pb	<LQ	10,6	8,30
	Zn	85,8	62,2	0,550
%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,27	0,705	0,00676
	CaO	0,0580	0,0401	0,00232
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,70	3,47	0,0105
	MgO	27,7	29,3	0,000046
	TiO <sub>2</sub>	0,0513	0,0286	0,000212
	PPC	5,98	5,29	-
	SiO <sub>2</sub> (*)	59,2	61,2	-
<i>LQ= Limite de Quantificação \ Flotado = concentrado</i>				
<i>(*) SiO<sub>2</sub> foi calculado por diferença (100 - PPC e teores de elementos maiores)</i>				

De uma maneira geral, pode-se afirmar que os ensaios de flotação em bancada dos resíduos de pedra sabão abaixo de 74µm (200#) geraram concentrados capazes de atender às especificações para a sua utilização como matéria prima para as indústrias de

inseticidas, têxteis, fertilizantes, rações (veículo), papel (carga), tintas (espalhador). Estes são os mesmos segmentos industriais a que os produtos da mesa vibratória se adequaram, entretanto, os flotados possuem maiores valores de alvuras e menores teores de impurezas, fato este que agrega um maior valor aos produtos purificados. No entanto, para a aplicação como fertilizantes e inseticidas, há de se efetuar ensaios complementares que devem englobar estudos específicos de bioacúmulo de elementos traços (Pb, As, Cu, Ni e Zn) em plantas e animais.

#### 6.5.4 – Alveamento químico

##### 6.5.4.1 – Alveamento químico com ditionito de sódio ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ )

A Tabela 24 apresenta os resultados do planejamento fatorial de experimentos onde se analisou a alvura do produto alvejado.

Tabela 24: Resultados do planejamento fatorial de experimentos da fração abaixo de 74 $\mu\text{m}$  dos resíduos de pedra sabão com ditionito de sódio

Ensaio	Matriz de planejamento			Variável resposta
	A	B	C	Alvura (ISO)
1	2,5	30	5,0	57,15
2	2,5	30	3,5	59,06
3	1,5	30	3,5	56,28
4	1,5	30	3,5	56,46
5	2,5	30	3,5	58,89
6	1,5	20	5,0	56,87
7	1,5	20	5,0	57,01
8	1,5	30	5,0	56,74
9	1,5	20	3,5	56,9
10	2,5	20	5,0	59,26
11	2,5	30	5,0	59,12
12	2,5	20	5,0	59,15
13	2,5	20	3,5	59,01
14	2,5	20	3,5	59,32
15	1,5	20	3,5	56,8
16	1,5	30	5,0	57,03

A: Dosagem de ditionito (kg/t); B: Porcentagem de sólidos (%); C: pH da polpa

Utilizou-se o gráfico de Pareto (Figura 54) a fim de se comparar a magnitude relativa dos fatores bem como as suas significâncias estatísticas. Como se pode observar, somente a dosagem de ditonito se mostrou significativa em relação à alvura.

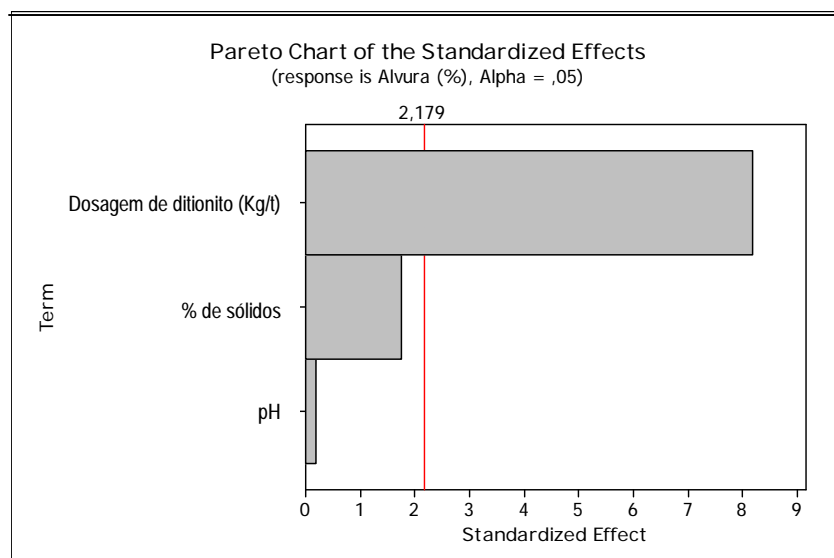


Figura 54: Gráfico de Pareto dos efeitos, dosagem de ditonito de sódio, porcentagem de sólidos e pH no alvejamento dos resíduos de pedra sabão

A análise da Figura 55 (gráfico dos efeitos principais) permite se obter informações a respeito do melhor nível para cada fator, bem como determinar se o fator apresenta realmente significância na resposta. Desta forma, observa-se que a dosagem de ditonito de sódio apresenta um efeito positivo, ou seja, 2 pontos percentuais na alvura foram ganhos quando se aumentou a concentração do reagente redutor (ditonito de sódio). Avaliando-se o comportamento do fator porcentagem de sólidos constata-se que, embora não apresente significância na resposta, ainda sim se percebe um pequeno efeito negativo em termos da alvura. Considerando-se então os efeitos significativos dos fatores, um melhor índice de alvura pode ser obtido trabalhando-se com: a dosagem de ditonito em seu nível máximo e porcentagem de sólidos em seu mínimo. Quanto ao pH, por não apresentar um efeito relevante na variabilidade da resposta alvura, pode-se se fixar seu valor em 5, minimizando-se assim o gasto de ácido sulfúrico utilizado como regulador do potencial hidrogeniônico (pH).



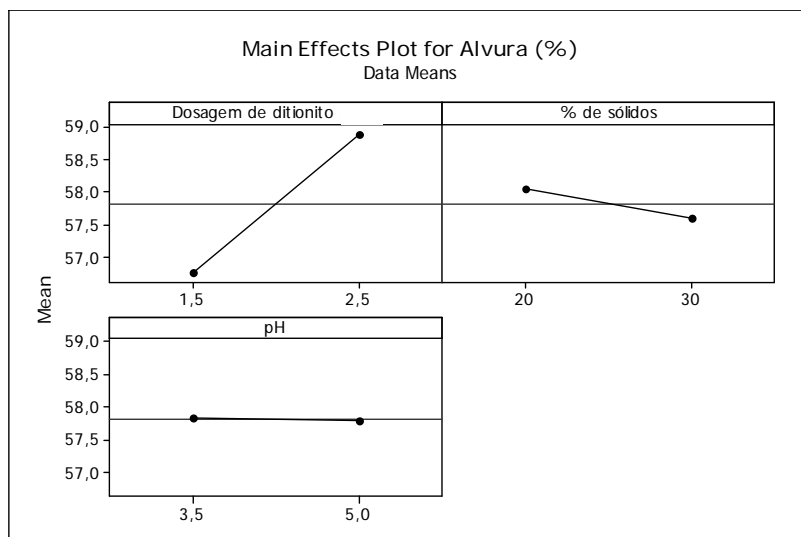


Figura 55: Gráfico dos efeitos principais, dosagem de ditionito de sódio (kg/t), porcentagem de sólidos e pH no alveamento dos resíduos de pedra sabão

De uma forma geral, observam-se interações pouco significativas entre os fatores apresentados na Figura 56. Ainda sim, constata-se que os melhores índices de alvura podem ser alcançados através da seguinte combinação: mantendo-se a dosagem do agente redutor (ditionito de sódio) em 2,5 kg/t acompanhada dos fatores porcentagem de sólidos e pH em seus níveis mínimos. Observa-se também um efeito positivo, embora relativamente menos significativo em termos de alvura, para os fatores dosagem de ditionito e porcentagem de sólidos em seus níveis mínimos enquanto se aumenta o valor do pH.

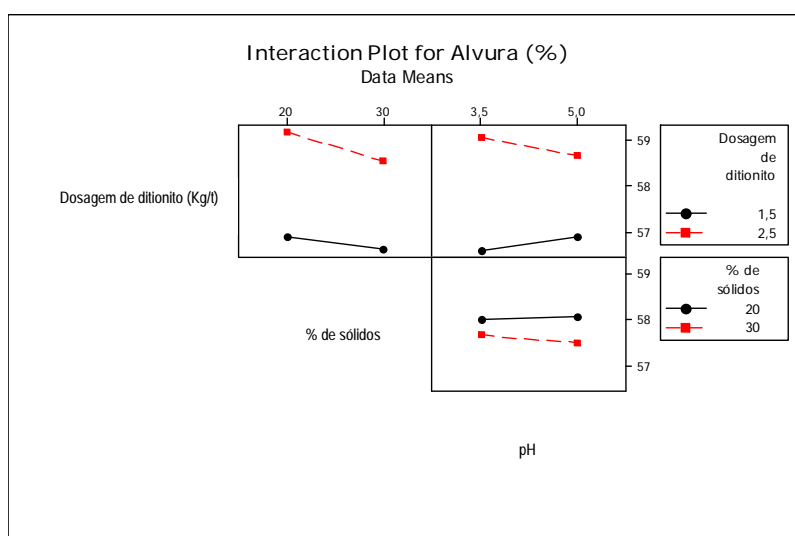


Figura 56: Gráfico das interações entre os efeitos para a alvura referente aos ensaios de alveamento com ditionito de sódio

O gráfico do cubo (Figura 57) mostra que um índice de alvura de 59,205% (ISO) pode ser obtido ao se trabalhar com os fatores dosagem de ditonito, porcentagem de sólidos e pH em níveis seus níveis máximo (2,5 kg/t), mínimo (20%) e máximo (5), respectivamente.

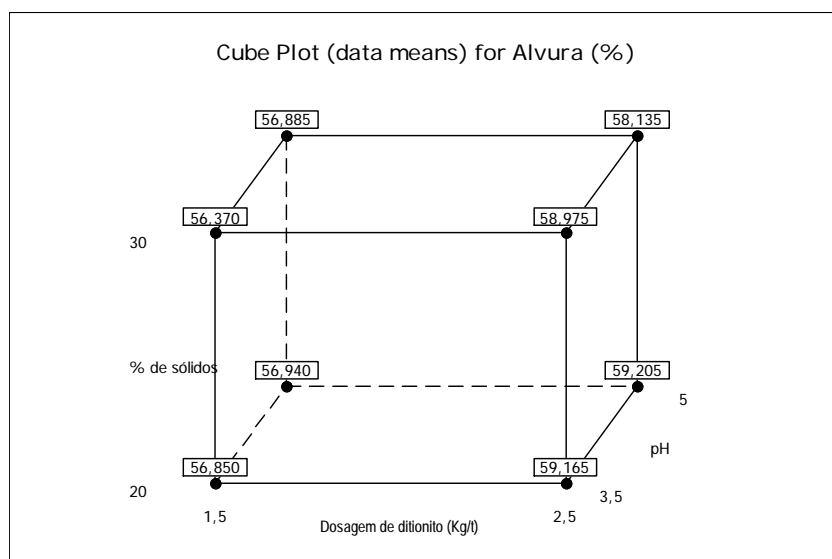


Figura 57: Gráfico do cubo para os resultados da alvura referente aos ensaios de alvejamento com ditonito de sódio

A faixa da dosagem de ditonito de sódio e porcentagem de sólidos nos valores de pH 3,5 e 5 são apresentados os gráficos de contorno nas figuras 58 e 59, respectivamente.

A partir dos gráficos de curvas de contorno verifica-se que os maiores valores de alvura (> 59,0%) estão dentro da faixa de 2,4 kg/t a 2,5 kg/t de ditonito de sódio, aproximadamente, para ambos os valores de pH. Relacionando-se a resposta em termos de porcentagem de sólidos observa-se que, para o pH de 3,5, o maior valor de alvura se estende por uma faixa maior de valores da porcentagem de sólidos quando comparada ao pH igual a 5. Verifica-se que a resposta alvura, em ambos os valores de pH, é muito mais influenciada pela dosagem de ditonito de sódio que pela porcentagem de sólidos.

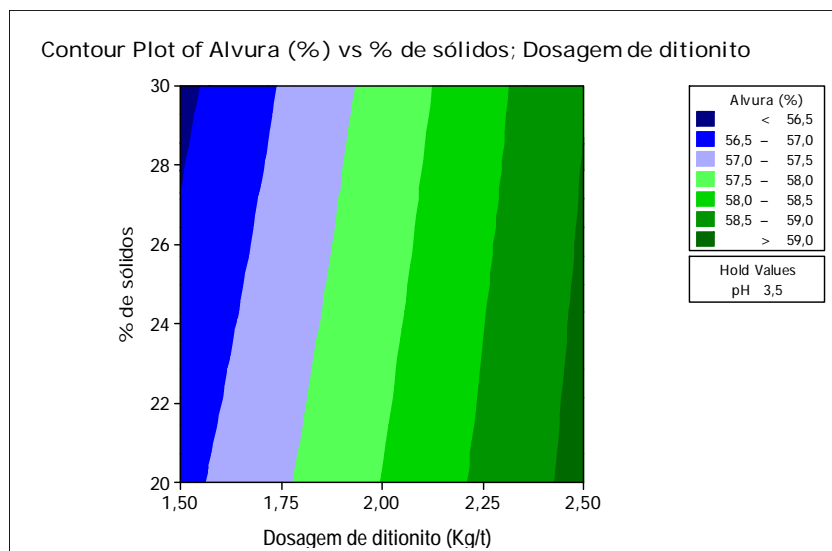


Figura 58: Curva de contorno para a alvura em função da dosagem de ditonito de sódio (g/t) e porcentagem de sólidos em pH 3,5

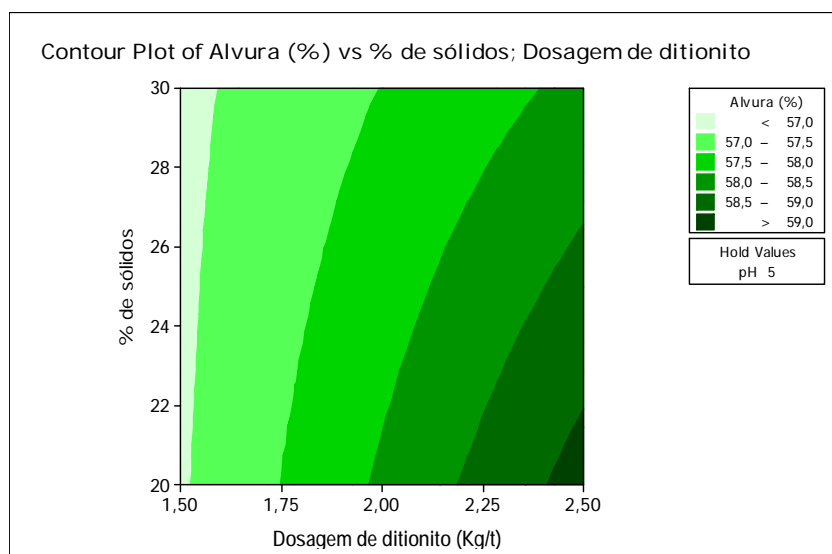


Figura 59: Curva de contorno para a alvura em função da dosagem de ditonito de sódio (g/t) e porcentagem de sólidos em pH 5

A otimização dos fatores para a obtenção de um maior índice de alvura está apresentada na Figura 60. A conjugação de 2,5 kg/t de ditonito em uma polpa de pH igual a 5 e, contendo 20% em massa de finos de pedra sabão, promoveu estatisticamente uma resposta em termos de alvura igual a 59,2055%. Partindo-se destes parâmetros

otimizados, realizou-se um novo alvejamento de um concentrado de flotação otimizada de alvura igual a 63,45%. O produto alvejado atingiu uma alvura final de 65,83%.

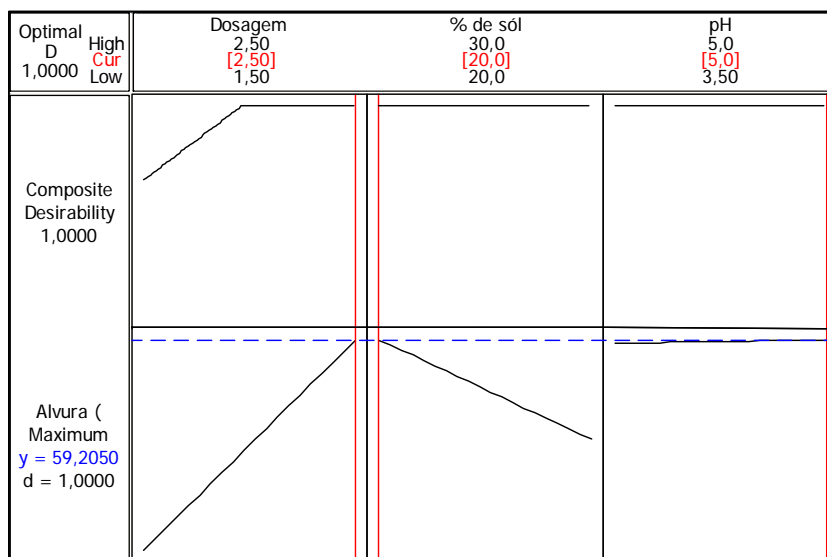


Figura 60: Otimização conjunta para alvura do produto alvejado dos ensaios de alvejamento com ditonito de sódio

Os resultados da análise química do processo de alvejamento com ditonito de sódio apresentado na Tabela 25 não indicou a presença de As e Pb, podendo estes estarem presentes abaixo do limite de quantificação do aparelho. O produto alvejado apresentou também reduções médias de 48,5, 52,9 e 26,2% para o Cu, o  $Al_2O_3$  e  $Fe_2O_3$ , respectivamente.

Na Figura 61 está apresentado o histograma contendo os valores de alvura da amostra abaixo de  $74 \mu m$  do produto flotado na condição otimizada anteriormente (dosagem de 150g/t do espumante (MIBC), porcentagem de sólidos de 14, dosagem de 500 g/t de coletor (querosene), dosagem de 500g/t de depressor (metassilicato de sódio), pH neutro, rotação de 1200 rpm, tempo de condicionamento do depressor de 5 minutos e tempo de condicionamento do coletor de 5 minutos), da condição otimizada pelo MINITAB 15 do alvejamento com ditonito de sódio (dosagem 2,5 kg/t de ditonito de sódio, pH igual a 5 e porcentagem de sólidos de 20%) e do alvejamento do concentrado de flotação otimizada com ditonito de sódio na condição otimizada.

Tabela 25: Teores do produto alvejado com ditionito de sódio para a amostra abaixo de 74µm

Ensaio	ppm					%						
	As	Cu	Ni	Pb	Zn	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	TiO <sub>2</sub>	PPC	SiO <sub>2</sub> *
1	<LQ	7,28	1959	<LQ	65,0	1,09	0,0253	3,43	29,9	0,0326	5,18	60,3
2	<LQ	7,25	1956	<LQ	65,1	1,10	0,0242	3,46	30,1	0,0329	5,16	60,1
3	<LQ	6,63	1965	<LQ	64,5	1,08	0,0204	3,61	30,4	0,0356	5,27	59,7
4	<LQ	6,92	1924	<LQ	64,6	1,07	0,0232	3,59	29,9	0,0355	5,19	60,3
5	<LQ	6,84	1953	<LQ	65,5	1,11	0,0256	3,40	30,0	0,0331	5,15	60,3
6	<LQ	7,13	1985	<LQ	65,1	1,05	0,0259	3,51	30,2	0,0352	5,21	60,0
7	<LQ	6,54	1974	<LQ	64,8	1,08	0,0241	3,53	29,8	0,0343	5,13	60,4
8	<LQ	7,18	1936	<LQ	64,7	1,02	0,0238	3,49	30,0	0,0353	5,25	59,8
<i>LQ</i>	<i>9,45</i>	<i>0,923</i>	<i>2,35</i>	<i>8,30</i>	<i>0,550</i>	<i>0,00676</i>	<i>0,00232</i>	<i>0,0105</i>	<i>0,000046</i>	<i>0,00021</i>	-	-
<i>LQ= Limite de Quantificação</i>												
<i>(*) SiO<sub>2</sub> foi calculado por diferença (100 - PPC e teores de elementos maiores)</i>												

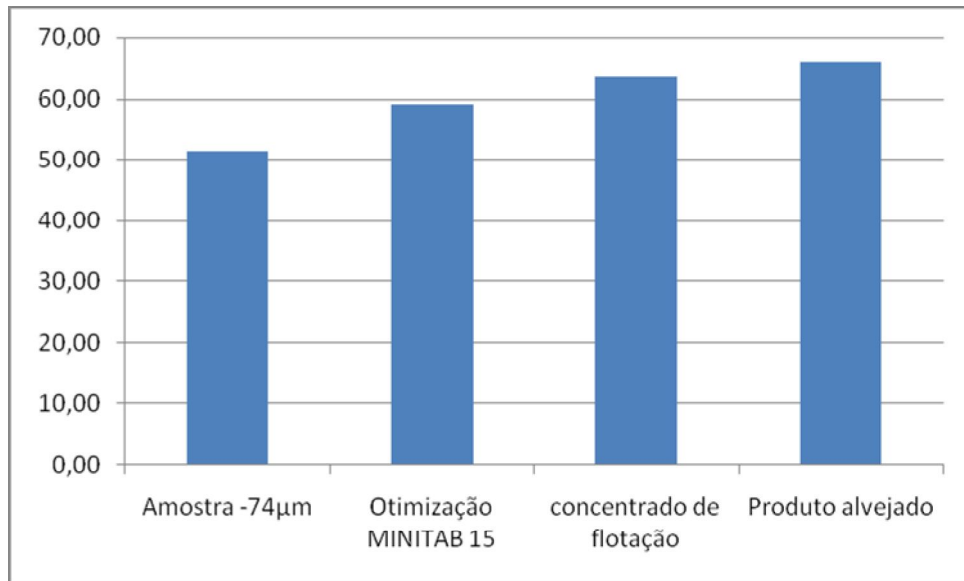


Figura 61: Resultados de alvura para o alvejamento com ditonito de sódio

Assim como os ensaios de separação magnética (apenas a fração acima de 74 µm), mesa vibratória e flotação em bancada dos resíduos de pedra sabão, o alvejamento de um concentrado de flotação otimizada com ditonito de sódio também gerou concentrados capazes de atender às especificações para a sua utilização como matéria prima para as indústrias de inseticidas, têxteis, fertilizantes, rações (veículo), papel (carga) e tintas (espalhador).

#### 6.5.4.2 – Alvejamento químico com ácido clorídrico (HCl)

De acordo com a Tabela 26, um ganho considerável de alvura foi obtido através desta operação de alvejamento partindo-se de um concentrado de flotação otimizada de 63,45% de alvura.

- A: Concentração de HCl (M)
- B: Temperatura (°C)
- C: Tempo (minutos)

Tabela 26: Resultados das variáveis respostas dos ensaios de alvejamento com ácido clorídrico segundo planejamento fatorial de experimentos

Ensaio	Matriz de planejamento			Variável resposta
	A	B	C	Alvura (ISO)
1	4	50	30	65,94
2	2	80	30	64,66
3	4	80	60	83,96
4	2	50	30	63,75
5	4	50	60	71,35
6	2	80	30	68,70
7	2	80	60	73,57
8	2	50	60	65,61
9	4	80	60	84,01
10	4	50	30	66,01
11	4	50	60	70,97
12	2	50	60	65,4
13	2	50	30	64,09
14	4	80	30	68,50
15	2	80	60	73,50
16	2	80	30	65,20

Observa-se a partir gráfico da Figura 62 que os efeitos da concentração de HCl (A), temperatura (B), tempo (C) e as interações entre os fatores B\*C, A\*C, A\*B e A\*B\*C, se mostram nesta ordem, como os mais significativos em termos da alvura final do produto lixiviado.

Analisando-se a Figura 63, a qual contém os gráficos dos efeitos principais, é possível obter a determinação da significância dos fatores frente à resposta alvura. Observa-se, de um modo geral, efeitos positivos sobre a alvura final do produto lixiviado, ou seja, a utilização das variáveis em seus níveis máximos promove um aumento nos índices de alvura. O fator tempo é o que apresenta maior influência no processo, visto que a sua respectiva linha, plotada no gráfico, é a de maior inclinação.

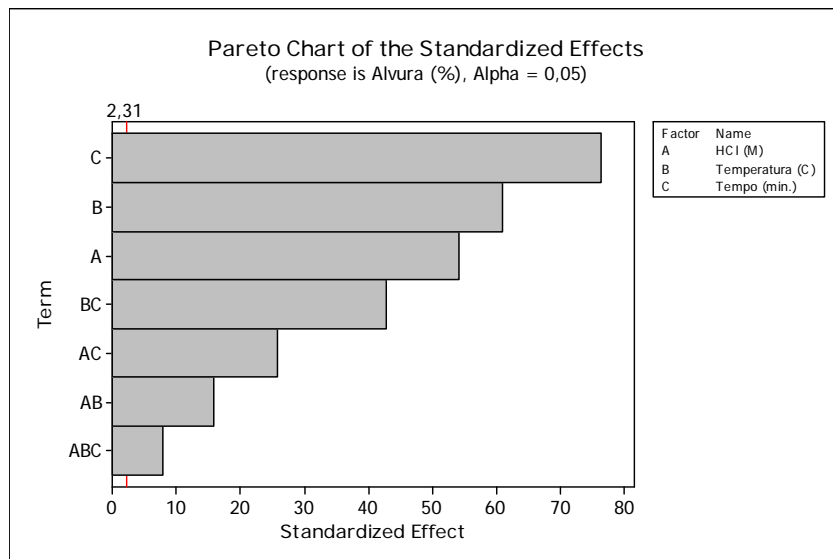


Figura 62: Gráfico de Pareto dos efeitos sobre a alvura dos ensaios de alveamento com ácido clorídrico

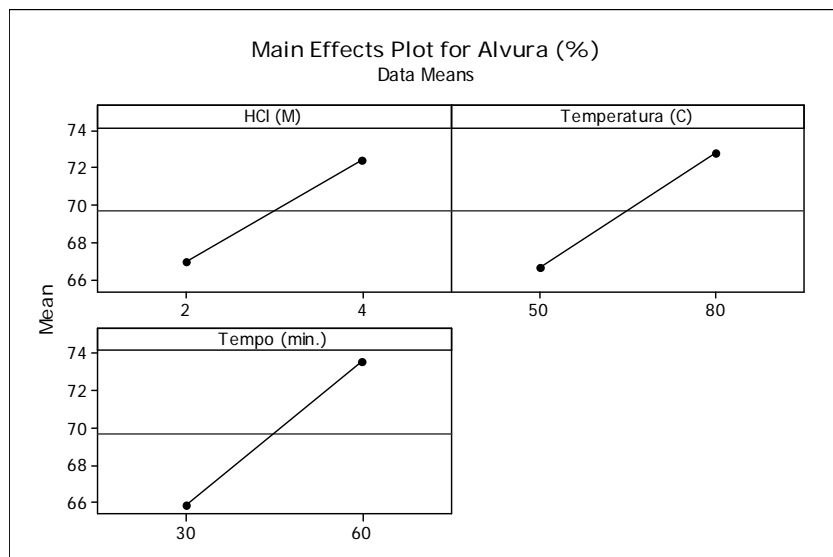


Figura 63: Gráfico dos efeitos principais sobre a alvura dos ensaios de alveamento com ácido clorídrico

A Figura 64 (gráfico de interação entre os fatores) mostra uma interação relativamente mais significativa entre a temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) e tempo (min.) de reação. Para



a maximização da alvura, a melhor combinação resulta da utilização das variáveis no níveis mais altos, o que é confirmado ao se analisar o gráfico do cubo apresentado na Figura 69.

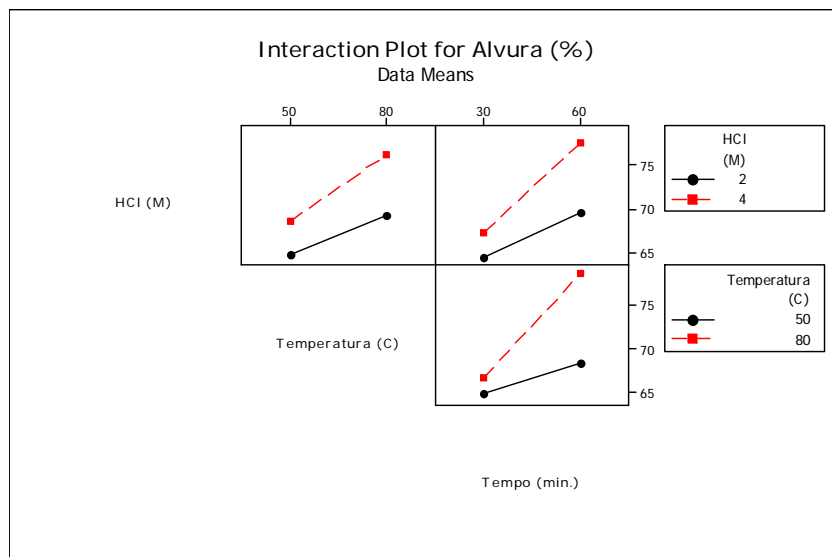


Figura 64: Gráfico das interações entre os efeitos concentração de HCl, temperatura e tempo de reação sobre a alvura referente aos ensaios de alveamento com ácido clorídrico

O gráfico do Cubo, apresentado na Figura 65, mostra em quais níveis as variáveis devem ser utilizadas no concentrado da flotação, a fim de se obter índices específicos de alvura. Trabalhando-se com uma concentração de 4M de HCl e mantendo-se a temperatura de reação a 80°C por 60 minutos, é possível obter uma alvura de 83,985%.

As curvas de contorno (Figuras 66 e 67) mostram que é possível alcançar valores máximos de alvura, dentro dos limites estabelecidos, trabalhando-se em uma pequena faixa de valores de temperatura e concentração de ácido clorídrico, próximos a seus níveis máximos. Desta forma, alvuras maiores que 68 e 82% para tempos de reação de 30 minutos e 60 minutos respectivamente, são obtidos em temperaturas acima de 75°C e concentrações de HCl superiores a 3,5M.

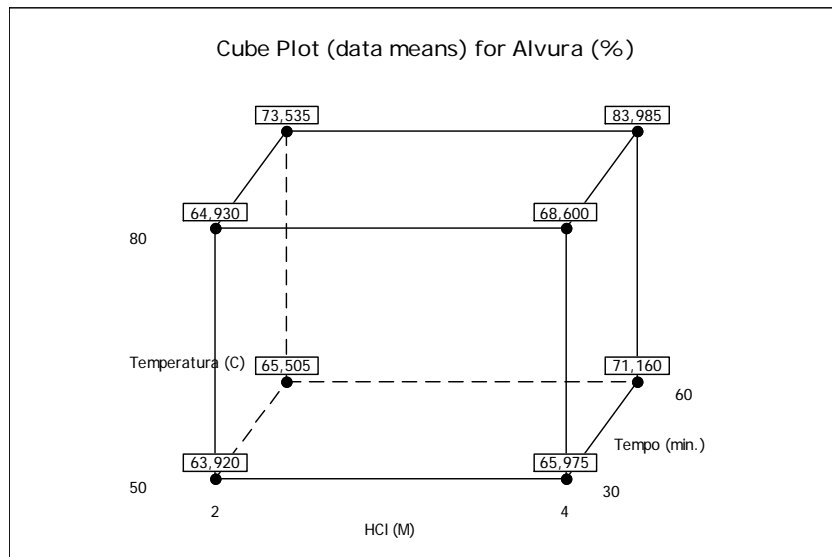


Figura 65: Gráfico do cubo para os resultados da alvura referente aos ensaios de alveamento com ácido clorídrico

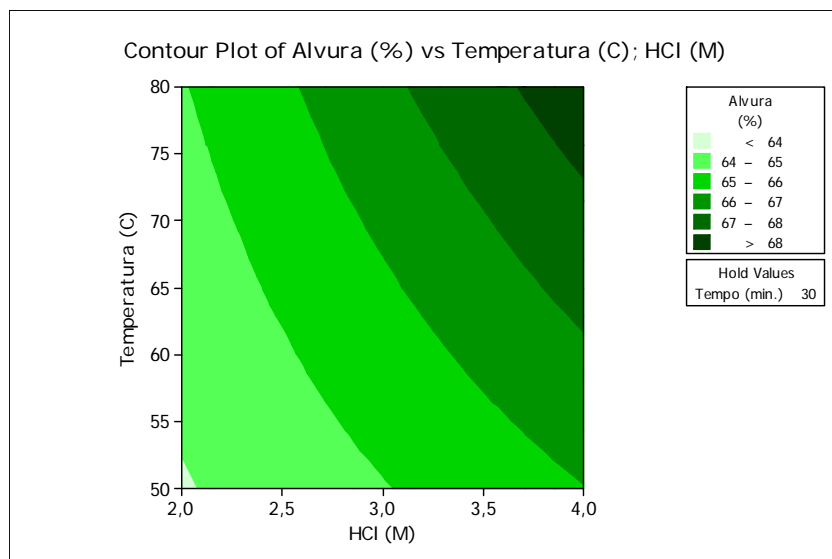


Figura 66: Curva de contorno da resposta alvura em função da concentração de HCl (M) e temperatura (C°) em um tempo de reação de 30 minutos

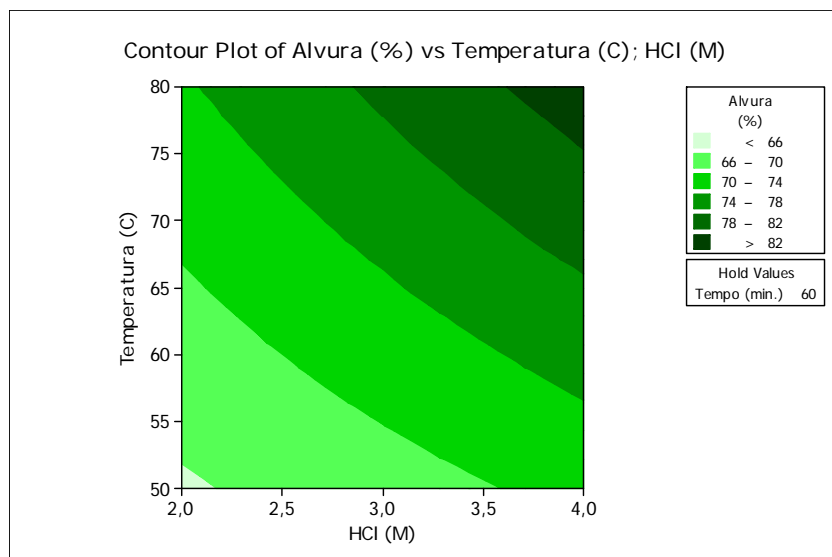


Figura 67: Curva de contorno da resposta alvura em função da concentração de HCl (M) e temperatura (C°) em um tempo de reação de 60 minutos

Através da ferramenta Resposta Otimizada (Figura 68) estabeleceu-se os parâmetros otimizados necessários para se obter uma alvura de 83,985%. Sendo assim, as condições de trabalho em termos da resposta alvura são: temperatura de 80°C, concentração de HCl igual a 4M e um tempo de reação de 60 minutos.

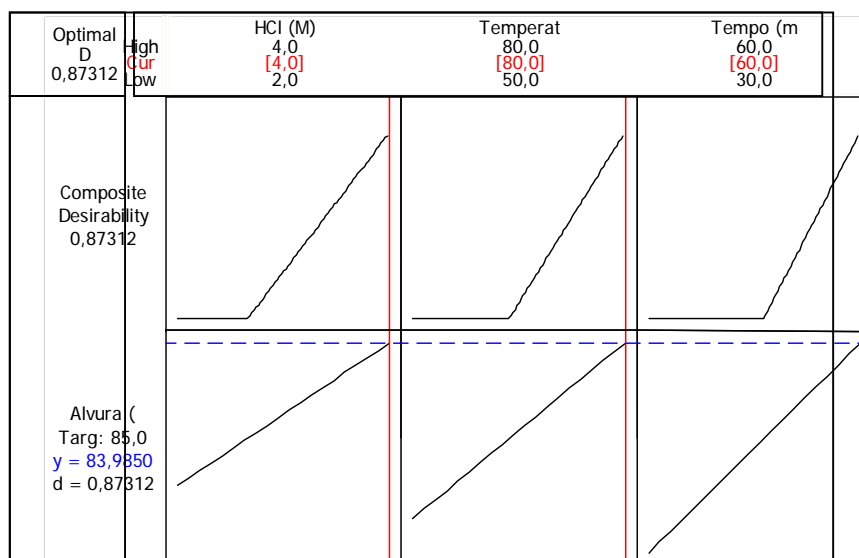


Figura 68: Otimização conjunta das variáveis concentração de HCl, temperatura e tempo de reação para alvura do produto alvejado dos ensaios de alvejamento com ácido clorídrico

Tomando como partida os parâmetros otimizados de alvejamento, realizou-se também uma lixiviação ácida de uma amostra bruta dos finos de pedra sabão com granulometria abaixo de  $74\mu\text{m}$ . O produto alvejado obteve uma alvura de 77,35% partindo de uma alvura inicial de 51,80%. O maior valor de alvura atingido diz respeito à lixiviação de um concentrado de flotação de 70,77%, onde foi possível obter produtos alvejados da ordem de 86,5% de alvura.

Na figura 69 estão apresentadas as alvuras referentes à amostra *in natura* abaixo de  $74\mu\text{m}$ , concentrado da flotação otimizada e concentrado de flotação após alvejamento com HCl.

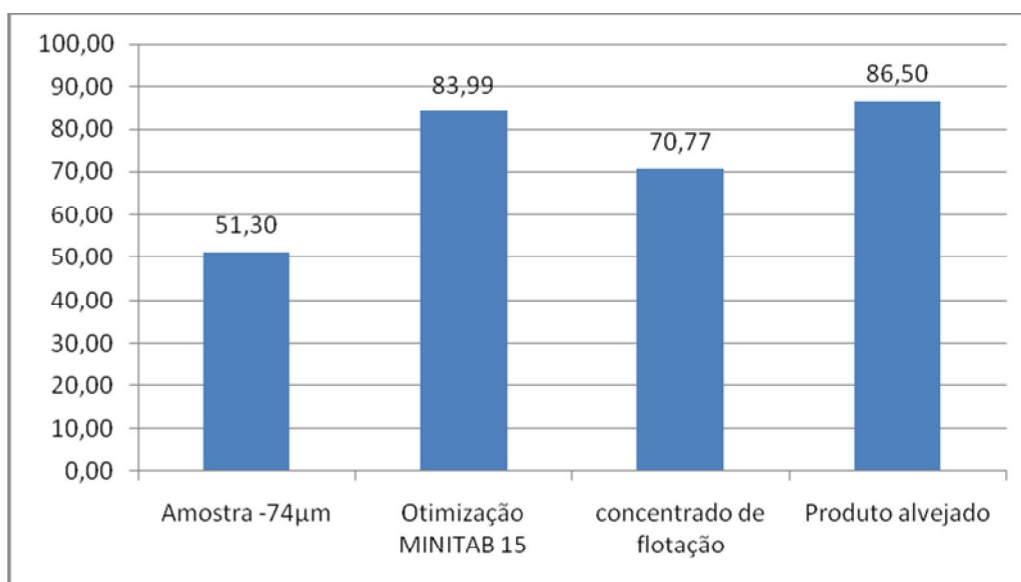


Figura 69: Resultados de alvura para o alvejamento com HCl

A análise química dos ensaios referentes ao planejamento fatorial do alvejamento químico com o ácido clorídrico é apresentada na Tabela 27. A não identificação do As e Pb no produto alvejado pode ser devido a seus teores se apresentarem abaixo do limite de quantificação do aparelho. As reduções máximas alcançadas nos produtos alvejados foram de 73,0, 40,9, 82,5 e 44,5% para o Cu, Zn,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , respectivamente. Para este mesmo ensaio, o qual promoveu as maiores reduções nos teores destes contaminantes, observou também um menor teor de MgO. Este fato pode ser devido à reduções dos carbonatos dolomita ( $\text{Ca,Mg}(\text{CO}_3)$ ) e/ou magnesita ( $\text{MgCO}_3$ ). Contatou-se

também uma redução de 66,7% no teor de CaO o qual pode ter a sua presença relacionada ao mineral dolomita. A não detecção destes carbonatos nos difratogramas pode ser devido a suas proporções estarem a baixo de 5% em peso.

O processo de alvejamento químico com HCl adequou ainda o produto alvejado às industriais, além daquelas supracitadas, de plásticos (carga e reforço) e plásticos antiaderentes. Com algumas restrições quanto aos teores de oxidados de ferro, os produtos deste alvejamento poderiam atender às exigências para os seguintes usos industriais: papel (cobertura), borracha (lubrificante), cerâmica branca e cosméticos (carga).

A Figura 70 apresenta um gráfico demonstrativo dos maiores ganhos em pontos percentuais referentes a cada ensaio de purificação realizado neste estudo.

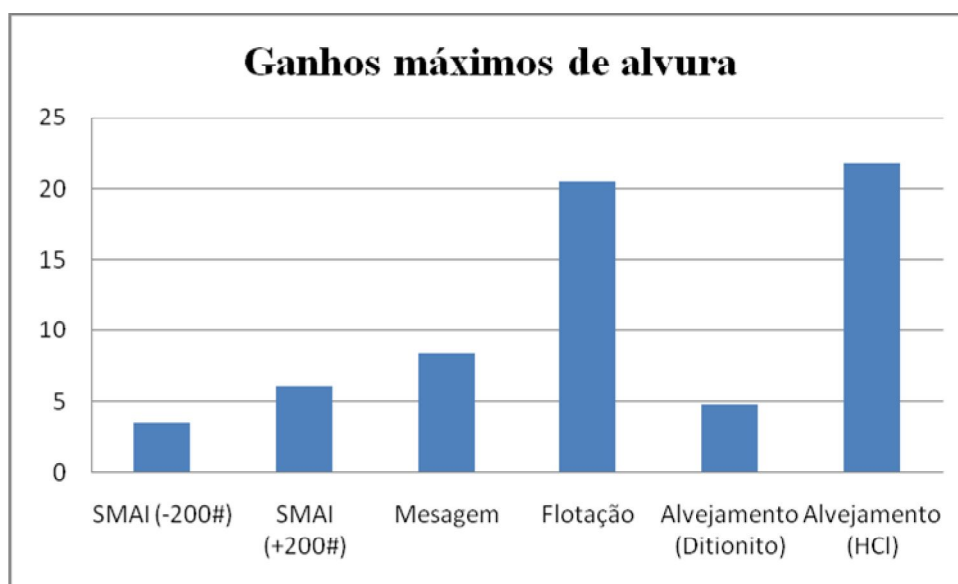


Figura 70: Ganhos de alvuras relativos aos processos de purificação

Tabela 27: Resultado das análises químicas do alvejamento químico com ácido clorídrico

Ensaio	mg/kg					%						
	As	Cu	Ni	Pb	Zn	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	TiO <sub>2</sub>	PPC	SiO <sub>2</sub> *
1	<LQ	3,62	1823	<LQ	51,4	0,898	0,0193	2,61	28,8	0,0324	5,84	62,3
2	<LQ	10,2	1929	<LQ	60,5	0,929	0,0218	3,08	29,8	0,0326	5,13	61,0
3	<LQ	6,60	1916	<LQ	58,9	0,951	0,0207	3,42	30,0	0,0343	5,21	60,3
4	<LQ	4,65	1923	<LQ	56,8	0,969	0,0287	3,23	29,9	0,0350	5,28	60,6
5	<LQ	3,74	1900	<LQ	56,1	0,823	0,0255	3,04	30,2	0,0335	4,44	61,7
6	<LQ	9,18	1940	<LQ	58,1	0,978	0,0250	3,28	30,0	0,0349	4,90	60,8
7	<LQ	6,70	1929	<LQ	59,3	0,977	0,0327	3,43	29,5	0,0352	4,97	61,1
8	<LQ	4,49	1936	<LQ	59,7	0,913	0,0350	3,29	30,9	0,0339	5,16	59,9
<i>LQ</i>	<i>9,45</i>	<i>0,923</i>	<i>2,35</i>	<i>8,30</i>	<i>0,550</i>	<i>0,00676</i>	<i>0,00232</i>	<i>0,0105</i>	<i>0,000046</i>	<i>0,00021</i>	-	-
<i>LQ= Limite de Quantificação</i>												
<i>(*) SiO<sub>2</sub> foi calculado por diferença (100 - PPC e teores de elementos maiores)</i>												

## 7 – CONCLUSÃO

A pesquisa realizada neste trabalho propiciou as seguintes conclusões:

- A análise granulométrica mostrou não existir uniformidade na granulometria das amostras analisadas. O  $d_{80}$  das amostras de resíduos de pedra sabão variou de 550 a 1575  $\mu\text{m}$ .

- Os difratogramas analisados permitiram a identificação de minerais comuns a todas as amostras analisadas, bem como em todas as frações granulométricas selecionadas, sendo eles o talco ( $\text{Mg}_3(\text{SiO}_{10})(\text{OH})_2$ ) e a nimita ( $(\text{Ni}, \text{Mg}, \text{Al})_6(\text{Si}, \text{Al})_4(\text{OH})_8$ ). Na amostra FPS01 (Cachoeira do Brumado), além do talco e nimita, também foram identificados os minerais tremolita ( $\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ ), ilmenita ( $\text{FeTiO}_3$ ), dolomita ( $\text{Ca}, \text{Mg}(\text{CO}_3)_2$ ), magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), magnesita ( $\text{MgCO}_3$ ) e quartzo ( $\text{SiO}_2$ ). As amostras FPS02, FPS03, FPS04 e FPS05 (Bandeiras) também apresentaram os minerais caolinita ( $\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) e clorita-serpentina ( $(\text{Ni}, \text{Mg}, \text{Al})(\text{Si}, \text{Al})\text{O}(\text{OH})$ ).

- O Potencial Zeta referente ao talco puro apresentou o PZC em um pH de 2,3, tanto em solução de 0,1M KCl quanto em água deionizada.

- Com base nas análises granuloquímica, pode-se deduzir a presença dos seguintes minerais: calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), rodocrosita ( $\text{MnCO}_3$ ) e arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ), sendo a presença deste último mais provável na amostra FPS01. O CaO presente está relacionado com o mineral dolomita e o  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  proveniente de óxidos/hidróxidos de ferro além da presença dos sulfetos pirita ( $\text{FeS}_2$ ) a calcopirita.

- Os melhores resultados em termo de alvura e recuperação em massa do concentrado não magnético foram alcançados trabalhando-se com um campo magnético gerado pela corrente elétrica de 7 ampères (A). Os valores de alvura sofreram um ganho de 3,53 e 6,04 pontos percentuais para as frações de -74  $\mu\text{m}$  (alvura inicial = 51,30%) e +74  $\mu\text{m}$  (alvura inicial = 59,34%) respectivamente. As recuperações em massa de mais alto valor para o produto não magnético também foram promovidas pela corrente de 7 (A), atingindo valores de 97,09% para a fração de -74  $\mu\text{m}$  e 64,42% para a de +74  $\mu\text{m}$ . A redução do teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  não sofreu variações significativas frente aos três campos magnéticos de diferentes magnitudes. O menor teor do óxido férrico remanescente nos produtos não magnéticos foram de 3,78 e 3,55% para as frações +74  $\mu\text{m}$  e -74  $\mu\text{m}$  respectivamente.

- Através do planejamento fatorial de experimentos determinou-se as condições ótimas de trabalho para a mesa vibratória. Os parâmetros otimizados em função da alvura e recuperação em massa foram: ângulo da mesa de 5°, vazão de 4,0kg/h e porcentagem de sólidos de 15% (fração dos finos superiores a 74 µm). O concentrado formado pela fração leve apresentou alvura de 67,50% e recuperação em massa de 22,5%. **Devido à baixa recuperação em massa do processo, uma etapa de cominuição da fração pesada, seguida de separação magnética de alta intensidade e flotação pode ser realizada a fim de se viabilizar, tanto uma melhora na recuperação quanto os valores de alvura.**

- Fazendo-se uso das ferramentas estatísticas do planejamento fatorial de experimentos foram determinados os parâmetros ótimos, dentro das faixas escolhidas para a obtenção dos valores prefixados das variáveis respostas alvura e recuperação em massa. São eles: dosagens de 500g/t de coletor (querosene), 500g/t de depressor (metassilicato de sódio) e 150g/t do espumante (MIBC), porcentagem de sólidos de 14% (fração dos finos inferiores a 74 µm), pH neutro, rotação de 1200 rpm e tempos de condicionamento de 5 minutos para o coletor e o depressor. Dentre as variáveis trabalhadas, ressaltam-se a porcentagem de sólidos e a dosagem de espumante, as quais afetaram de forma mais significativa as variáveis respostas. A alvura máxima foi de 71,81% acompanhada de uma recuperação em massa de 61,70%. Para a maior recuperação obtida (86,11%), uma alvura de 67,17% foi alcançada.

- Através do planejamento fatorial de experimentos foi possível se otimizar os parâmetros para os alvejamentos químicos em termos de alvura final do produto alvejado. Partindo-se de uma amostra de alvura de 51,57% e granulometria abaixo de 74 µm obteve-se um produto lixiviado de alvura máxima igual a 59,32% utilizando-se ditionito de sódio como agente redutor. Já quando se utilizou o HCl como alvejante químico, um ganho significativo de alvura foi alcançado, obtendo-se um produto final alvejado de alvura máxima igual a 86,5%, partindo-se de um flotado de 70,77%.

- Com base nos resultados obtidos na caracterização tecnológica e ensaios de purificação dos resíduos de pedra sabão, avaliou-se seus possíveis usos industriais. O rejeito ROM (run of mine) possui especificações para ser usado na fabricação de inseticidas, têxteis, fertilizantes e rações (veículo). A fração superior a 74 µm, devido a sua alvura da ordem de 59%, atende às especificações exigidas para a sua utilização como carga para papel. Tais utilizações se devem ao fato de que as especificações para



estes usos industriais dizem respeito, principalmente, à granulometria do material, a qual pode ser adequada por métodos de cominuição e peneiramento.

Os processos de separação magnética de alta intensidade (fração +74  $\mu\text{m}$ ), mesa vibratória, flotação e alvejamento químico com ditonito de sódio também atendem, além das especificações citadas anteriormente, às exigências para o uso em tintas como espalhador. Entretanto, possuem melhores índices de alvuras e menores teores de impurezas, fato este que agrega um maior valor aos produtos. **A flotação promoveu ganhos consideráveis de alvura e recuperação em massa de talco. Sendo assim, sugere-se a realização de uma etapa estagiada com separação magnética de alta intensidade seguida de uma flotação otimizada, utilizando-se para tanto, os parâmetros descritos anteriormente.**

O processo de alvejamento químico com HCl adequou ainda o produto alvejado às industriais, além daquelas supracitadas, de plásticos (carga e reforço) e plásticos antiaderentes. **Um maior ganho em termos de alvura ainda podem ser alcançados realizando-se uma etapa de separação magnética de alta intensidade, anteriormente, à flotação otimizada. Desta forma, pode-se reduzir o teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  remanescente e agregando, conseqüentemente, valor ao produto alvejado.**

## 8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AHMED M. M., IBRAHIM, G. A., HASSAN, M. M.A. Improvement of Egyptian talc quality for industrial uses by flotation process and leaching, *Int. J. Miner. Process.* 83, p.132-145, 2007.
2. BURDUKOVA, E., BECKER, M., BRADSHAW, D.J., LASKOWSKI, J.S. Presence of negative charge on the basal planes of New York talc, *Journal of Colloid and Interface Science* 305, p. 337-342, 2007.
3. DANA, J. D., e HURLBULT, C. S. Manual de Mineralogia, Livros Técnicos e Científicos. Vol II, Rio de Janeiro - R.J, p. 58-60, 1984.
4. DUARTE, A. J. Recursos minerais do Estado de Minas Gerais. *Metamig*. Belo Horizonte - MG, p. 57-58, 1982.
5. FILIPPOV, L.O., JOUSSEMET, R., IRANNAJAD, M., HOUOT, R., THOMAS, A. An approach of the whiteness quantification of crushed and floated talc concentrate, *Powder Technology* 105. p. 106-112, 1999.
6. FUERSTENAU, M. C., LOPEZ-VALDIVIESO A., FUERSTENAU, D. W. Role of hydrolyzed cations in the natural hydrophobicity of talc, *Int. J. Miner. Process.* 23. p. 161-170, 1988.
7. FUERSTENAU, M. C., JAMESON, G., YOON, R. Froth Flotation, a century of innovation. Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc. Colorado, USA. p. 51-52, 487-488, 2007.
8. HUEGE; FRED R. Purification of talc. Engelhard Minerals & Chemicals Corporation. 05/521,763, 1974).
9. JORDT-EVANGELISTA, H., SILVA, M.L., Rochas metaultramáficas de Lamim, sul do Quadrilátero Ferrífero, MG: contribuição ao conhecimento do protólito da pedra-sabão. *Revista Escola de Minas*, v.58, n.1, p. 11-20, 2005.
10. KUZVART, M., *Industrial Minerals and Rocks*. Elsevier. Amsterdam - Oxford - New York - Tokyo. p. 252-254, 1984.

11. LEFOND, L. F., Industrial Minerals and Rocks. American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, Inc. 4ª Edição. New York, N. Y., p. 1127-1139, 1975.
12. LEJA, J., Surface Chemistry of Froth Flotation. Kluwer Academic/Plenum Publishers. 2ª Edição. v. II. New York - Boston - Dordrecht - London - Moscow, p. 654, 2004.
13. LIMA, R. M. F., ALMEIDA, S. L. M., Beneficiamento do talco do Paraná por flotação em coluna. In: XVI ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E HIDROMETALURGIA. v. I., Rio de Janeiro - RJ, p. 181-189, 1995.
14. LIMA, R. M. F., PEREIRA, C. A., LUZ, J. A. M., Caracterização tecnológica de pedra sabão e resíduos de pedreiras e de oficinas de artesanato de pedra sabão de Ouro Preto, visando a um melhor aproveitamento econômico. Projeto de pesquisa, DEMIN - UFOP, p. 101, 2008.
15. LUZ, A., B. LINS, F. A. F. Rochas & Minerais industriais: usos e especificações. CETEM - MCT. Rio de Janeiro - RJ, p. 615-623, 2005.
16. PETTER, C. O., ALIAGA W., BATISTELLA A. M., SARTORI B., Estudo de beneficiamento de minério de talco. In: XXII ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA. v.I. Ouro Preto - MG, p.313-320, 2007.
17. PINHEIRO, J. C. F., Perfil analítico do talco. Boletim M.M.E / DNPM. Rio de Janeiro. nº 22, p. 1-4, 1973.
18. PONTES, I. F., LEAL FILHO, L. S., Purificação de talco do Paraná com flotação e branqueamento, In: XXI ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA. v. II. Natal - RN, p. 422-429, 2005.
19. PONTES, I. F., ALMEIDA, S. L. M. Talco. In: Rochas e Minerais Industriais Usos e especificações. Editores: Luz, A. B., Lins, F. F.. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, p. 607-628, 2005.
20. ROE, LAWRENCE, A. Talc beneficiating process, 05/334,929, 1973.

21. SHIMABUKURO, N. T., BALTAR, C. A. M. e VIDAL, F. W. H., Beneficiamento de talco: estudos em escala de bancada. Brasília: CETEM/DNPM. Série de Tecnologia Mineral. p. 33, 1979.
22. SARQUIS, P.E., GONZALEZ, M., Limits of the use of industrial talc - the carbonate effect. Minerals Engineering, v.11, n° 7, p. 657–660, 1998.
23. YEHIA A., AL- WAKEEL, M.I., Technical note talco separation from talc-carbonate ore to be suitable for diferente industrial applications Minerals Engeneering, v. 13, n. 1, p. 111-1 16, 1999.
24. YEKELER M., SONMEZ I., Effect of the hydrophobic fraction and particle size in the collectorless column flotation kinetics. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 121. p. 9-13, 1997.
25. <http://www.luzenac.com/mineralogy.htm>, acessado em fevereiro de 2009.

## 9 – APÊNDICES

9.1 – Apêndice I: Resultados das análises granulométricas das amostras de resíduos de pedra sabão

9.1.1 – Amostra de resíduo de pedra sabão de Cachoeira do Brumado

Tabela 28: Distribuição granulométrica da amostra FPS01

Amostra: FPS01						
Tamanho			Massa (g)	Frequência (%)		
#	µm	Média (µm)		Retida simples	Retida Acumulada	Passante Acumulada
10	1700	2052	5,1	5,2	5,2	94,8
16	1000	1350	7,3	7,4	12,6	87,4
20	850	925	4,7	4,8	17,4	82,6
28	600	725	6,5	6,6	24,0	76,0
35	425	513	6,6	6,7	30,7	69,3
48	300	363	6,0	6,1	36,8	63,2
65	212	256	7,1	7,2	44,0	56,0
100	150	181	7,5	7,6	51,6	48,4
150	106	128	8,7	8,8	60,4	39,6
200	74	90	6,2	6,3	66,7	33,3
270	53	64	2,3	2,3	69,0	31,0
325	45	49	2,7	2,7	71,7	28,3
400	37	41	1,9	1,9	73,6	26,4
-400	-37	32	25,9	26,4	100,0	-
		Total	98,5	100	-	-

9.1.2 – Amostra de resíduos de pedra sabão de Bandeiras

Tabela 29: Distribuição granulométrica da amostra FPS02

Amostra: FPS02						
Tamanho			Massa (g)	Frequência (%)		
#	µm	Média (µm)		Retida simples	Retida Acumulada	Passante Acumulada
8	2362	2845	3,5	3,1	3,1	96,9
10	1651	2007	3,4	3,0	6,1	93,9
14	1168	1410	5,3	4,7	10,8	89,2
16	1000	1084	1,6	1,5	12,3	87,7
20	833	917	3,7	3,3	15,6	84,4
28	589	711	5,2	4,6	20,2	79,8
35	417	503	4,9	4,4	24,6	75,4
48	295	356	10,1	9,0	33,6	66,4
65	208	252	8,7	7,8	41,4	58,6
100	147	178	8,6	7,7	49,2	50,8
150	104	126	10,2	9,1	58,3	41,7
200	74	89	3,4	3,0	61,3	38,7
270	53	64	12,3	11,0	72,3	27,7
325	45	49	2,8	2,5	74,8	25,2
400	38	42	4,8	4,3	79,2	20,8
-400	-38	32	23,3	20,8	100,0	-
Total			111,8	100,0	-	-

Tabela 30: Distribuição granulométrica da amostra FPS03

Amostra: FPS03						
Tamanho			Massa (g)	Frequência (%)		
#	$\mu\text{m}$	Média ( $\mu\text{m}$ )		Retida simples	Retida Acumulada	Passante Acumulada
8	2362	2845	6,8	5,9	5,9	94,1
10	1651	2007	5,0	4,4	10,3	89,7
14	1168	1410	9,0	7,8	18,1	81,9
16	1000	1084	3,1	2,7	20,7	79,3
20	833	917	5,3	4,6	25,3	74,7
28	589	711	6,9	6,0	31,4	68,6
35	417	503	5,0	4,3	35,7	64,3
48	295	356	8,5	7,4	43,1	56,9
65	208	252	8,1	7,0	50,1	49,9
100	147	178	8,4	7,3	57,3	42,7
150	104	126	9,9	8,6	65,9	34,1
200	74	89	6,8	5,9	71,9	28,1
270	53	64	8,7	7,5	79,4	20,6
325	45	49	3,4	2,9	82,3	17,7
400	38	42	4,9	4,3	86,5	13,5
-400	-38	32	15,5	13,5	100,0	-
Total			115,2	100,0	-	-

Tabela 31: Distribuição granulométrica da amostra FPS04

Amostra: FPS04						
Tamanho			Massa (g)	Frequência (%)		
#	μm	Média (μm)		Retida simples	Retida Acumulada	Passante Acumulada
8	2362	2845	1,8	1,5	1,5	98,5
10	1651	2007	2,8	2,3	3,9	96,1
14	1168	1410	3,7	3,1	7,0	93,0
16	1000	1084	3,4	2,9	9,9	90,1
20	833	917	2,7	2,2	12,1	87,9
28	589	711	5,3	4,5	16,6	83,4
35	417	503	5,5	4,7	21,3	78,7
48	295	356	4,8	4,0	25,3	74,7
65	208	252	3,8	3,2	28,5	71,5
100	147	178	4,8	4,1	32,6	67,4
150	104	126	7,6	6,4	39,0	61,0
200	74	89	2,3	1,9	40,9	59,1
270	53	64	18,6	15,8	56,6	43,4
325	45	49	3,8	3,2	59,8	40,2
400	38	42	4,8	4,0	63,8	36,2
-400	-38	32	42,7	36,2	100,0	-
Total			118,1	98,4754	-	-



Tabela 32: Distribuição granulométrica da amostra FPS05

Amostra: FPS05						
Tamanho			Massa (g)	Frequência (%)		
#	$\mu\text{m}$	Média ( $\mu\text{m}$ )		Retida simples	Retida Acumulada	Passante Acumulada
8	2362	2845	8,0	7,6	7,6	92,4
10	1651	2007	6,3	6,0	13,6	86,4
14	1168	1410	9,2	8,7	22,2	77,8
16	1000	1084	2,8	2,6	24,8	75,2
20	833	917	4,9	4,6	29,4	70,6
28	589	711	6,0	5,7	35,2	64,8
35	417	503	4,7	4,5	39,6	60,4
48	295	356	6,7	6,3	46,0	54,0
65	208	252	6,0	5,7	51,6	48,4
100	147	178	5,8	5,5	57,1	42,9
150	104	126	8,2	7,7	64,9	35,1
200	74	89	2,9	2,8	67,6	32,4
270	53	64	10,3	9,7	77,4	22,6
325	45	49	3,6	3,4	80,8	19,2
400	38	42	5,1	4,8	85,6	14,4
-400	-38	32	15,2	14,4	100,0	-
Total			105,7	92,3	-	-

Tabela 33: Distribuição granulométrica da amostra FPS06

Amostra: FPS06						
Tamanho			Massa (g)	Frequência (%)		
#	$\mu\text{m}$	Média ( $\mu\text{m}$ )		Retida simples	Retida Acumulada	Passante Acumulada
8	2362	2845	9,8	4,8	4,8	95,2
10	1651	2007	7,9	3,9	8,6	91,4
14	1168	1410	10,9	5,3	14,0	86,0
16	1000	1084	5,2	2,5	16,5	83,5
20	833	917	7,0	3,4	19,9	80,1
28	589	711	9,3	4,5	24,4	75,6
35	417	503	10,7	5,2	29,6	70,4
48	295	356	9,5	4,6	34,3	65,7
65	208	252	7,0	3,4	37,7	62,3
100	147	178	7,4	3,6	41,3	58,7
150	104	126	10,2	5,0	46,3	53,7
200	74	89	6,5	3,2	49,4	50,6
270	53	64	14,1	6,9	56,3	43,7
325	45	49	15,5	7,6	63,9	36,1
400	38	42	18,0	8,8	72,7	27,3
-400	-38	32	56,0	27,3	100,0	-
Total			204,8	100,0	-	-

9.2 – Apêndice II: Balanços de massa dos ensaios de purificação

Tabela 34: Balanço de massa da separação magnética de alta intensidade

Fração granulométrica	Corrente (A)	Massa (g)			Perda (%)	Recuperação em massa(%)
		Fração magnética	Fração não magnética	Total		
+200#	3	36,93	62,53	99,46	0,54	62,53
	5	37,00	62,39	99,39	0,61	62,39
	7	31,88	67,42	99,30	0,70	67,42
-200#	3	7,21	92,3	99,51	0,49	92,3
	5	8,29	91,19	99,48	0,52	91,19
	7	2,27	97,09	99,36	0,64	97,09

Tabela 35: Balanço de massa da mesa vibratória

Ensaio	Massa (g)				Perda (%)	Recuperação em massa (%)
	Pesado	Misto	Leve	Total		
1	1175	450	305	1930	3,50	15,25
2	1171	465	282	1918	4,10	14,10
3	1157	435	330	1922	3,90	16,50
4	1221	485	233	1939	3,05	11,65
5	1168	445	314	1927	3,65	15,70
6	1039	505	380	1924	3,80	19,00
7	1182	460	287	1929	3,55	14,35
8	1152	440	333	1925	3,75	16,65

Tabela 36: Balanço de massa dos ensaios de flotação do planejamento fatorial

Ensaio	Massa (g)			Perda (%)	Recuperação em massa (%)	Alvura (ISO) afundado
	Flotado	Afundado	Total			
1	292,49	69,78	362,27	1,02	80,74	37,20
2	112,53	54,69	167,22	1,64	67,29	41,19
3	322,90	35,23	358,13	2,15	90,16	32,39
4	122,35	42,51	164,86	3,02	74,21	37,95
5	299,65	63,81	363,46	0,69	82,44	33,54
6	274,16	80,13	354,29	3,20	77,38	36,94
7	289,38	72,38	361,76	1,16	79,99	37,00
8	121,66	46,05	167,71	1,35	72,54	39,32
9	121,70	45,76	167,46	1,49	72,67	39,44
10	301,27	58,76	360,03	1,63	83,68	36,24
11	121,46	45,61	167,07	1,72	72,70	41,18
12	126,30	40,21	166,51	2,05	75,85	38,22
13	113,67	52,98	166,65	1,97	68,21	41,52
14	287,53	71,74	359,27	1,84	80,03	35,44
15	288,10	73,09	361,19	1,31	79,76	37,29
16	290,16	70,48	360,64	1,46	80,46	39,23
17	128,02	39,44	167,46	1,49	76,45	38,85
18	135,04	31,50	166,54	2,04	81,09	36,97
19	117,02	50,47	167,49	1,48	69,87	39,21
20	130,80	36,24	167,04	1,74	78,30	37,64
21	133,08	35,15	168,23	1,04	79,11	36,34
22	320,92	39,94	360,86	1,40	88,93	31,33
23	305,55	56,89	362,44	0,97	84,30	34,93
24	304,20	59,58	363,78	0,61	83,62	33,66
25	307,87	51,51	359,38	1,81	85,67	33,02
26	129,94	38,11	168,05	1,15	77,32	39,67
27	127,27	40,61	167,88	1,25	75,81	38,03
28	312,65	48,29	360,94	1,38	86,62	37,68
29	116,10	51,14	167,24	1,62	69,42	40,88
30	302,71	58,41	361,12	1,33	83,83	36,26
31	320,48	40,21	360,69	1,45	88,85	33,32
32	124,80	41,94	166,74	1,92	74,85	39,20

Tabela 37: Balanço de massa dos ensaios de flotação otimizada

Teste	Massa (g)			Perda (%)	RM%	Alvura (ISO)	
	Flotado	Afundado	Total			Flotado	Afundado
1	210,75	31,38	242,13	1,17	86,02	63,45	31,57
2	208,9	34,4	243,3	0,69	85,27	63,5	32,51
<i>RM% = Recuperação em Massa do Flotado</i>							

Tabela 38: Balanço de massa dos ensaios de flotação otimizada com duas etapas *cleaner*

Teste	Etapa	Massa (g)	RM%	Alvura (ISO)
1	Concentrado final	156,14	63,73	68,79
	Rejeito <i>rougher</i>	44,02	17,97	34,8
	Rejeito <i>cleaner</i>	19,42	7,92	45,17
	Rejeito <i>recleaner</i>	19,27	7,86	53,6
	Perda	6,15	2,51	-
	Alimentação recalculada	245	99,99	-
2	Concentrado final	157,87	64,44	68,34
	Rejeito <i>rougher</i>	43,18	17,62	33,91
	Rejeito <i>cleaner</i>	18,91	7,72	46,17
	Rejeito <i>recleaner</i>	20,98	8,56	53,43
	Perda	4,07	1,66	-
	Alimentação recalculada	245,01	100	-
<i>RM% = Recuperação em massa</i>				

Tabela 39: Balanço de massa dos ensaios de flotação otimizada com polpa de alimentação deslamada

Teste	Massa (g)			Perda (%)	RM%	Alvura (ISO)	
	Flotado	Afundado	Total			Flotado	Afundado
1	211,8	30,9	242,7	0,94	86,45	67,21	39,57
2	210,11	31,64	241,75	1,33	85,76	67,13	38,41
<i>RM% = Recuperação em Massa do Flotado</i>							

Tabela 40: Balanço de massa dos ensaios de flotação otimizada com polpa de alimentação deslamada e duas etapas cleaner

Teste	Produtos	Massa (g)	RM%	Alvura (ISO)
1	Concentrado final	158,62	64,74	70,89
	Rejeito <i>rougher</i>	29,97	12,23	35,41
	Rejeito <i>cleaner</i>	28,83	11,76	46,23
	Rejeito <i>re-cleaner</i>	22,67	9,25	54,94
	Perda	4,9	2,00	-
	Alimentação recalculada	244,99	99,98	-
2	Concentrado final	158,36	64,64	70,66
	Rejeito <i>rougher</i>	31,18	12,73	34,89
	Rejeito <i>cleaner</i>	27,94	11,4	46,58
	Rejeito <i>re-cleaner</i>	23,75	9,69	53,76
	Perda	3,77	1,54	-
	Alimentação recalculada	245	100	-
<i>RM% = Recuperação em massa</i>				

9.3 – Apêndice III: Teores dos ensaios de purificação

Tabela 41: Teores dos afundados dos ensaios de flotação

Ensaio	ppm					%						
	As	Cu	Ni	Pb	Zn	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	TiO <sub>2</sub>	PPC	SiO <sub>2</sub> *
1	15	29,2	1913	<LQ	112	6,31	0,168	7,73	26,1	0,108	7,63	51,9
2	15,5	22,9	1920	<LQ	99	4,889	0,128	6,63	26,4	0,088	6,9	55
3	16	24,3	1913	<LQ	105	5,52	0,14	6,99	25,8	0,101	7,21	54,2
4	17,32	28,5	1948	<LQ	114	6,15	0,142	7,66	26,3	0,103	7,72	51,9
5	17,1	28,6	1922	<LQ	111	6,15	0,158	7,41	25,8	0,102	7,56	52,8
6	13,5	26,9	1942	<LQ	110	6,16	0,153	7,5	26	0,104	7,49	52,6
7	14,16	26,5	1924	<LQ	110	6,16	0,142	7,41	26	0,102	7,59	52,6
8	15,62	24,6	1925	<LQ	107	5,57	0,139	7,05	26,4	0,098	7,46	53,3
9	14,45	25,4	1933	<LQ	107	5,67	0,132	6,99	26,1	0,097	7,54	53,5
10	16,81	31,1	1903	<LQ	120	7,12	0,177	8,03	26	0,113	8,08	50,5
11	15,45	26	1902	<LQ	110	6,03	0,149	7,55	27,6	0,101	7,57	51
12	15,43	27,7	1899	<LQ	111	6,32	0,138	7,59	26,3	0,105	7,67	51,9
13	18,35	23,4	1926	<LQ	100	5,16	0,134	6,57	26,1	0,089	7,15	54,8
14	18,97	30,5	1932	<LQ	119	7,08	0,166	8,13	25,8	0,115	8,08	50,6
15	19,74	26,5	1906	<LQ	111	6,29	0,153	7,62	26	0,108	7,53	52,3
16	17,91	28	1907	<LQ	113	6,49	0,156	7,74	26,1	0,104	7,69	51,7
<i>LQ</i>	<i>9,45</i>	<i>0,923</i>	<i>2,35</i>	<i>8,3</i>	<i>0,55</i>	<i>0,00676</i>	<i>0,00232</i>	<i>0,0105</i>	<i>4,6E-05</i>	<i>0,00021</i>	-	-
<i>LQ= Limite de Quantificação / Afundado = rejeito</i>												
<i>(*) SiO<sub>2</sub> foi calculado por diferença (100 - PPC e teores de elementos maiores)</i>												

Tabela 41: Teores dos afundados dos ensaios de flotação (continuação)

Ensaio	ppm					%						
	As	Cu	Ni	Pb	Zn	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	TiO <sub>2</sub>	PPC	SiO <sub>2</sub> *
17	As	Cu	Ni	Pb	Zn	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	TiO <sub>2</sub>	PPC	SiO <sub>2</sub> *
18	16,18	26,3	1916	<LQ	110	6,09	0,138	7,27	26	0,1	7,69	52,7
19	16,61	30,8	1851	<LQ	118	6,98	0,169	7,78	25	0,105	8,61	51,3
20	14,32	24,8	1899	<LQ	121	5,57	0,139	7,11	26,4	0,092	7,45	53,3
21	18,5	29,7	1892	<LQ	111	6,57	0,151	7,32	26	0,102	7,92	52
22	19,2	32,3	1879	<LQ	115	6,9	0,169	7,79	25,6	0,106	8,06	51,4
23	21,34	38,5	1860	<LQ	136	9,16	0,222	9,53	24,5	0,122	9,26	47,2
24	18,74	33,3	1869	<LQ	122	7,15	0,172	8,37	25,8	0,116	8,18	50,2
25	16,58	30,2	1869	<LQ	117	7,14	0,172	8,13	25,7	0,11	8,13	50,6
26	19,81	33,7	1868	<LQ	126	7,87	0,174	8,61	25,8	0,116	8,57	48,8
27	15,91	27,3	1864	<LQ	108	6,14	0,138	7,09	26,1	0,101	7,95	52,5
28	14,72	27,9	1882	<LQ	111	6,29	0,134	7,46	26,1	0,1	7,71	52,2
29	18,26	33,5	1850	<LQ	123	8,06	0,185	8,59	25,5	0,118	8,7	48,9
30	16,13	23,4	1877	<LQ	97	5,13	0,112	6,39	27,2	0,088	7,21	53,9
31	16,35	28,9	1863	<LQ	114	6,88	0,148	8,04	27,1	0,116	7,91	49,9
32	21,09	37	1837	<LQ	132	8,98	0,226	8,92	25,7	0,123	9,11	46,9
LQ	15,98	26	1864	<LQ	104	5,56	0,144	6,94	26,3	0,094	7,56	53,4
<i>LQ= Limite de Quantificação / Afundado = rejeito</i>												
<i>(*) SiO<sub>2</sub> foi calculado por diferença (100 - PPC e teores de elementos maiores)</i>												



Tabela 42: Resultado das análises químicas dos afundados das etapas *rougher* e *cleaner* da flotação otimizada

Teor	Constituinte	Afundado			
		Etapa <i>Rougher</i>	2 etapas <i>cleaner</i>		
			<i>Rougher</i>	1° <i>Cleaner</i>	2° <i>Cleaner</i>
ppm	As	20,2	18,8	10,9	<LQ
	Cu	31,5	28,0	17,6	7,93
	Ni	2037	2034	2075	2084
	Pb	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
	Zn	137	128	95,1	79,4
%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,72	8,24	3,87	2,20
	CaO	0,205	0,182	0,0770	0,0498
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,53	9,08	6,12	4,98
	MgO	26,3	25,3	23,5	26,6
	TiO <sub>2</sub>	0,130	0,124	0,0893	0,0628
	PPC	8,61	8,27	6,54	5,80
	SiO <sub>2</sub> (*)	46,5	48,8	59,8	60,3
<i>LQ= Limite de Quantificação \ Afundado = rejeito</i>					
<i>(*) SiO<sub>2</sub> foi calculado por diferença (100 - PPC e teores de elementos maiores)</i>					

Tabela 43: Resultado das análises químicas dos afundados das etapas *rougher* e *cleaner* da flotação otimizada com alimentação deslamada

Teor	Constituinte	Afundado			
		Etapa <i>Rougher</i>	2 etapas <i>cleaner</i>		
			<i>Rougher</i>	1° <i>Cleaner</i>	2° <i>Cleaner</i>
ppm	As	17,7	18,7	<LQ	<LQ
	Cu	24,3	28,1	16,3	8,08
	Ni	2003	1997	2057	2065
	Pb	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
	Zn	133	152	100	82,5
%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,11	10	4,06	2,33
	CaO	0,227	0,235	0,0773	0,0402
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,2	10	6,35	4,93
	MgO	25,7	26,5	28,2	28,1
	TiO <sub>2</sub>	0,146	0,15	0,0975	0,0693
	PPC	8,82	9,11	6,6	5,75
	SiO <sub>2</sub> (*)	45,8	44	54,6	58,8
<i>LQ= Limite de Quantificação \ Afundado = rejeito</i>					
<i>(*) SiO<sub>2</sub> foi calculado por diferença (100 - PPC e teores de elementos maiores)</i>					

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)