

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Tese de Doutorado

"Efeito da Adição de Reagentes
Agregantes e de Ligantes sobre a
Consistência em Pastas Minerais"

Autor: Christian Anthony Hernández Osorio

Orientador: Prof. George Eduardo Sales Valadão

Co-orientador: Prof. Armando Corrêa de Araujo

Fevereiro/2007

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	
.....	01
2. OBJETIVOS	
.....	08
2.1. Objetivo Geral	
.....	08
2.2. Objetivos Específicos	
.....	08
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	
.....	09
3.1. Aspectos Preliminares	
.....	09
3.2. Preparação das Pastas Mineraias	
.....	12
3.3. Vantagens dos Sistemas de Preenchimento com Pasta	
.....	17
3.4. Disposição de Rejeitos na Forma de Pasta	
.....	18
3.5. Reologia, Propriedades Mecânicas e Aditivos de Pastas Mineraias	
.....	24
3.5.1. Características reológicas de “pastefill” puros	
.....	24
3.5.2. Efeito da adição de polímeros orgânicos agregantes em pastas mineraias	
.....	45
3.5.3. Efeito da adição de ligantes em pastas mineraias	
.....	53

4. ESTRATÉGIA EXPERIMENTAL	66
4.1. Materiais Utilizados	66
4.2. Metodologia	66
4.3. Planejamento Experimental	73
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	77
5.1. Caracterização da Amostra Sólida	77
5.1.1. Densidade	77
5.1.2. Distribuição granulométrica	77
5.1.3. Área superficial específica - ASE	82
5.1.4. Composição química e mineralógica	82
5.1.5. Comportamento da carga superficial	86
5.2. Caracterização das Pastas Minerais	87
5.2.1. Pastas sem adição de agentes agregantes e ligantes	87
5.2.2. Efeito de agregantes na consistência e reologia das pastas	88
5.2.3. Efeito de % de sólidos, pH e % de material fino sobre a consistência e reologia das pastas	94

5.2.4. Efeito de ligantes na consistência e resistência à compressão das pastas minerais	99
6. CONCLUSÕES	114
7. RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS	117
8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	119
REFERÊNCIAS	120
ANEXOS	128

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Descarga (à esquerda) e disposição superficial de uma pasta mineral (à direita).	3
Figura 3.1: Gráfico qualitativo da tensão de ruptura em função do adensamento de sólidos da pasta.	10
Figura 3.2: Aspecto visual de pastas minerais segundo os trabalhos de Fourie (2003), Bedell (2003) e Coxon (2003).	10
Figura 3.3: Gráfico de tensão de cisalhamento em função do adensamento de sólidos para diferentes pastas minerais.	12
Figura 3.4: Espessador de cone profundo piloto e detalhe da descarga de pasta.	14
Figura 3.5: Equipamentos de desaguamento utilizados na produção industrial de polpas e pastas minerais: a) Espessador de alta velocidade; b) Espessador de alta densidade; c) Espessadores de pasta (cone profundo); d) Filtros a vácuo.	15
Figura 3.6: Sistema de bombeamento de deslocamento positivo.	15
Figura 3.7: Fricção na tubulação para uma determinada pasta.	16
Figura 3.8: Ângulos de disposição para polpas de alta densidade e para pasta, em vários tipos de terreno.	19
Figura 3.9: Descarga de pasta utilizando uma torre rotatória.	20
Figura 3.10: Transporte sobre rodas para a disposição superficial de pasta.	20
Figura 3.11: Descarga múltipla de pasta aplicada na usina Ekati no Canadá.	21

Figura 3.12: Sistema de produção de pasta (espessamento, bombeamento e descarga) para disposição superficial.	22
Figura 3.13: O conceito de co-disposição de pasta e rejeito grosso.	22
Figura 3.14: Co-disposição de pasta de rejeitos finos e rejeitos grossos.	23
Figura 3.15: Estágios finais da co-disposição: a) Disposição; b) Reabilitação.	23
Figura 3.16: Resultados do teste de abatimento de cone (“slump”).	25
Figura 3.17: Perfil da pasta com 64% de sólidos e sem excesso de água.	26
Figura 3.18: Pastas ensaiadas pelo teste de calha considerando diferentes adensamentos e inclinações de calha.	27
Figura 3.19: Gráfico de predominância dos estados sólido, pasta e polpa para o projeto Yaullyam Casapalca.	29
Figura 3.20: Gráfico do ângulo de repouso em função de adensamento de sólidos.	30
Figura 3.21: Fotografias de testes de abatimento e calha de pastas da amostra de rejeito de flotação.	30
Figura 3.22: Abatimento adimensional em função da tensão de escoamento adimensional.	31
Figura 3.23: Comportamento da viscosidade de pastas adensadas com 70 e 72,5% de sólidos.	33
Figura 3.24: Efeito do pH sobre a tensão de ruptura de duas suspensões de alumina.	34

Figura 3.25: Comportamento do ângulo de repouso de diferentes pastas minerais em função da largura da calha.	35
Figura 3.26: Comportamento da tensão de escoamento em função do adensamento da pasta.	36
Figura 3.27: Gráficos da tensão de escoamento e viscosidade de Bingham em função do adensamento das pastas e fotografias do teste de abatimento de cone.	37
Figura 3.28: Gráfico da energia de bombeamento em função do adensamento de sólidos em volume.	38
Figura 3.29: Gráfico do gradiente de pressão em função do “slump” do material.	41
Figura 3.30: Gráfico do consumo específico de água em função da densidade de polpa.	41
Figura 3.31: Disposição superficial de pasta na usina Bulyanhulu.	44
Figura 3.32: Perfil da umidade gravimétrica em função do tempo da secagem da pasta da usina Bulyanhulu.	44
Figura 3.33: Alternativas atuais da disposição de rejeitos da mineração.	45
Figura 3.34: a) Formação de agregado ou floco; b) Efeito da dosagem excessiva de floculante.	46
Figura 3.35: Efeito da floculação sobre o comportamento do fluxo de sólido em função da concentração de sólido na descarga do espessador.	47
Figura 3.36: Efeito da floculação sobre o comportamento da tensão de escoamento em função do adensamento de sólido em massa.	48

Figura 3.37: Capacidade de floculação de floculantes não iônico, aniônico e catiônico em função do valor de pH.	49
Figura 3.38: Efeito da dosagem de floculante sobre a velocidade de sedimentação e a concentração de sólidos na polpa.	50
Figura 3.39: Gráfico do ângulo de repouso em função do adensamento de polpa para valores de pH de 9,12 e de 11,60.	51
Figura 3.40: Tensão de escoamento e energia de separação de flocos (kT) em função da dosagem de floculantes aniônico e não iônico.	52
Figura 3.41: Efeito da dosagem de floculante considerando-se o adensamento da descarga do espessador em função do fluxo de sólido na alimentação.	53
Figura 3.42: Efeito da adição de cal sobre o comportamento do ângulo de repouso em função do adensamento de sólido em massa.	54
Figura 3.43: Resistência compressiva relativa da pasta de concreto em função do tempo de cura, com adições de 5, 10 e 15% de meta caulim (MK).	57
Figura 3.44: Densidade da pasta cimentada em função do conteúdo de material fino.	57
Figura 3.45: Consumo e custo específico de ligante em função da densidade dos rejeitos empregados.	58
Figura 3.46: Efeito da distribuição de tamanho de partículas e da drenagem sobre a resistência mecânica de pastas cimentadas.	59
Figura 3.47: Distribuições granulométricas dos rejeitos denominados G ₁ , G ₂ , G ₃ , G ₄ e G ₅ .	60
Figura 3.48: Efeito do tipo e proporção de ligante sobre sua eficiência de fixação de As.	61

Figura 3.49: Controle de expansão de longo prazo usando MK como ligante.	62
Figura 3.50: Expansão do concreto após 2 anos em função do conteúdo de meta caulim.	63
Figura 3.51: Uso de sensores térmicos para controle do transporte de pasta mineral.	64
Figura 4.1: Fluxograma de processamento das amostras sólidas.	67
Figura 4.2: Viscosímetro Brookfield modelo DV-III com os “spindles” LV-1, LV-2, LV-3 e LV-4.	68
Figura 4.3: Reômetro usando técnica de Vane para medições da tensão de escoamento.	69
Figura 4.4: Cilindro “slump” de laboratório.	69
Figura 4.5: Metodologia do teste de cone “slump”.	70
Figura 4.6: Calha construída em acrílico: a) Vista isométrica; b) Dimensões e forma.	70
Figura 4.7: Prensa hidráulica MTS para realização de ensaios mecânicos e corpos de prova fraturados por compressão.	71
Figura 4.8: Prensas hidráulicas utilizadas para os ensaios de cisalhamento: a) direto; b) triaxial.	71
Figura 4.9: a) Permeabilímetro de Germann; b) Permeabilímetro de Karsten.	72
Figura 4.10: Aparelho de Vicat usado para determinar a consistência das pastas minerais.	73
Figura 5.1: Curva granulométrica da amostra sólida obtida por peneiramento.	78

Figura 5.2: Curvas granulométricas da fração mais fina (<400 # Tyler ou <37 μ m) da amostra sólida obtidas mediante Cyclosizer e granulômetros Cilás e Sympatec.	81
Figura 5.3: Micrografias MEV mostrando imagens obtidas pelos elétrons retroespalhados: A) Vista geral da amostra original (200X); B) Partícula 1 com 1500X; C) Partícula 2 com 1000X; D) Partícula 3 com 2000X.	84
Figura 5.4: Espectro de infravermelho obtido da amostra original.	85
Figura 5.5: Resultado do teste de Mular e Roberts mostrando uma reversão de sinal de carga para um valor de pH de 6,98.	86
Figura 5.6: Ângulos de repouso obtidos para diferentes inclinações de calha.	87
Figura 5.7: Altura de abatimento em função da % de sólidos em massa da pasta mineral.	88
Figura 5.8: Gráfico das velocidades de sedimentação ($\times 10^3$ cm/min) obtidas nas diferentes condições de adição de agregantes na polpa de 70% de sólidos.	89
Figura 5.9: Gráficos de: a) velocidades de sedimentação ($\times 10^4$ cm/min) e b) % de abatimento obtidas nas diferentes condições de agregação na pasta mineral de 75% de sólidos.	90
Figura 5.10: Gráfico comparativo dos valores da velocidade de sedimentação ($\times 10^3$ cm/min) da polpa de 70% de sólidos obtidos experimentalmente e preditos pelo modelo.	92
Figura 5.11: Gráfico comparativo dos valores da velocidade de sedimentação ($\times 10^4$ cm/min) da pasta de 75% de sólidos obtidos experimentalmente e preditos pelo modelo.	93
Figura 5.12: Gráfico comparativo dos valores da % de abatimento da pasta de 75% de sólidos em massa obtidos experimentalmente e preditos pelo modelo.	93

Figura 5.13: % de abatimento obtidas nas diferentes pastas estudadas.	95
Figura 5.14: Valores de viscosidade aparente medidos nas diferentes pastas estudadas.	95
Figura 5.15: Comparação dos valores experimentais e aqueles preditos pelo modelo da viscosidade aparente da mistura sólido-líquido.	97
Figura 5.16: Comparação dos valores experimentais e aqueles preditos pelo modelo da % de abatimento.	98
Figura 5.17: Fotografias dos testes de abatimento realizados no planejamento fatorial 2 ³	99
Figura 5.18: Resistências à compressão obtidas em diferentes ambientes de cura.	103
Figura 5.19: Resistências à compressão dos corpos de prova curados a seco.	105
Figura 5.20: Resistências à compressão dos corpos de prova ensaiados de acordo a norma brasileira.	105
Figura 5.21: Corpos de prova utilizados para determinar a resistência à compressão, utilizando o procedimento da UFMG e a norma brasileira NBR 7215.	106
Figura 5.22 Superior: Imagem MEV obtida com elétrons retroespalhados mostrando uma vista geral da superfície de fratura de corpo de prova cimentado com os ligantes metacaulins (ROM e ARC) e de cimento portland (CP); Inferior: imagem MEV obtida por elétrons secundários (aumento 5000X).	107
Figura 5.23: Imagens MEV obtidas via elétrons retroespalhados; Superior: Vista geral da superfície de fratura de corpo de prova cimentado com os ligantes dos 3 metacaulins (MK) e cimento portland (CP); Inferior: partícula mais escura que contém MK, CaO e mica e partícula mais clara de hematita.	108

Figura 5.24: Imagens MEV obtidas via elétrons retroespalhados; Superior: Partícula mais clara e brilhante de hematita detetada num corpo de prova cimentado com os ligantes dos 2 metacaulins (MK), cinzas volantes (CV) e cimento portland (CP); Inferior: partícula mais escura que contém principalmente quartzo.

.....109

Figura 5.25: Imagens MEV obtidas via elétrons retroespalhados; Superior: Vista geral da superfície de fratura de corpo de prova cimentado com os 4 ligantes; Inferior: possível partícula de forma acicular típica de estruturas cimentadas com cimento portland.

.....110

Figura 5.26 Imagens MEV obtidas via elétrons retroespalhados; Superior: Vista geral da superfície de fratura de corpo de prova cimentado com os ligantes dos 2 metacaulins (MK) e cimento portland (CP); Inferior: Vista geral de outra superfície de fratura que corresponde a um corpo de prova cimentado com os 4 ligantes estudados (16% do total).

.....111

Figura 5.27: Imagens MEV obtidas via elétrons retroespalhados; Superior: Partícula mais clara de hematita detetada num corpo de prova cimentado com os 4 ligantes; Inferior: partícula mais escura que contém principalmente quartzo.

.....112

LISTA DE TABELAS

Tabela I.1: Aplicações industriais do preenchimento com "pastefill".	6
Tabela I.2: Porcentagens típicas dos custos operacionais do sistema "backfill".	7
Tabela III.1: Testes necessários à caracterização de um material visando o preenchimento com pasta.	17
Tabela III.2: Características reológicas de rejeitos de carvão, ouro e Pb-Zn.	24
Tabela III.3: Correlação entre adensamento de sólidos, altura de abatimento e ângulo de repouso.	26
Tabela III.4: Frações passantes acumuladas da amostra sólida utilizada.	28
Tabela III.5: Correlação entre adensamento de sólidos e reologia da pasta.	28
Tabela III.6: Características de granulometria e ASE das partículas de alumina.	33
Tabela III.7: Algumas características do material e do projeto avaliado.	36
Tabela III.8: Propriedades dos rejeitos após a secagem da pasta disposta superficialmente.	39
Tabela III.9: Efeito do adensamento sobre as características de fluxo das pastas minerais.	40
Tabela III.10: Características reológicas de polpas e pastas minerais.	43
Tabela III.11: Propriedades físicas de rejeitos e dosagens de flocculantes recomendáveis.	49
Tabela III.12: Resultados de resistência à compressão após 7 e 28 dias de cura.	54

Tabela III.13: Valores das resistências e tensões de ruptura alcançadas pelos corpos de prova das amostras II, III e V, para tempo de cura de 28 dias.	55
Tabela III.14: Resistência compressiva não confinada (UCS) do "pastefill" em MPa.	56
Tabela III.15: Resistências compressivas das pastas minerais.	62
Tabela III.16: Comparação das alternativas de preenchimento.	64
Tabela IV.1: Equipamentos e técnicas empregadas na caracterização da amostra sólida.	67
Tabela IV.2: Planejamento experimental 2^2 para estudar o efeito da adição de agregantes em pastas minerais: a) Fatores e níveis estudados; b) Detalhe dos experimentos realizados.	74
Tabela IV.3: Planejamento experimental 2^4 para estudar o efeito da adição de ligantes em pastas minerais: a) Fatores e níveis estudados; b) Detalhe dos experimentos realizados.	74
Tabela IV.4: Planejamento experimental 2^3 para estudar o efeito de outras variáveis tais como adensamento de sólidos (x_1), pH da pasta (x_2) e conteúdo de material fino (x_3) sobre o comportamento reológico de pastas minerais: a) Fatores e níveis estudados; b) Detalhe dos experimentos realizados.	76
Tabela V.1: Densidades medidas da amostra sólida.	77
Tabela V.2: Análise granulométrica da amostra sólida.	78
Tabela V.3: Resultados da análise granulométrica por classificação centrífuga (via Cyclosizer).	79
Tabela V.4: Resultados da análise granulométrica utilizando os granulômetros de Cilás e Sympatec.	80

Tabela V.5: Valores dos parâmetros d_{50} e d_{90} da fração fina (<400 # Tyler ou <37 μ m) e da amostra original.	81
Tabela V.6: Valor de índice de Blaine da amostra sólida.	82
Tabela V.7: Análise química obtida pelas técnicas de via úmida e FRX.	82
Tabela V.8: Análise mineralógica obtida via DRX.	83
Tabela V.9: Análise semiquantitativa (EDS) obtida na microscopia eletrônica.	84
Tabela V.10: Respostas velocidade de sedimentação, % de abatimento de cone e comportamento reológico no ciclo 1 – 20 – 1 rpm numa pasta mineral de 70% de sólidos.	88
Tabela V.11: Respostas velocidade de sedimentação, % de abatimento de cone e comportamento reológico no ciclo 1 – 20 – 1 rpm numa pasta mineral de 75% de sólidos.	89
Tabela V.12: Efeitos principais e interação no planejamento fatorial 2 ² .	91
Tabela V.13: Resultados do planejamento fatorial 2 ³ .	94
Tabela V.14: Efeitos principais e interações do planejamento fatorial 2 ³ .	96
Tabela V.15: Resistência à compressão e condições experimentais dos ensaios de rompimento segundo norma francesa.	100
Tabela V.16: Resistência à compressão e condições experimentais dos ensaios de rompimento dos corpos de prova curados a seco.	104
Tabela V.17: Permeabilidade a água determinada no permeabilímetro de Karsten.	113

LISTA DE NOTAÇÕES

CAF	Sistema de preenchimento com agregado cimentado
CHF	Sistema de preenchimento hidráulico cimentado
CPF	Sistema de preenchimento com pasta cimentada ou "pastefill"
Cw	Concentração de sólidos em massa da pasta
D ₈₀	Diâmetro mediano de 80% do material passante
d _n	Diâmetro nominal da partícula
d _s	Diâmetro mediano considerando área superficial da partícula
d _v	Diâmetro mediano considerando volume da partícula
d ₁₀	Diâmetro superficial mediano de partícula para 10% passante
d ₅₀	Diâmetro superficial mediano de partícula para 50% passante
d ₉₀	Diâmetro superficial mediano de partícula para 90% passante
Deep Cone	Espessador de cone profundo
g	Aceleração da gravidade
GWT	Aparelho de Germann para medição da permeabilidade
H	Altura total do cone ou cilindro de "slump"
H _s	Altura de "slump"
H ₁	Altura da camada da pasta no final da calha ao final do teste de "flume"
H ₂	Altura da camada da pasta no início da calha ao final do teste de "flume"
ICDD	Base de dados para difração de raios-X do International Centre for Diffraction Data
K	Constante do aparelho de Blaine
L	Comprimento da camada da pasta no teste de Flume
P ₈₀	Tamanho do material com 80% passante
ρ _{H₂O}	Permeabilidade à água
PIE	Ponto isoelétrico
PLB	Mistura de 70% pozolana com 30% de cal
PLC	sistemas controlados em forma automática
s	Altura de abatimento ("slump")
s'	Altura de "slump" adimensional
t	Tempo em (s) no teste de permeabilidade ao ar (Blaine) e a água
T _M	Tempo médio
TTD	Disposição de rejeitos adensados

UCS	Resistência à compressão simples
V_s	Velocidade de sedimentação
X	Aumento ou magnificação da imagem
WDS	Técnica de espectrometria dispersiva de raios-X
ε	Porosidade
Φ	Fração volumétrica de sólidos
γ	Taxa de cisalhamento
η	Viscosidade de Bingham
η_N	Viscosidade newtoniana
$\eta_{ap.}$	Viscosidade aparente
θ_R	Ângulo de repouso
ρ	Massa específica ou densidade do material
τ	Tensão de cisalhamento
τ_Y	Tensão de escoamento da pasta
τ'_y	Tensão de escoamento pelo cisalhamento adimensional
"	Polegadas
%ABT	% de abatimento ("slump")
%S _M	% de sólidos em massa

LISTA DE ABREVIATURAS

ARC	Arcóseo do teto da mina utilizado para fabricar o meta caulim 2
ASE	Área superficial específica
CP	Cimento portland
CV	Cinzas volantes
DEMET	Departamento de Engenharia Metalúrgica
DEMIN	Departamento de Engenharia de Minas
DRX	Difração de raios-X
EAA	Espectrofotometria de absorção atômica
EDS	Espectrometria de Energia Dispersiva
EIV	Espectroscopia no infravermelho
EUA	Estados Unidos de América
EE-UFMG	Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais

FRX	Fluorescência de raios-X
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MK	Meta caulim
NBR	Norma brasileira
PC	Cimento portland
PG	Picnometria a gás
PS	Picnometria simples
PZ	Potencial zeta
ROM	“Run of mine” utilizado para fabricar o meta caulim 1
rpm	Rotações por minuto
SM	Separação magnética
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais

RESUMO

A prática atual da disposição de rejeitos de beneficiamento de minerais ainda se baseia principalmente na deposição dos rejeitos de forma subaquática em bacias criadas por barragens em vales naturais. Por outro lado, a disposição de rejeitos em superfície na forma de pastas vem sendo considerada cada vez mais como alternativa à disposição de forma subaquática por diversas razões. Algumas das vantagens incluem uma maior recuperação de água, uma área ocupada muito inferior e impactos ambientais diminuídos, redução de custo total e, no caso de pastas cimentadas aplicada em trabalhos subterrâneos, aumento na recuperação de minério na lavra. O uso de agregantes como polímeros floculantes e coagulantes não-poliméricos melhora as técnicas de separação sólido-líquido, podendo também melhorar a produção de pasta e seu transporte.

A adição de ligantes como cimento Portland, cinza volante, meta-caulim, fumo de sílica, cal e outros pode promover material na forma de pasta com resistência adequada de forma a ser empregado no enchimento de cavidades subterrâneas. Misturas de pastas cimentadas, rochas estéreis e todo tipo de rejeitos (lamas, rejeitos de flotação, etc.) são possíveis.

O objetivo do presente trabalho é avaliar o desempenho de diferentes reagentes agregantes e ligantes para a produção de pasta a ser empregada na disposição de rejeitos de minério de ferro.

A metodologia básica que foi empregada consistiu de ensaios de abatimento para determinação da consistência da pasta, caracterização reológica e determinação da velocidade de sedimentação. Como um suporte para a metodologia básica, experimentos de planejamento fatorial foram realizados para verificar superfícies de resposta para os vários parâmetros avaliados e suas inter-relações ao longo do trabalho desenvolvido. Estes parâmetros incluíram principalmente a determinação dos efeitos dos agregantes (um coagulante e um polímero floculante) nas respostas de consistência, velocidade de sedimentação e viscosidade das pastas preparadas, e também a influência de ligantes (meta-caulim, cinza volante e cimento Portland) na resistência à compressão de corpos de prova. O efeito de fatores tais como pH, concentração de sólidos (como % de sólidos), conteúdo de finos ($37\mu\text{m}$) na consistência (% de abatimento) e nos parâmetros

reológicos das misturas sólido-líquido (viscosidade aparente e comportamento reológico) também foi investigado.

Os principais resultados do presente trabalho são: a) em relação ao efeito dos agregantes pode-se concluir que uma dosagem de 20g/t de coagulante representa a melhor condição de agregação para os sistemas sólido-líquido estudados; b) os sistemas sólido-líquido com a adição de 20g/t de coagulante mostraram os melhores resultados em termos de seus comportamentos reológicos e o pior resultado aconteceu para uma dosagem de mistura de 10g/t de coagulante e 10g/t de floculante; c) para uma pasta com 75% de sólidos em peso, diferença na consistência usando os ensaios de abatimento pode ser observada; d) a melhor correlação de resultados para os modelos matemáticos tendo como resposta a consistência (% de abatimento) alcançou 99,15%; e) a adição de 4% em peso dos quatro ligantes (uma dosagem total de 16%) representa a melhor condição (maior resistência à compressão) considerando normas Francesas para a preparação de meta-caulim; f) a adição de 4% em peso de cinza volante na condição de cura a seco (40 °C) em um forno de laboratório mostrou resultados promissores embora a disponibilidade de cinza volante no Brasil precise ser levada em consideração; g) para o planejamento fatorial 2^3 (tendo como fatores a % de sólidos, o pH e o conteúdo de material abaixo de 37 μ m) a melhor condição de transporte para o sistema sólido-líquido é representada pelo experimento N°7 (70% de sólidos em peso, pH 9 e 80% < 37 μ m) por causa do baixo valor de viscosidade aparente (281cP), do comportamento tixotrópico no ciclo 1-20-1 rpm e pela alta % de abatimento no ensaio com cone (90%); h) o melhor resulta para a disposição de rejeitos é representado pelo experimento N°6 por causa do maior valor de consistência da mistura sólido-líquido (5% de abatimento); i) a partir das respostas investigadas – viscosidade aparente e % de abatimento, o efeito mais significativo foi a % de sólidos (na faixa de 70 a 80%); j) nos modelos lineares para a % de abatimento uma boa correlação foi obtida (85,16%) e apenas uma correlação razoável foi alcançada para a viscosidade aparente (61,07%) para uma rotação de 20rpm.

ABSTRACT

Current deposition of tailings from mineral processing operations is still based upon the sub aqueous disposal of tailings into tailings ponds, created by dams erected in natural valleys. On the other hand, surface disposal of tailings as mineral pastes has increasingly been seen as an advantageous alternative to conventional sub aqueous disposal for several reasons. Some of these advantages include improved water recovery, much smaller tailings area's footprints, and diminished environmental impacts, reduced overall costs and, for the case of cemented paste fill applied to underground works, increased ore recovery. The use of aggregants as polymeric flocculants and non-polymeric coagulants enhances solid-liquid separation techniques, eventually improving mineral paste production and transport operation.

The addition of binders such as Portland cement, fly ash, meta-kaolin, silica fume, lime, and others can promote paste fill material with adequate resistance so it can be used as a filler of underground and surface cavities. Blends of cemented pastes, waste rocks and all type of tailings (slimes, flotation tailings, etc) are possible.

The objective of the current work is evaluating the different aggregants agents and binders' performance for paste production to be used in the disposal of iron ore tailings.

The basic methodology employed consisted of slump testing for paste consistency determination, rheological characterization and settling rate determination. As a support for the basic methodology, factorial design experiments were performed in order to assess response surfaces of the several parameters evaluated and their relationships throughout the current work. These parameters chiefly included the determination of the effects of aggregants (a coagulant and a polymeric flocculant) on the responses of consistency, settling rate and viscosity of the pastes prepared, and the influence of binders (meta-kaolin, fly ash and Portland cement) on the compression resistance of specimens. The effect of factors such as pH, solid concentration (as percent solids), content of fines (<37 μ m) on consistency (% of slump) and rheological parameters of the solid-liquid mixtures (apparent viscosity and rheological behavior) was also investigated.

The major findings of the current work are: a) in reference to the effect of aggregants it can be concluded that a dosage of 20g/t coagulant represents the best aggregation condition for the solid-liquid systems studied; b) the solid-liquid systems with addition of 20g/t coagulant dosage have showed the best results in terms of their rheological behavior, and the worst result took place for the blend of 10g/t coagulant and 10g/t flocculant dosages; c) for a paste with 75% w/w solids differences in the pastes consistency using slump cylinder could be ascertained; d) the best correlation of mathematical models results for the consistency response (% of slump) on paste with 75% w/w solids reached 99.15%; e) addition of 4% w/w of the four binders (16% global dosage) represents the best condition (largest compression resistance) considering French standards for meta-kaolin preparation; f) addition of 4% w/w fly ash with dry cure condition (40°C) in the laboratory furnace gives promising results, although availability and cost of fly ash in Brazil must be taken into account; g) on the factorial 2^3 design array (factors: solids concentration, pH and %<37 μ m), the best condition for solid-liquid system transport is represented for experiment N°7 (70% w/w solids, pH 9 and 80%< 37 μ m) because the low apparent viscosity (281cP), the thixotropic rheological behavior in the cycle 1 – 20 – 1 rpm and the high % of slump cone (90%); h) the best result for tailings disposal is represented for experiment N°6 because the highest consistency of solid-liquid mixture (5% of slump); i) for the responses investigated - apparent viscosity and % of slump, the most significant effect was % w/w solids (in the range: 70 to 80%); j) in the linear models for % of slump a good correlation (85.16%) was obtained and only fair correlation was reached for the apparent viscosity (61.07%) to spindle rotation of 20rpm.

1. INTRODUÇÃO

O uso da tecnologia de pastas minerais ou “pasting” para “backfill” subterrâneo tem uma ampla aceitação, hoje em dia, na indústria mineral. Essa é uma alternativa efetiva quanto ao custo para preenchimento com polpa hidráulica e rocha de cavidades a céu aberto ou subterrâneas. Na última década, essa tecnologia tem recebido crescente aceitação como um método de “backfill” de mina e, mais recentemente, está propiciando benefícios também na disposição superficial de rejeitos da mineração, subprodutos da mineração de carvão e outros tipos de produtos industriais. Indústria, governos e entidades estão, cada vez mais, interessados em investigar a utilização da tecnologia de pasta como tecnicamente desejável, ambientalmente segura e socialmente aceitável. Isso significa um melhor manejo e administração dos rejeitos da mineração, dentre outros resíduos e descartes industriais. A disposição de produtos minerais na forma convencional subaquática (polpas de mais alta densidade dispostas nas barragens de rejeitos) apresenta riscos físicos ao meio ambiente, podendo ocorrer significativas perdas econômicas e sociais em comunidades locais no caso de eventuais rompimentos de barragens. A tecnologia de pasta pode ser aplicada para reduzir esses riscos e, ao mesmo tempo, melhorar a eficiência na armazenagem dos rejeitos industriais. (Johnson et al., 2005)

Segundo Brackebusch (2000), o preenchimento com pasta corresponde a um conjunto bombeável, geralmente fluído não newtoniano composto de rejeitos de mina e cimento. Para preparar a pasta precisa-se eliminar água, o que pode ser realizado utilizando métodos convencionais de espessamento e filtragem. A consistência desejada na pasta é aquela requerida num concreto de “slump” ou consistência média, e para ser transportada será preciso a ajuda de bombas de deslocamento positivo, percorrendo grandes distâncias horizontais de 1km ou mais. Alternativamente o cimento pode ser adicionado próximo ao final da tubulação.

Deve estar presente uma certa proporção de partículas finas, menores que $20\mu\text{m}$, e podem ser adicionadas partículas de agregados, sem que alterem, de forma significativa, as características de fluxo da pasta. Para prevenir pressões excessivas e entupimento de tubulações, as usinas devem ser construídas e controladas pelos sistemas de PLC que possibilitam um controle de alta qualidade. Com adições entre 3 e 5% de cimento pode-se produzir pastas de preenchimento com resistências adequadas de 1,5 a 3,5MPa (217 a 507psi). Algumas das vantagens do uso de preenchimento com pasta numa operação

mineira são a redução do desaguamento da mina, economia na mão de obra e materiais, redução no tamanho das bacias de rejeitos, adequadas propriedades no suporte do céu da mina e redução das perdas pela drenagem. O preenchimento com pasta pode ser realizado tanto em forma superficial quanto subterrânea (preenchimento de tipo "backfill"). É importante destacar que o volume de rejeitos da mineração de ferro, que atualmente é disposto nas bacias ou barragens de rejeitos no Brasil, alcança valores entre 50 e 60 milhões de toneladas por ano, fato que se constitui em um impacto ambiental considerável. (Araujo, 2004)

Segundo Germani (2002) a região do Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais constitui a maior concentração mineral do mundo na atualidade, sendo movimentadas massas de minério e de estéril da ordem de 450 milhões de toneladas por ano.

Em outros países como Chile, segundo Palma (2004), em uma usina da mineração de cobre, de cada 100.000 toneladas diárias processadas, 97.000 correspondem inevitavelmente a rejeitos.

Somente nas últimas décadas, principalmente depois da ocorrência de graves acidentes provocados pela ruptura de barragens e pilhas de rejeitos, os projetos dessas estruturas de contenção passaram a contar com maior atenção das empresas de mineração. A elaboração de legislações ambientais mais rígidas em todo mundo, acrescida dos impactos negativos decorrentes da eventual ruptura dessas barragens, motivou o desenvolvimento de novas abordagens de caracterização tecnológica e de disposição dos rejeitos da mineração (Gomes et al., 2003). Dentre as novas alternativas para a disposição de rejeitos da mineração aparece a sua contenção na forma de sistemas de pasta mineral.

A pasta mineral pode ser definida como um material adensado e homogêneo, com distribuição de tamanhos e mineralogia característicos, que apresenta baixa perda de água e quase nula segregação de partículas, baixa velocidade de sedimentação dos sólidos e possibilidade de transporte em tubulações em baixas velocidades. Esse material conhecido como "pastefill" pode permanecer dentro das tubulações durante longos períodos de tempo se não houver ligante em sua composição e sua consistência possa ser medida através de sua altura de abatimento ("slump"). O teste de abatimento normalmente é realizado empregando um cone de 305mm de altura (12 polegadas) segundo a norma ASTM C143/C 143 M-97. Geralmente, as pastas podem ser produzidas a partir de uma ampla faixa de distribuições de tamanho de partícula, ainda que

usualmente tenha um mínimo de 15% em massa de material de tamanho inferior a 20 μm . (Johnson et al., 2005)

Brackebusch (2000) define a pasta como sendo uma mistura de alta densidade de água com sólidos, que contém uma proporção significativa de partículas finas. Conteúdos relativamente baixos de água (10 a 25% em massa) fazem que a consistência da pasta seja espessa e que possa ser caracterizada através do teste de abatimento de cone ou “slump” segundo a norma ASTM muito utilizada para concretos.

Outra definição do conceito de pasta mineral, apresentada no trabalho de Araujo e colaboradores (2006), corresponde a uma mistura sólido-líquido homogênea, que não apresenta segregação de partículas num curto período de tempo e, se disposta sobre superfície estável, não mostra drenagem significativa de água.

A Figura 1.1 apresenta o aspecto visual de uma pasta mineral de descarga do underflow de um espessador de cone e de outra pasta disposta sobre uma superfície impermeável, segundo o trabalho de Vietti e Dunn (2002).



Figura 1.1: Descarga (à esquerda) e disposição superficial de uma pasta mineral (à direita). (Vietti e Dunn, 2002)

Segundo Johnson et al. (2005), a consistência de uma pasta mineral pode ser obtida mediante:

- adição de líquidos para secar ou umedecer;
- remoção de líquido da pasta utilizando equipamentos de separação sólido-líquido (espessadores, filtros, centrífugas ou alguma combinação desses).

A maioria das aplicações atuais de pastas minerais considera o desaguamento de rejeitos, originados no beneficiamento, na forma de polpa. Estudos devem ser realizados em cada situação para determinar as características da fração sólida do rejeito como: distribuição de tamanho de partículas, composição química e mineralógica, área superficial específica, tipo de processamento empregado. As propriedades da pasta mineral podem também ser determinadas por meio das medições de: tensão de escoamento, viscosidade, altura de abatimento, ângulo de repouso, resistência à compressão (pasta cimentada), módulo elástico (pasta cimentada), permeabilidade (pasta cimentada), segundo Hernández, (2005). Cada potencial aplicação deve estar sujeita a uma revisão rigorosa que caracterize as condições locais, propriedades do material, relação custo-benefício (Johnson et al., 2005).

Algumas das aplicações industriais que utilizam este sistema de pasta mineral para preenchimento são citadas por Araujo et al., (2004):

1) Projeto Bulyanhulu - Tanzânia, tem um nível de produção de 2500 t/dia de minério de ouro e trabalha com uma planta produtora de pasta de rejeitos. Essa mistura é constituída de 50% de rejeito e de 50% de rocha estéril para produção do "pastefill". A produção de pasta permite reduzir os custos da operação de preenchimento em 40% comparado com preenchimento de polpa de alta densidade. Algumas das vantagens do sistema de pastefill para essa aplicação particular, são as seguintes:

- pode-se alcançar alturas de 12m na disposição de rejeitos adensados; o depósito fica com descarga zero de água, o que melhora sua reciclagem para o processo;
- diques de 3m de rocha são necessários para contenção do "pastefill", sem requerer linhas de drenagem; a recuperação ambiental é progressiva.

2) Uma aplicação na mineração de níquel no Canadá, na qual se avalia a opção da disposição de rejeitos na forma de pasta, mostra algumas vantagens: ângulo mínimo da disposição de pasta de 3°, redução significativa na construção de barragens, dando como resultado ganhos superiores a US\$ 55 milhões, redução de aproximadamente 80% em operações de manejo e tratamento de águas de descarte, e fechamento prematuro dos depósitos de descarte.

3) No caso da mina Neves Corvo em Portugal, utiliza-se preenchimento com pasta para suas cavas subterrâneas ("backfill"). O nível de produção dessa usina é de aproximadamente 2 milhões de t/ano de minério, composto de cobre e cobre/estanho. Essa usina utiliza os rejeitos com uma concentração de 65% em massa de sólidos e uma

granulometria 100% inferior a 200 μm , um D80 na faixa de 30 – 40 μm . O conteúdo de cimento na pasta para preenchimento vai de 1 até 7% em massa, dependendo do método de mineração usado.

A primeira aplicação industrial que considerava a disposição de rejeitos de mineração em forma de pastas foi a mina Grund na Alemanha, que atualmente está fechada. O “pastefill” era preparado a partir dos rejeitos de uma operação de flotação e de concentração por líquidos densos de uma usina concentradora de chumbo e zinco. Em forma aproximada, partes iguais de agregados de médios densos e de rejeitos da flotação já filtrados eram misturados por um misturador contínuo, formando-se uma pasta de aproximadamente 12% de umidade. O cimento portland era transportado em forma pneumática e somente era adicionado à pasta quando faltavam 50m aproximadamente para alcançar o ponto de descarga. A velocidade de preenchimento era próxima de 30(m³/h) empregando tubulações de 125mm de diâmetro. (Brackebusch, 2000)

Dentre as mais recentes aplicações da tecnologia de preenchimento com pasta mineral podem ser citados os seguintes quatro projetos: (Slottee, 2003)

- i) Projeto Kimberley CTP na África do Sul, que considera a utilização de 5 espessadores de cone profundo de 15m de diâmetro por 16,5m de altura (com ângulo de 45° no cone), que operam em paralelo. A entrada em operação aconteceu no fim do ano de 2002. Os espessadores são controlados por sistemas de controle projetados com base nas características reológicas do “underflow” em concordância com os requerimentos de fluxo da pasta das bombas de deslocamento positivo.
- ii) Projeto Ekapa Mining também na África do Sul que considera o uso de um espessador de cone profundo de 15m de diâmetro e uma altura de 16,5m. O início de operação ocorreu em Dezembro de 2002, considerando a produção de pasta com “slump” de 152 a 178mm (6 a 7”) na descarga das bombas centrífugas.
- iii) Projeto Iscaycruz no Perú que processa rejeitos de Pb-Zn, utilizando um espessador tipo “deep cone” de 11m de diâmetro por 16m de altura. A mina emprega sistema de preenchimento com pasta apresentando os seguintes dados: capacidade de produção de 65t/h; adensamento de sólidos de 78% em massa; descarga do underflow como pasta de “slump” compreendido entre 235 e 241mm (9,25 e 9,50”).

- iv) Projeto PPL Colstrip nos Estados Unidos que corresponde a uma usina produtora de cinzas volantes. São utilizados 2 espessadores de cone profundo de 10m de diâmetro para a produção de pasta mineral. As operações foram iniciadas no ano de 2003. A disposição da pasta é feita através de um fluxo de 100t/h dessa mistura. Havia anteriormente a essa operação um depósito com polpa de alta densidade com ângulo de disposição de somente 2°. Se essa condição fosse mantida, a vida útil desse depósito seria de 3,5 anos. Usando o sistema de disposição na forma de pasta com uma consistência equivalente a um abatimento de 254mm (10"), o ângulo de repouso aumentaria para 5° e sua vida útil alcançaria os 10 anos. Se fosse usada uma pasta mais consistente ainda, com um abatimento equivalente a 178 mm (7"), o ângulo de repouso aumentaria para 10° e a vida útil passaria a 37 anos.

Como se pode observar em grande número das aplicações, são utilizados vários tipos de ligantes como é o caso do cimento portland, cinzas volantes, metacaulim, dentre outros.

Na Tabela I.1 Hernández (2005) apresenta uma lista de aplicações industriais do uso de "pastefill" para preenchimento subterrâneo ou superficial.

Tabela I.1: Aplicações industriais do preenchimento com "pastefill". (Hernández, 2005)

Nome da usina	Localidade/País	Produção	Características do sistema "pastefill"
Cannington	Austrália	Pb-Ag-Zn	Uso de CP
Jiaojia	China	Au	7% outro ligante
Neves Corvo	Portugal	Cu e Cu/Sn	1-7% CP
Enterprice	Austrália	Cu	Uso de outros ligantes
Brunswick	Canadá	Pb-Zn	2-7% CP
Hard Rock	Toyoha/Japão	Pb-Zn-Ag	3-7% CP
Bulyanhulu	Tanzânia	Au	Descarga zero de água
Colstrip	Montana/EUA	Carvão	Cinzas volantes
El Peñón	Chile	Au	Disposição seca dos rejeitos
Mantos de Ouro	Chile	Au	Disposição seca dos rejeitos
Kanowa Belle	Austrália	Au	Cimento (produz pasta, filtros Eimco)
Argyle Diamond Mine	Austrália	Diamante	Realiza mistura de 2 tipos de rejeitos
Mt - Keith	Austrália	Ni	Uso só de espessamento
Line Creek	BC – Canadá	Carvão	Disposição seca dos rejeitos
Cluff Lake	Canadá	U	Disposição seca dos rejeitos
Ekati	Nor-oeste, Canadá	Diamante	Disposição seca dos rejeitos
Vandreuil	Québec - Canadá	Bauxita	Produz pasta desde 1.987

Quando é empregado cimento portland para cimentar o “pastefill” são alcançadas resistências mecânicas adequadas para realizar o preenchimento de cavidades subterrâneas, mas o maior custo de operação está associado justamente a esse insumo, segundo mostram Jung e Biswas (2002) na Tabela I.2. Portanto, para o desenvolvimento de um novo sistema de preenchimento com pasta, deveriam ser avaliados em detalhe os custos de investimento e de operação.

No que se refere ao uso de reagentes orgânicos na preparação de pastas minerais e seu efeito sobre suas características quanto ao estado de agregação, muito pouco tem sido feito. Este é um tema interessante para estudo a ser considerado dentro deste trabalho.

Tabela I.2: Porcentagens típicas dos custos operacionais do sistema "backfill". (Jung e Biswas, 2002)

Descrição	Custo total	Custo relativo unitário de preenchimento (US\$/t)	Custo relativo unitário do minério (US\$/t)
Tarefa:			
- Manutenção/h	6%	6%	6%
- Operação/h	12%	12%	12%
- Salários	0,2%	0,2%	0,2%
Provisão:			
- Manutenção	8%	8,5%	8,5%
- Floculante	0,4%	0,4%	0,5%
- Cimento	73,4%	72,9%	72,8%
Total	100%	100%	100%

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

- Avaliar o desempenho de diferentes reagentes agregantes e ligantes para a produção de “pastefill” a ser empregado na disposição de rejeitos provenientes da mineração de ferro.

2.2. Objetivos Específicos

- Fazer um estudo do estado da arte da utilização de aditivos ligantes e reagentes agregantes empregados para cimentar ou adensar materiais rejeitados do processamento mineral.
- Estudar o papel específico da incorporação de reagentes agregantes (polímero floculante e coagulante inorgânico) e de aditivos ligantes como metacaulim/cal, cimento portland e cinzas volantes, quanto ao desempenho mecânico (resistência à compressão) e de permeabilidade dos materiais cimentados.
- Estudar e comparar comportamentos reológicos de “pastefill” cimentado com diferentes ligantes e não cimentado, mediante a determinação de características tais como viscosidade, tensão de escoamento, abatimento de cone (“slump”) e ângulo de repouso.
- Avaliar possíveis aplicações industriais para os sistemas de pastas cimentadas, produzidas a partir de rejeitos e estéreis da mineração de ferro, a serem implementadas no Brasil.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Aspectos Preliminares

Segundo os trabalhos de Jewell (2002), Araujo et al., (2004), uma pasta mineral pode ser conceituada como um sistema que se apresenta como um fluido homogêneo, no qual não ocorre a segregação granulométrica das partículas, e que, se disposto de forma suave em superfícies estáveis, não apresenta drenagem significativa de água. Sua conformação e consistência durante sua disposição podem ser avaliadas através das metodologias do teste de abatimento de cone ou "slump" (segundo norma NBR NM 67, 1998) e do teste de calha ou "flume". Através da primeira dessas metodologias é possível se determinar a consistência da pasta mineral e mediante a segunda, sua fluidez, especificamente através da determinação do ângulo de repouso desse material. Essas propriedades dos sistemas de pasta, juntamente com a viscosidade e a tensão de escoamento, tornam possível caracterizar seu comportamento reológico. Além das características reológicas de um sistema de pasta mineral, também são importantes as características físicas e químicas do componente sólido, tais como a densidade, a distribuição de tamanhos de partícula, a área superficial específica, as composições química e mineralógica, assim como as características mecânicas e de permeabilidade da pasta cimentada. (Sofrá et al., 2002)

Outra forma de entender o que é um sistema de pasta mineral, é através da observação de Figura 3.1 que apresenta um gráfico de caráter qualitativo da tensão de escoamento ou tensão de ruptura em função do adensamento da pasta, expresso como a porcentagem de sólidos em massa, que mostra os sistemas sólido-líquido possíveis de formar-se a partir de uma simples polpa mineral até uma torta obtida através da filtração, segundo Fourie (2003).

Dependendo das características do componente sólido e da própria pasta formada pela mistura da água e do sólido, pode-se obter diferentes características de fluidez e consistência da pasta, fato que pode ser observado nas fotografias mostradas na Figura 3.2, segundo Fourie (2003), Coxon et al., (2003) e Bedell et al., (2003).

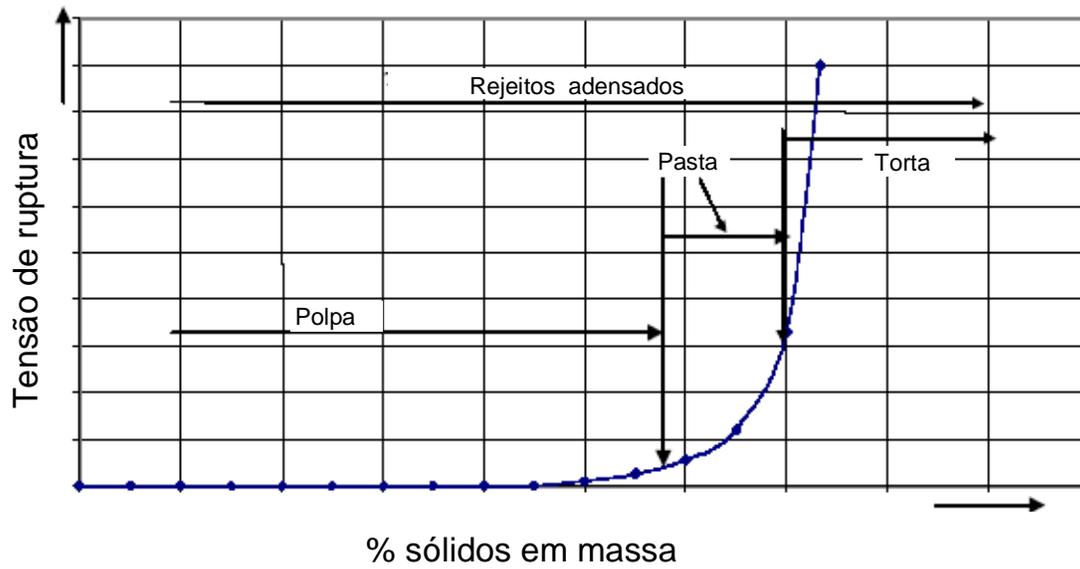


Figura 3.1: Gráfico qualitativo da tensão de ruptura em função do adensamento de sólidos da pasta. (Fourie et al., 2003)



Figura 3.2: Aspecto visual de pastas minerais segundo os trabalhos de Fourie (2003), Bedell et al., (2003) e Coxon et al., (2003).

Segundo Brackebusch (2000), uma pasta pode perder água quando ela é mantida sem movimento durante algumas horas, mesmo dentro de uma tubulação de transporte desse material. A linha divisória entre uma polpa de alta densidade e uma pasta mineral não é normalmente bem definida, fato que não pode ser esquecido na prática do transporte através de bombeamento. A presença de partículas finas parece ser um fator comum nas pastas minerais. Esses finos podem se originar dos rejeitos, argilas, areias finas, dentre outras fontes. Esse fato pode significar uma mineralogia de grande variedade, como por exemplo quartzo, feldspatos, argilas, micas e sais. Também são de interesse o conteúdo de umidade e a densidade da pasta para uma determinada consistência, que pode ser medida através do teste de abatimento, ambas dependem do tamanho das partículas. Assim, quanto mais finas sejam as partículas, maior será a área superficial específica a ser umedecida. Isso proporciona altas umidades e baixas densidades para uma determinada consistência. Com partículas sólidas de maior tamanho a área superficial específica é menor, o que resulta em baixas umidades e altas densidades de pasta de uma mesma consistência.

Na prática, segundo Brackebusch (2000), as misturas de pastas variam seus adensamentos entre 40 e 90% de sólidos em massa. Por exemplo, no caso de uma pasta de rejeitos de flotação de cobre porfírico obtém-se um adensamento de 75% de sólidos em massa.

Boger (2003), na Figura 3.3, mostra um gráfico da tensão de cisalhamento em função do adensamento de sólidos para diferentes pastas preparadas com rejeitos de cobre da usina mineira Escondida no Chile e da usina Ekati, que produz diamante no Canadá. Nota-se nessa figura que os adensamentos críticos variam entre 63 e 76% de sólidos em massa. Também observa-se a diferença de comportamento das pastas preparadas com frações finas e grosseiras do mesmo minério. As pastas com maior participação de finos precisam de maiores quantidades de água para sua formação, em contraste com aquelas preparadas com material de maior granulometria.

As pastas minerais apresentam, em geral, comportamentos de fluídos não newtonianos, mas podem ser classificadas como fluidos plásticos de Bingham que apresentam um valor constante da viscosidade relativa a medida que aumenta a velocidade de fluxo. A prática do transporte desses sistemas de pastas, utilizando tubulações, tem demonstrado que os mecanismos envolvidos ainda não estão bem entendidos.

Dependendo das características próprias da pasta, a viscosidade pode aumentar ou diminuir em função do tempo ou da velocidade do fluxo.

Muitas pastas minerais apresentam-se como pseudo-plásticas, ou seja, a viscosidade diminui quando são aplicadas elevadas velocidades de bombeamento, propriedade que é benéfica para o transporte em tubulações. (Brackebusch, 2000)

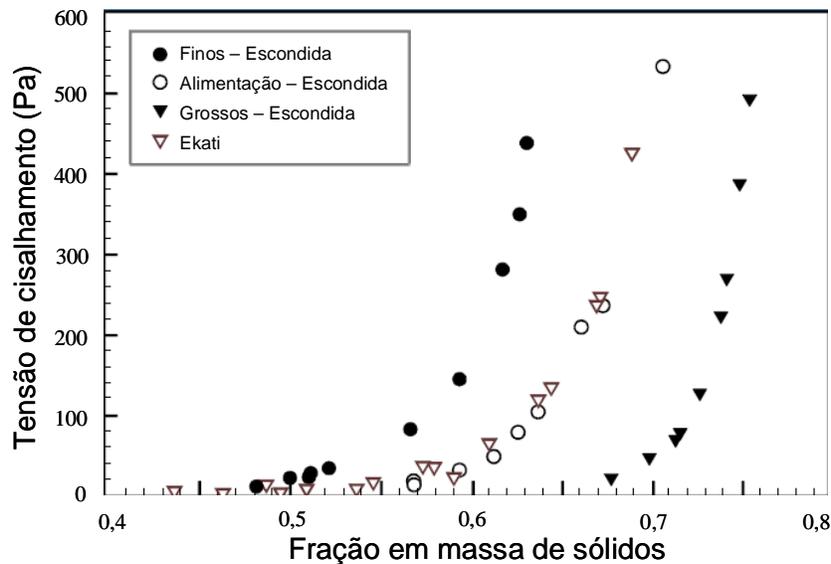


Figura 3.3: Gráfico de tensão de cisalhamento em função do adensamento de sólidos para diferentes pastas minerais. (Boger, 2003)

3.2. Preparação das Pastas Minerais

Brackebusch (2000) afirma que os rejeitos de uma usina de tratamento de minérios geralmente são descarregados na forma de polpas diluídas. O excesso de água pode ser recuperado mediante recirculação na usina usando espessadores de rejeitos. O desaguamento das polpas normalmente é o primeiro passo na preparação de pastas para preenchimento. As partículas finas não devem ser retiradas na operação de desaguamento. Emprega-se, às vezes, um hidrociclone para realizar uma retirada parcial de finos, processo conhecido como classificação parcial, que faz aumentar a viscosidade e as velocidades da filtragem da pasta mineral. O autor desta tese discorda deste procedimento devido a que a presença de finos favorece o manuseio das pastas.

A fração de “overflow” do hidrociclone pode ser desaguada usando um espessador convencional e misturada à descarga do hidrociclone. A descarga do espessador pode alcançar um adensamento de 65 a 70% de sólidos em massa, formando assim uma polpa estável. Essa polpa estável não apresenta segregação das partículas o que permite o bombeamento usando bombas centrífugas em velocidades que não sejam críticas para a polpa. A filtragem pode ser, então, o último estágio na preparação de uma pasta mineral. Nesse caso, diferentes tipos de filtros (de discos, tambor, correia entre outros) podem ser utilizados. Os custos de investimento e de operação são os critérios empregados na escolha do filtro.

Também é possível evitar o estágio da filtragem na preparação da pasta para preenchimento, isso é, misturando diretamente a descarga do espessador convencional com material aluvial já seco, produzindo assim uma pasta para preenchimento. A umidade e a distribuição do tamanhos de partícula do componente sólido são fatores determinantes na formação da pasta mineral. Em lugar de utilizar espessador convencional pode se empregar um espessador de alta densidade ou de cone profundo (“deep cone”) para produzir pasta, método que é um dos mais utilizados. A indústria do alumínio, por exemplo, tem sido pioneira no uso dos espessadores de cone profundo para o processamento de lamas vermelhas e sua posterior disposição superficial em forma de pasta.

Brzienski (2000) afirma que, para estabelecer tanto a sustentabilidade técnica quanto econômica de determinados rejeitos para espessamento em consistência de pasta, é necessária a determinação de propriedades físicas, químicas e reológicas. Podem ser utilizados ainda testes geotécnicos, caracterizações mineralógicas e geoquímicas, em escala de laboratório. Os últimos testes devem ser conduzidos para determinar o tipo e dosagem de floculante requerido para alcançar máximos valores de densidade do material sedimentado, da consistência do underflow do espessador assim como dimensionar os espessadores que sejam precisos (número e área total). Em algumas situações, testes de espessamento, em escala piloto, podem ser aplicados para estudar as características da pasta.

Rejeitos de granulometria grosseira e fina podem ser utilizados para preparar pastas usando operações de espessamento. Bombas de deslocamento positivo podem ser empregadas para o transporte, aproveitando a mesma tubulação para a formação de uma pilha no local do depósito. A dosagem do floculante não deve ser tão alta pois poderá tornar mais difícil a recuperação e reciclagem de água do overflow do espessador.

Através dos testes reológicos pode-se estabelecer a faixa de transição de polpa que sofre segregação das partículas e de pastas sem segregação. O teste de abatimento facilita esta análise, já que é uma ferramenta muito simples de ser empregada durante a execução e produção da pasta.

A Figura 3.4 mostra uma vista de um espessador de cone profundo piloto e um detalhe da descarga de pasta produzida a partir de um rejeito de minério laterítico da Austrália (GL&V, 2003).



Figura 3.4: Espessador de cone profundo piloto e detalhe da descarga de pasta. (GL&V, 2003)

Diversos equipamentos industriais empregados para a produção de pasta mineral são mostradas na Figura 3.5, segundo um dos fabricantes. (GL&V, 2003).

Segundo Vietti e Dunn (2002), as bombas de deslocamento positivo atualmente apresentam uma alta taxa de utilização no transporte de pastas minerais (Figura 3.6).

Quanto aos aspectos de transporte das pastas em tubulações, tais como efeitos tixotrópicos e de perdas por fricção, podem ser empregados os testes de “loop” e de abrasividade. Para assegurar condições adequadas ao transporte (retenção adequada de água e manter a consistência de pasta sem segregação), é preciso que haja uma porção mínima de partículas de granulometria muito fina. Normalmente se utiliza 25% em massa de material com tamanho inferior a 20 μ m. (Brzienski, 2000)

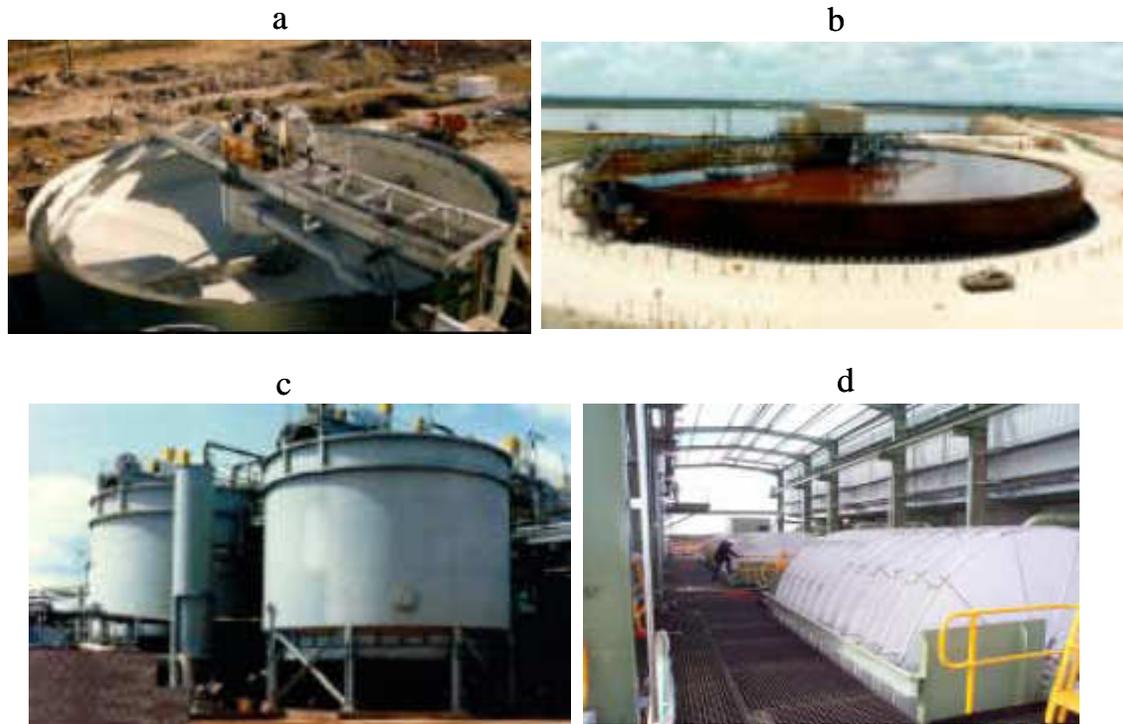


Figura 3.5: Equipamentos de desagamento utilizados na produção industrial de polpas e pastas minerais: a) espessador de alta velocidade; b) espessador de alta densidade; c) espessadores de pasta (cone profundo); d) filtros a vácuo. (GL&V, 2003)



Figura 3.6: Sistema de bombeamento de deslocamento positivo. (Vietti e Dunn, 2002)

As distâncias de bombeamento na prática podem alcançar até 1km segundo a horizontal e nas quedas verticais elas seriam ilimitadas. Os diâmetros da tubulação variam entre 100 e 200mm (4 a 8 polegadas) e as velocidades de fluxo normalmente são menores do que 1(m/s). Brackebusch (2000) mostra, na Figura 3.7, o comportamento do fluxo convencional de uma pasta de consistência média (50% de abatimento) numa tubulação de 150mm.

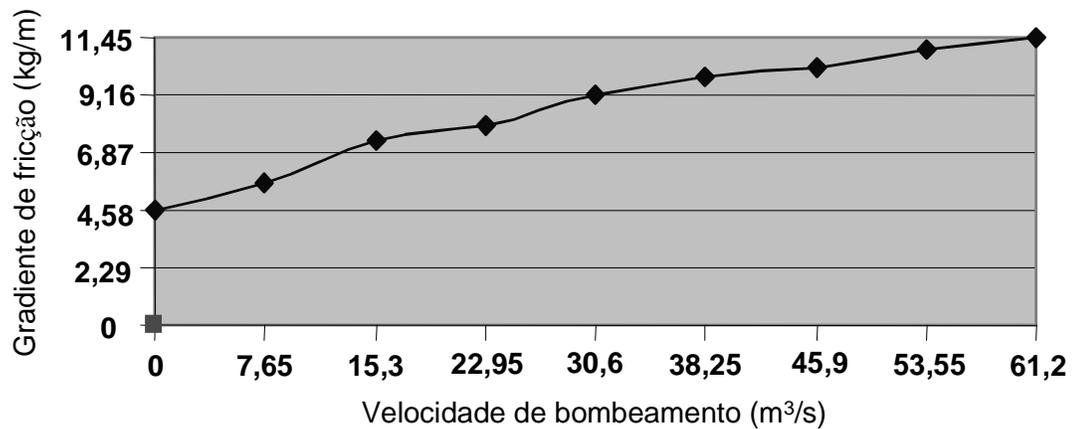


Figura 3.7: Fricção na tubulação para uma determinada pasta. (Brackebusch, 2000)

Segundo Brackebusch (2000) alguns testes que podem ser aplicados para determinar se um material é recomendável para a formação de uma pasta mineral são mostrados na Tabela III.1.

A experiência prática tem mostrado que o escalonamento é difícil quanto as características de fluxo de pasta em tubulações, o que justifica a realização de provas em escala piloto e industrial inclusive.

Tabela III.1: Testes necessários à caracterização de um material visando o preenchimento com pasta. (Brackebusch, 2000)

Escala de laboratório	Escala piloto e industrial
Distribuição de tamanhos de partícula	Espessamento
Densidade	Filtragem
Mineralogia	“slump” versus requerimento energético
Geometria das partículas	Provas de bombeamento em escala industrial
Curvas de compactação e densidade ótima	
Limites líquidos e plásticos	
Porosidade	
Permeabilidade	
Abrasividade	
Fluidez em depósitos	
“slump” versus conteúdo de água	
Testes de espessamento	
Testes de filtragem	
Testes de ciclonagem	
Observação visual	
Provas de fluído em colunas de tubulação	
Resistência mecânica	

3.3. Vantagens dos Sistemas de Preenchimento com Pasta

Segundo Brackebusch (2000), a introdução do sistema de preenchimento hidráulico na mineração subterrânea há mais de 40 anos vem melhorando os suportes do solo e teto da mina e diminuindo os custos de mão de obra e materiais. Algumas das vantagens do sistema de preenchimento com pasta em comparação com os sistemas de preenchimento hidráulico convencionais são as seguintes:

- maiores resistências com menores adições de ligante;
- não há necessidade de decantação de água;
- maior versatilidade quanto a distribuição de tamanhos de partícula do sólido;
- maior densidade do “pastefill” dada sua porosidade mais reduzida;
- maiores resistências confinadas;
- menores problemas gerados pela presença das lamas;

- tempo de ciclo de lavra é reduzido pois a resistência pode ser alcançada mais rapidamente;
- menores velocidades de fluxo de pasta são requeridas devido a um menor número de paradas;
- pode usar-se um maior número de métodos para realizar os trabalhos de lavra.

Por outro lado, frente ao preenchimento com rocha, o preenchimento com pasta apresenta as seguintes vantagens:

- o sistema de transporte através de tubulações é mais econômico que o transporte de rochas para o preenchimento, que utiliza caminhões, carregadores e/ou vagões;
- o preenchimento com rochas tem um maior custo que o sistema de “pastefill”, já que requer também a adição de ganga ou estéril da mina;
- o custo do uso de barragens de rejeitos é maior que o da operação de preenchimento com rocha. Os custos ambientais são também maiores devido à utilização de material de capeamento para o preenchimento subterrâneo.

A única desvantagem talvez seja seu alto custo de investimento, o qual é maior que o necessário para preenchimento hidráulico convencional e muito similar ao preenchimento com rocha. Esse maior investimento somente será justificado com a redução dos custos de operação e aumento da produtividade, no caso em que as reservas de minério sejam suficientes para recuperar o capital ou investimento inicial. (Brackebusch, 2000)

3.4. Disposição de Rejeitos na Forma de Pasta

Brackebusch (2000) estabelece que devido às propriedades plásticas de Bingham que as pastas minerais apresentam, elas formam um ângulo de repouso que é característico quando são descarregadas em uma superfície plana ou inclinada. Esse ângulo está relacionado com a consistência da pasta, e pode estar compreendido na faixa de 5 até 30% de inclinação. Assim a pasta pode ser disposta utilizando uma torre central. A vantagem dessa tecnologia de disposição de rejeitos é que são necessárias menores áreas e estruturas mais simples para a retenção da pasta.

Landriault (2002) mostra na Figura 3.8 os possíveis ângulos de repouso e estruturas de retenção necessários para uma pasta mineral em comparação com uma polpa de alta densidade, considerando diferentes tipos de solos.

Um sistema de descarga múltipla mostrado por Lord (2003) na Figura 3.11, é aplicado pela usina Ekati, no Canadá.



Figura 3.9: Descarga de pasta utilizando uma torre rotatória. (Lord, 2003)



Figura 3.10: Transporte sobre rodas para a disposição superficial de pasta. (Lord, 2003)



Figura 3.11: Descarga múltipla de pasta aplicada na usina Ekati, no Canadá. (Lord, 2003)

A Figura 3.12 apresenta um processo de produção de pasta aplicado pela empresa Alcan, que emprega um espessador de cone profundo, um sistema de bombeamento e tubulação, uma torre de descarga de pasta no local da disposição superficial. (Baker e Hughes, 2001)

Outra forma de fazer a disposição dos rejeitos é conhecida como co-disposição, que utiliza uma mistura de rejeitos finos e adensados na forma de pasta mineral com um fluxo de rejeitos de granulometria mais grosseira, segundo o esquema apresentado por Vietti e Dunn (2002) na Figura 3.13.

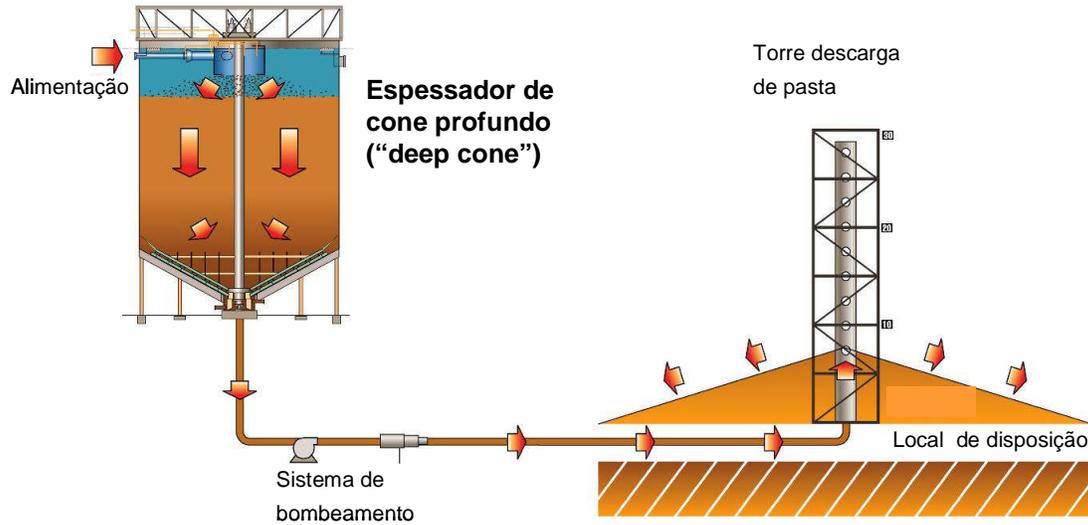


Figura 3.12: Sistema de produção de pasta (espessamento, bombeamento e descarga) para disposição superficial. (Baker e Hughes, 2001)

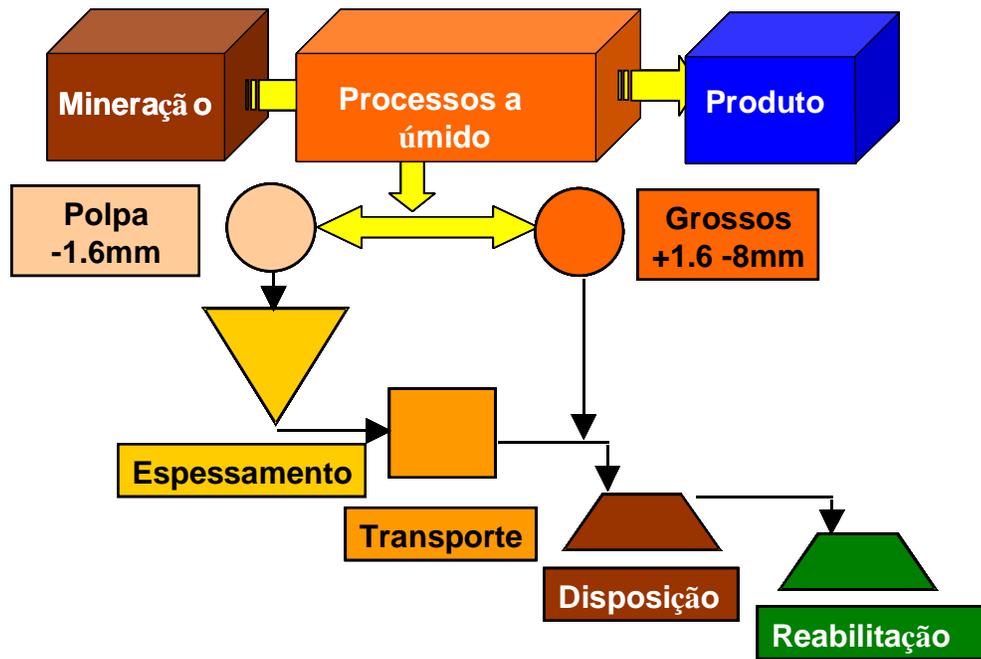


Figura 3.13: O conceito de co-disposição de pasta e rejeito grosso. (Vietti e Dunn, 2002)

Vietti e Dunn (2002) mostram na Figura 3.14 o processo que realiza a co-disposição de pasta de rejeitos finos e rejeitos de granulometria mais grosseira.

A Figura 3.15 mostra as operações de disposição superficial e recuperação ou reabilitação do terreno através de vegetação.



Figura 3.14: Co-disposição de pasta de rejeitos finos e rejeitos grossos. (Vietti e Dunn, 2002)



Figura 3.15: Estágios finais da co-disposição: a) disposição; b) reabilitação. (Vietti e Dunn, 2002)

3.5. Reologia, Propriedades Mecânicas e Aditivos de Pastas Minerais

Alguns resultados obtidos em recentes pesquisas referentes a reologia, propriedades mecânicas e efeito de aditivos utilizados na produção e preenchimento com pastas minerais são apresentados em continuação.

3.5.1. Características reológicas de “pastefill” puros

Quanto a resultados de estudos reológicos podem ser citados os seguintes trabalhos:

1) Boger (2003) apresenta na Tabela III.2 resultados de três tipos diferentes de rejeitos quanto às suas características reológicas de altura de “slump” e tensão de escoamento.

Observa-se que a consistência das pastas estudadas é exatamente a mesma, mas devido às diferentes características químicas e físicas dos componentes sólidos, apresentam-se diferentes resultados quanto às tensões de escoamento, cujo valor está relacionado com a maior resistência a mudança de comportamento de sólido a líquido (caso do rejeito de Pb-Zn).

Tabela III.2: Características reológicas de rejeitos de carvão, ouro e Pb-Zn. (Boger, 2003)

Característica	Rejeitos de carvão	Rejeitos de ouro	Rejeitos de Pb-Zn
Densidade do sólido (kg/m ³)	1450	2800	4100
Concentração de sólidos (em massa)	36	75	75
Densidade de pasta (kg/m ³)	1120	1930	2310
Altura de abatimento (mm)	203 (8")	203 (8")	203 (8")
Tensão de escoamento calculada (Pa)	160	275	330
Predição do gradiente de pressão (kPa/m) *	5,07	8,13	9,60

(*) O gradiente de pressão supõe: material tem comportamento plástico de Bingham; a viscosidade de Bingham é de 1(Pa·s); tubulação horizontal; diâmetro interno da tubulação de 200mm; velocidade na tubulação de 1(m/s).

2) Chambers et al. (2002) apresentam, na Figura 3.16, resultados dos testes de “slump” realizados com um rejeito adensado da mina Myra Falls localizada na Columbia Britânica, no Canadá, na faixa entre 58 e 74% de sólidos em massa. Essa usina subterrânea processa 3600t/dia de um minério de cobre-zinco que gera 1500t/dia de rejeitos finos obtidos pelo “overflow” do hidrociclone e rejeitos mais grosseiros que são destinados ao preenchimento de cavidades subterrâneas (“backfill”). A granulometria dos rejeitos finos é 100% inferior a 74 μ m com 10% de ultrafinos (granulometria inferior a 2 μ m), e massa específica de 3,60g/cm³.

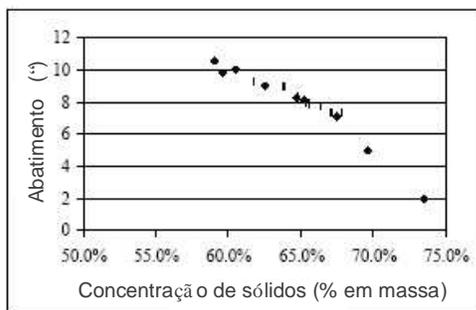
Chambers et al. (2002) também mostraram, através do teste de calha ou “flume”, que a melhor condição de adensamento era aquela de 64% de sólidos aproximadamente, que apresentou um abatimento ou “slump” de 203mm (8,4”) e um ângulo de repouso de 8,9%. A Figura 3.17 apresenta um perfil da pasta ensaiada no teste de calha que mostra uma pasta sem excesso de água. A Tabela III.3 apresenta uma correlação entre dados de adensamento de sólidos, altura de abatimento (medida da consistência) e do ângulo de repouso (medida da fluidez) das pastas estudadas.



Abatimento de 178mm (7”)



Abatimento de 213mm (8,4”)



Faixa de “slump” testada



Abatimento de 254mm (10”)

Figura 3.16: Resultados do teste de abatimento de cone (“slump”). (Chambers et al., 2002)



Figura 3.17: Perfil da pasta com 64% de sólidos e sem excesso de água. (Chambers et al., 2002)

Tabela III.3: Correlação entre adensamento de sólidos, altura de abatimento e ângulo de repouso. (Chambers et al., 2002)

Abatimento (mm)	% de sólidos (em massa)	Ângulo de repouso (%)
178 (7")	67,7	13
203 (8")	65,5	----
213 (8,4")	-----	8,9
229 (9")	63,1	----
254 (10")	60,2	1,4

3) Araujo et al. (2004) apresentam, na Figura 3.18, os resultados obtidos no teste de calha usando pastas minerais preparadas a partir de rejeitos da mineração de ferro e considerando diferentes adensamentos de sólidos e inclinações da calha.

A Figura 3.18-a mostra o perfil de uma pasta com 73% de sólidos e sem inclinação da calha de acrílico construída para a realização desse teste. A Figura 3.18-b mostra o efeito da inclinação da calha sobre o desaguamento de uma pasta, após 5min do término do teste. A Figura 3.18-c mostra a presença de estrias numa pasta menos adensada (71% de sólidos) e sem inclinação da calha.

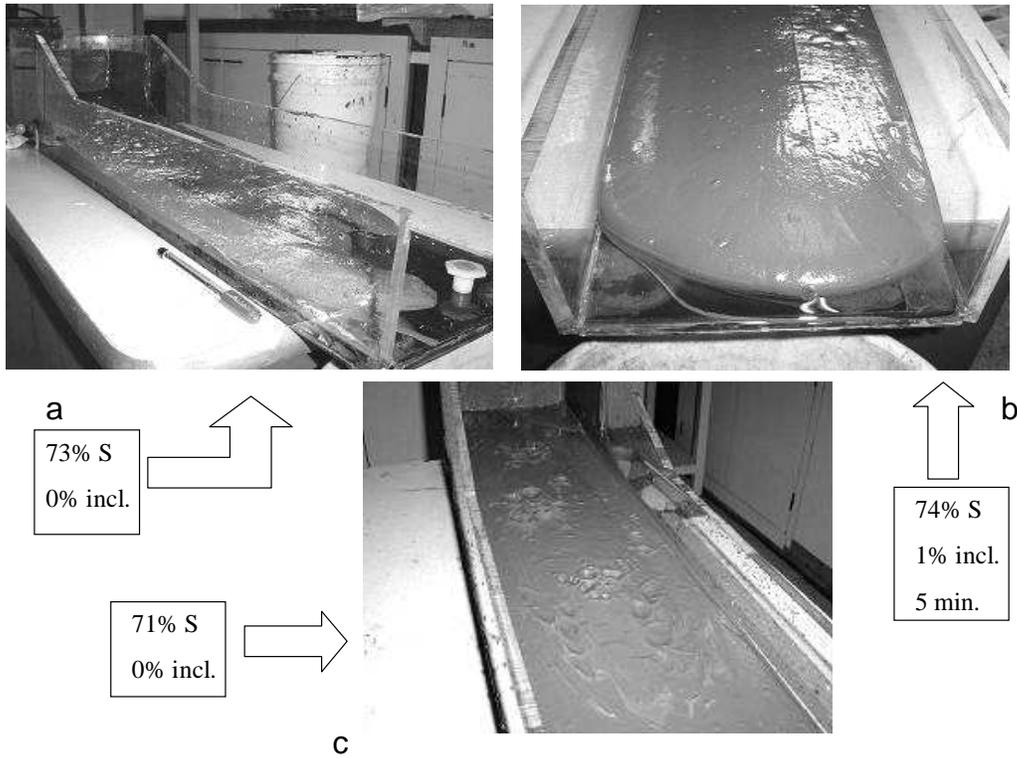


Figura 3.18: Pastas ensaiadas pelo teste de calha considerando diferentes adensamentos e inclinações de calha. (Araujo et al., 2004)

4) Shou (2002) apresenta nas Tabelas III.4 e III.5 a caracterização granulométrica e a correlação entre adensamento de sólidos e reologia de pastas, respectivamente. Os rejeitos de zinco da mina Greens Creek localizada no Alaska-USA tinham, na realidade, quantidades de cimento portland entre 3 e 5% em massa, sendo testados “pastefill” com 5% de cimento para concentrações de sólido entre 74 e 80%. Da Tabela III.4 pode ver-se a distribuição de tamanho de partículas a qual apresenta um percentual elevado de material fino ($\approx 60\% < 25\mu\text{m}$). Da Tabela III.5 observa-se a correlação entre a variável adensamento de sólidos da pasta e as respostas reológicas viscosidade de Bingham e tensão de cisalhamento, as quais mostram uma variação do tipo exponencial com a fração volumétrica de sólidos.

Tabela III.4: Frações passantes acumuladas da amostra sólida utilizada. (Shou, 2002)

Tamanho de partícula (µm)	Fração passante acumulada (%)
74	85,02
25	59,38

Tabela III.5: Correlação entre adensamento de sólidos e reologia da pasta. (Shou, 2002)

Cw	η (Pa·s)	τ_Y (Pa)
74	1,12	18,89
75	1,52	16,44
76	1,55	27,96
78,1	2,23	20,98
$\tau_Y = A \cdot \Phi B$	A = 41153; B = 4,6144	
$\eta = 10Vt \cdot B'$	B' = 3,595	

onde: Cw é a concentração de sólidos em massa da pasta; Φ é a fração em volume de sólidos; τ_Y é a tensão de escoamento da pasta; η é a viscosidade de Bingham; A, B e B' são parâmetros reológicos característicos.

5) A Figura 3.19 mostra um gráfico referente a formação de pasta em função da quantidade de finos considerando os dados do projeto Yaullyam Casapalca. (Baker & Hughes, 2001). O gráfico também mostra as regiões de predominância dos estados sólido, pasta e polpa.

Ao observar a Figura 3.19 se verifica o fato que uma maior quantidade de material fino na mistura sólido-líquido amplia o campo de predominância da pasta mineral.

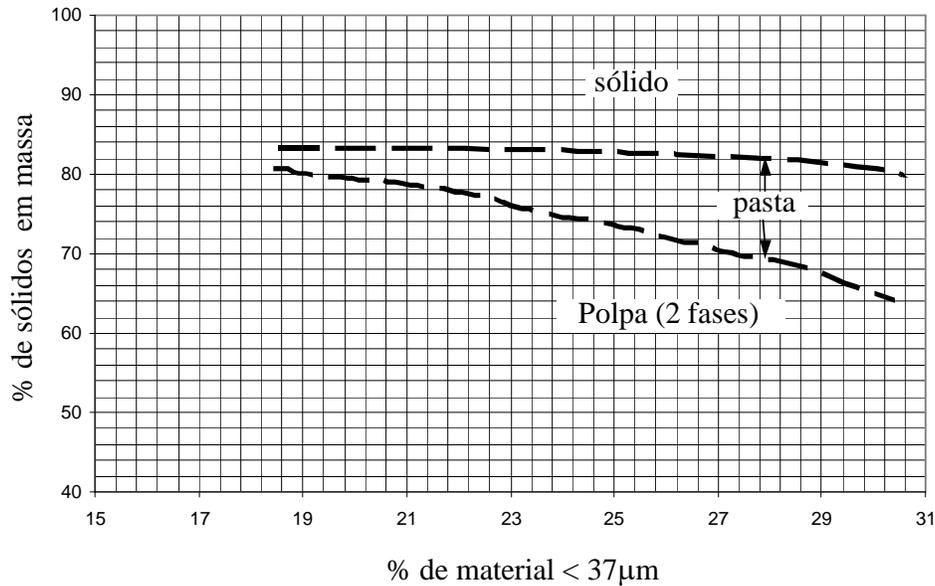


Figura 3.19: Gráfico de predominância dos estados sólido, pasta e polpa para o projeto Yaullyam Casapalca. (Baker-Hughes, 2001)

6) O efeito da adição de finos sobre o ângulo de repouso foi estudado por Robinsky (2002). Na Figura 3.20 mostra-se um gráfico do ângulo de repouso em função do adensamento da pasta mostrando o comportamento típico de uma polpa e de uma pasta mineral.

Nesse caso, pode-se verificar que uma maior adição de material fino causa aproximação do sistema ao estado de pasta anulando o processo de segregação das partículas sólidas.

A figura 3.20 mostra ainda que existe um certo ponto no qual a co-disposição se faz factível já que mesmo sendo uma mistura de material mais grosseiro (areia) e outro mais fino (lama), o comportamento da pasta é único (aparece uma única curva). Nesse caso particular, este ponto crítico no adensamento acontece a partir de 67,5% de sólidos em massa.

7) O efeito do adensamento de sólidos sobre as respostas de altura de abatimento e ângulo de repouso é mostrado por Hernández et al. (2005) na Figura 3.21. Nesse caso foi considerada uma amostra de rejeito de flotação de ferro para a preparação das pastas estudadas. Essa figura apresenta fotografias dos testes de abatimento em cilindro e de calha, para duas pastas testadas.

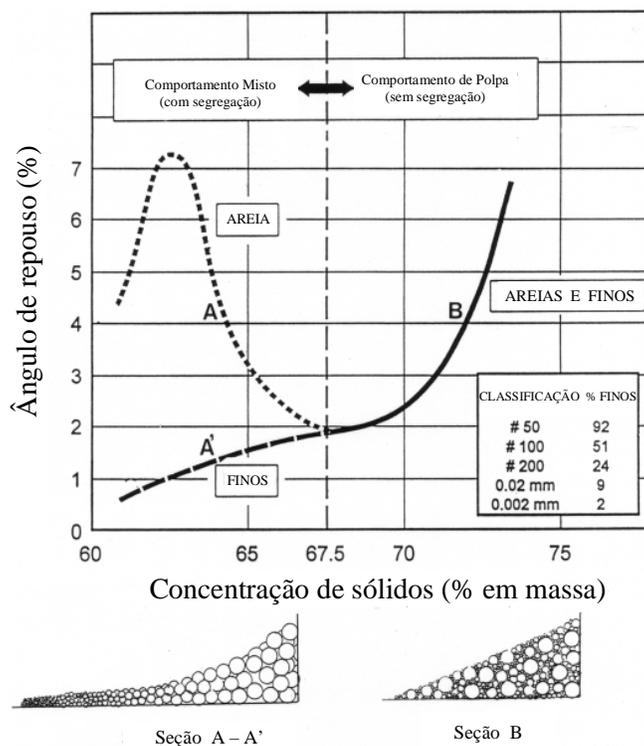


Figura 3.20: Gráfico do ângulo de repouso em função de adensamento de sólidos. (Robinsky, 2002)

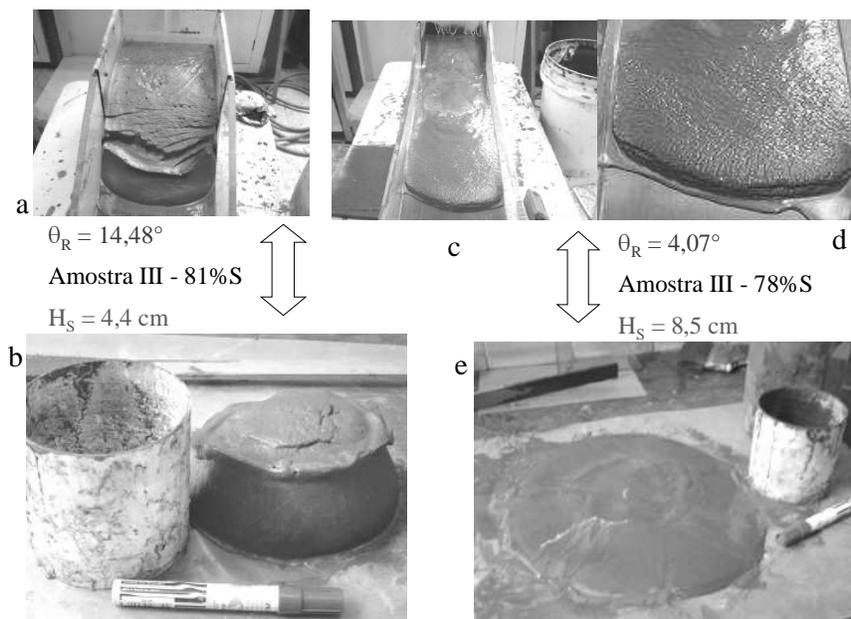


Figura 3.21: Fotografias de testes de abatimento e calha de pastas da amostra de rejeito de flotação. (Hernández et al., 2005)

A figura 3.21 mostra os comportamentos extremos de pastas com adensamentos de 78 e 81% de sólidos. Foram obtidos promissores valores dos ângulos de repouso para essas pastas minerais (superiores aos 4°) apesar da menor consistência da pasta com adensamento de 78% em sólidos.

8) Um gráfico da altura de abatimento adimensional em função da tensão de escoamento adimensional é apresentado por Fourie (2002) na Figura 3.22. São mostradas curvas correspondentes a areia mineral e rejeitos do processamento de minérios de ouro e zinco.

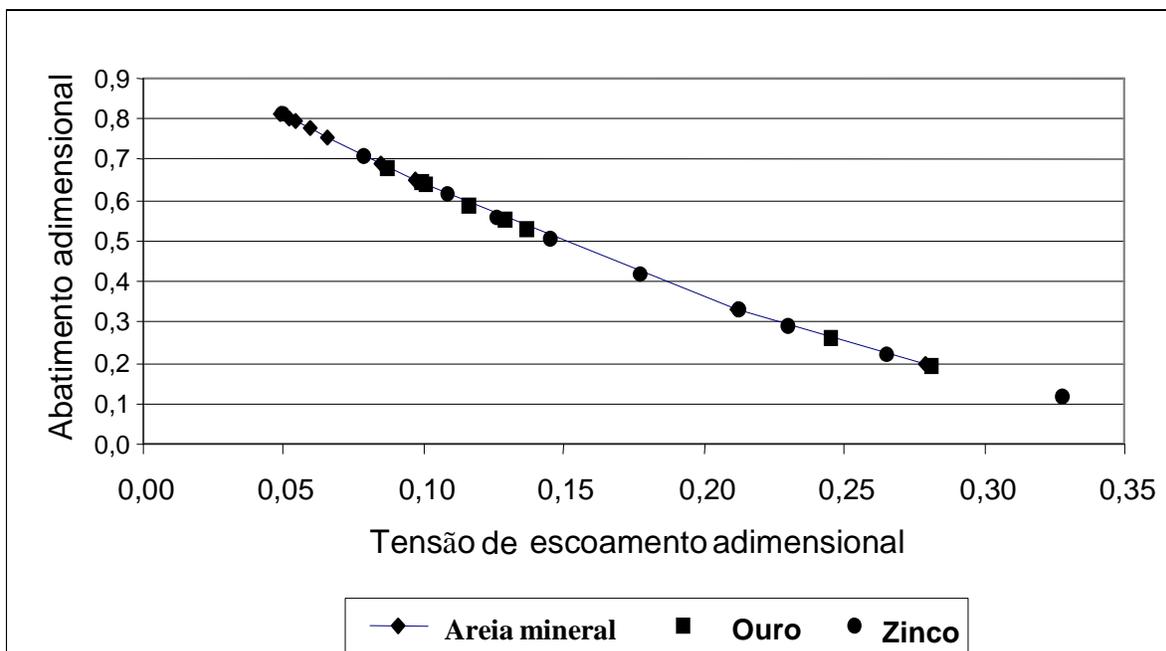


Figura 3.22: Abatimento adimensional em função da tensão de escoamento adimensional. (Fourie, 2002)

A definição dos parâmetros reológicos adimensionais, apresentados na Figura 3.22, está dada pelas seguintes equações:

$$\tau'_{y} = \tau Y / \rho g H \quad (3.1)$$

$$s_a = s_i / H \quad (3.2)$$

onde: s_a é a altura de abatimento adimensional; s_i é a altura de abatimento em um determinado tempo e condição de adensamento.

Na Figura 3.22 nota-se uma ótima correlação linear existente entre esses parâmetros reológicos adimensionais que tem validade para os três tipos de materiais testados. Este resultado é de muito interesse na prática já que o uso de uma metodologia tão simples como o teste de abatimento poderia correlacionar-se com propriedades reológicas intrínsecas do material em estudo (nesse caso as pastas minerais).

9) O efeito do adensamento de sólidos e da velocidade de rotação da haste sobre a viscosidade da pastas minerais preparadas com uma mistura de rejeitos e lamas da mineração de ferro do Brasil é mostrado por Araujo et al., (2004) na Figura 3.23. Os adensamentos testados nesse caso foram 70 e 72,5% de sólidos considerando o ciclo reológico 1-100-1rpm.

Ambas as pastas apresentam um comportamento tixotrópico (Boger, 2003), isto é, valores do trajeto de ida (1-100rpm) do ciclo reológico são maiores que aqueles registrados no trajeto de retorno (100-1rpm). A pasta com maior adensamento mostrou os maiores valores de viscosidade, como esperado.

10) Na pesquisa de Zhou et al. (1999) foram estudadas amostras de alumina ultrafina de diferentes distribuições granulométricas e áreas superficiais específicas segundo apresenta-se na Tabela III.6. Também o efeito do pH sobre a tensão de ruptura ou escoamento das suspensões de alumina foi estudado para duas distribuições granulométricas equivalentes (AKP-30 e a mistura de AKP-15 e AKP-50), segundo mostra-se na Figura 3.24.

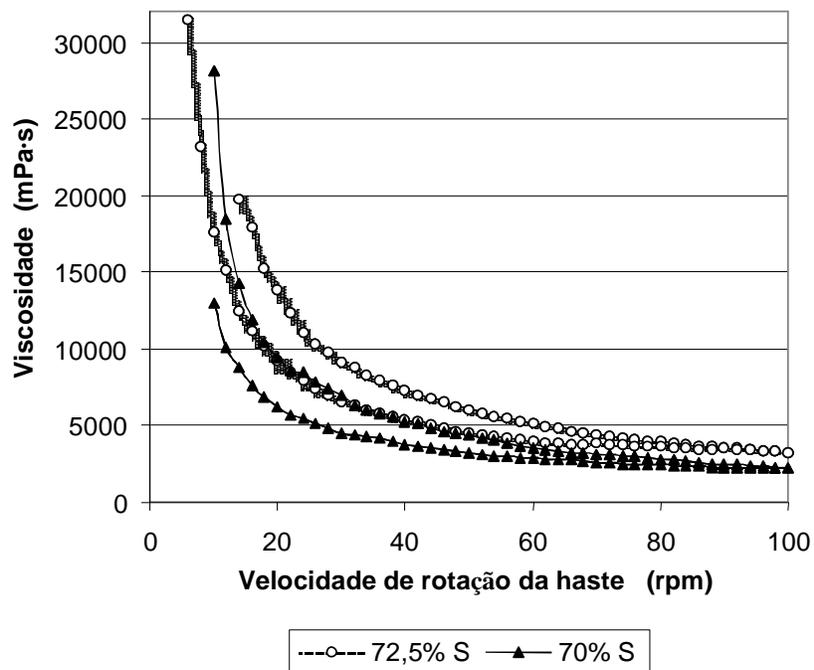


Figura 3.23: Comportamento da viscosidade de pastas adensadas com 70 e 72,5% de sólidos. (Araujo et al., 2004)

Tabela III.6: Características de granulometria e ASE das partículas de alumina. (Zhou et al., 1999)

Nome da amostra	ASE por BET (m ² /g)	d ₅₀ (μm)	d ₉₀ (μm)
AKP-15	3,8	0,548	0,945
AKP-20	4,3	0,332	0,761
AKP-30	6,8	0,169	0,451
AKP-50	10,5	0,140	0,391

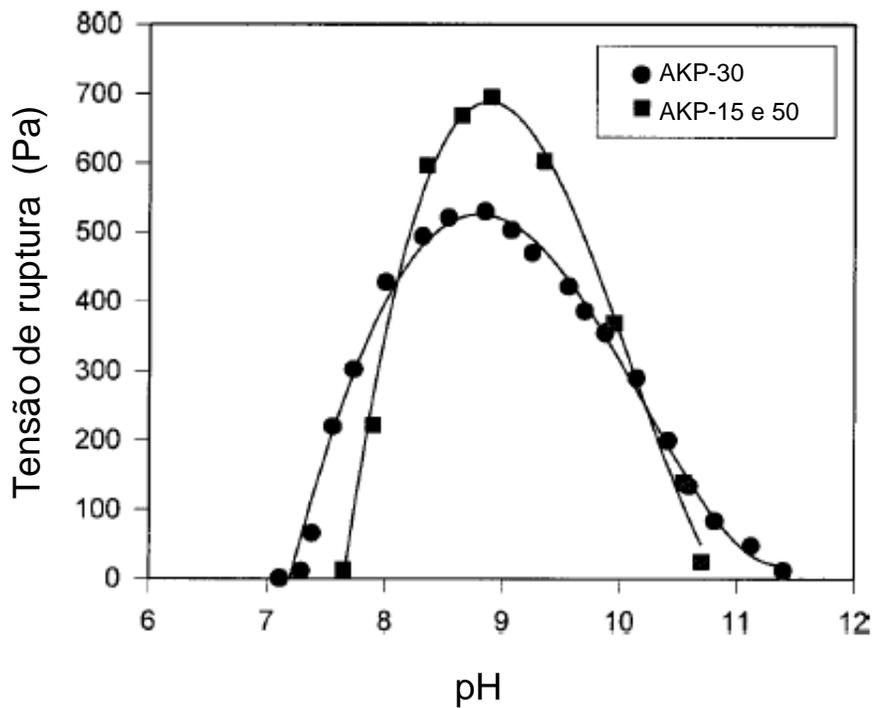


Figura 3.24: Efeito do pH sobre a tensão de ruptura de duas suspensões de alumina. (Zhou et al., 1999)

11) O efeito da largura da calha sobre o ângulo de repouso de três sistemas de pasta é apresentado por Fourie (2003) na Figura 3.25.

Da Figura 3.25 observa-se que as curvas têm uma tendência à queda nos valores dos ângulos de repouso em calhas com maior largura, sendo mais significativa no caso da pasta de maior adensamento e maior tensão de escoamento ($\tau_3 = 80\text{Pa}$).

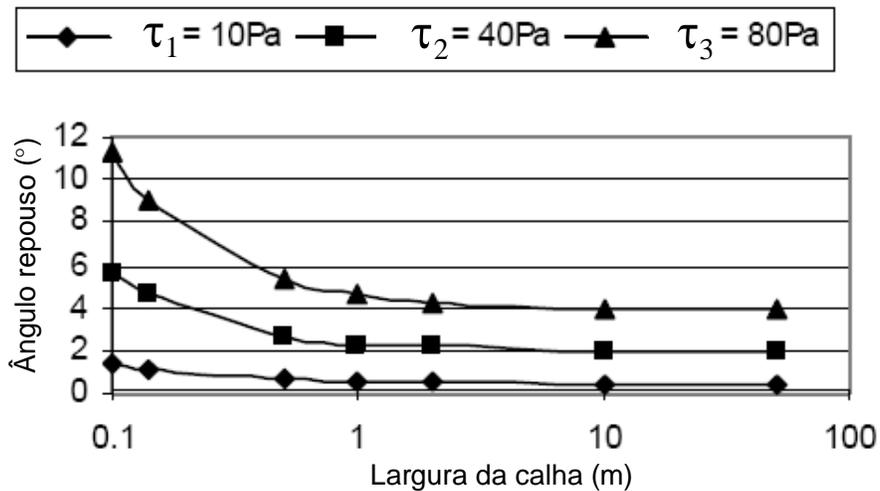


Figura 3.25: Comportamento do ângulo de repouso de diferentes pastas minerais em função da largura da calha. (Fourie, 2003)

No caso de uma calha de 10cm de largura, se obtém um ângulo de repouso superior aos 11° para a pasta mais adensada, de 6° na pasta intermediária e de 1,5° na pasta menos adensada. Já para uma calha de escala piloto/industrial de 10m de largura, os ângulos de repouso obtidos são bastante menores (inferiores a 4° em todos os casos testados). Estes últimos valores são os que mais se aproximam da prática industrial.

12) Fourie (2003) apresenta na Figura 3.26 diferentes medidas da tensão de escoamento de pastas minerais preparadas a partir de rejeitos da mineração de ouro, empregando diferentes técnicas diretas (reômetro e Vane) e indiretas (teste de abatimento) para sua obtenção.

Ao observar o gráfico apresentado na Figura 3.26, verifica-se uma boa correlação dos dados da tensão de escoamento obtidos através das três técnicas utilizadas.

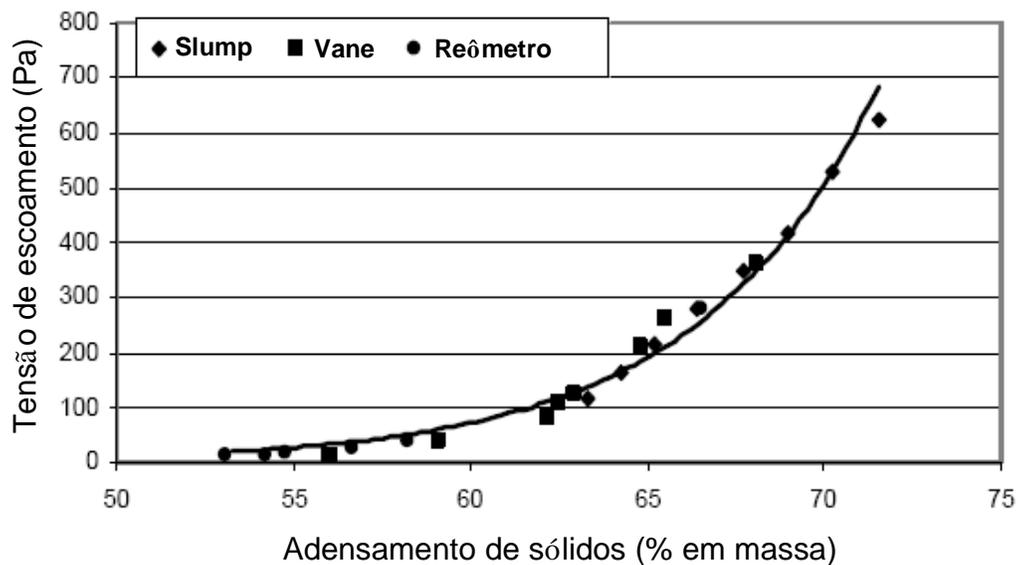


Figura 3.26: Comportamento da tensão de escoamento em função do adensamento da pasta. (Fourie, 2003)

13) Cooke (2005) mostra na Tabela III.7 e na Figura 3.27 as características do material e projeto de disposição de rejeitos na forma de pasta e o resultado de um estudo de caso que apresenta os gráficos de tensão de escoamento e viscosidade de Bingham em função do adensamento de sólidos e da consistência da pasta (usando fotografias e alturas de cone de abatimento).

Tabela III.7: Algumas características do material e do projeto avaliado. (Cooke, 2005)

Tipo de polpa	Rejeitos de ouro
Tonelagem	500 t/h
Comprimento tubulação	5 km
Mudança na elevação da tubulação	Zero (0)
Vida do projeto	10 anos
Horas de operação por ano	8000 horas
Custo em energia	US\$ 0,05 / kWh
Taxa de inflação	8% ao ano
Taxa de desconto	10% ao ano

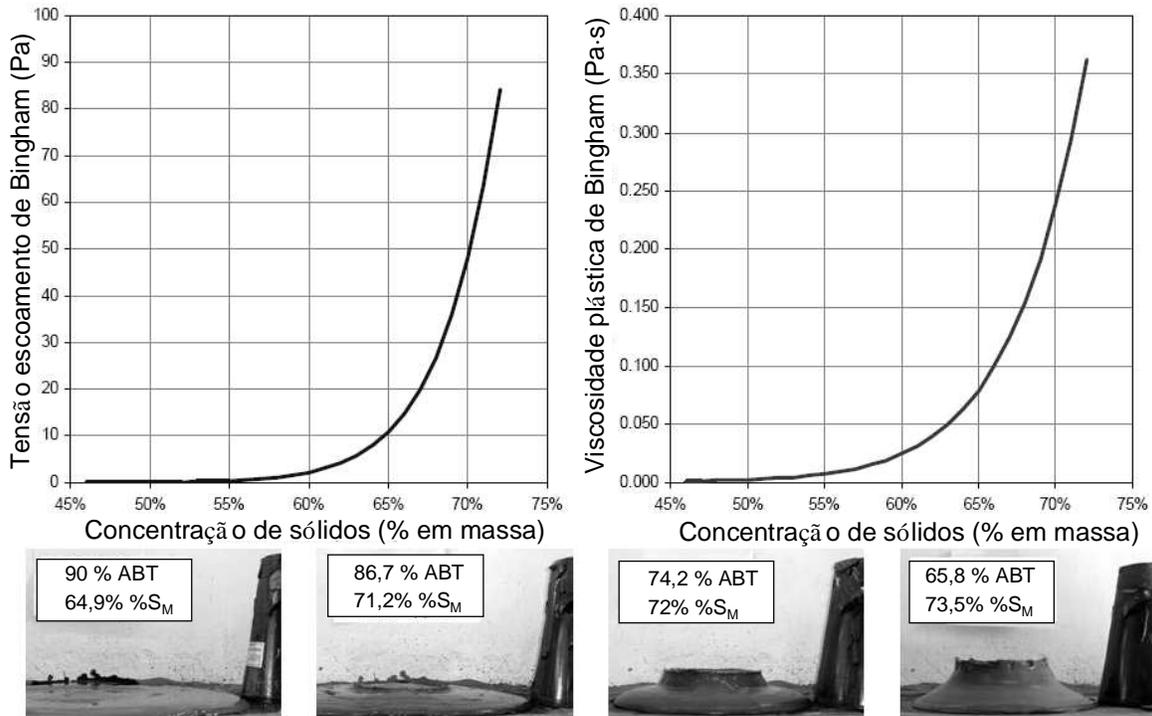


Figura 3.27: Gráficos da tensão de escoamento e viscosidade de Bingham em função do adensamento das pastas e fotografias do teste de abatimento de cone. (Cooke, 2005)

Da Figura 3.27 pode-se ver que a partir do adensamento de 65% em massa de sólidos ambas as curvas (tensão de escoamento e viscosidade plástica de Bingham) sofrem um aumento significativo. Esse fato é comprovado ao observar as fotografias correspondentes aos testes de abatimento de cone obtidas para diferentes condições de adensamento, que evidenciam, também, esse significativo incremento na resposta reológica.

14) Fourie (2002) apresenta na Figura 3.28 um gráfico da energia necessária para realizar o bombeamento de um fluido tipo pasta em função do adensamento de sólidos expresso como % em volume.

Nessa figura mostram-se as regiões extremas correspondentes ao fluxo laminar e turbulento do material estudado considerando uma tubulação de diâmetro de 152mm e uma alimentação de 65t/dia. A curva da tendência maioritária dos pontos experimentais apresenta um mínimo na energia necessária para realizar a operação de bombeamento, condição que se apresenta na faixa de adensamento de 23 a 25% em volume de sólidos.

Para o caso das pastas minerais, onde os adensamentos em sólidos são elevados, pode-se esperar, portanto, que o regime de fluxo seja laminar.

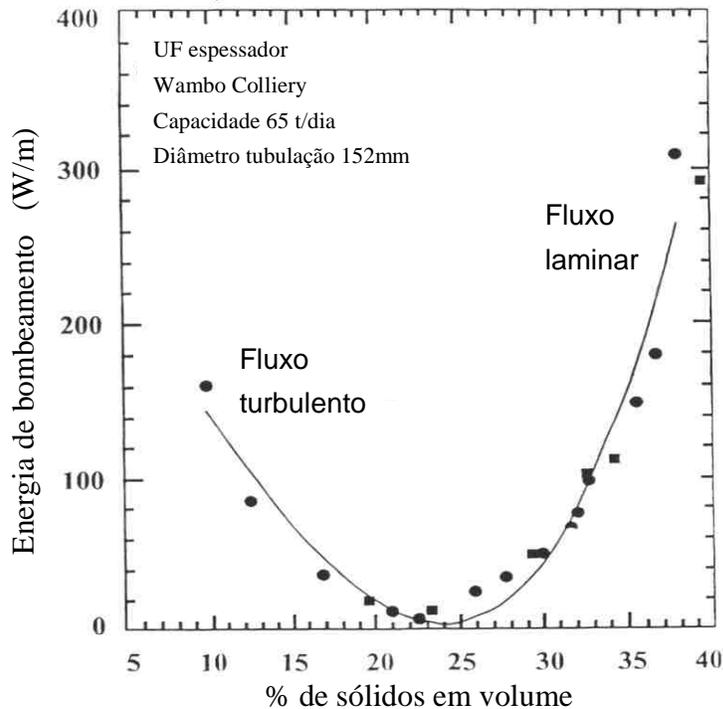


Figura 3.28: Gráfico da energia de bombeamento em função do adensamento de sólidos em volume. (Fourie, 2002)

15) Scheurenberge et al. (2004) mostram os resultados obtidos através de testes de calha e de cone em escala piloto aplicados a pastas preparadas com rejeitos da mineração de cobre das usinas peruanas de Toquepala e Cuajone. Uma mistura desses rejeitos foi utilizada nesse trabalho considerando 54% de adensamento de sólidos, um tamanho médio de partícula de $80\mu\text{m}$, com um valor de pH natural da pasta de 9,35. A Tabela III.8 mostra algumas das propriedades dos rejeitos adensados após a secagem natural da pasta. Os valores de ângulo de repouso obtidos com essa mistura de rejeitos foram de 6,4% para um adensamento de 67% de sólidos em massa e de 5,7% para 65% de sólidos.

Algumas das variáveis empregadas no teste de cone piloto foram as seguintes: adensamento de rejeitos de 67% em sólidos, disposição da pasta usando tubulação a

razão de 15 a 18L/min, espessura de pasta disposta no cone de 150mm. O ângulo do cone era de 45°, o raio de 25m e a inclinação do terreno de 5%.

Nos testes de calha foram caracterizadas pastas com adensamentos de 65 a 67% de sólidos em massa, considerando espessura de pasta disposta de 70 e 150mm. Os períodos da secagem foram de 5 e 10 dias. A alimentação das pastas foi realizada em calhas a uma razão de fluxo entre 15 e 18L/min em períodos de 6 e 12 horas. As calhas de cimento tinham 10m de comprimento, 1m de largura e 5% de inclinação na base.

Tabela III.8: Propriedades dos rejeitos após a secagem da pasta disposta superficialmente. (Scheurenberge et al., 2004)

% finos	% areias	ρ_S seco	Umidade (%)	Grau de Saturação (%)	Ângulo de fricção (φ)	Permeabilidade (cm/s)
50 – 51	50 – 48	1,60 – 1,69	25 – 30	90	35°	1,2×10 ⁻⁶
51 – 52	49 – 48	1,60 – 1,67	26 – 30	100	34°	1,2×10 ⁻⁶

Da Tabela III.8 observa-se que pode ser obtido um “pastefill” de baixa permeabilidade uma vez seco, com ângulo de fricção de 35° e valores de umidade inferiores a 30% em massa, considerando granulometrias similares dos rejeitos de cobre testados.

16) Williamson et al. (2004) também apresentam resultados obtidos através de testes realizados em escala piloto de pastas minerais preparadas com rejeitos da mineração de cobre das usinas peruanas de Toquepala e Cuajone. Foram obtidos ângulos de repouso de 6% em testes de calha em escala de laboratório. O valor de pH tinha um efeito marcante na reologia das pastas com 67% de sólidos em massa. Na Tabela III.9 observa-se o efeito da concentração de sólidos sobre o requerimento de fluxo em tubulações de transporte de pastas. Dessa tabela pode-se concluir que para maiores adensamentos de pasta tem-se a predominância do regime de fluxo laminar frente ao turbulento. Quando os gradientes de pressão são muito elevados se faz necessário o emprego de bombas de deslocamento positivo para poder transportar a pasta.

Tabela III.9: Efeito do adensamento sobre as características de fluxo das pastas minerais. (Williamson et al., 2004)

63% SM	65% SM	67% SM
Possível fluxo turbulento	Possível fluxo laminar	Fluxo laminar
Gradientes de pressão baixos	Mudanças moderadas no gradiente de pressão devido a mudanças de fluxo laminar a turbulento	Mudança grande no gradiente de pressão devido a mudanças de fluxo laminar a turbulento durante flutuações de densidade
-----	Podem ser usadas bombas centrífugas sempre que a diferença de cota seja suficiente	Uso de bombas de deslocamento positivo
-----	-----	Complexidade crescente de projeto

17) Shou et al. (2002) mostram uma correlação entre o gradiente da pressão e a consistência da pasta expressa como altura de abatimento na Figura 3.29. O incremento do gradiente da pressão se acelera quando o abatimento diminui. Por exemplo, quando o “slump” desce de 7 para 6 polegadas, o gradiente da pressão cresce em torno de um 20% para a tubulação de 20,3cm (8”) de diâmetro, e de 30% para a tubulação de 15,2cm (6”) de diâmetro.

18) Paterson (2003) apresenta, na Figura 3.30, uma correlação entre o consumo específico de água e o adensamento de polpa, considerando as faixas de existência de polpa convencional, polpa de alta densidade e de pasta. O autor faz uma comparação da porcentagem de reciclagem de água no processo em cada uma das misturas de sólido e líquido analisadas, verificando uma maior necessidade de reciclagem de água no caso de uma polpa convencional, uma intermediária para o caso da polpa de alta densidade e nula no caso da pasta.

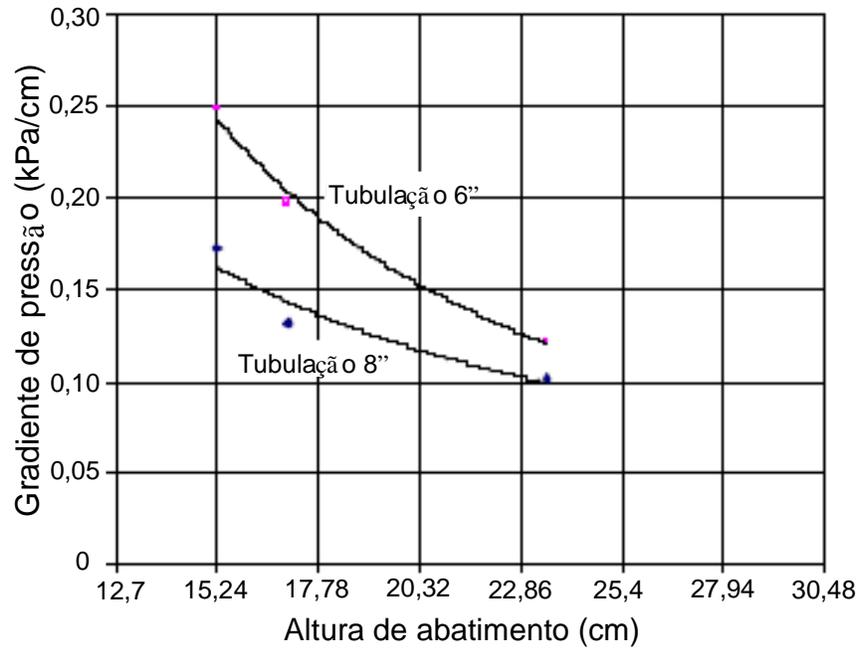


Figura 3.29: Gráfico do gradiente de pressão em função do “slump” do material. (Shou et al., 2002)

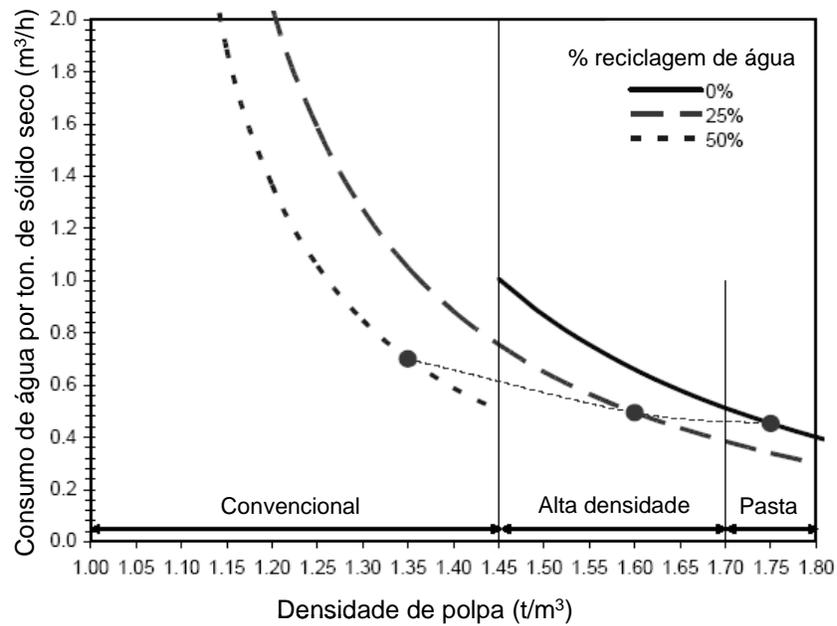


Figura 3.30: Gráfico do consumo específico de água em função da densidade de polpa. (Paterson, 2003)

19) Sellgren et al. (2005) apresentam um estudo de viabilidade técnica-econômica do uso de bombas centrífugas para sistemas de polpas de rejeitos altamente adensados e comparam com a alternativa do emprego de bombas de deslocamento positivo. Algumas das variáveis consideradas nesse estudo foram as seguintes:

- a. Fluxo de 300(t/h) de sólido seco a transportar em forma de polpa;
- b. Tensão de escoamento de 200Pa para uma pasta com 70% de sólidos em massa (44% em volume) e um fluxo de pasta equivalente a 227(m³/h).
- c. Diâmetro da tubulação de 20cm foi requerido para uma distância de bombeamento de 1000m.

Assim, o requerimento de pressão de bomba foi de 4MPa, o que define o uso de cinco bombas centrífugas em série, com diâmetro de impulsor de 43cm, 1500rpm, uma eficiência de bombeamento de 57% e um requerimento de potência de 442kW. Neste caso o autor desta tese não concorda com esta avaliação dado o alto gradiente de pressão que deverão suportar as bombas centrífugas dispostas em série.

Na comparação com o emprego de bombas de deslocamento positivo, tem-se uma eficiência no bombeamento de 80% com uma potência de 315kW.

Para 6.000h/ano de produção com US\$0,05/kWh quanto ao custo específico de potência, tem-se uma diferença no custo de potência de US\$38.000/ano maior para o caso das bombas centrífugas. Mas, quanto ao capital inicial ou custo de investimento de bombas de deslocamento positivo resultou ser US\$900.000 mais elevado que no caso das bombas centrífugas. Portanto, se for considerada uma vida útil do projeto de aproximadamente 18 anos, seria recomendável o uso de bombas de deslocamento positivo.

Outra conclusão desse trabalho foi que as bombas centrífugas podem ser empregadas quando a porcentagem de sólidos em volume era superior a 45%.

20) Na Tabela III.10, Martinson et al. (2005) apresentam características de uma polpa convencional, uma polpa de alta densidade e uma pasta mineral, que foram preparadas com um rejeito de cobre da mina subterrânea de Cabildo da Companhia Mineira "Las Cenizas" no Chile. Especificamente, são mostradas as faixas nas quais variam propriedades reológicas tais como tensão de escoamento e da altura de abatimento, em função do adensamento da mistura sólido-líquido. As pastas tinham um valor médio de pH de 9,7 e sua parte sólida um tamanho médio equivalente a 42 μ m (d₅₀).

Tabela III.10: Características reológicas de polpas e pastas minerais. (Martinson et al., 2005)

Característica	Polpa convencional	Polpa alta densidade	Pasta
Tensão de escoamento	$0 \text{ Pa} < \tau_Y < 4,8 \text{ Pa}$	$4,8 \text{ Pa} < \tau_Y < 100 \text{ Pa}$	$\tau_Y > 100 \text{ Pa}$
Abatimento (s) para $H \approx 30\text{cm}$ (12")	Apresenta abatimento total (100%)	$10'' < s < 11,5''$	$7'' < s < 10''$
Adensamento (% de sólidos em massa)	$0 < \%SM < 59,9$	$59,9 < \%SM < 70,6$	$\%SM > 70,6$

21) Theron et al. (2005) mostram, na Figura 3.31, a disposição superficial da pasta de rejeitos da mineração de ouro da usina Bulyanhulu da Tanzânia, e na Figura 3.32, um gráfico do perfil da umidade da pasta disposta em forma superficial em função do tempo da secagem natural. Foi considerada uma profundidade de camada testada de 600mm e de um comprimento total de 55m. A taxa de alimentação de pasta para disposição foi de 130t/h com umidade de 35% em massa.

Na Figura 3.31 observa-se a disposição superficial da pasta aproveitando o ângulo de repouso natural que esse material apresenta. A Figura 3.32 mostra que após 90 dias da secagem da pasta obtêm-se umidades residuais na faixa compreendida entre 14 e 18% em massa, o que representa respectivamente 40 e 51,4% da umidade inicial da alimentação desse rejeito de ouro na forma de pasta.

22) Newman et al. (2001) apresentam, na Figura 3.33, uma comparação das atuais alternativas de disposição de rejeitos: na forma de polpa (disposição convencional subaquática) e na forma de pasta (disposição superficial de pasta), considerando alguns dados dos requerimentos das barragens de rejeitos correspondentes. Observa-se que ao considerar uma barragem para dispor uma pasta de rejeitos (com um volume total de 154000m³), podem ser dispostos 5,6 milhões de m³ de rejeitos, enquanto que no caso de disposição subaquática de rejeitos, precisa-se de um volume de barragem doze vezes maior (1,9×10⁶m³) e o volume de rejeitos é apenas de 7 milhões de m³ dos rejeitos (somente 22% maior que no caso anterior).



Figura 3.31: Disposição superficial de pasta na usina Bulyanhulu. (Theron et al., 2005)

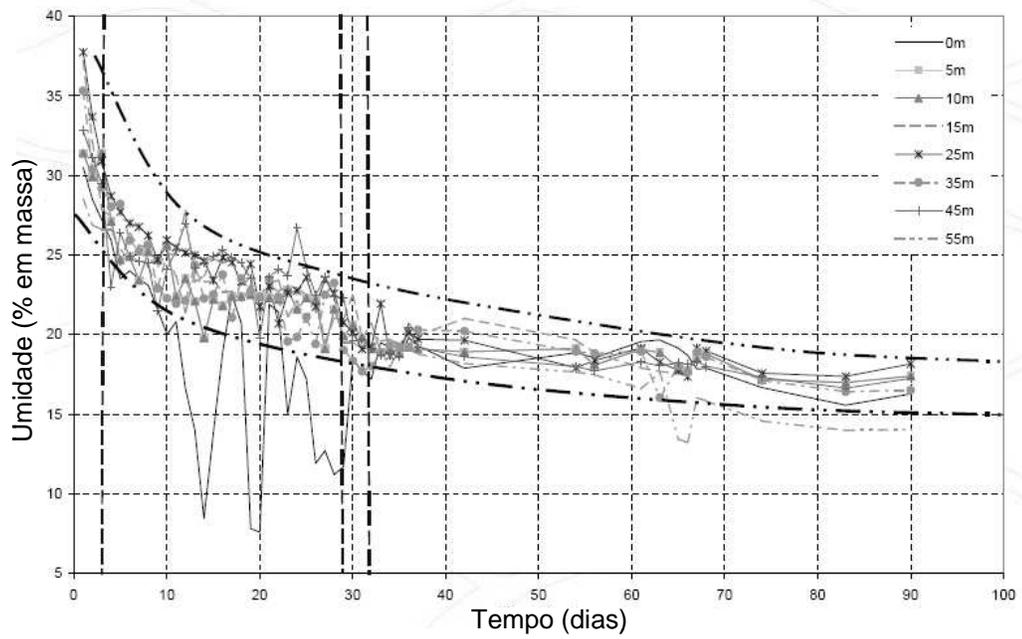


Figura 3.32: Perfil da umidade gravimétrica em função do tempo da secagem da pasta da usina Bulyanhulu. (Theron et al., 2005)

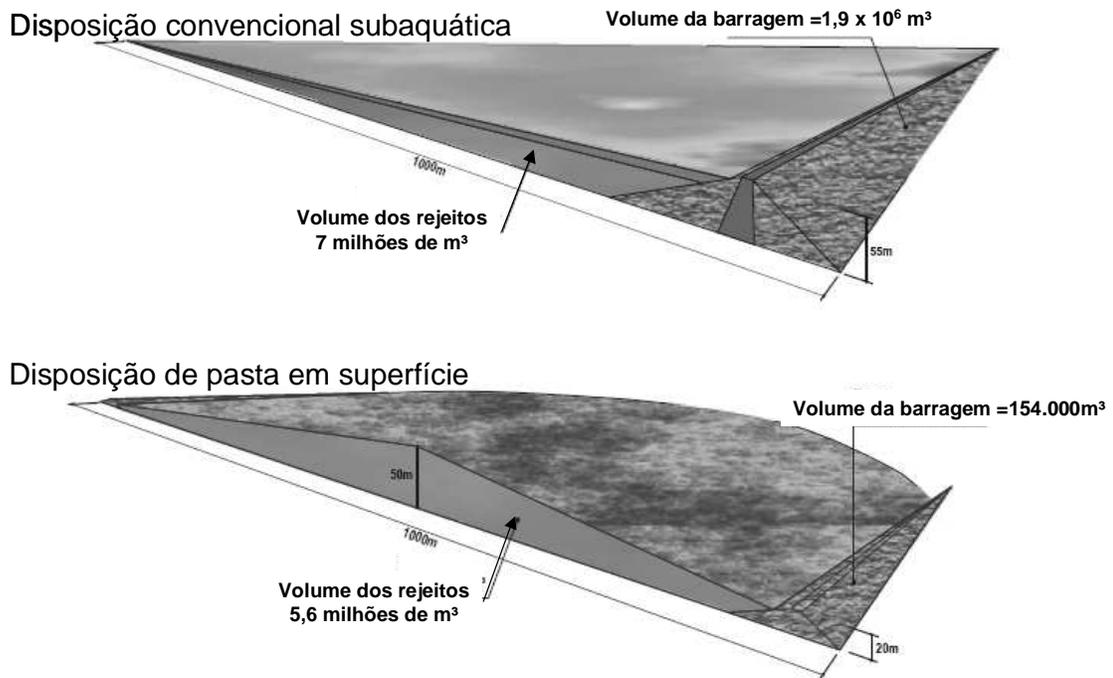


Figura 3.33: Alternativas atuais da disposição de rejeitos da mineração. (Newman et al., 2001)

3.5.2. Efeito da adição de polímeros orgânicos agregantes em pastas minerais

Quanto ao efeito da adição de floculante numa polpa ou pasta mineral, tem-se que a incorporação de reagentes poliméricos forma pontes quando esses se adsorvem na superfície das partículas sólidas.

23) Dymond (2003) apresenta, na Figura 3.34-a, um esquema que mostra a formação de um agregado devido a uma adição adequada de floculante, enquanto que a Figura 3.34-b mostra o efeito de uma dosagem excessiva de reagente floculante, fato que impede o processo de floculação.

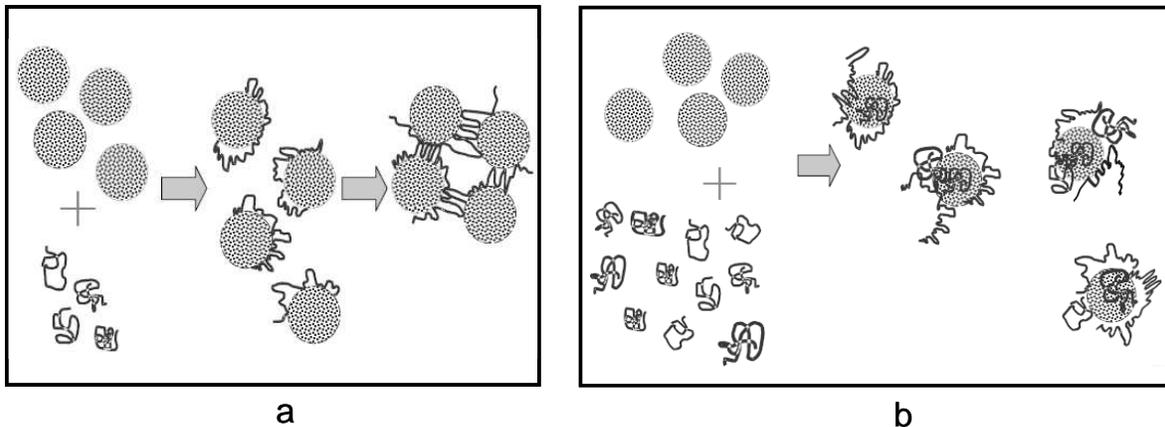


Figura 3.34: a) Formação de agregado ou floco; b) Efeito da dosagem excessiva de floculante. (Dymond, 2003)

Dymond (2003) mostra as vantagens de um processo chamado TCT (Rejeitos Argilosos Espessados) sob pontos de vista econômico, operacional e ambiental. Numa perspectiva econômica apresenta baixos custos de tratamento de água, custos reduzidos na construção e manutenção de recipientes dos rejeitos, custos reduzidos quanto a reagentes para tratamento, menor número de empregados para a condução do processo, maiores taxas de retorno do investimento. Operacionalmente oferece uma reciclagem de água de mais elevada qualidade. Quanto ao meio ambiente, o processo TCT precisa de menores barragens para contenção dos rejeitos, apresenta menores perdas de água devido a evaporação, menores riscos associados a rompimentos de bacias de contenção, menores requerimentos quanto a tamanho da operação e de tubulação dadas as menores áreas requeridas para a disposição.

24) Scales (2003) apresenta, na Figura 3.35, o efeito da adição de dois diferentes floculantes sobre o comportamento do fluxo em função da concentração de sólidos no “underflow” do espessador.

Da Figura 3.35 observa-se que essa predição do comportamento do material submetido a espessamento sugere que com o uso do floculante HXPAM são obtidos maiores adensamentos de sólidos na descarga do espessador em comparação ao NaAc/ACM e ao material sem floculante.

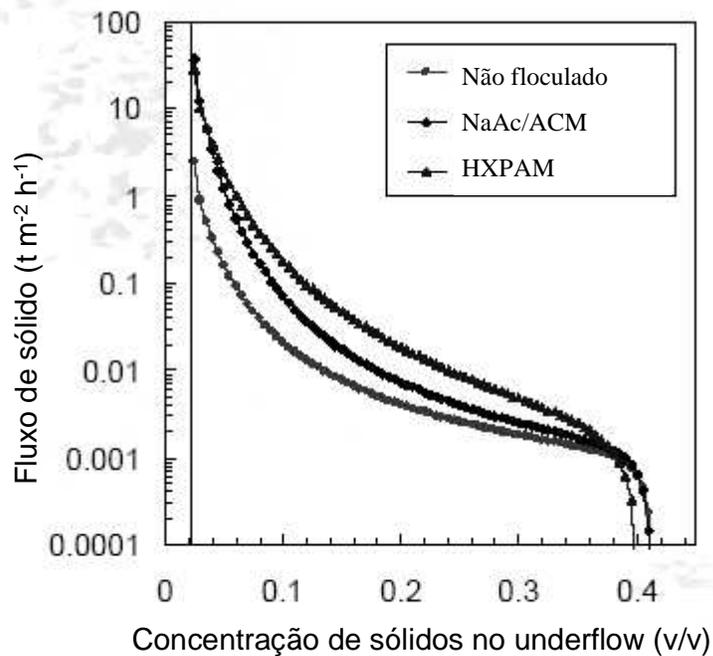


Figura 3.35: Efeito da floculação sobre o comportamento do fluxo de sólido em função da concentração de sólido na descarga do espessador. (Scales, 2003)

25) Na Figura 3.36, Boger (2003) apresenta o efeito da adição de diferentes floculantes sobre o comportamento da tensão de escoamento em função do adensamento de sólidos.

Da Figura 3.36, observa-se que uma maior adição de floculante implica em maior conteúdo de água (menor adensamento de sólidos) para produzir um significativo incremento na resposta reológica expressa como tensão de escoamento. Isso significa um incremento entre 4 a 5% aproximadamente na necessidade de água, dado que uma maior presença de flocos produz uma maior retenção de moléculas de água.

As pastas estudadas nessa pesquisa foram preparadas com minério de limonita na faixa de adensamento compreendida entre os valores de 32 e 52% em massa.

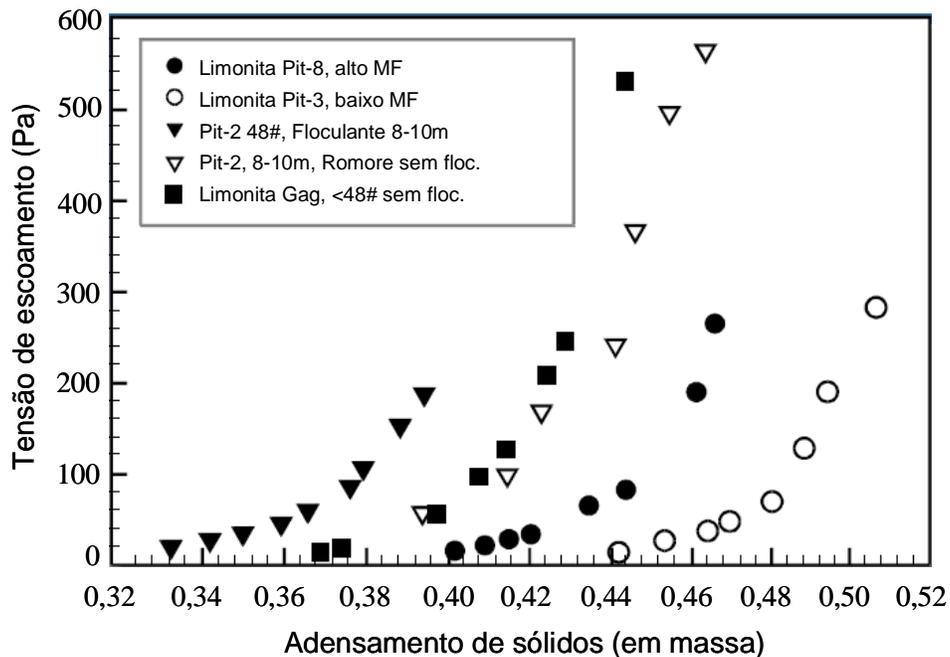


Figura 3.36: Efeito da floculação sobre o comportamento da tensão de escoamento em função do adensamento de sólido em massa. (Boger, 2003)

26) Na Tabela III.11, Fourie (2002) apresenta uma lista de características físicas dos rejeitos empregados e as dosagens de floculante recomendáveis em cada caso.

Verifica-se na Tabela III.11 que existem grandes diferenças nas características físicas dos rejeitos estudados, sobretudo no caso dos rejeitos de carvão em relação aos demais. Quanto a dosagem recomendável de floculante para o estágio de espessamento, observa-se que os rejeitos de carvão apresentam um maior consumo desse reagente devido à sua menor densidade.

27) Na Figura 3.37, Ozkan et al. (2004) apresentam um gráfico da capacidade de floculação em função do pH de suspensões aquosas de celestita não floculada e floculada com três espécies diferentes de floculante (não iônico, aniônico e catiônico).

Tabela III.11: Propriedades físicas de rejeitos e dosagens de flocculantes recomendáveis. (Fourie, 2002)

Propriedades dos rejeitos	Carvão	Ouro	Areia mineral	Zinco
Massa específica (g/cm ³)	1,72	2,74	2,76	2,80
Limite líquido (%)	38	29	66	37
Limite plástico (%)	35	26	29	36
% de lamas	20	13	56	11
% de areias	39	27	15	28
% de finos (<75µm)	61	73	85	72
% material < 20µm	36	55	80	38
Dosagem de flocculante (g/t)	350	80	65	---

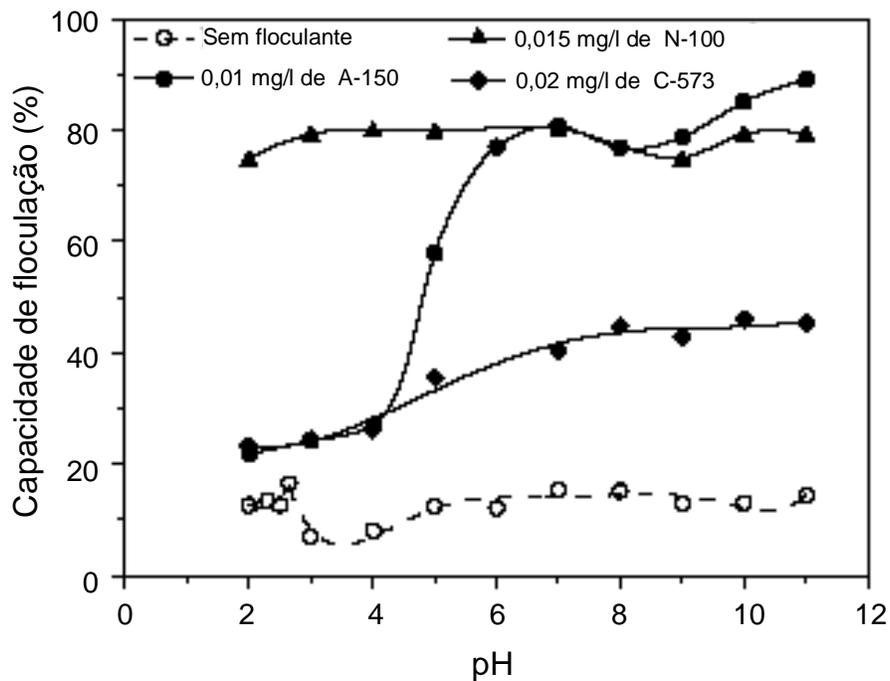


Figura 3.37: Capacidade de floculação de flocculantes não iônico, aniônico e catiônico em função do valor de pH. (Ozkan et al., 2004)

Da Figura 3.37 observa-se que a adição do flocculante não iônico (N-100) não mostrou uma grande sensibilidade quanto ao valor de pH da suspensão; já no caso do flocculante

aniônico A-150 nota-se uma queda nos valores do poder de floculação na região ácida e neutra do pH. Essa é a faixa de pH em que o grupo carboxílico do A-150 não existe em forma iônica, ou seja, o grupo carboxílico se dissocia em condições neutro-alcinas do sistema. Para o polímero catiônico C-573 mostra-se um incremento na sua capacidade de floculação ao aumentar o pH de 2 até 8, para logo apresentar um comportamento relativamente estável. Na bibliografia normalmente se mostra que a faixa de pH para polímeros catiônicos é de alta tendência à estabilidade, os não iônicos não são normalmente afetados pelas mudanças de pH, e no caso dos polímeros aniônicos tem-se que funcionam muito bem no caso de pH neutro-alcino.

28) Na Figura 3.38, Bedell et al. (2003) apresentam um gráfico do efeito da dosagem do floculante MF351 em pH 12 sobre a velocidade de sedimentação das partículas e adensamento da polpa (expresso como % de sólidos em massa). Verifica-se que ao aumentar a dosagem de 20 a 60g/t desse floculante a velocidade de sedimentação sofre um significativo aumento (de 0,8 a 1,9 m/h) enquanto que adensamento da polpa cai de 48 a 43%, aproximadamente.

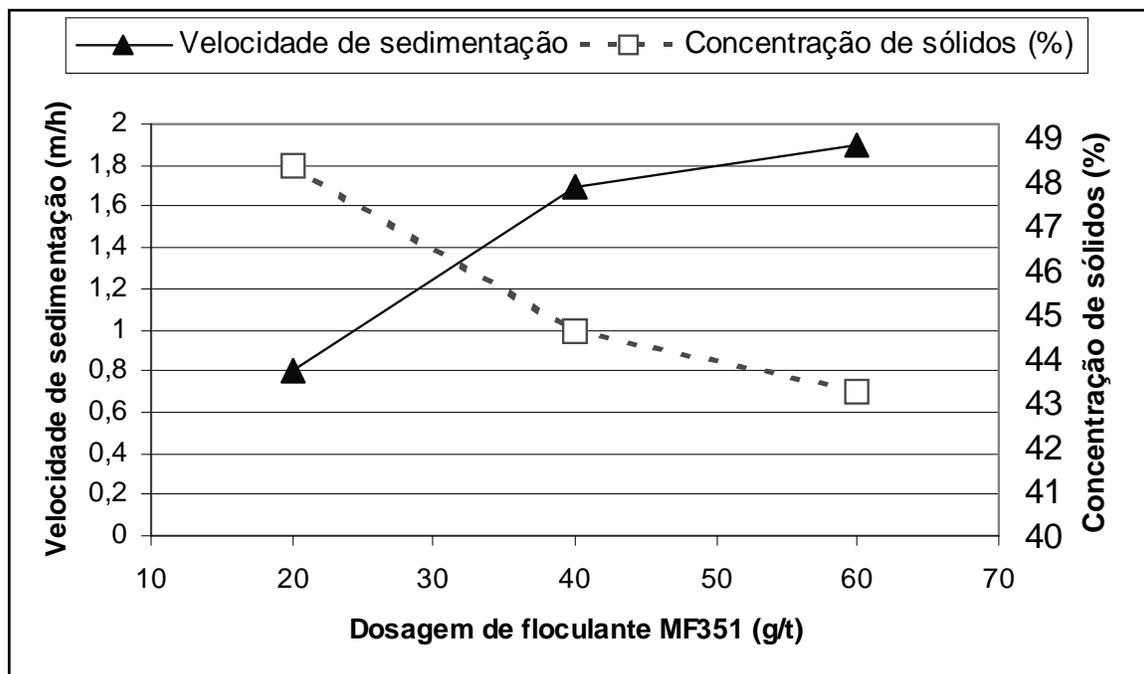


Figura 3.38: Efeito da dosagem de floculante sobre a velocidade de sedimentação e a concentração de sólidos na polpa. (Bedell et al., 2003)

Na Figura 3.39, Bedell et al. (2003) mostram o efeito do valor do pH da polpa quando se considera o ângulo de repouso em função do adensamento da polpa (porcentagem de sólidos em massa). Nesse caso, a dosagem utilizada do floculante MF351 foi de 40g/t.

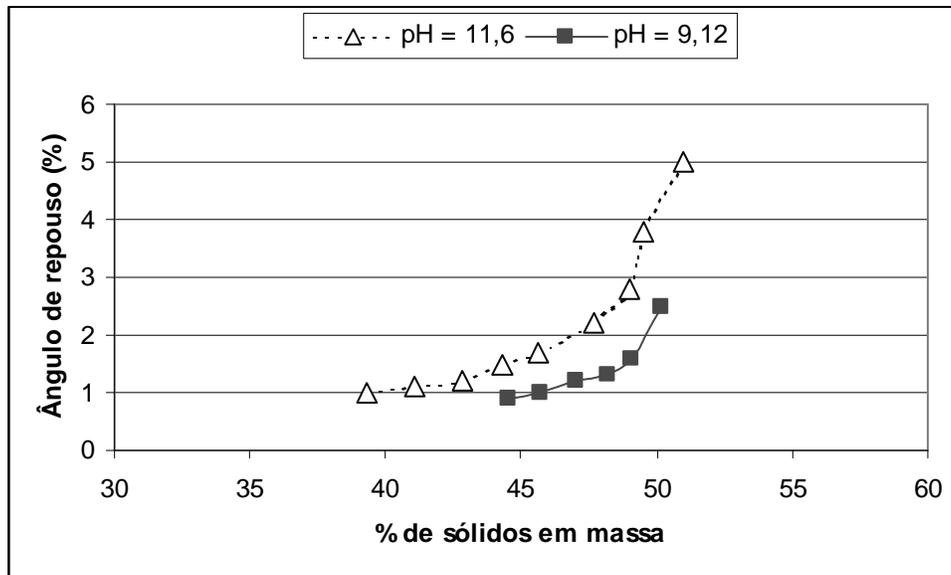


Figura 3.39: Gráfico do ângulo de repouso em função do adensamento de polpa para valores de pH de 9,12 e de 11,60. (Bedell et al., 2003)

Da Figura 3.39 observa-se o crescimento do ângulo de repouso em função das porcentagens de sólidos o qual se faz mais significativo sobre adensamentos de 48 a 49%. A curva para valor de pH 11,6 apresenta maiores valores do ângulo de repouso em toda a faixa de porcentagem de sólidos se comparada com a correspondente à de valor de pH 9,12. Isso se deve aos diferentes estados de agregação e ao efeito do floculante adicionado.

29) Na Figura 3.40, Mpofu et al. (2004) apresentam um gráfico do efeito da dosagem dos floculantes não iônico e aniônico sobre a tensão de escoamento e a energia de separação de suspensões de esmectita preparadas a 20% em massa, para um valor de pH 7,5. Observa-se que ao aumentar a dosagem acima de 700g/t do floculante não iônico, tanto a tensão de escoamento, quanto a energia de separação dos flocos formados, crescem de forma muito significativa. Esse comportamento não é observado no caso do floculante aniônico. Portanto, a ação do floculante não iônico foi incrementar as interações interpartículas através de uma mais forte união entre as pontes de flocos. Foi

observado que a água foi excluída dos flocos após agitação melhorando sua posterior compactação (mais fortes forças atrativas das pontes de flocos). Quanto à energia de separação de flocos, tem-se que, no caso do não iônico, ela aumenta de 100 a 600kT, enquanto com o aniônico se incrementa apenas de 100 a 120kT, fenômeno que também foi observado no caso das dispersões de caulinita floculadas com os mesmos reagentes.

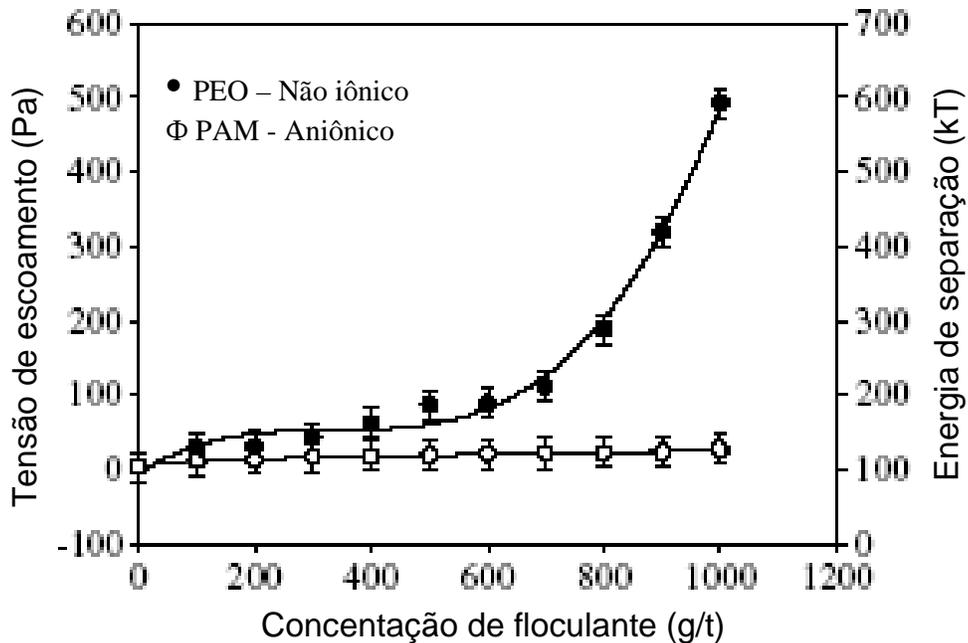


Figura 3.40: Tensão de escoamento e energia de separação de flocos (kT) em função da dosagem de flocoantes aniônico e não iônico. (Mpofu et al., 2004)

30) Arbutnot et al. (2005) apresentam o resultado de testes realizados em espessador de alta velocidade na empresa Outokumpu. Na Figura 3.41 é mostrado o efeito da dosagem do flocoante considerando-se o adensamento da descarga do espessador em função do fluxo de sólido na alimentação. Foram utilizadas as dosagens de flocoante de 15, 20 e 25g/t. Assim, para um mesmo fluxo de sólido na alimentação do espessador observam-se maiores adensamentos de sólidos na descarga quando utilizadas maiores dosagens do flocoante empregado.

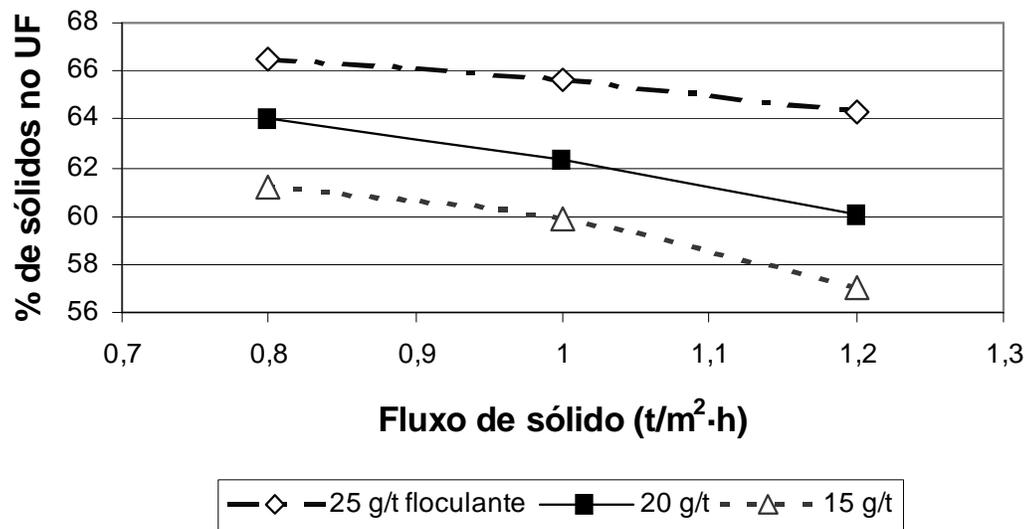


Figura 3.41: Efeito da dosagem de floculante considerando-se o adensamento da descarga do espessador em função do fluxo de sólido na alimentação. (Arbuthnot et al., 2005)

De uma forma geral nota-se que existem poucas pesquisas relativas ao uso de reagentes orgânicos nos sistemas de pasta mineral, fato que faz mais interessante esse aspecto considerado neste trabalho de tese.

3.5.3. Efeito da adição de ligantes em pastas minerais

Quanto aos resultados de propriedades mecânicas e efeito de alguns aditivos ligantes de pastas cimentadas, podem ser citados os seguintes trabalhos:

31) O efeito do aglomerante cal sobre a resposta reológica do ângulo de repouso foi estudado por Robisnky (2002). Na Figura 3.42 mostra-se um gráfico do ângulo de repouso em função do adensamento da pasta considerando diferentes adições de cal. Verifica-se que uma maior adição de cal é responsável pelo aumento de valores do ângulo de repouso da pasta mineral. Por exemplo, ao considerar um adensamento de sólidos de 68%, a pasta apresenta um ângulo de repouso de 2,5°, e ao ser adicionada cal em 0,15% em massa, esse ângulo cresce para 4,5°, aproximadamente.

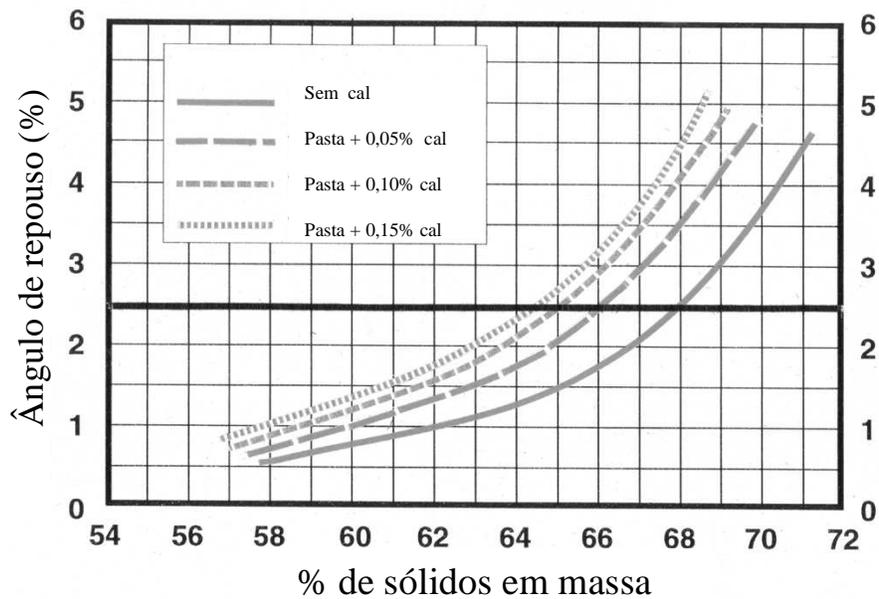


Figura 3.42: Efeito da adição de cal sobre o comportamento do ângulo de repouso em função do adensamento de sólido em massa. (Robinsky, 2002)

32) O efeito da adição de diferentes ligantes, tais como cimento, fumo de sílica e metacaulim sobre a resistência à compressão de pastas de concreto e ligantes foi mostrado por Gama e colaboradores (2003). Na Tabela III.12 mostram-se os resultados comparativos da resistência à compressão após 7 e 28 dias de cura. Aumentos significativos na resistência à compressão podem ser observados nos corpos de prova de concreto com pozolanas quando se compara aos concretos com cimento portland puro. A mistura contendo 10% de meta caulim apresentou melhores resultados.

Tabela III.12: Resultados de resistência à compressão após 7 e 28 dias de cura. (Gama et al., 2003)

Amostras	Descrição das amostras	Resistência à compressão (MPa) após 7 dias de cura	Resistência à compressão (MPa) após 28 dias de cura
C	Controle: 100% cimento	51,6	64,0
SF	+ 10% fumo de sílica	53,8	68,4
HRM	+ 10% meta caulim	59,8	74,0
SM	+ 5% fumo de sílica + 5% meta caulim	55,4	71,3

33) O efeito da adição dos ligantes cimento portland (CP) e de uma mistura de 95% metacaulim (MK) e 5% de cal (CaO), sobre a resistência à compressão e a tensão de ruptura de pastas preparadas com lamas (amostra II), um rejeito de flotação (amostra III) e uma mistura 50% de lamas e 50% de rejeitos (amostra V), provenientes da mineração de ferro, foi estudado por Hernández (2005).

Na Tabela III.13 são mostrados os resultados comparativos da resistência à compressão após 28 dias de cura. Dessa tabela pode observar-se que as maiores resistências e tensões de ruptura foram alcançadas para o caso das pastas preparadas com uma mistura das amostras de lamas e de rejeitos de flotação (amostra V) e cimentadas com 4% de cimento portland, superando por grande diferença, aos “pastefill” preparados com as amostras originais (de lamas e de rejeitos de flotação), e cimentados também com cimento portland. No caso da amostra III cimentada com a mistura de MK e CaO, tem-se que as resistências alcançadas são muito menores mas ainda assim com uma consistência adequada para disposição em superfície.

Tabela III.13: Valores das resistências e tensões de ruptura alcançadas pelos corpos de prova das amostras II, III e V, para tempo de cura de 28 dias. (Hernández, 2005)

# corpo prova	Amostra	Ligante	Resistência Ruptura (kgf)	Tensão Ruptura (MPa)	Tensão Ruptura média (MPa)
1	II	4% CP	100	0,519	0,584
2	II	4% CP	110	0,571	
3	II	4% CP	110	0,571	
4	II	4% CP	130	0,675	
1	III	4% CP	220	1,142	1,039
2	III	4% CP	230	1,194	
3	III	4% CP	180	0,935	
4	III	4% CP	170	0,883	
1	V	4% CP	360	1,869	1,818
2	V	4% CP	375	1,947	
3	V	4% CP	325	1,688	
4	V	4% CP	340	1,766	
1	III	4% (MK+CaO)	45	0,234	0,260
2	III	4% (MK+CaO)	55	0,286	
3	III	4% (MK+CaO)	-----	-----	
4	III	4% (MK+CaO)	-----	-----	

34) Wang et al. (2002) apresentaram um estudo sobre o efeito dos aditivos pozolana 344N e Meyco MainFill R01 (MMR01) sobre a resistência à compressão do "pastefill". Na Tabela III.14 são mostrados os resultados obtidos para pastas de 75% em massa de sólidos e com adições de 6% em massa de cimento. O rejeito utilizado para a preparação do "pastefill" era originário da Eastern Goldfields no oeste da Austrália, com uma granulometria 100% < 250µm.

Observa-se da Tabela III.14 que a incorporação de ambos aditivos em estudo proporciona um melhoramento na resistência à compressão do "pastefill", sendo mais significativo no caso do MMR01 (130% em relação à amostra de controle). Também com relação à

propriedade da fluidez, esse aditivo mostrou um melhor desempenho em comparação com a pozolana 334N.

Tabela III.14: Resistência compressiva não confinada (UCS) do "pastefill" em MPa (Wang et al., 2002)

Número	Amostra	UCS individual (MPa)	Média da UCS (MPa)	% relativa ao controle
1	Controle	0,585	0,641	100
2		0,654		
3		0,683		
1	Pozolana 334N	0,771	0,767	120
2		0,810		
3		0,722		
1	MMR01	0,800	0,834	130
2		0,839		
3		0,863		

35) Sabir e colaboradores (2001) mostram o efeito positivo da adição de insumos como cinzas volantes e meta caulim nas pastas cimentadas sobre a resistência do concreto, em comparação ao uso exclusivo de cimento portland (PC). A variação da resistência relativa em função do tempo de cura com diferentes dosagens de meta caulim (MK) é mostrada pela Figura 3.43.

36) Fall et al. (2005) estudaram o efeito do conteúdo de material fino sobre a densidade de pastas minerais cimentadas e preparadas com rejeitos das minerações de ouro e polimetálicos ao oeste do Canadá. O consumo e custo específico de ligantes foram também estudados nessa pesquisa. A Figura 3.44 mostra a variação da densidade da pasta em função de um maior conteúdo de material fino presente nas pastas cimentadas com diferentes ligantes e preparadas com rejeitos de ouro (rejeito A) e polimetálicos (rejeito B).

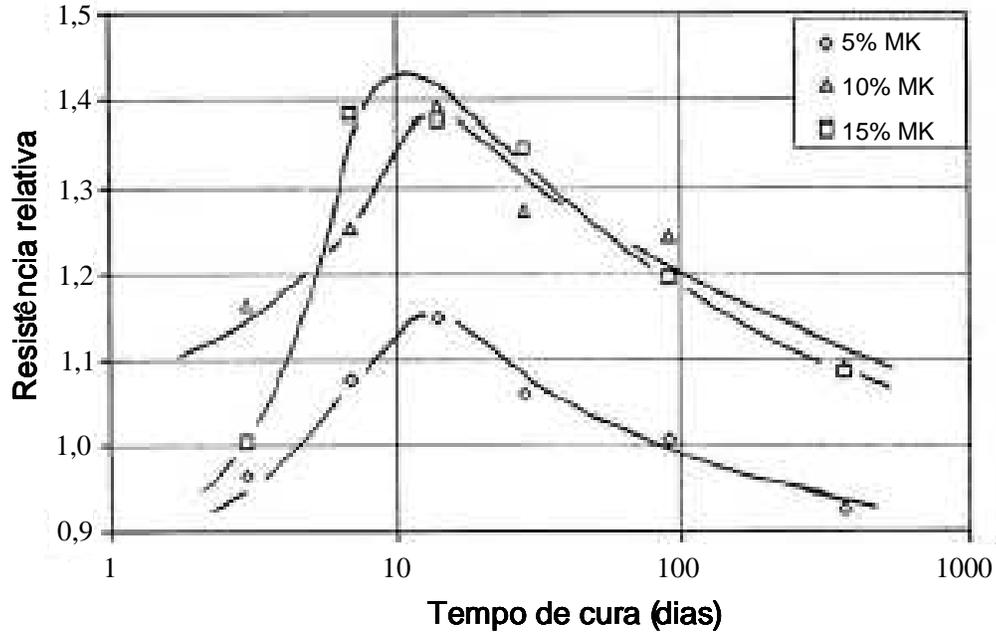


Figura 3.43: Resistência compressiva relativa da pasta de concreto em função do tempo de cura, com adições de 5, 10 e 15% de meta caulim (MK). (Sabir et al., 2001)

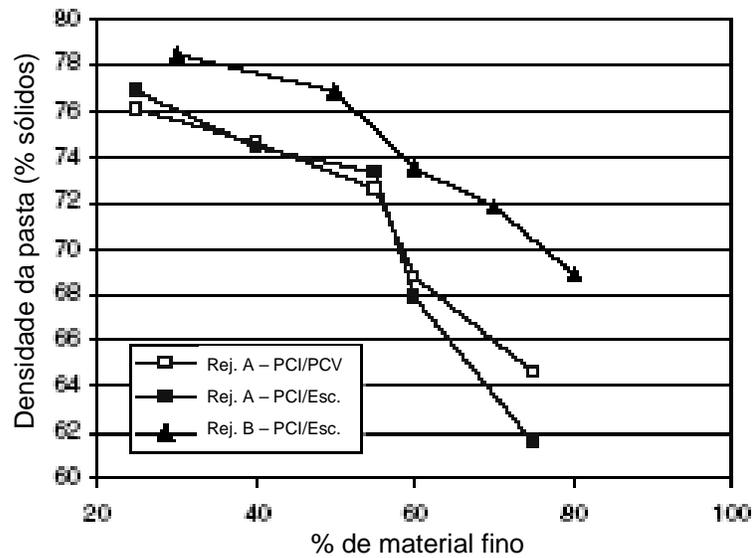


Figura 3.44: Densidade da pasta cimentada em função do conteúdo de material fino. (Fall et al., 2005)

Os ligantes estudados foram PC I (cimento portland tipo I), PC V (cimento portland tipo V) e Esc. (escoria de alto forno). Para os dois tipos de rejeito empregados (A e B) observa-se que um maior conteúdo de material fino provoca uma queda significativa na densidade da pasta formada ou, em outras palavras, aumenta o consumo de água. Na Figura 3.45 está indicado o consumo e o custo de ligante empregado para diferentes adensamentos de pasta.

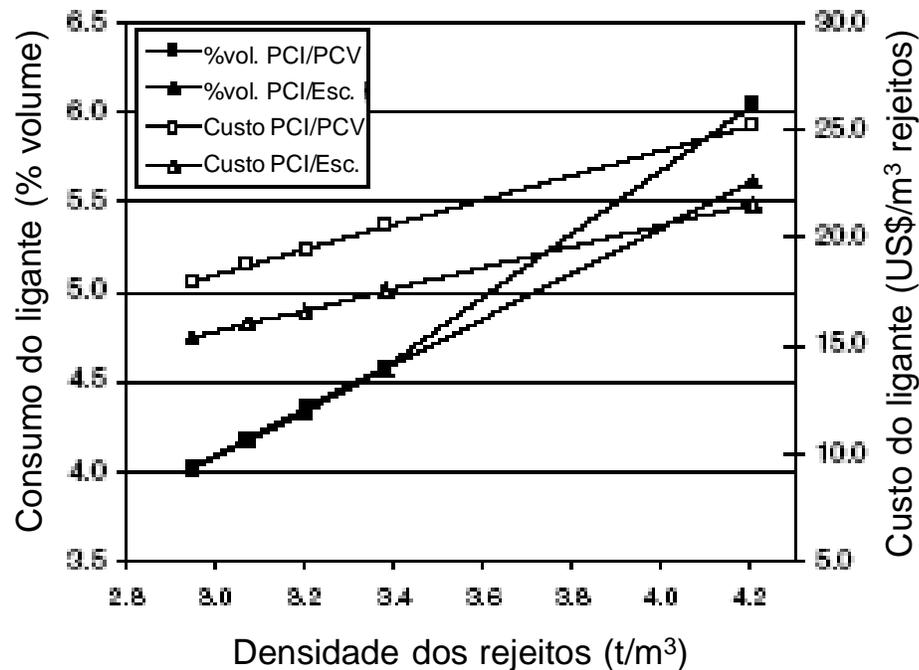


Figura 3.45: Consumo e custo específico de ligante em função da densidade dos rejeitos empregados. (Fall et al., 2005)

Da Figura 3.45 observa-se que à medida que aumenta a densidade dos rejeitos há um maior consumo e um maior custo associado ao ligante utilizado na preparação da pasta que será cimentada. Comparativamente mostra-se que o custo de ligante/m³ de rejeito cimentado é maior para o caso da mistura de 50% CP I e 50% de CP V que no caso da mistura 20% CP I e 80% de escoria de redução. Quanto ao consumo volumétrico de ligante, somente para rejeitos com densidades maiores que 3,4t/m³ observa-se um maior consumo do ligante CP I e CP V em comparação a aquele preparado com CP I e escória de redução.

37) Benzaazoua et al. (2004) estudaram o processo de endurecimento de “pastefill” cimentado, empregando diferentes tipos de rejeitos sulfetados provenientes de algumas minerações canadenses e diferentes ligantes, tais como cimento portland de tipo I (T10) e V (T50), ou alto em sílica fuma (HSF), cinzas volantes (FA), escória de fusão. Na Figura 3.45 mostram-se os resultados da resistência à compressão não confinada (UCS) para diferentes “pastefill” preparados com rejeitos de diferentes distribuições de tamanho de partículas e misturas de ligantes de T10 e T50 ou de T10 e escória, com conteúdos de 4,5% em massa e 28 dias de tempo de cura.

A Figura 3.46 mostra que as resistências mecânicas (UCS) dos “pastefill” cimentados com a mistura de T-10 e escória são de 220 e 330% daquelas obtidas ao usar a mistura T-10 e T-50, durante um período de cura de 28 dias. No caso dos corpos de prova que foram drenados, tem-se que a diferença aumenta para 280 e 530%, respectivamente.

A distribuição granulométrica também mostra um significativo efeito sobre a resistência à compressão do “pastefill”. No entanto, esse efeito é fortemente dependente do tipo de ligante empregado e do tempo de cura. Os rejeitos utilizados nesse caso foram especialmente preparados mediante deslamagem ou adição de material mais grosseiro, e suas distribuições granulométricas são mostradas pela Figura 3.47.

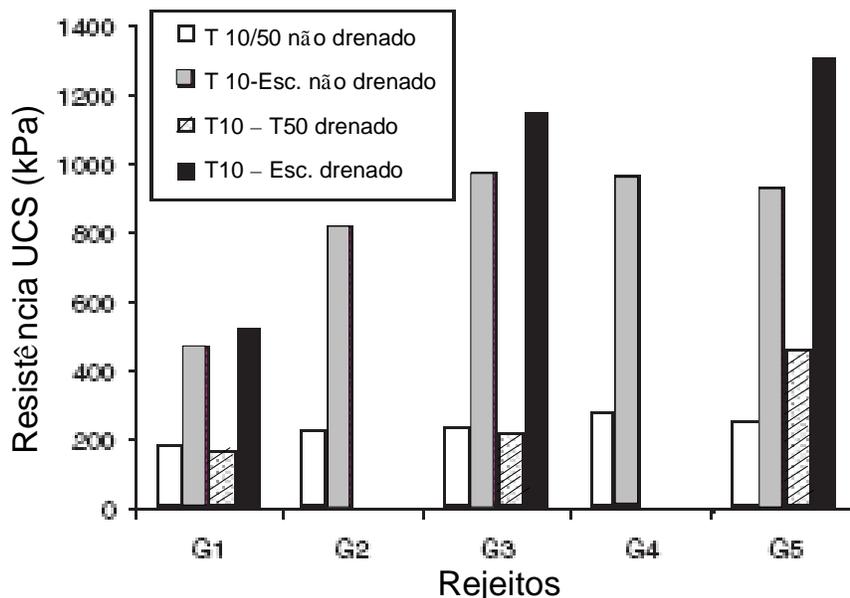


Figura 3.46: Efeito da distribuição de tamanho de partículas e da drenagem sobre a resistência mecânica de pastas cimentadas. (Benzaazoua et al., 2004)

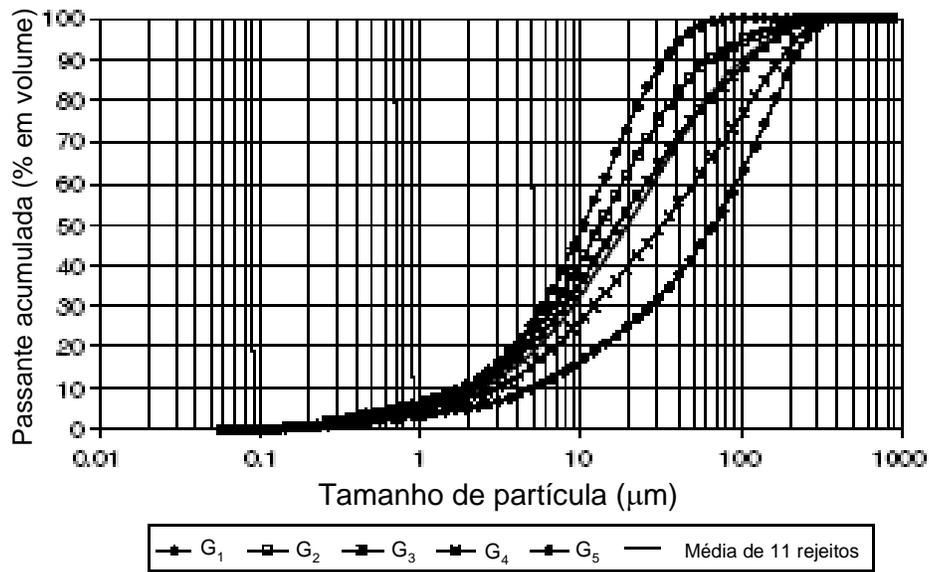


Figura 3.47: Distribuições granulométricas dos rejeitos denominados G1, G2, G3, G4 e G5. (Benzaazoua et al., 2004)

38) Benzaazoua e colaboradores (2004) abordam o tema do uso dos “pastefill” para estabilizar e controlar a drenagem ácida de mina, especificamente para a retenção de arsênio.

Na Figura 3.48 é mostrada uma comparação do uso de diferentes ligantes e suas proporções sobre a eficiência de fixação de arsênio, expressa em mg de As/kg de sólido. Essa retenção de As foi obtida através de testes de lixiviação dinâmica. Os rejeitos sem adição de ligante lixiviaram mais de 1000mg/kg de As. Com a adição de 5% de ligante se produz a solidificação da pasta e se reduz em 75% a quantidade de As lixiviado se comparado com a pasta de controle (sem ligante). A adição de OPC (cimento portland tipo I) ou de cal tem um efeito positivo sobre fixação de As, ainda que as misturas com 5, 10 e 20% de SC (mistura de escória de fusão e cimento portland) forneçam as mesmas respostas quanto a retenção de As no local de disposição do “pastefill”. O ligante SC mostra ser tão eficiente quanto OPC quando adicionado em 10%. Já a adição de 20% de SC não mostra ter um efeito adicional significativo sobre a estabilização química do arsênio. O “backfill” cimentado somente com cal foi aquele que mostrou a melhor capacidade de retenção de As (apenas 10 mg/kg de As lixiviado).

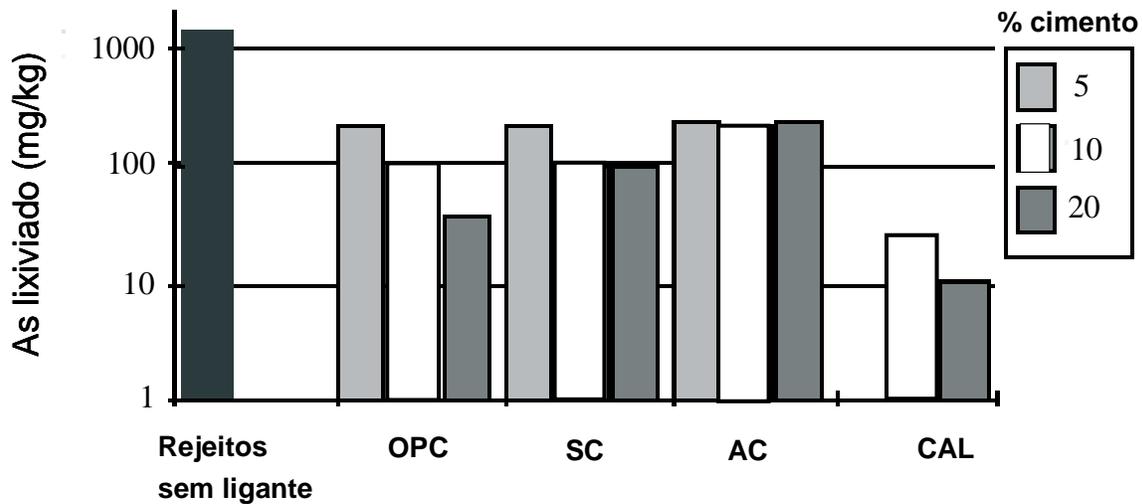


Figura 3.48: Efeito do tipo e proporção de ligante sobre sua eficiência de fixação de As. (Benzaazoua et al., 2004)

39) Chindaprasirt et al. (2005) estudaram o efeito da finura do ligante cinzas volantes sobre a resistência à compressão e tamanho de poros de pastas cimentadas com misturas de cimento portland e cinzas volantes. Na Tabela III.15 mostram-se os resultados da resistência à compressão de pastas cimentadas com cimento portland (PC, Blaine de 360 m²/kg) e misturas de PC e cinzas volantes. Foram utilizados dois tipos de cinzas volantes, OFA (31% > 45µm, com um d₅₀ equivalente a 19,1µm, Blaine de 300 m²/kg) e CFA (100% < 45µm, com um d₅₀ equivalente a 6,4µm, Blaine de 510 m²/kg). Da Tabela III.15 tem-se que os valores da resistência à compressão mostram uma queda conforme se incrementa a substituição de cimento portland por cinzas volantes. Quanto à substituição de CP por CFA verifica-se um melhor resultado (maiores resistências à compressão) que no caso do uso da OFA (distribuição granulométrica mais grosseira). Esse é o resultado de um melhor empacotamento proporcionado pela cinzas volantes de maior finura (CFA). A grande quantidade de partículas finas presentes na CFA, junto a sua grande área superficial e ao conteúdo de fase vítrea, melhoram de forma significativa o desempenho da reação pozolânica.

Tabela III.15: Resistências compressivas das pastas minerais. (Chindaprasirt et al., 2005)

Tipo de pasta	Resistência à compressão (MPa)			
	7 dias	28 dias	60 dias	90 dias
PC	60,9	77,6	84,5	84,8
OFA – 20%	45,2	64,5	70,4	74,5
OFA – 40%	30,6	56,6	60,1	61,4
CFA – 20%	47,2	69,3	76,6	81,4
CFA – 40%	44,1	65,3	73,6	78,5

40) Gruber e colaboradores (2001) estudaram o efeito de metacaulim de alta reatividade sobre o incremento da durabilidade do concreto. Na Figura 3.49 mostra-se o efeito da adição de metacaulim e da idade do concreto sobre a expansão volumétrica. Essa expansão após 2 anos de idade do concreto é inferior a 0,04% para adições de 15 e 20% de metacaulim (MK), e de apenas 0,05% para a pasta cimentada com 10% de MK. Adições de 5% MK são insuficientes para provocar coeficientes de expansão aceitáveis no concreto.

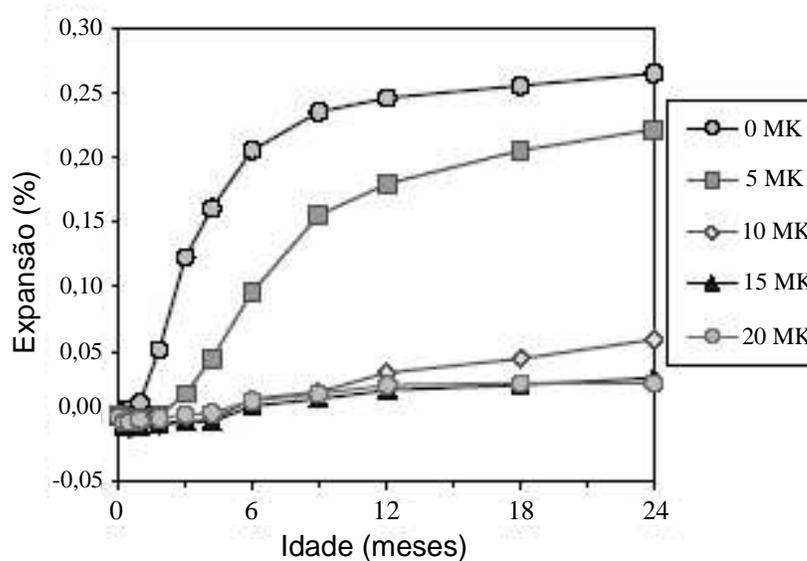


Figura 3.49: Controle de expansão de longo prazo usando MK como ligante. (Gruber et al., 2001)

Gruber e colaboradores (2001) também estudaram o coeficiente de expansão volumétrica após 2 anos de envelhecimento do concreto em função de diferentes adições de metacaulim de alta reatividade empregado em substituição de cimento portland (de 0 até 20% em massa), segundo a Figura 3.50. Foi empregado o método conhecido como teste de prisma para concreto, sendo considerados dois agregados diferentes do Canadá: i) “Spratt” que corresponde a uma limonita silicosa proveniente de Ottawa – Ontario; ii) “Sudbury” que é uma argila proveniente da cidade Sudbury – Ontario.

Da Figura 3.50 observa-se que a expansão é reduzida com os incrementos nas quantidades de meta caulim de alta reatividade (HRM). O prisma de concreto cimentado com cimento portland e 10% de HRM com o agregado Spratt mostra mais de 0,4% do critério de expansão (definido pelo limite de reatividade da álcali-sílica: CSA) após 2 anos de idade do concreto. Tanto a adição de 15% quanto do 20% de HRM levam a limite de expansão inferior a 0,4%.

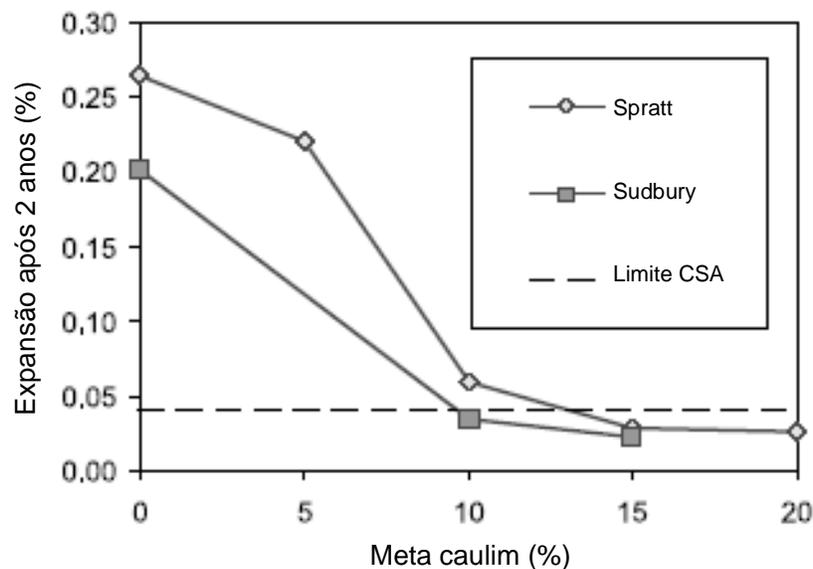


Figura 3.50: Expansão do concreto após 2 anos em função do conteúdo de meta caulim. (Gruber et al., 2001)

41) Luke e Rankine (2003) estudaram a variação espacial no preenchimento com pasta e rocha (“rockfill”) em sistema “filled stope”. Na Tabela III.16 são comparadas

as alternativas de preenchimento com pasta, com rocha e dois sistemas de “rockfill”, mediante as características de ângulo de atrito, coesão, UCS e custos relativos.

Tabela III.16: Comparação das alternativas de preenchimento. (Luke e Rankine, 2003)

Técnica de preenchimento	Natureza dominante	Natureza 2a	ϕ (°)	c (kPa)	UCS 28 dias (kPa)	% CP tipo I	Custo relativo a pasta	Comentários
Pasta	Coesiva	Fricional	30	350	785	3,5	100	Custo alto em cimento
Rocha	Fricional	Não coesiva	32 a 36	Baixo	Baixo	0	50	Preenchimento não exposto
Rockfill pouco segregado	Fricional	Coesiva	41	157	701	1,4	70	Menor UCS que pasta aos 28 dias
Rockfill bem segregado	Fricional	Coesiva	41	184	806	1,1	65	UCS similar à pasta aos 28 dias

42) Ilgner (2005) mostrou a utilidade de utilizar sensores térmicos através de teste seccional na tubulação que transporta a pasta mineral, segundo a Figura 3.51. Efetivamente com a passagem da pasta que flui pela tubulação gera-se energia calórica devido a sua velocidade, que ainda sendo baixa (da ordem de 0,3m/s), pode ser detetada através do uso de sensores térmicos mostrados pela Figura 3.51. O uso desse tipo de sensores tem aplicação potencial nas seguintes tarefas: i) monitoramento do comportamento de sedimentação em tanques e espessadores; ii) identificação de zonas mortas em pastas sem movimento em equipamentos como alimentação de bombas, tubulações de transferência, calhas, entre outros; condições de fluxo heterogêneo (“slack flow”) em tubulações inclinadas.



Figura 3.51: Uso de sensores térmicos para controle do transporte de pasta mineral.
(Ilgner, 2005)

4. ESTRATÉGIA EXPERIMENTAL

4.1. Materiais Utilizados

Os materiais utilizados neste estudo são os seguintes:

- rejeitos provenientes do processamento de minérios de ferro da usina de Urucum pertencente à Rio Doce Manganês – RDM;
- metacaulim de baixa reatividade fabricado a partir de estéreis provenientes da mineração de ferro (foram considerados dois tipos diferentes de materiais da mina de Urucum), através de processo de calcinação aplicado no Laboratório de Tecnologia de Rochas do Demin da UFMG;
- cimento Portland tipo V, cal desidratada e cinza volante provenientes de fábrica e que foram empregados como ligantes das pastas minerais;
- reagente polimérico sintético (floculante) de caráter não iônico Superfloc N-100 (SN-100) da Cytec. Também foi usado um coagulante inorgânico $Al_2(SO_4)_3$ para ser avaliado junto ao floculante.

4.2. Metodologia

A amostra sólida correspondente à descarga (“underflow”) do espessador de rejeitos da usina de Urucum da empresa Rio Doce Manganês – RDM foi enviada à UFMG na forma de polpa de aproximadamente 60% em sólidos, com uma densidade média de $1,85t/m^3$. Após a operação de secagem foram preparadas as amostras representativas de sólido cuja massa total aproximada foi de 120kg.

A caracterização da amostra sólida foi realizada considerando as propriedades de densidade, distribuição granulométrica, área superficial específica, composição química e mineralógica e de carga superficial. As técnicas e equipamentos utilizados nesta caracterização são apresentadas na Tabela IV.1.

Tabela IV.1: Equipamentos e técnicas empregadas na caracterização da amostra sólida.

Característica ou propriedade	Técnica utilizada	Equipamento(s) requerido(s)
Densidade	Picnometria	Picnômetro simples e à gás
Distribuição granulométrica	- Peneiramento - Elutrição - Difração a laser	- Peneiras de laboratório - Cyclosizer Warman - Granulômetros Sympatec e Cilás
Área superficial específica	Permeabilidade ao ar	Permeabilímetro de Blaine
Composição química	- Fluorescência de raios X - Microscopia eletrônica	- Espectrômetro de raios X e dispersivo (WDS) - Microsonda eletrônica (EDS)
Composição mineralógica	- Difração de raios X (DRX) - Espectrometria de infravermelho (EIV) - Microscopia eletrônica	- Espectrômetro de raios X - Espectrômetro de infravermelho - Microscópio eletrônico de varredura (MEV)
Carga elétrica superficial	Mulhar e Roberts (1966)	- peagâmetro de laboratório

Um fluxograma que mostra as etapas de preparação das amostras recebidas na forma de polpa é apresentado na Figura 4.1 :

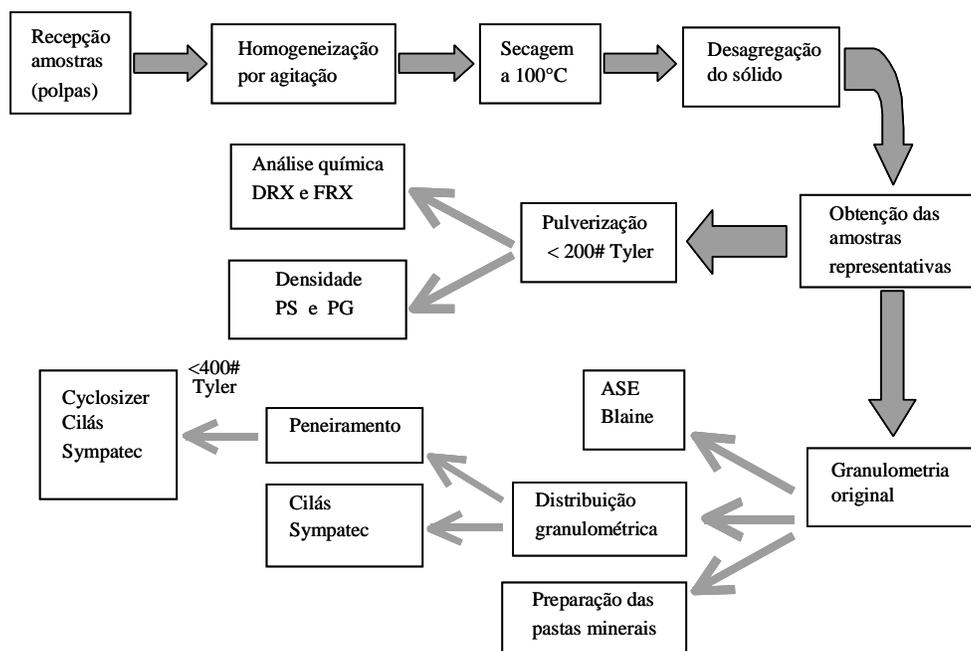


Figura 4.1: Fluxograma de processamento das amostras sólidas.

Os principais métodos e equipamentos requeridos para a caracterização das pastas minerais são apresentados a seguir:

- viscosidade da pasta: propriedade que foi determinada usando viscosímetro Brookfield, modelo DV-III e conectado a um computador mediante uma interface e o software Rheocalc (ver Figura 4.2). Este equipamento pertence ao Laboratório de Fenômenos de Interface do DEMIN da UFMG.
- tensão de escoamento da pasta mineral: através do uso de um reômetro que dispõe de um set de Vane para poder medir essa propriedade reológica (Figura 4.3).



Figura 4.2: Viscosímetro Brookfield modelo DV-III com os “spindles” LV-1, LV-2, LV-3 e LV-4.



Figura 4.3: Reômetro usando técnica de Vane para medições da tensão de escoamento. (Jewell, 2003)

- medida da consistência da pasta: foi feita através da determinação da altura de abatimento, empregando o teste de abatimento (“slump”). O cilindro de laboratório de PVC utilizado tinha dimensões de 10cm de altura (H) e de 10cm de diâmetro (D). Na Figura 4.4 mostra-se uma fotografia desse aparelho. O procedimento desta metodologia é apresentado na Figura 4.5.



Figura 4.4: Cilindro “slump” de laboratório. (Hernández et al., 2005)

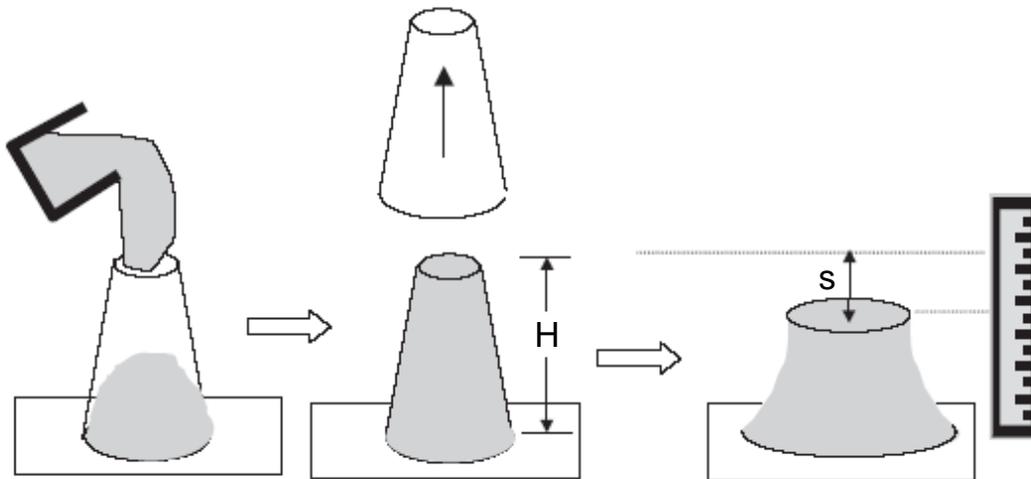
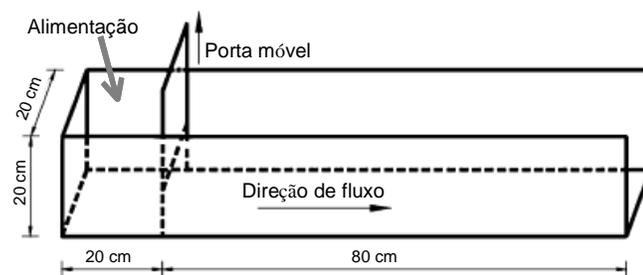


Figura 4.5: Metodologia do teste de cone “slump”. (Clayton et al., 2003)

- características de fluidez da pasta: foram determinadas através do teste de calha, avaliando-se o ângulo de repouso da pasta. Uma calha foi construída em acrílico com dimensões de $100 \times 20 \times 20\text{cm}$ (Figura 4.6).



a



b

Figura 4.6: Calha construída em acrílico: a) Vista isométrica (Hernández et al., 2005); b) Dimensões e forma. (Kwak et al., 2005)

- características mecânicas da pasta mineral cimentada: foram determinadas através de ensaio de compressão empregando uma prensa hidráulica MTS do Laboratório de Tecnologia de Rochas do DEMIN da EE-UFG (ver Figura 4.7).

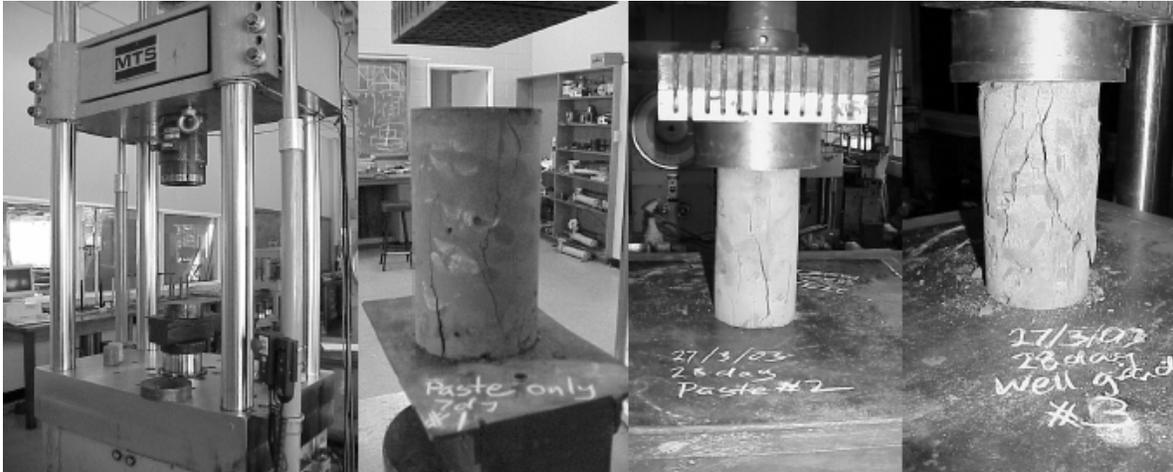


Figura 4.7: Prensa hidráulica MTS para realização de ensaios mecânicos e corpos de prova fraturados por compressão. (Luke e Rankine, 2003)

- parâmetros mecânicos: o ângulo de atrito e a coesão foram determinados através da realização dos testes de cisalhamento direto e triaxial nas prensas hidráulicas pertencentes ao Laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia da UFG (Figura 4.8).

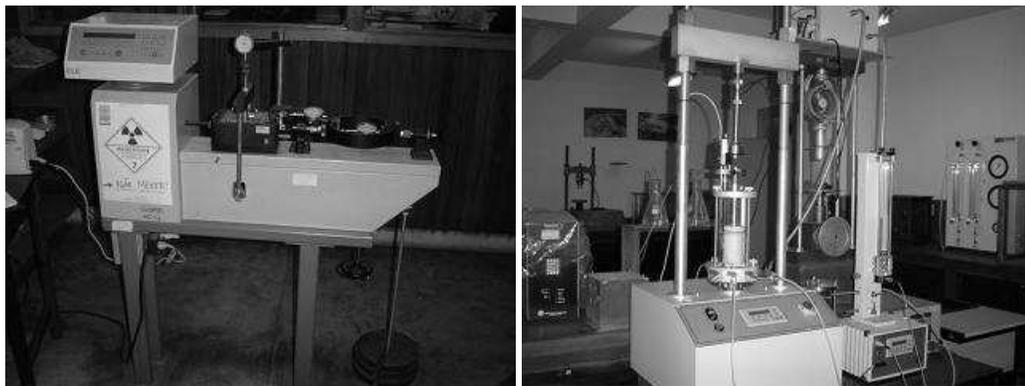


Figura 4.8: Prensas hidráulicas utilizadas para os ensaios de cisalhamento: a) direto; b) triaxial.

- permeabilidade da pasta cimentada: foi determinada utilizando-se aparelho de Germann ou de Karsten, dependendo da resistência mecânica dos corpos de prova obtidos. Estes equipamentos pertencem ao Laboratório de Concretos do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção Civil da UFMG (Figura 4.9).

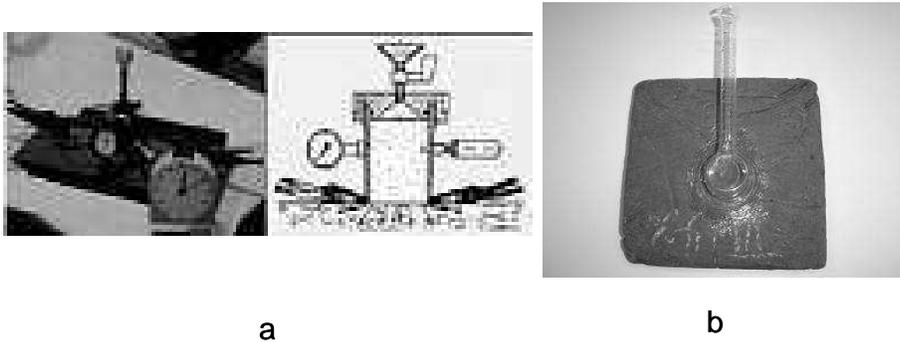


Figura 4.9: a) Permeabilímetro de Germann; b) Permeabilímetro de Karsten. (Hernández, 2005)

No caso dos corpos de prova a serem rompidos por compressão, é requerida uma consistência muito elevada para realizar o preenchimento das formas. Dessa forma foi empregado um aparelho de Vicat utilizado na indústria do concreto. Detalhes deste aparelho são mostrados na Figura 4.10.

Quanto a preparação das pastas minerais no laboratório foi utilizada água de torneira que era adicionada em béquer em um volume requerido. Posteriormente, uma massa de sólido foi adicionada à água para atingir uma determinada % de sólidos, misturando-se manualmente até alcançar a homogeneidade característica dos sistemas de pasta mineral. A adição de reagentes agregantes e de ligantes foi realizada uma vez preparada a pasta. No caso de estudo de varios adensamentos de pasta a água necessária foi adicionada e a pasta novamente homogeneizada.



Figura 4.10: Aparelho de Vicat usado para determinar a consistência das pastas minerais.

4.3. Planejamento Experimental

Mediante a ferramenta estatística do desenho fatorial 2² podem ser planejados os experimentos requeridos para estudar o efeito da adição de um polímero sintético ou floculante (Superfloc N-100), assim como também o uso de um coagulante de origem inorgânica ($Al_2(SO_4)_3$). Da mesma forma, no caso dos ligantes requeridos para cimentar as pastas minerais, serão considerados como ligantes: cimento Portland de tipo V, cinza volante, uma mistura de meta caulim I (60%) e cal desidratada (40%) e outra de meta caulim II (60%) e cal desidratada (40%), proporção recomendada por Gama (2005). Nesse caso, foi adotado um planejamento fatorial 2⁴. Na Tabela IV.2 apresentam-se os experimentos e dosagens que serão consideradas para o caso do floculante e coagulante a estudar (planejamento fatorial 2²), enquanto que a Tabela IV.3 mostra os experimentos planejados para estudar a adição dos ligantes, segundo um planejamento fatorial 2⁴.

No estudo da adição de reagentes agregantes (floculante ou coagulante), foram consideradas as respostas de % de abatimento (%ABT) e velocidade de sedimentação (VS). Posteriormente os níveis ótimos dos reagentes empregados foram estudados tendo-se em vista a tensão de escoamento ou ruptura.

Tabela IV.2: Planejamento experimental 2^2 para estudar o efeito da adição de agregantes em pastas minerais: a) Fatores e níveis estudados; b) Detalhe dos experimentos realizados.

a) Fatores e níveis estudados para os reagentes agregantes

Fatores/Níveis	(-)	(0)	(+)
Dosagem de SN-100 (g/t)	0	10	20
Dosagem de $Al_2(SO_4)_3$ (g/t)	0	10	20

b) Detalhe dos experimentos realizados

No. experimento	Fator x1 SN-100	Fator x2 $Al_2(SO_4)_3$
1	-	-
2	+	-
3	-	+
4	+	+
5	0	0
6	0	0

Tabela IV.3: Planejamento experimental 24 para estudar o efeito da adição de ligantes em pastas minerais: a) Fatores e níveis estudados; b) Detalhe dos experimentos realizados.

a) Fatores e níveis a estudar para os ligantes

Fatores/Níveis	(-)	(0)	(+)
Adição de CP-V (%)	0	2	4
Adição de cinza volante (%)	0	2	4
Adição de MK-I e cal (%)	0	2	4
Adição de MK-II e cal (%)	0	2	4

b) Detalhe dos experimentos realizados

No. experimento	Fator x1 CP-V	Fator x2 Cinza volante	Fator x3 MK-I e cal	Fator x4 MK-II e cal
1	-	-	-	-
2	+	-	-	-
3	-	+	-	-
4	+	+	-	-
5	-	-	+	-
6	+	-	+	-
7	-	+	+	-
8	+	+	+	-
9	-	-	-	+
10	+	-	-	+
11	-	+	-	+
12	+	+	-	+
13	-	-	+	+
14	+	-	+	+
15	-	+	+	+
16	+	+	+	+

17	0	0	0	0
18	0	0	0	0
19	0	0	0	0
20	0	0	0	0

O MK-I representa um metacaulim preparado no Laboratório de Tecnologia de Rochas da UFMG proveniente do material “run of mines” ROM de Urucum, enquanto que o MK-II corresponde a um metacaulim preparado com arcóseo do teto da mina Urucum.

No caso do estudo relativo aos ligantes, foram estudadas as respostas de % de abatimento ou % de Vicat e resistência à compressão (UCS) do pastefill cimentado. Após serem determinados os níveis mais adequados para as características de resistência à compressão e consistência das pastas minerais, foram também estudadas as propriedades de ângulo de atrito, coesão e permeabilidade à água (pH₂O). Os testes foram realizados em valores de pH natural das pastas.

Os efeitos de outros fatores como pH da pasta, adensamento (% em sólidos) e conteúdo de material fino (% < 37µm) sobre as características reológicas: viscosidade e altura de abatimento (“slump”) da pasta mineral e característica de sedimentação: velocidade de sedimentação (VS), foram estudados considerando-se os níveis ótimos dos fatores estudados na etapa anterior.

O planejamento de experimentos de tipo fatorial 2³ é mostrado na Tabela IV.4.

Tabela IV.4: Planejamento experimental 2³ para estudar o efeito de outras variáveis tais como adensamento de sólidos (x₁), pH da pasta (x₂) e conteúdo de material fino (x₃) sobre o comportamento reológico de pastas minerais: a) Fatores e níveis estudados; b) Detalhe dos experimentos realizados.

a) Fatores e níveis estudados para outros fatores

Fatores/Níveis	(-)	(0)	(+)
% de sólidos	70	75	80
pH	6	7,5	9
% material fino (<37µm)	20	50	80

b) Detalhe dos experimentos realizados

No. Experimento	Fator x1 % de sólidos	Fator x2 pH	Fator x3 % < 37 μ m
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	+	+
9	0	0	0
10	0	0	0
11	0	0	0

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Caracterização da Amostra Sólida

A caracterização da amostra sólida foi realizada considerando as propriedades de densidade, distribuição granulométrica, área superficial específica, composição química e mineralógica e de carga superficial.

5.1.1. Densidade

Os resultados obtidos ao empregar a técnica de picnometria a gás (PG) e convencional ou simples (PS) são mostrados na Tabela V.1:

Tabela V.1: Densidades medidas da amostra sólida.

Técnica	Medição I	Medição II	Medição III	Densidade Média (g/cm ³)
PS	3,595	3,556	3,544	3,565
PG	3,713	3,681	3,705	3,699

A partir dos dados da Tabela V.1 pode-se calcular a densidade média da amostra sólida estudada que foi de 3,64g/cm³. O desvio padrão dos valores determinados pelos dois métodos foi de 6,7%. Como era esperado, a picnometria a gás apresentou maiores valores da densidade dado o vácuo aplicado na amostra de sólido.

5.1.2. Distribuição granulométrica

O resultado da análise granulométrica da amostra sólida, obtida via peneiramento de laboratório, é apresentado na Tabela V.2 e na Figura 5.1.

Tabela V.2: Análise granulométrica da amostra sólida.

Mesh (série Tyler)	Abertura (μm)	Massa retida (g)	% Retida Simples	% Retida Acumulada	% Passante Acumulada	Média geométrica do tamanho (μm)
100#	148	44,47	4,27	4,27	95,73	176,30
150#	105	14,11	1,36	5,63	94,37	124,66
200#	74	39,58	3,80	9,43	90,57	88,15
270#	52	24,57	2,36	11,79	88,21	62,03
325#	44	24,97	2,40	14,19	85,81	47,83
400#	37	26,56	2,55	16,75	83,25	40,35
- 400#	37	866,34	83,25	100,00	0,00	----
Total		1040,60	100,00			

Da Tabela V.2 e da Figura 5.1 observa-se que a amostra sólida estudada contém grande quantidade de material fino e de lamas, o que é indicado pelo elevado valor de material passante pela peneira de abertura de 37μm assim como uma baixa quantidade de material grosseiro (apenas 4,27% da amostra apresenta partículas maiores que a abertura de 148μm).

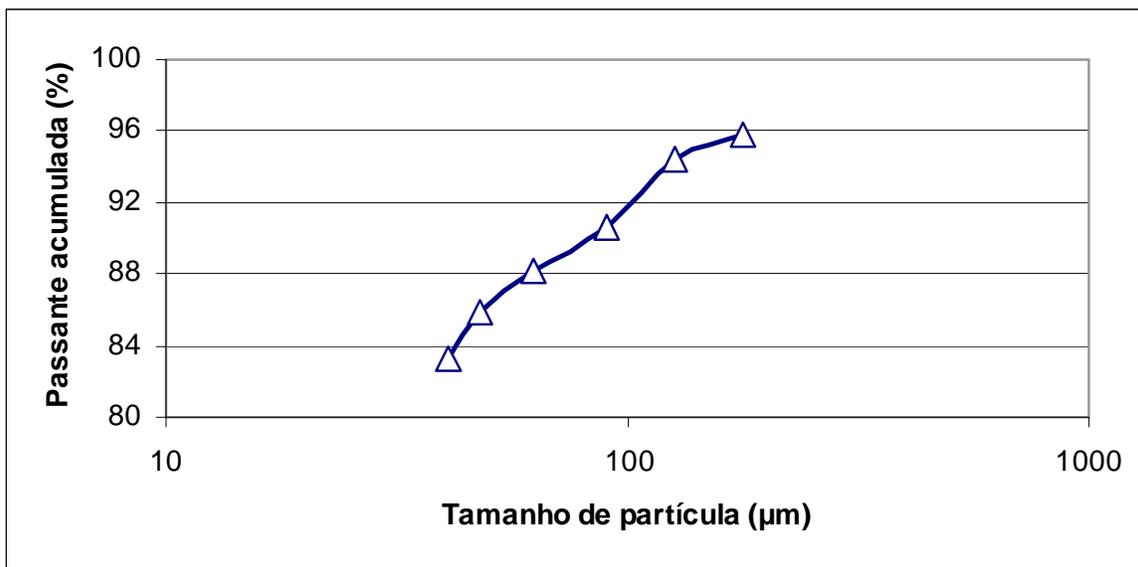


Figura 5.1: Curva granulométrica da amostra sólida obtida por peneiramento.

A distribuição granulométrica da fração mais fina da amostra obtida no peneiramento foi obtida pela elutriação (Cyclosizer Warman) e pela difração de laser (granulômetros Sympatec Helos e Cilás), e é mostrada nas Tabelas V.3 e V.4, respectivamente. A Figura 5.2 mostra as distribuições granulométricas obtidas pelas diferentes técnicas aplicadas.

Ao observar as Tabelas V.3 e V.4 e a Figura 5.2 se nota que existem diferenças nas distribuições granulométricas determinadas pelas diferentes técnicas e equipamentos empregados.

Tabela V.3: Resultados da análise granulométrica por classificação centrífuga (via Cyclosizer).

Tamanho de partícula (μm)	Passante acumulada (%)
29	84,4
20,9	74,0
15,2	61,8
10,3	50,0
8,2	42,0
< 8,2	----

Tabela V.4: Resultados da análise granulométrica utilizando os granulômetros de Cilás e Sympatec.

Cilás		Sympatec	
Tamanho de partícula (µm)	Passante acumulada (% em massa)	Tamanho de partícula (µm)	Passante acumulada (% em massa)
1	13,56	0,18	0
3	28,87	0,22	0
5	40,80	0,26	0,09
8	55,96	0,30	0,33
10	63,74	0,36	0,90
15	75,93	0,44	1,95
20	83,12	0,52	3,26
25	88,09	0,62	5,12
30	91,80	0,74	7,53
38	96,05	0,86	10,00
45	98,28	1,00	12,81
53	99,47	1,20	16,63
63	99,93	1,50	21,83
75	100	1,80	26,45
90	100	2,10	30,49
106	100	2,50	35,09
125	100	3,00	39,95
150	100	3,60	44,98
180	100	4,20	49,46
-----	-----	5,00	54,77
-----	-----	6,00	60,47
-----	-----	7,20	66,17
-----	-----	8,60	71,53
-----	-----	10,2	76,51
-----	-----	12,2	81,96
-----	-----	14,6	88,17
-----	-----	17,4	94,75
-----	-----	20,6	99,71
-----	-----	24,6	100
-----	-----	29,4	100
-----	-----	35,0	100

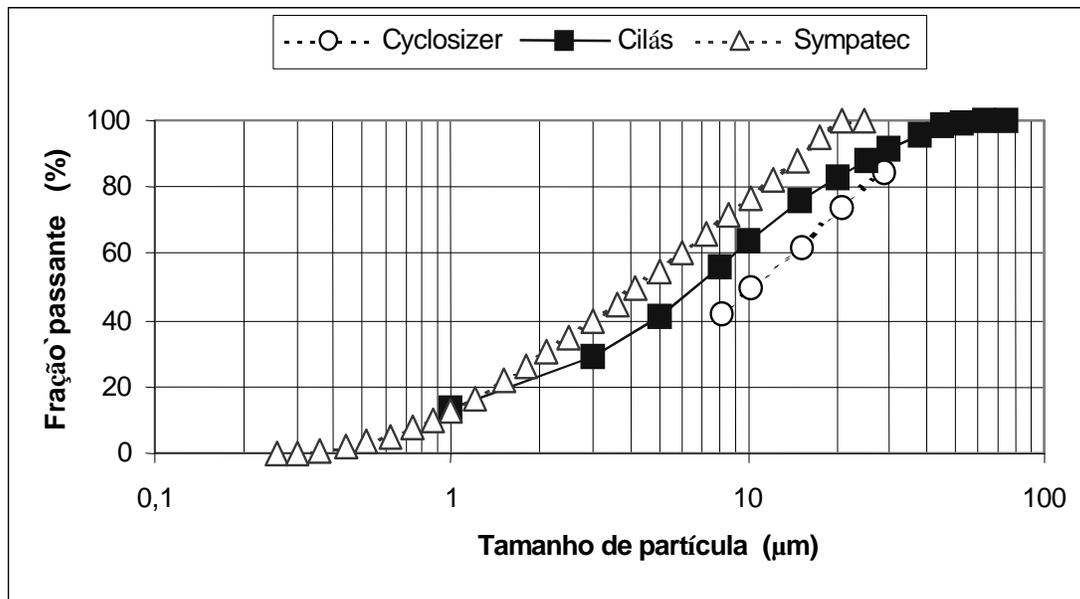


Figura 5.2: Curvas granulométricas da fração mais fina (< 400# Tyler ou < 37μm) da amostra sólida obtidas mediante Cyclosizer e granulômetros Cilás e Sympatec.

Os parâmetros granulométricos d_{50} e d_{90} , obtidos através dos softwares de ambos granulômetros utilizados, são apresentados na Tabela V.5.

Tabela V.5: Valores dos parâmetros d_{50} e d_{90} da fração fina (<37μm) e da amostra original.

Amostra	d_{50} (μm)	d_{90} (μm)
Amostra original - (S)	4,67	15,96
< 37μm - (S)	4,28	15,38
< 37μm - (C)	6,73	27,42

(S) dados obtidos usando granulômetro Sympatec
 (C) dados obtidos usando granulômetro Cilás

Da Tabela V.5 observa-se a proximidade das distribuições previstas pela análise do granulômetro Sympatec, praticamente não mostrando diferenças entre os parâmetros obtidos na amostra original e na fração mais fina. Já o resultado obtido no granulômetro Cilás apresenta uma granulometria mais grosseira.

5.1.3. Área superficial específica - ASE

O resultado da ASE obtido pela técnica de permeabilidade ao ar (segundo a norma NBR NM 76 de 1998) usando o aparelho de Blaine (Índice de Blaine) é apresentado na Tabela V.6.

Tabela V.6: Valor de índice de Blaine da amostra sólida.

Teste	Tempo passagem do ar (s)	Valor médio ASE (cm ² /g)
1	188,13	5.526
2	192,31	
3	186,20	
4	177,28	
5	180,20	
6	176,00	

O valor de 5.526(cm²/g) é relativamente alto, o que é indicativo de quantidade significativa de material fino, estando em concordância com os resultados de distribuição granulométrica apresentados no ponto anterior.

5.1.4. Composição química e mineralógica

Mediante a realização das análises via úmida e FRX aplicadas numa amostra sólida especialmente preparada para esse fim, foi possível determinar os teores dos diferentes elementos presentes e expressos como óxidos segundo mostra a Tabela V.7.

Tabela V.7: Análise química obtida pelas técnicas de via úmida e FRX.

Teores (%)										
Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	TiO ₂	P. F.
8,30	0,08	60,70	0,14	0,25	0,14	<0,1	0,38	28,2	0,36	3,46

P.F. refere-se a perda ao fogo obtida por aquecimento a 900°C (medida gravimétrica).

Portanto, as análises via úmida e por fluorescência de raios-X (FRX) mostraram a presença dos elementos ferro, silício, oxigênio, alumínio (que seriam os principais), fósforo, manganês, titânio, potássio e cálcio (detectados em nível de traços).

Utilizando-se DRX foi determinada, de forma qualitativa, a composição mineralógica indicada na Tabela V.8. Uma concentração magnética da amostra sólida representativa foi realizada buscando-se a identificação de outras espécies mineralógicas além das predominantes hematita e quartzo, mas não houve alteração significativa do resultado.

Tabela V.8: Análise mineralógica obtida via DRX.

Amostra	Hematita	Quartzo
Amostra original	++++	+++
Concentrado magnético	++++	++
Não magnético	++++	+++

++++ Alta concentração da fase; +++ Média concentração da fase;
 ++ Baixa concentração da fase; + Traços da fase.

A análise FRX não está em total acordo com o resultado obtido por meio da DRX tendo em vista a presença significativa de alumínio não mostrada nessa segunda técnica.

A análise por meio de microscopia eletrônica foi realizada para estudar aspectos da microestrutura (MEV) e para uma análise química semi-quantitativa (EDS). Assim a Figura 5.3 apresenta quatro micrografias MEV correspondentes a uma vista geral e de 3 partículas diferentes selecionadas da amostra original.

Na Tabela V.9 apresenta-se a distribuição de elementos presentes em cada uma das zonas fotografadas e apresentadas na Figura 5.3. Este resultado foi obtido por meio de EDS.

Dos valores apresentados na Tabela V.9 observa-se que esta amostra (vista geral) apresenta como elemento predominante o ferro (58,66%) e quantidades significativas dos elementos Si (21,81%), Al (7,77%) e O (11,76%). Este resultado é coincidente com aquele mostrado pela FRX que evidencia um conteúdo de Al próximo de 8% em massa.

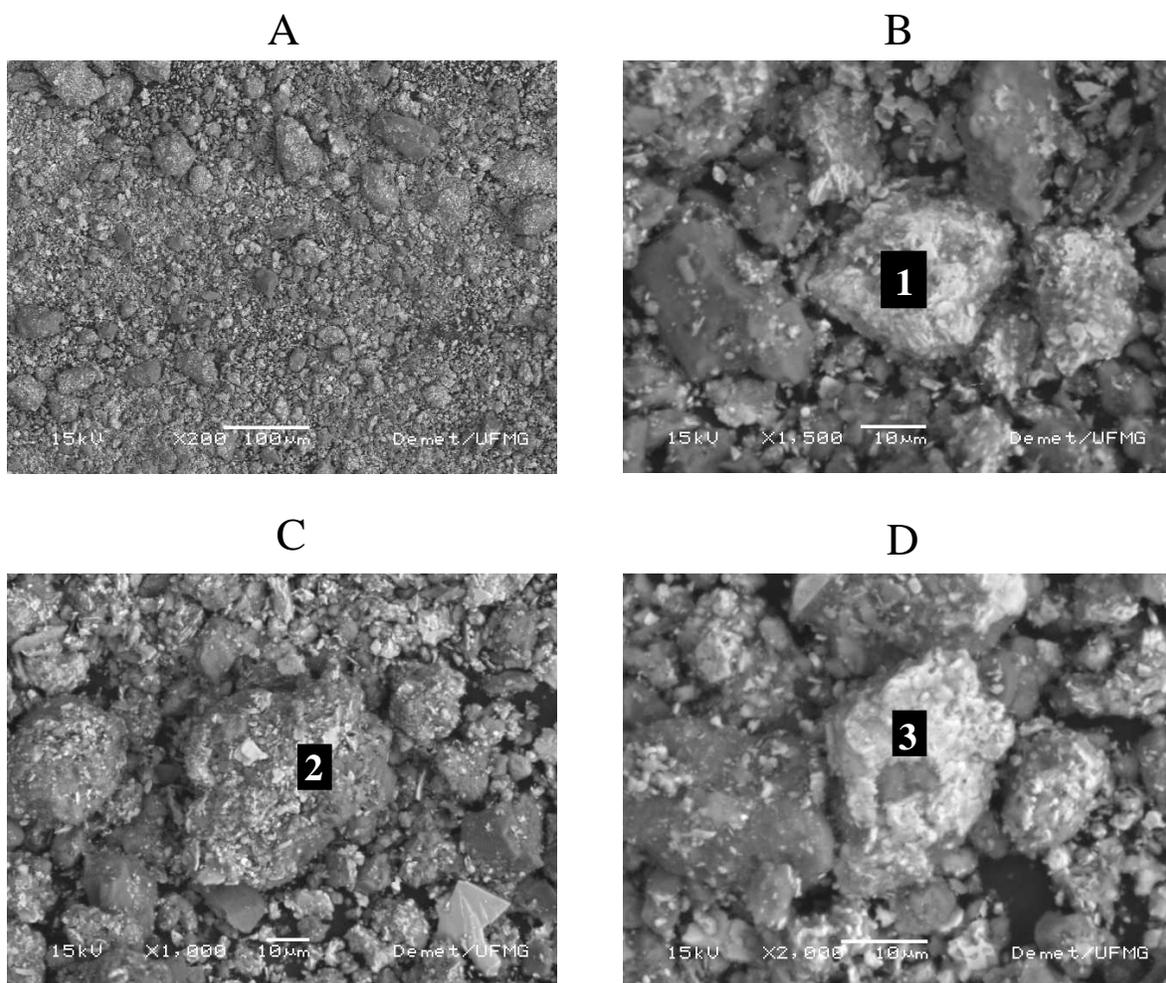


Figura 5.3: Micrografias MEV mostrando imagens obtidas pelos elétrons retroespalhados: A) Vista geral da amostra original (200X); B) Partícula 1 com 1500X; C) Partícula 2 com 1000X; D) Partícula 3 com 2000X.

Tabela V.9: Análise semiquantitativa (EDS) obtida na microscopia eletrônica.

Elemento (% massa)	Vista geral	Partícula 1 zona clara	Partícula 1 zona escura	Partícula 2 zona clara	Partícula 2 zona escura	Partícula 3 zona clara	Partícula 3 zona escura
O	11,76	9,31	1,31	12,66	17,54	7,01	20,05
Al	7,77	2,40	9,68	7,83	18,48	2,03	23,66
Si	21,81	1,96	10,78	6,76	20,27	1,77	33,34
K	---	---	---	---	0,85	---	13,85
Ti	---	---	---	---	0,47	---	---
Fe	58,66	86,33	78,23	72,74	42,40	89,18	9,10

Pode-se observar ainda na Tabela V.9 que o conteúdo do elemento ferro é maior nas zonas mais claras (brancas) da partícula 1, e nas regiões mais escuras aumenta a presença dos elementos Al e Si em mais de 3 e 4 vezes, respectivamente. Isso estaria indicando uma maior presença das espécies quartzo e provavelmente caulinita naquelas zonas. Na partícula 2 foram encontrados maiores teores dos elementos Si e Al se comparados com os da partícula 1, e portanto, menores teores de ferro, que continua sendo o elemento predominante. Há um incremento significativo do elemento K na região mais escura dessa partícula 2, o que poderia significar presença de alguma espécie de mica ou feldspato. Finalmente, a presença de mica deve ocorrer na região mais escura da partícula 3 em razão dos altos teores dos elementos K, Si, Al e O, sendo bastante baixo no que se refere ao elemento ferro. Já na região mais clara há o predomínio da espécie hematita (89,18% Fe).

Utilizando-se a técnica de EIV foi possível verificar, de forma qualitativa e mediante a identificação do tipo de ligação química, a presença das espécies predominantes da amostra sólida estudada, ou seja, de hematita, goethita, quartzo e caulinita. O espectro correspondente é apresentado na Figura 5.4 e no Anexo 1.

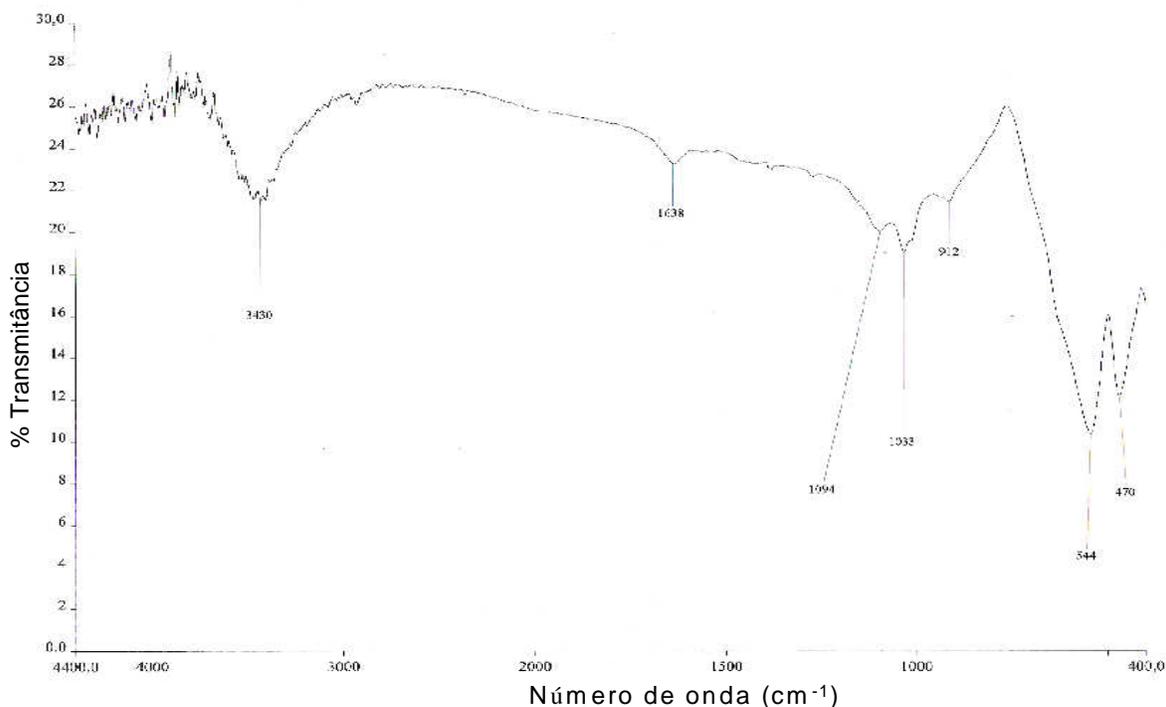


Figura 5.4: Espectro de infravermelho obtido da amostra original.

Da Figura 5.4 observam-se regiões de absorção correspondentes aos valores de número de onda equivalentes a 470 e 544cm⁻¹ que são característicos da hematita; 912cm⁻¹ correspondente a goethita; 1033cm⁻¹ correspondente a caulinita e 1094 e 3430cm⁻¹ que evidenciaríamos a presença de quartzo.

5.1.5. Comportamento da carga superficial

Quanto ao comportamento de carga superficial da amostra sólida estudada, foi aplicado o método simplificado de Mular e Roberts (1966) de modo a estabelecer o ponto isoelétrico de uma suspensão preparada com o rejeito da mineração de ferro estudado. Foram empregadas as concentrações de 10⁻² e 10⁻¹(M) de KNO₃ e a temperatura de todos os testes foi de 20°C. A Figura 5.5 mostra uma reversão de sinal de carga (similar ao ponto isoelétrico de uma amostra sólida pura) nesta amostra que na realidade é uma mistura de espécies minerais, sendo equivalente a um valor de pH de 6,98 aproximadamente.

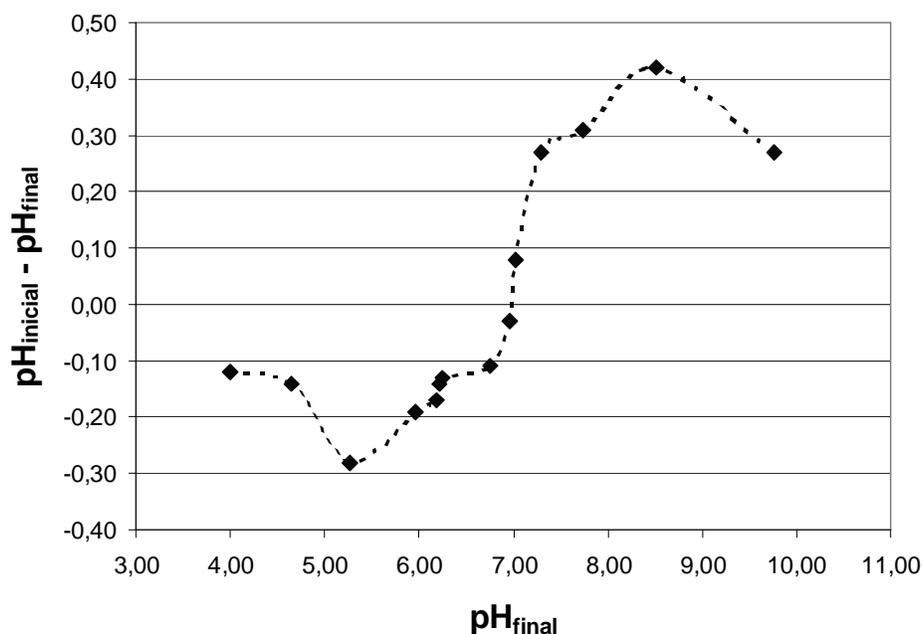


Figura 5.5: Resultado do teste de Mular e Roberts mostrando uma reversão de sinal de carga para um valor de pH de 6,98.

5.2. Caracterização das Pastas Minerais

5.2.1. Pastas sem adição de agentes agregantes e ligantes

O ângulo de repouso de uma pasta mineral pode ser avaliado através do teste de calha. A Figura 5.6 apresenta o comportamento quanto a fluidez de pastas minerais sem adição de agentes agregantes e ligantes, mostrando um gráfico do ângulo de repouso em função do adensamento das pastas minerais considerando diferentes inclinações de calha. Pode-se observar que o maior ângulo de repouso foi de 11° obtido na pasta mineral de 71% de sólidos em massa e sem inclinação da calha.

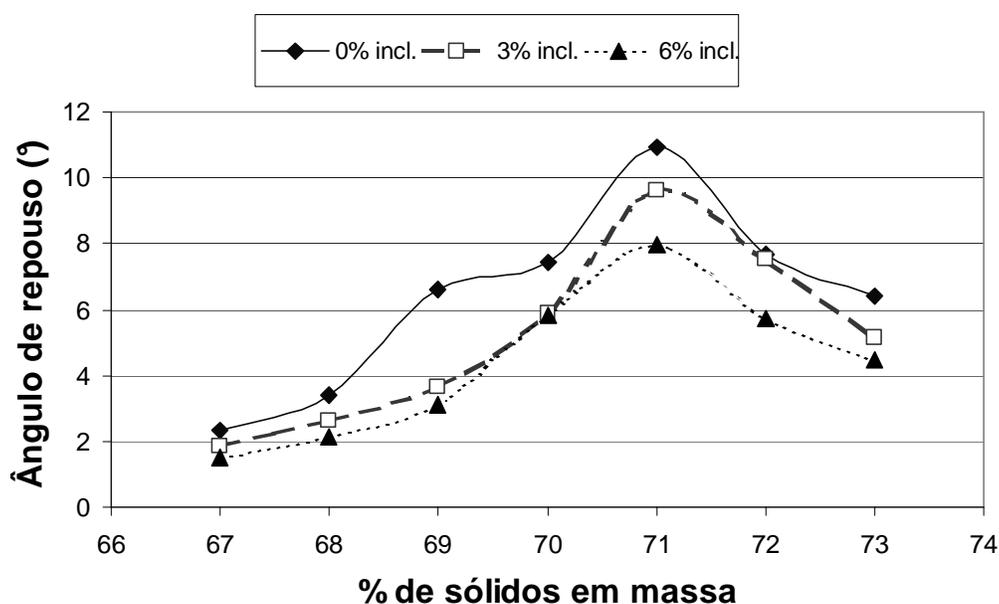


Figura 5.6: Ângulos de repouso obtidos para diferentes inclinações de calha.

A consistência das pastas minerais pode ser caracterizada pela altura de abatimento medida no teste de abatimento de cone ou “slump”. Para a condição sem adição de agentes agregantes e de ligantes nas diferentes misturas sólido-líquido estudadas é representada, na Figura 5.7, a altura de abatimento em função da % de sólidos. Da Figura 5.7 observa-se que a amostra de rejeito de ferro apresenta comportamento de pasta mineral entre os adensamentos de 71 a 76% de sólidos em massa, dados os abatimentos maiores que 10% obtidos nessas condições de adensamento. Esse valor de 10% de abatimento corresponde aproximadamente à consistência de uma torta de filtragem obtida com o mesmo material da amostra estudada.

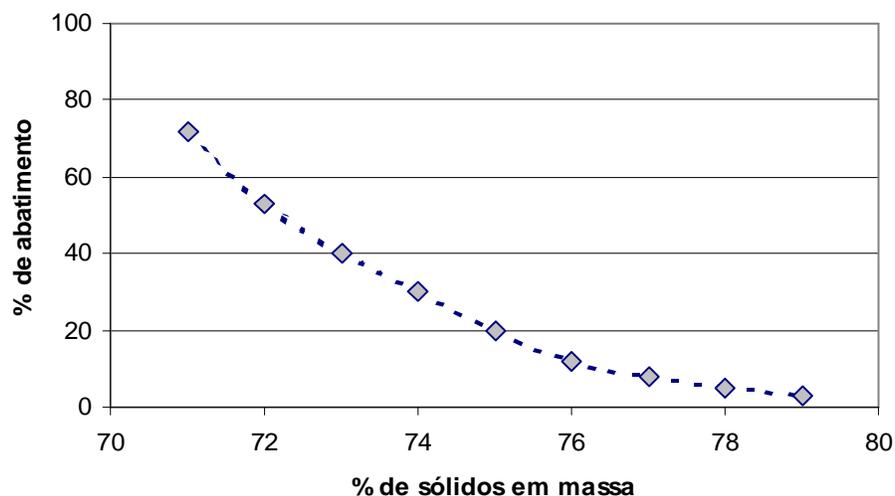


Figura 5.7: Altura de abatimento em função da % de sólidos em massa da pasta mineral.

5.2.2. Efeito de agregantes na consistência e reologia das pastas

O efeito da adição dos agentes agregantes SN-100 (floculante polimérico) e $Al_2(SO_4)_3$ (coagulante) foi estudado segundo um planejamento fatorial considerando as respostas de velocidade de sedimentação, % de abatimento de cone e comportamento reológico (registrando os valores de viscosidade de pasta ao aplicar o ciclo reológico 1 – 20 – 1 rpm). Foram considerados os adensamentos de 70 e 75% de sólidos em massa nas pastas minerais estudadas. As Tabelas V.10 e V.11 apresentam esses resultados.

Tabela V.10: Velocidade de sedimentação, % de abatimento de cone e comportamento reológico no ciclo 1 – 20 – 1 rpm numa polpa de 70% de sólidos.

No. experimento	Fator x1 SN-100	Fator x2 $Al_2(SO_4)_3$	Velocidade sedimentação (cm/min)	Abatimento de cone (%)	Comportamento Reológico
1	-	-	$4,6 \times 10^{-3}$	90	Duplo (mais reotrópico)
2	+	-	$5,6 \times 10^{-3}$	90	Duplo (mais tixotrópico e menores viscosidades)
3	-	+	$13,3 \times 10^{-3}$	90	Duplo (mais tixotrópico e menores viscosidades)
4	+	+	$5,5 \times 10^{-3}$	90	Quase newtoniano (valores da viscosidade são muito próximos)
5	0	0	$4,7 \times 10^{-3}$	90	Duplo (mais reotrópico e aumento da viscosidade)
6	0	0	$4,9 \times 10^{-3}$	90	Duplo (mais reotrópico e aumento da viscosidade)

Tabela V.11: Velocidade de sedimentação, % de abatimento de cone e comportamento reológico no ciclo 1 – 20 – 1 rpm numa pasta mineral de 75% de sólidos.

No. experimento	Fator x1 SN-100	Fator x2 Al ₂ (SO ₄) ₃	Velocidade sedimentação (cm/min)	Abatimento de cone (%)	Comportamento da pasta no ciclo reológico 1-20-1 rpm
1	-	-	$1,74 \times 10^{-4}$	34	Tixotrópico
2	+	-	$3,23 \times 10^{-4}$	43,33	Duplo (mais tixotrópico)
3	-	+	$4,41 \times 10^{-4}$	59,67	Tixotrópico
4	+	+	$3,85 \times 10^{-4}$	61	Tixotrópico
5	0	0	$2,68 \times 10^{-4}$	47	Duplo (mais tixotrópico)
6	0	0	$2,76 \times 10^{-4}$	50	Duplo (mais tixotrópico)

Outra forma de observar os resultados obtidos é através dos gráficos apresentados nas Figuras 5.8 e 5.9.

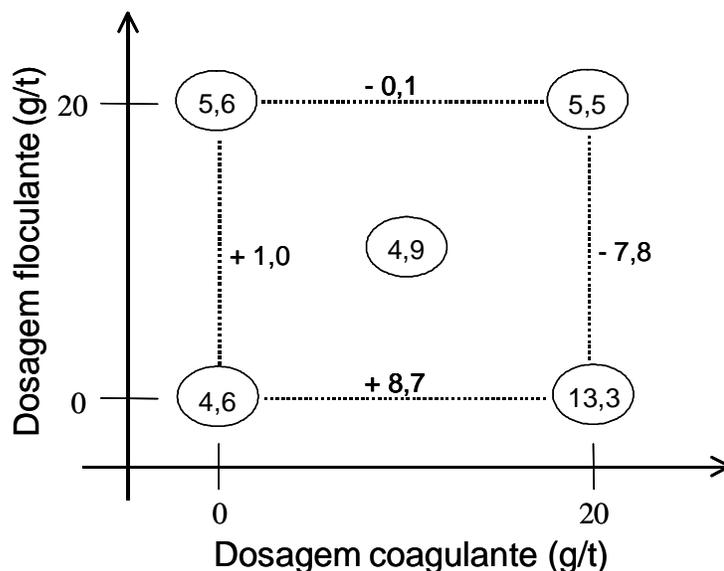


Figura 5.8: Gráfico das velocidades de sedimentação ($\times 10^3$ cm/min) obtidas nas diferentes condições de adição de agregantes na polpa de 70% de sólidos.

Da Tabela V.10 e da Figura 5.8 observa-se que a melhor condição de agregação para 70% de sólidos corresponde à adição de 20g/t do coagulante Al₂(SO₄)₃. Nessa condição a velocidade de sedimentação aumentou 289% no ciclo rotacional 1-20-1 rpm e foram observadas menores viscosidades e maior tendência ao tixotropismo. Já a condição combinada de 10g/t de ambos agregantes foi a condição menos favorável pois a velocidade de sedimentação aumentou menos do que 10% e o comportamento reológico

registrado teve uma maior tendência ao reotropismo, fato que não é favorável quando se pensa no transporte da pasta mineral. Quanto à consistência da pasta, não foram registradas respostas diferenciadas na % de abatimento de cone das pastas ensaiadas, pois o abatimento foi completo (90%).

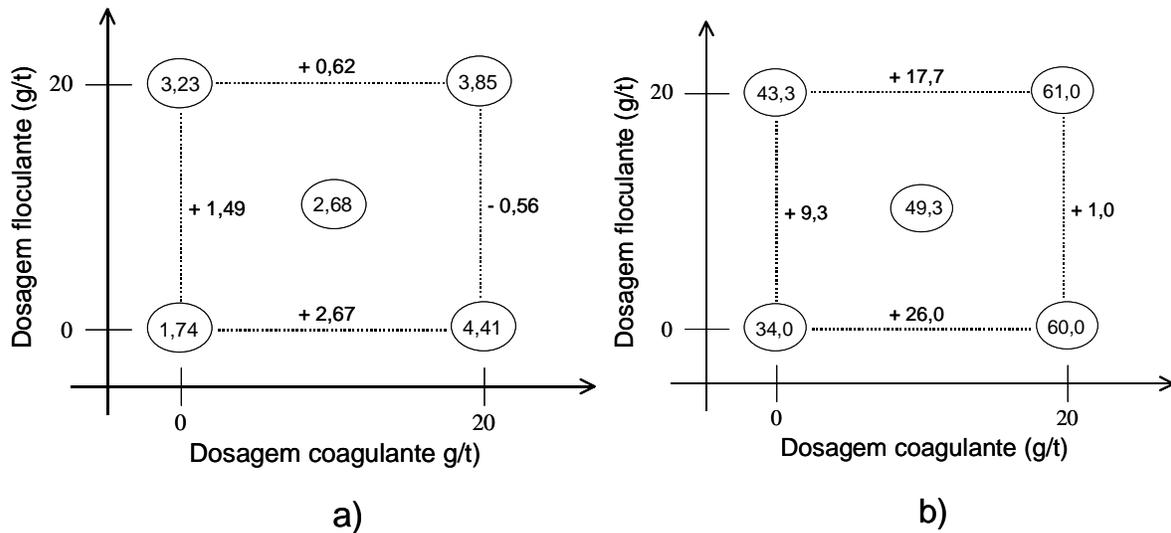


Figura 5.9: Gráficos de: a) velocidades de sedimentação ($\times 10^4$ cm/min) e b) % de abatimento obtidas nas diferentes condições de agregação na pasta mineral de 75% de sólidos.

A Tabela V.11 e as Figuras 5.9 - a) e b) indicam que a melhor condição de agregação para 75% de sólidos corresponde a adição de 20 g/t do coagulante $Al_2(SO_4)_3$. Nesse caso a velocidade de sedimentação aumentou 253% e no ciclo rotacional 1-20-1 rpm foram observadas menores viscosidades e uma maior tendência ao tixotropismo. A adição de 20g/t de flocculante aumentou também a velocidade de sedimentação (80%) mas o comportamento reológico apresentou um caráter duplo. Já a condição de adição combinada de 10g/t de ambos agregantes foi a condição menos favorável pois o aumento da velocidade de sedimentação foi menor do que 10% e o comportamento reológico indicou uma maior tendência ao reotropismo. Quanto à consistência da pasta foram registradas respostas bem diferenciadas na % de abatimento de cone das pastas ensaiadas. Por exemplo, para adição de 20g/t de coagulante observou-se uma pasta menos consistente já que sua % de abatimento aumentou de 34 para 60% (aumento de

176%), resultado quase idêntico à adição combinada de 20g/t de coagulante e 20g/t de floculante (% ABT aumentou de 34 para 61%, ou seja, 179%).

Considerando os resultados dos experimentos no nível “0” deste planejamento, foi possível fazer uma estimativa do erro experimental associado a cada medição das respostas estudadas. Assim, para o caso da pasta de 70% de sólidos tem-se um erro estimado pelo desvio padrão de 2,89% (resposta velocidade de sedimentação). No caso da pasta de 75% de sólidos, foram estimados erros de 2,05% e 4,24% (para velocidade de sedimentação e % de abatimento, respectivamente).

Considerando as respostas estudadas para ambas as pastas foram calculados os efeitos principais e da interação dos fatores estudados neste planejamento fatorial. Os valores são apresentados na Tabela V.12:

Tabela V.12: Efeitos principais e interação no planejamento fatorial 22.

Material	Polpa 70% sólidos	Pasta 75% sólidos	
Parâmetro	Velocidade sedimentação (cm/min)	Velocidade sedimentação (cm/min)	Abatimento de cone (%)
Média	$7,25 \times 10^{-3}$	$3,31 \times 10^{-4}$	49,575
Efeito x1	$-3,40 \times 10^{-3}$	$0,47 \times 10^{-4}$	5,15
Efeito x2	$4,30 \times 10^{-3}$	$1,65 \times 10^{-4}$	21,85
Interação x1x2	$-4,40 \times 10^{-3}$	$-1,03 \times 10^{-4}$	-4,15

Com os valores da Tabela V.12 podem-se estabelecer os modelos matemáticos lineares para as respostas velocidade de sedimentação (cm/min) e abatimento de cone (%) que são apresentados nas equações 5.1, 5.2 e 5.3:

$$Y1 = VS = 7,25 \times 10^{-3} - 3,40 \times 10^{-3}X1 + 4,30 \times 10^{-3}X2 - 4,40 \times 10^{-3}X1X2 \quad (5.1)$$

$$Y2 = VS = 3,31 \times 10^{-4} + 0,47 \times 10^{-4}X1 + 1,65 \times 10^{-4}X2 - 1,03 \times 10^{-4}X1X2 \quad (5.2)$$

$$Z = \%ABT = 49,575 + 5,15X1 + 21,85X2 - 4,15X1X2 \quad (5.3)$$

Onde: $X1 = (x1 - 10) / (20 - 0)$; $X2 = (x2 - 10) / (20 - 0)$; x1 é a dosagem do floculante SN-100 (em g/t); x2 é a dosagem de coagulante $Al_2(SO_4)_3$ (em g/t); Y1 e Y2 são as velocidades de sedimentação para a polpa de 70% e pasta de 75% de sólidos respectivamente; Z é a % de abatimento da pasta de 75% de sólidos em massa.

Os três modelos apresentados nas equações 5.1, 5.2 e 5.3 são válidos para dosagens entre 0 e 20 g/t de cada agregante estudado.

Uma análise comparativa entre os valores das respostas estudadas obtidos pela experimentação e aqueles preditos pelos modelos é mostrada pelas Figuras 5.10, 5.11 e 5.12:

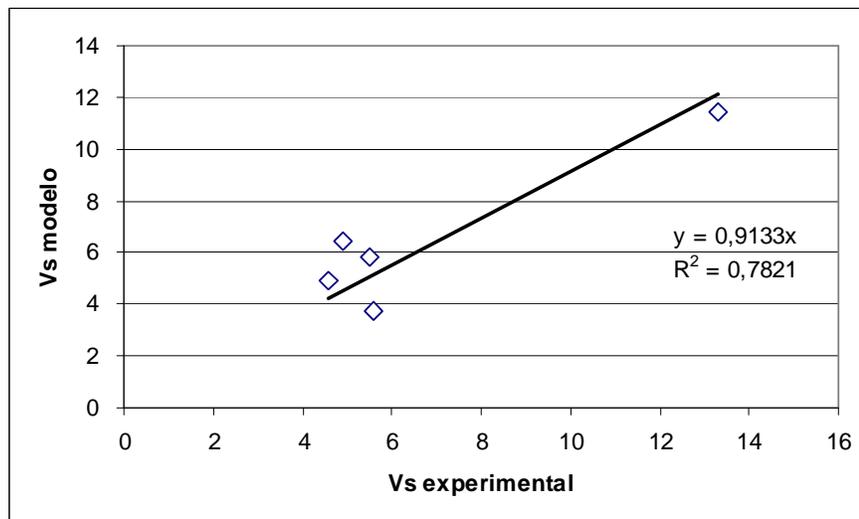


Figura 5.10: Gráfico comparativo dos valores da velocidade de sedimentação ($\times 103$ cm/min) da polpa de 70% de sólidos obtidos experimentalmente e preditos pelo modelo.

Da Figura 5.10 observa-se uma correlação que pode ser considerada razoável de 78,21% obtida entre os resultados experimentais e aqueles preditos pelo modelo apresentado na equação 5.1.

Da Figura 5.11 aprecia-se uma boa correlação equivalente a 83,61% obtida entre os resultados experimentais e aqueles preditos pelo modelo apresentado na equação 5.2.

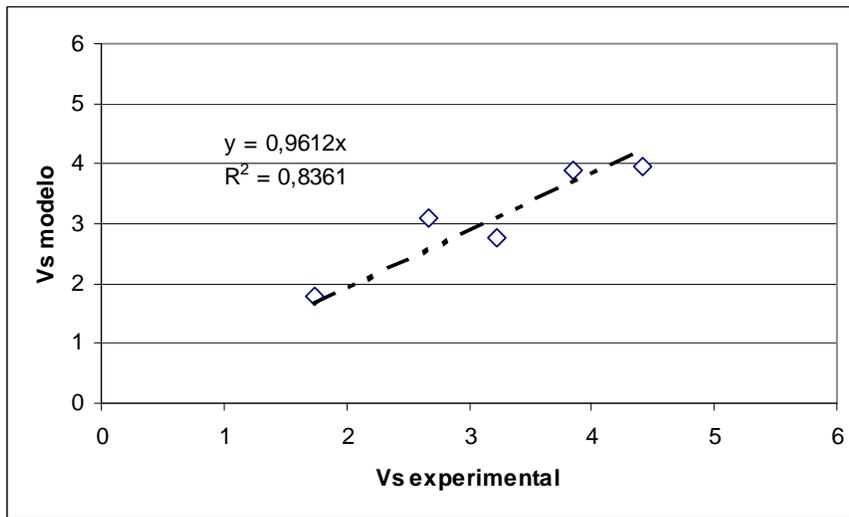


Figura 5.11: Gráfico comparativo dos valores da velocidade de sedimentação ($\times 10^4$ cm/min) da pasta de 75% de sólidos obtidos experimentalmente e preditos pelo modelo.

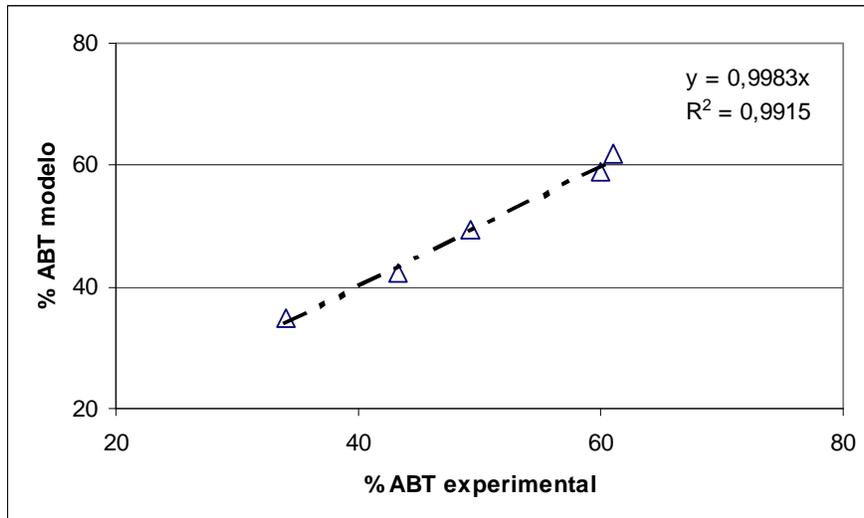


Figura 5.12: Gráfico comparativo dos valores da % de abatimento da pasta de 75% de sólidos em massa obtidos experimentalmente e preditos pelo modelo.

Da Figura 5.12 aprecia-se uma excelente correlação equivalente a 99,15% obtida entre os resultados experimentais e aqueles preditos pelo modelo apresentado na equação 5.3.

5.2.3. Efeito de % de sólidos, pH e % de material fino sobre a consistência e reologia das pastas

O efeito dos fatores % de sólidos, pH e da % de material fino (<37 μ m) nas misturas de sólido e líquido foi estudado no planejamento fatorial 23 apresentado no capítulo anterior da Metodologia.

Para a consistência foi considerada a resposta % de abatimento e como resposta reológica foi considerada a viscosidade aparente ($\eta_{ap.}$) da polpa ou da pasta mineral.

Os resultados obtidos nesse planejamento 23 são apresentados na Tabela V.13:

Tabela V.13: Resultados do planejamento fatorial 23.

No. Exp.	Fator x1 % de sólidos	Fator x2 pH	Fator x3 % < 37 μ m	% ABT	Viscosidade aparente (cP)	Comportamento reológico ciclo 1-20-1 rpm
1	-	-	-	90	14330	Duplo (mais tixotrópico)
2	+	-	-	33	17925,5	Duplo (mais tixotrópico)
3	-	+	-	90	12963,5	Duplo (mais reotrópico)
4	+	+	-	84	23461	Altamente reotrópico
5	-	-	+	80	5639,5	Duplo (mais tixotrópico)
6	+	-	+	5	99999,99 (*)	Valores de $\eta_{ap.}$ fora de escala
7	-	+	+	90	281	Tixotrópico
8	+	+	+	77	13379	Duplo (mais tixotrópico)
9	0	0	0	90	8761,13	Duplo (tixo e reotrópico)
10	0	0	0	87	8494,19	Duplo (tixo e reotrópico)
11	0	0	0	84	8732,64	Duplo (tixo e reotrópico)

(*) Valor estimado para a viscosidade aparente para poder avaliar planejamento 23.

Em forma gráfica os resultados desse planejamento fatorial 23 podem ser observados nas Figuras 5.13 e 5.14, considerando as respostas de % ABT e viscosidade aparente.

Observando a Tabela V.13 e as Figuras 5.13 e 5.14 pode-se visualizar que a condição mais favorável para transporte e fluidez da mistura sólido-líquido seria aquela do experimento 7, ou seja, a pasta com 70% de sólidos pH de 9 e 80% de material fino. Isso é devido a que seu comportamento reológico ser totalmente tixotrópico no ciclo rotacional 1 – 20 – 1 rpm. Sua viscosidade aparente foi o valor mais baixo registrado (281cP) e seu abatimento no teste de cone foi muito elevado (90%). Quanto à disposição desse rejeito seria mais favorável a condição do experimento 6, dada a maior consistência da mistura sólido-líquido (somente 5% de abatimento).

Para resposta %ABT

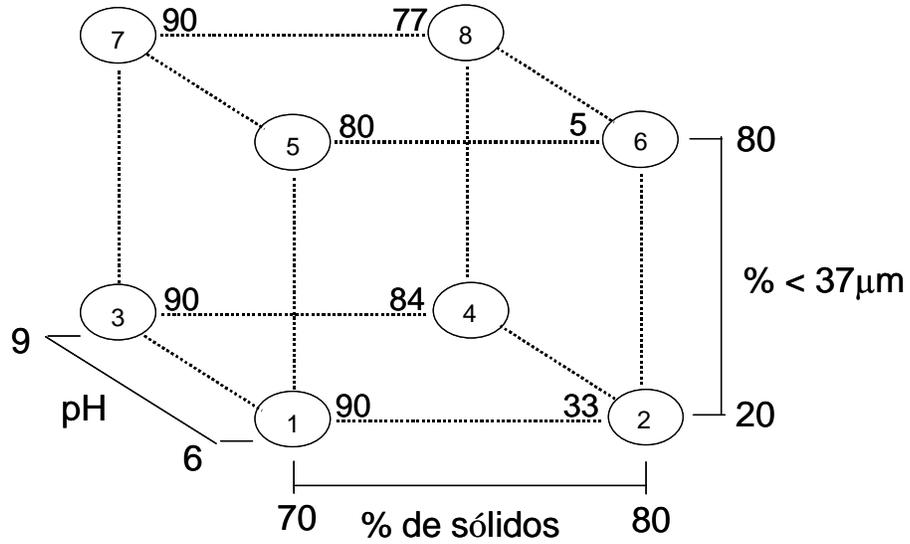


Figura 5.13: % de abatimento obtidas nas diferentes pastas estudadas.

Para resposta η_{aparente}

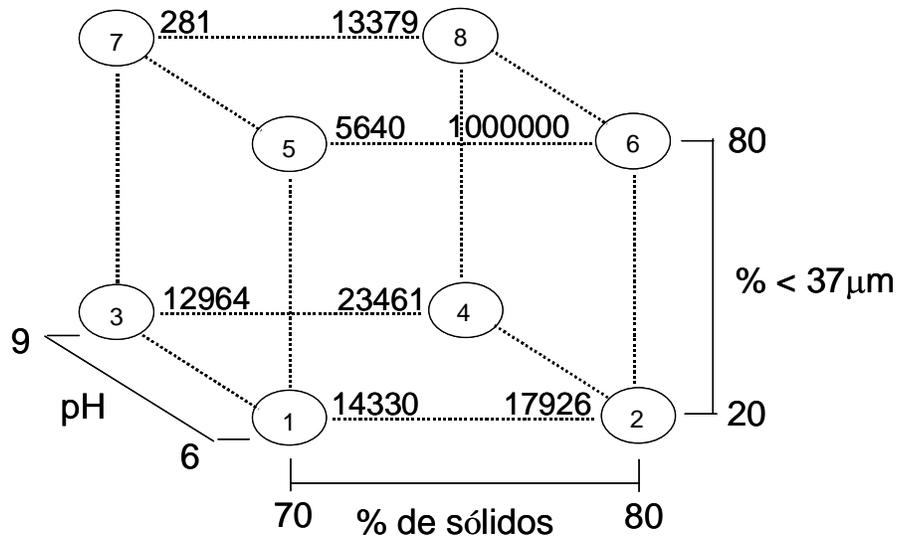


Figura 5.14: Valores de viscosidade aparente medidos nas diferentes pastas estudadas.

De uma forma geral são observados efeitos positivos da % de sólidos sobre a consistência (diminuição da % de abatimento) e viscosidade aparente, efeitos negativos do pH sobre a consistência e a viscosidade aparente e um efeito positivo do conteúdo de material fino sobre a consistência e negativo sobre a viscosidade aparente da mistura sólido-líquido (em 3 dos 4 casos estudados desse fator). Mas deve-se analisar cuidadosamente esse último aspecto dado que em apenas um dos casos considerados a resposta viscosidade aparente aumentou significativamente (de 17926cP do experimento 2 para 1000000cP do experimento 6).

Considerando as respostas quantitativas obtidas foram calculados os efeitos principais e das interações dos fatores estudados nesse planejamento fatorial. Os valores são apresentados na Tabela V.14.

A partir dos valores dos efeitos mostrados na Tabela V.14 podem ser estabelecidos os modelos lineares que permitem estimar os valores das respostas obtidas na faixa estudada de cada fator considerado (70 a 80% de sólidos; pH entre 6 e 9; 20 a 80% de material fino). Esses modelos são mostrados nas equações 5.4 e 5.5.

Tabela V.14: Efeitos principais e interações do planejamento fatorial 2³.

Parâmetro	Viscosidade aparente (cP)	Abatimento de cone (%)
Média	29772,51	73,64
Efeito x1	17907,38	-18,88
Efeito x2	-9469,88	16,63
Efeito x3	161,13	-5,63
Interação x1x2	-6104,88	14,13
Interação x1x3	11751,13	-10,25
Interação x2x3	-11883,25	3,88
Interação x1x2 x3	-9543,13	1,38

$$W = \eta_{ap.} = 29772,51 + 17907,38X_1 - 9469,88X_2 - 6104,88X_1X_2 + 11751,13X_1X_3 - 11883,25X_2X_3 - 9543,13X_1X_2X_3 \quad (5.4)$$

$$Z = \%ABT = 73,64 - 18,88X_1 + 16,63X_2 + 14,13X_1X_2 - 10,25X_1X_3 \quad (5.5)$$

Onde: $X_1 = (x_1 - 75) / (80 - 70)$; $X_2 = (x_2 - 7,5) / (9 - 6)$; $X_3 = (x_3 - 50) / (80 - 20)$; x_1 é a % de sólidos em massa; x_2 é o pH; x_3 é o conteúdo de finos (% < 37 μ m); W é a

viscosidade aparente da polpa ou da pasta; Z é a % de abatimento da mistura sólido-líquido.

Uma análise comparativa entre os valores obtidos pela experimentação e aqueles preditos pelos modelos é mostrada pelas Figuras 5.15 e 5.16.

Das Figuras 5.15 e 5.16 pode-se apreciar que a correlação é apenas razoável para a viscosidade aparente (61,07%) e boa para % de abatimento da mistura sólido-líquido (85,16%). Deve-se notar que as linhas de tendência, em ambos casos, não passam pela origem e sua inclinação está um pouco longe da unidade (reta $Y = X$). Isto demonstra as diferenças significativas entre os valores experimentais e aqueles preditos pelos modelos matemáticos.

No caso particular da viscosidade aparente deve-se observar que existe um valor que não foi possível registrar uma vez que estava fora da escala de medição e somente se pode fazer uma estimativa desse valor (experimento 6).

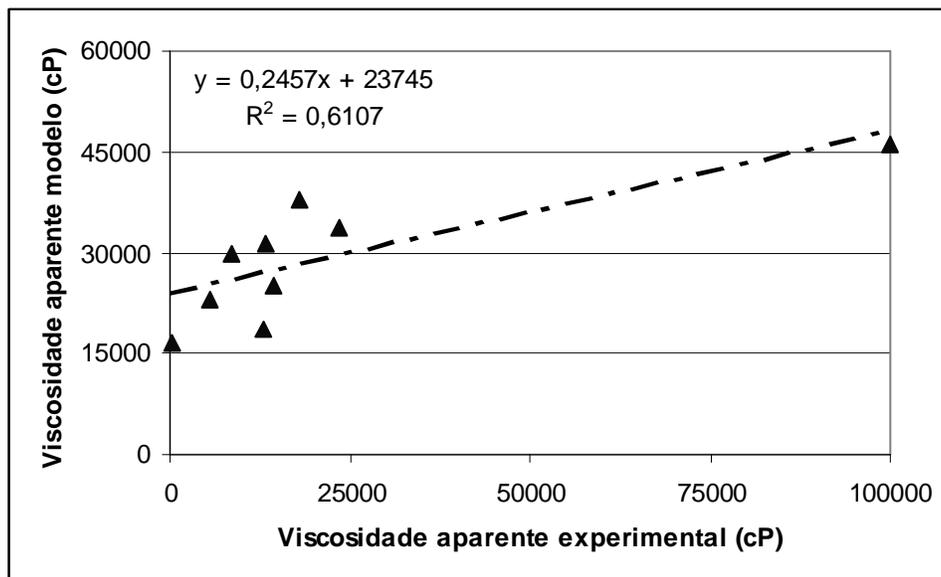


Figura 5.15: Comparação dos valores experimentais e aqueles preditos pelo modelo da viscosidade aparente da mistura sólido-líquido.

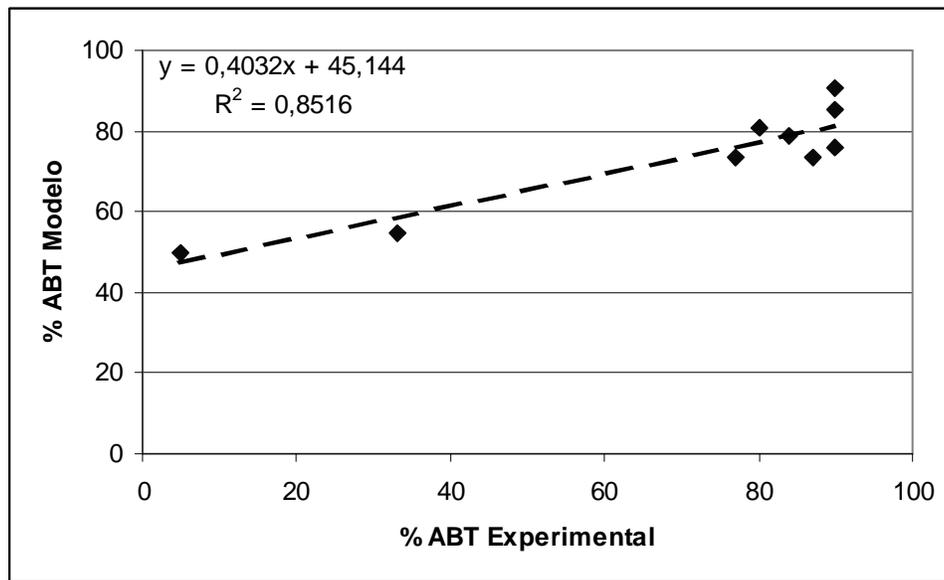


Figura 5.16: Comparação dos valores experimentais e aqueles preditos pelo modelo da % de abatimento.

Fotografias dos testes de abatimento são mostrados na Figura 5.17. Se comparadas as fotografias superior e inferior do lado esquerdo observa-se o efeito da mudança de pH na faixa estudada, ou seja, uma pasta mais agregada em pH 6 (com 80% de sólidos e 20% de material fino) que apresentou uma % de abatimento de 33% (experimento 2) e outra mais dispersa em pH 9 (com 80% de sólidos e 20% de material fino) que mostrou uma % de abatimento de 84% (experimento 4). A explicação dessa diferença tão marcante na resposta de consistência da pasta (medida através da % de abatimento) poderia ser explicada pela proximidade do ponto de reversão de sinal de carga (similar ao ponto isoelétrico do sólido para o valor de pH de 6,98, ver Figura 5.5), ou seja, pelo estado de agregação maior. Já na condição de pH 9 o material estaria em uma condição de maior dispersão, devido principalmente à mudança no fator pH, ainda que também pode estar influenciando os níveis dos demais fatores, fato que se comprova ao analisar os efeitos significativos de algumas interações (principalmente X_1X_2 e X_1X_3 , ver equação 5.5).

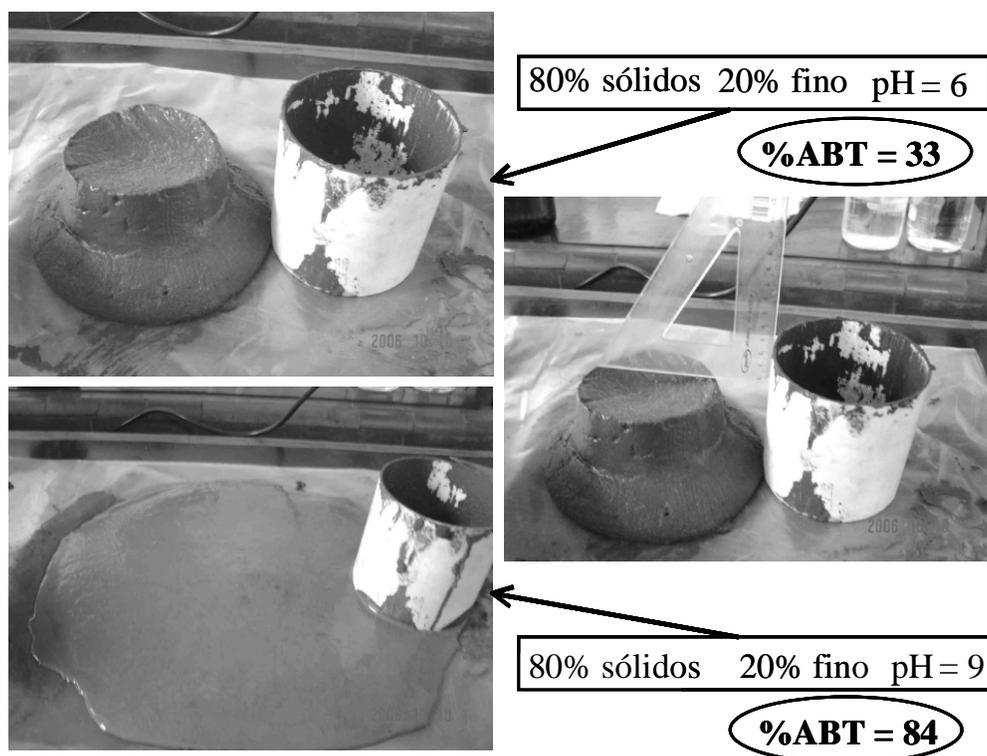


Figura 5.17: Fotografias dos testes de abatimento realizados no planejamento fatorial 2^3 .

A fotografia do lado direito da Figura 5.17 mostra o resultado do teste com 33% de abatimento e a forma de realizar a medida da altura de abatimento que foi realizada em 5 pontos da parte superior do cone formado.

5.2.4. Efeito de ligantes na consistência e na resistência à compressão das pastas minerais

Outro dos objetivos do presente estudo é avaliação de alguns ligantes utilizados para cimentar as pastas minerais. Portanto, será estudado o efeito da adição de diferentes agentes ligantes sobre a consistência em verde e sobre a resistência à compressão das pastas minerais cimentadas, o que foi realizado por meio de um planejamento fatorial 2^4 já mostrado no capítulo da Metodologia.

Os resultados dos ensaios de rompimento utilizando o procedimento sob pedido de patente pela UFMG são apresentados na Tabela V.15. Será identificado como meta caulim preparado com o estéril de mina “run of mines” aquele indicado como ROM, e o meta caulim preparado a partir do estéril arcóseo aquele indicado como ARC.

Tabela V.15: Resistência à compressão e condições experimentais dos ensaios de rompimento.

Ligante utilizado	Consistência em verde (% Vicat)	Condição de cura	Período para rompimento (dias)	Resistência à compressão (kPa)	Desvio padrão (kPa)
2%CP+2%ARC+2%ROM+2%CV	(5,5/40) 13,75%	1 dia - subaquática	1	831,694	72,558
		1 dia - subaquática	7	530,027	47,500
		1 dia - subaquática	14	438,612	41,891
2%CP+2%ARC+2%ROM+2%CV	(3,5/40) 8,75%	1 dia - subaquática	1	886,543	59,243
		1 dia - subaquática	7	694,573	27,424
		1 dia - subaquática	14	548,309	88,157
4%CP	(5/40) 12,5%	2 dias - subaquática	1	1270,585	109,698
		2 dias - subaquática	7	1279,626	155,942
		2 dias - subaquática	14	1288,767	79,167
4%CP+4%ARC	(4,5/40) 11,25%	1 dia - subaquática	1	566,592	15,833
		1 dia - subaquática	7	1151,645	167,566
		1 dia - subaquática	14	763,134	96,311
4%CP+4%ARC+4%ROM+4%CV	(2/40) 5%	1 dia - subaquática	1	1599,577	123,663
		1 dia - subaquática	7	968,816	27,424
		1 dia - subaquática	14	680,861	119,540
4%ARC+4%ROM+4%CV	(3/40) 7,5%	1 dia - subaquática	1	283,207	47,500
		1 dia - subaquática	7	-----	-----
		1 dia - subaquática	14	-----	-----
4%ROM	(5/40) 12,5%	7 dias - subaquática	1	224,70	113,972
		7 dias - subaquática	7	310,632	22,392
		7 dias - subaquática	14	-----	-----
	(6/40)	1 dia - subaquática	1	1297,909	54,849

4%CP+4%ARC+ 4%CV	15%	1 dia - subaquática	7	488,890	57,088
		1 dia - subaquática	14	447,753	47,500
		1 dia - seco - 40°C	1	2792,536	717,502
		1 dia - seco - 40°C	7	-----	-----
		1 dia - seco - 40°C	14	-----	-----
4%CP+4%ROM+ 4%CV	(8/40) 20%	1 dia - subaquática	1	1140,218	152,487
		1 dia - subaquática	7	502,602	0
		1 dia - subaquática	14	502,602	72,558
		1 dia - seco - 40°C	1	2586,854	271,487
		1 dia - seco - 40°C	7	2650,844	41,891
		1 dia - seco - 40°C	14	2358,317	176,314
4%CP+4%ARC+4%ROM	(6/40) 15%	1 dia - subaquática	1	530,027	82,273
		1 dia - subaquática	7	557,451	97,604
		1 dia - subaquática	14	-----	-----
4%CP+4%ROM	(5/40) 12,5%	1 dia - subaquática	1	548,309	83,783
		1 dia - subaquática	7	536,883	41,137
		1 dia - subaquática	14	447,754	72,558

Muitas das misturas simples entre dois ligantes assim como outras de três ligantes não produziram corpos de prova adequados para a realização do ensaio de compressão, isso devido ao desmanche ou desagregação dos corpos de prova no meio aquoso (todos aqueles que estavam compostos de cinzas volantes). Também os corpos de prova cimentados com um ligante (metacaulins preparados com ROM ou ARC ou com cinzas volantes) desmancharam-se completamente nessa condição de cura. Por exemplo, considerando a adição do ligante MK a base de ROM, se obteve uma consistência adequada a verde (5cm de um total de 40cm medidos no aparelho de Vicat, ou seja, 12,5% de penetração) mas somente após 7 dias de cura apresentaram uma resistência apropriada para desenformar. O excelente resultado alcançado pela condição de 4% de CP (superior a 1270kPa de resistência à compressão) após 2 dias de cura mostra o efeito do tempo de cura sobre a resposta de resistência à compressão.

Devido ao problema descrito acima foram realizados ensaios de rompimento por compressão preparando corpos de prova em condições de cura diferentes ao sistema subaquático estabelecido pela procedimento sob pedido de patente da UFMG. Assim, foram considerados periodos de cura a 40°C a seco dentro de estufa e também em

câmara úmida. Os resultados da resistência à compressão obtidos nessas novas condições foram extremamente superiores. Por exemplo, para as misturas de ligantes 4%CP + 4%ROM + 4%CV e 4%CP + 4%ARC + 4%CV, foram realizados ensaios de compressão de corpos de prova curados em forma subaquática e a seco. Obteve-se nesse último caso mais do que o dobro dos valores das resistências à compressão, como pode-se observar na Tabela V.15.

Quanto à consistência a verde, a pasta cimentada com 4% de cada ligante utilizado (16% do total) foi a que apresentou a maior resistência a penetração do Vicat (5% da altura total de 40cm) mas também mostrou a maior porosidade.

De qualquer forma, o melhor resultado da resistência à compressão foi aquele obtido com a adição da mistura de ligantes 4%CP + 4%ARC + 4%ROM + 4%CV com um dia de cura alcançando um valor de 1599,577kPa.

Considerando essa mesma condição da mistura de ligantes foram realizados ensaios de rompimento de corpos de prova por compressão realizando o processo de cura em três ambientes diferentes: subaquático (procedimento sob pedido de patente da UFMG), a seco (40°C) e na câmara úmida (norma brasileira NBR 7215, 1998). Os resultados nessas condições são mostrados na Figura 5.18.

O melhor resultado foi alcançado pelos corpos de prova curados no ambiente seco dentro da estufa a 40°C (2202,913kPa), em seguida os corpos de prova curados na câmara úmida (2065,791kPa) e finalmente os corpos de prova curados de forma subaquática dentro da estufa a 40°C (1599,577kPa).

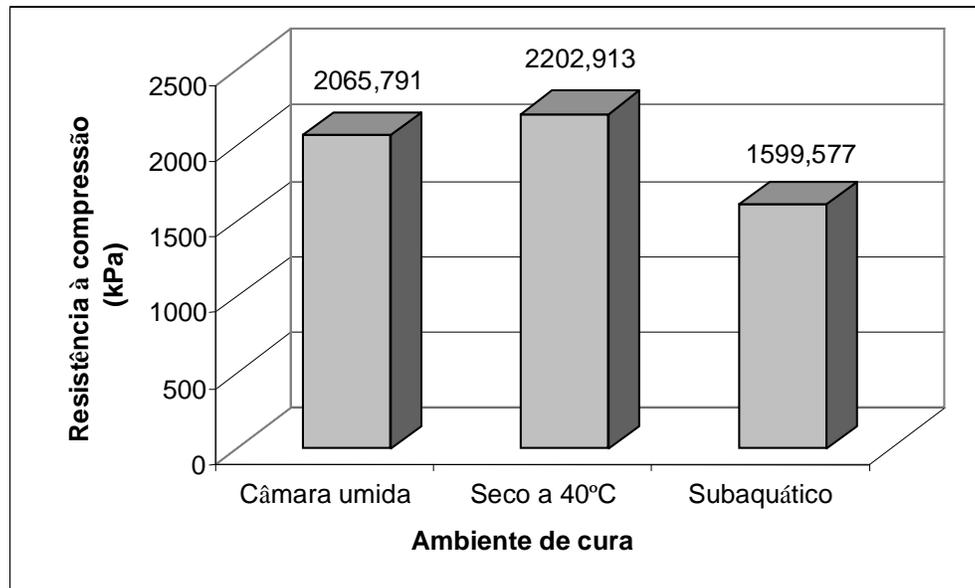


Figura 5.18: Resistências à compressão obtidas em diferentes ambientes de cura.

Os resultados dos ensaios de rompimento utilizando corpos de prova curados a seco (a 40°C dentro da estufa) são mostrados em detalhe na Tabela V.16.

As maiores resistências à compressão foram as obtidas nos corpos de prova cimentados apenas com 4% de cinzas volantes, atingindo o valor máximo de 5548,684kPa na condição de 7 dias de cura a seco a 40°C dentro da estufa.

Um gráfico que mostra os resultados dos ensaios daqueles corpos de prova curados em ambiente seco é apresentado na Figura 5.19. Dessa figura se observa claramente que a máxima resistência à compressão (condição de 4% de CV e 7 dias de cura) é mais elevada (>100%) que qualquer uma das outras adições de ligantes estudadas.

Ao considerar a norma brasileira (NBR 7215, 1998) foram obtidos menores valores da resistência à compressão (somente 525kPa), isso é, considerando um processo de cura em câmara umida. Na Figura 5.20 são apresentados os resultados dos ensaios de rompimento dos corpos de prova preparados segundo a norma brasileira (NBR 7215, 1998) para diferentes tempos de cura.

Tabela V.16: Resistência à compressão e condições experimentais dos ensaios de rompimento dos corpos de prova curados a seco.

Ligante utilizado	Consistência em verde (% Vicat)	Condição de cura	Período para rompimento (dias)	Resistência à compressão (kPa)	Desvio padrão (kPa)
4% CV	(6/40) 15%	1 dia – seco – 40°C	1	3121,628	474,740
		1 dia – seco – 40°C	7	5548,684	852,805
4% ROM	(5/40) 12,5%	1 dia – seco – 40°C	1	658,007	151,042
		1 dia – seco – 40°C	7	660,292	112,796
4% ARC	(5/40) 12,5%	1 dia – seco – 40°C	1	575,734	110,834
		1 dia – seco – 40°C	7	667,148	98,880
4% ROM + 4% CV	(5/40) 12,5%	1 dia – seco – 40°C	1	1398,465	258,236
		1 dia – seco – 40°C	7	1832,684	413,190
4% ARC + 4% CV	(5/40) 12,5%	1 dia – seco – 40°C	1	1407,747	69,017
		1 dia – seco – 40°C	7	2148,064	530,501
4% ROM + 4% ARC	(2,5/40) 6,25%	1 dia – seco – 40°C	1	591,731	169,610
		1 dia – seco – 40°C	7	566,592	69,016
4% CP + 4% CV	(5/40) 12,5%	1 dia – seco – 40°C	1	1599,577	372,507
		1 dia – seco – 40°C	7	1837,254	69,017
4% ROM + 4% ARC + 4% CV	(5/40) 12,5%	1 dia – seco – 40°C	1	1764,123	258,236
		1 dia – seco – 40°C	7	2504,580	296,217

Da Figura 5.20 observa-se que o melhor resultado foi obtido após 1 semana de cura alcançando o valor de $521,421 \pm 36,100$ kPa (ensaios realizados em triplicata).

Ao comparar esse valor da resistência à compressão obtido com os corpos de prova preparados segundo a norma brasileira com aqueles obtidos segundo a procedimento sob pedido de patente da UFMG, observa-se uma grande diferença (525 e 2065,791 kPa), talvez devido ao efeito da maior massa e porosidade obtidas ao usar a norma brasileira para a fabricação dos corpos .

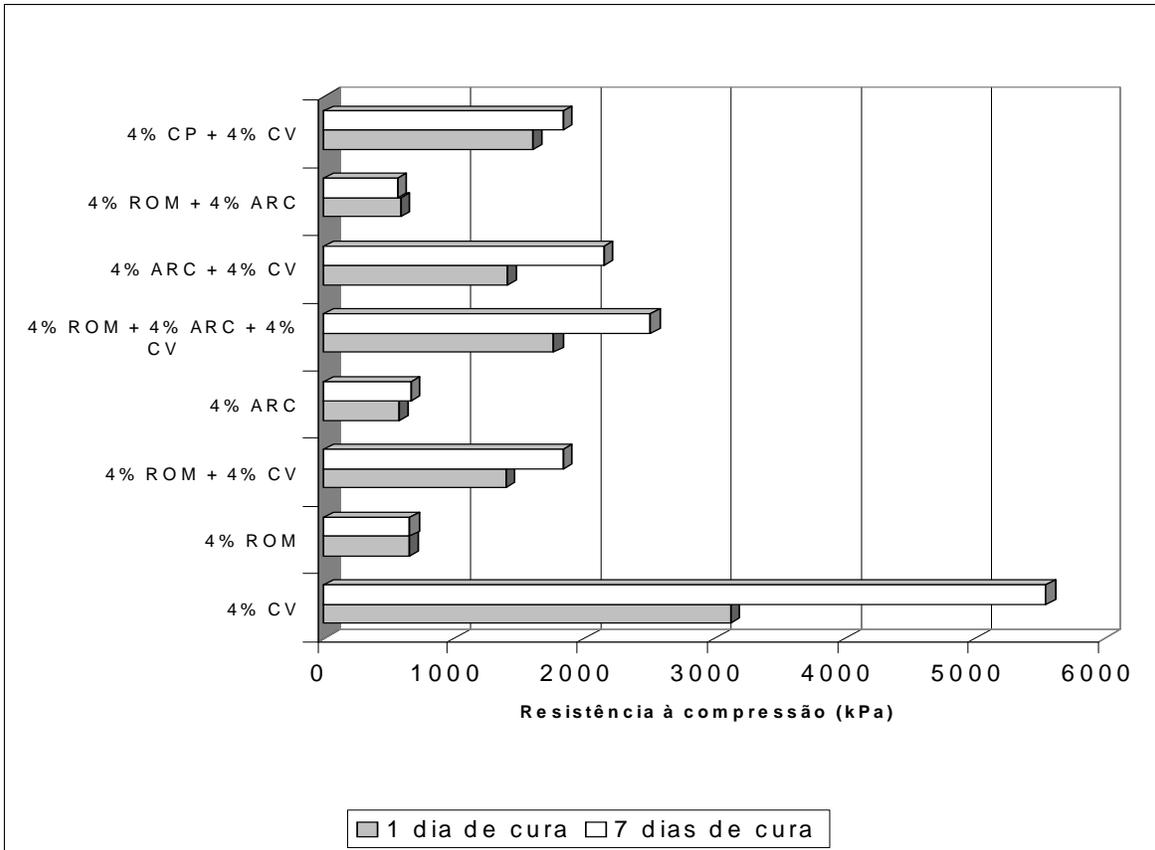


Figura 5.19: Resistências à compressão dos corpos de prova curados a seco.

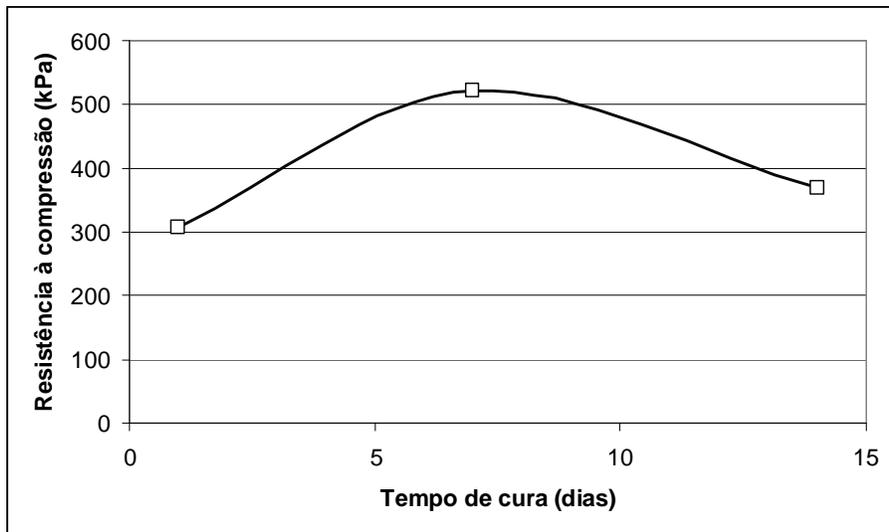
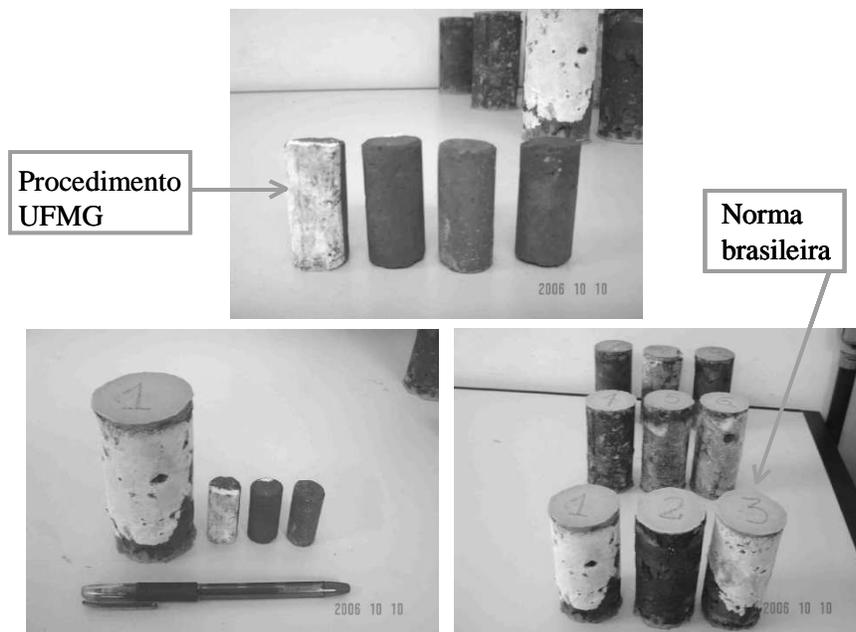


Figura 5.20: Resistências à compressão dos corpos de prova ensaiados de acordo a norma brasileira.



Fotografias dos corpos de prova dos ensaios de resistência à compressão segundo procedimento da UFMG e norma brasileira podem ser vistas na Figura 5.21.

Figura 5.21: Corpos de prova utilizados para determinar a resistência à compressão, utilizando o procedimento da UFMG e a norma brasileira NBR 7215.

As dimensões dos corpos de prova cilíndricos são de 1cm de diâmetro por 4cm de altura no caso da procedimento sob pedido de patente da UFMG e de 5cm de diâmetro por 10cm de altura para a norma brasileira (NBR 7215, 1998).

Foram escolhidas as duas normas anteriores devido a que não existe uma norma específica para determinação de resistência à compressão de pastas minerais cimentadas.

Os períodos de cura são realizados em ambientes diferentes segundo a norma considerada. Na procedimento sob pedido de patente da UFMG é utilizado um ambiente subaquático dentro de uma estufa a 40°C e na norma brasileira é empregada uma câmara úmida com condições controladas de temperatura e umidade (NBR 7215, 1988).

Na Figura 5.21 observa-se também o aparecimento de uma camada superficial em alguns corpos de prova após o processo de cura. Essa camada branca somente foi detectada naqueles corpos de prova que consideravam adições do ligante cinzas volantes. A análise

vía EDS desse depósito mostrou somente a presença de Ca. A análise via DRX também não foi conclusiva na detecção dos elementos que formavam essa camada. Mediante análise via EIV foi determinada finalmente a presença de Na e CO_3^{2-} , evidenciando a presença dos compostos carbonato e bicarbonato de sódio (ver espectro infravermelho no Anexo 1). Os sinais de absorção correspondentes a esses compostos são aqueles de número de onda de 1437 e 1689cm^{-1} , respectivamente.

As imagens MEV e os resultados das análises EDS realizados nas superfícies de fratura de alguns corpos de prova preparados com diferentes misturas de ligantes são apresentadas nas Figuras 5.22 a 5.27.

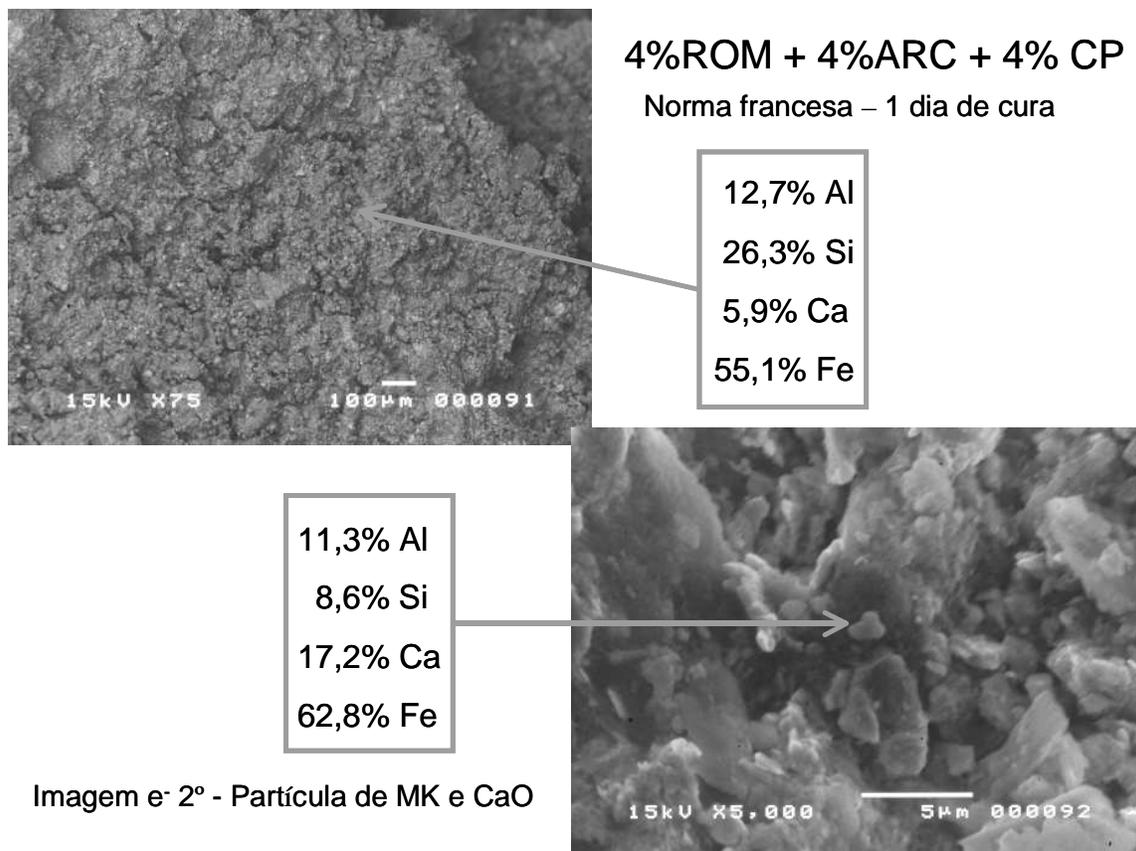


Figura 5.22 Superior: Imagem MEV obtida com elétrons retroespalhados mostrando uma vista geral da superfície de fratura de corpo de prova cimentado com os ligantes metacaulins (ROM e ARC) e de cimento Portland (CP); Inferior: imagem MEV obtida por elétrons secundários (aumento 5000X).

A Figura 5.22 superior mostra algumas fissuras produzidas pela compressão aplicada no corpo de prova ensaiado. A análise EDS mostra que o elemento principal é ferro (55%) proveniente da hematita presente no “pastefill” e os elementos secundários seriam Si (26,3%) proveniente do quartzo e dos metacaulins adicionados, Al (12,7%) proveniente dos metacaulins adicionados e Ca (5,9%) produto da adição de cal e do CP. A Figura 5.22 inferior mostra uma partícula muito pequena (tamanho aproximado de 2µm) com um maior conteúdo de Ca (17,2%), o que pode significar presença de cal ou de CP.

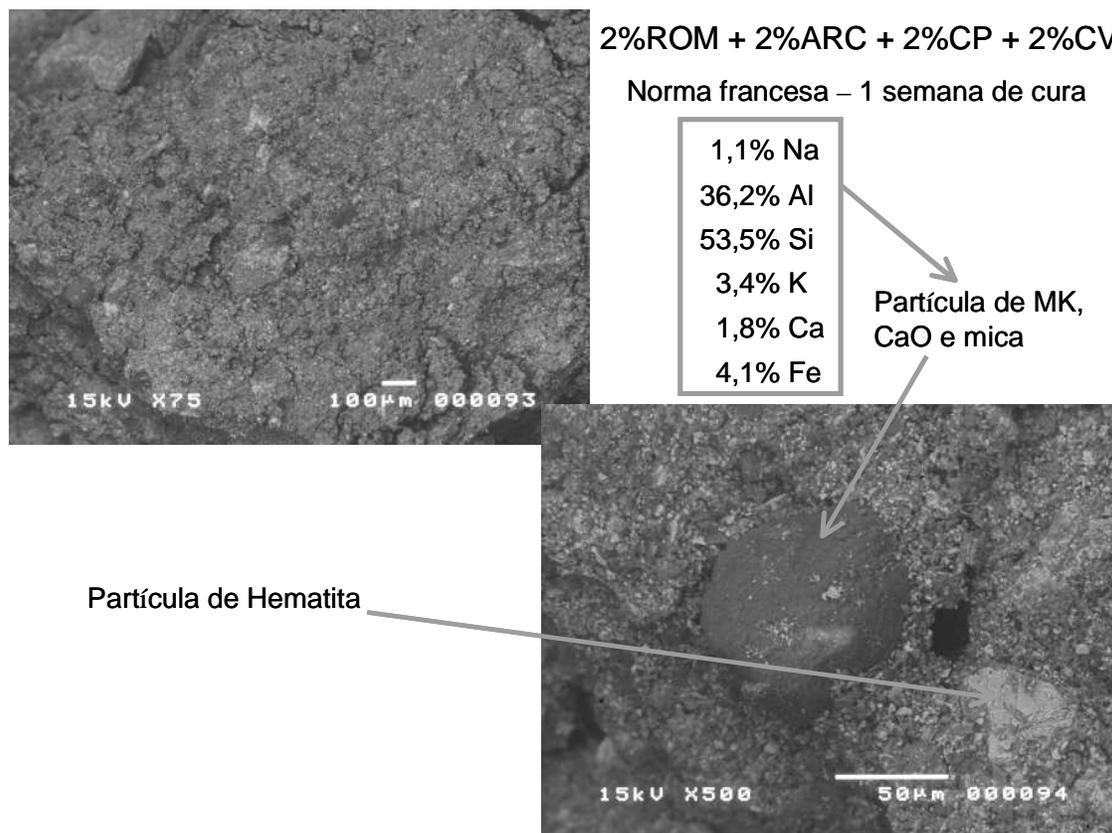


Figura 5.23: Imagens MEV obtidas via elétrons eletrospalhados; Superior: Vista geral da superfície de fratura de corpo de prova cimentado com os ligantes dos 3 metacaulins (MK) e cimento Portland (CP); Inferior: partícula mais escura que contém MK, CaO e mica e partícula mais clara de hematita.

Da análise EDS da partícula mais escura mostrada na Figura 5.23 inferior observa-se um alto conteúdo de Si proveniente dos MK adicionados e do mesmo “pastefill” e de K, possivelmente pela presença de alguma mica ou feldspato.

A Figura 5.24 superior mostra a mesma partícula de hematita analisada na Figura 5.23 inferior com um maior aumento (1500X). Pode-se observar uma forma cristalina bem definida e segundo a análise EDS observa-se grande quantidade de ferro na composição química dessa partícula com relativamente baixos conteúdos dos elementos Al, Si e Ca. A Figura 5.24 inferior mostra uma partícula de quartzo de cor mais escura e cristalinidade típica dessa espécie mineralógica. A análise EDS verifica a observação do MEV dado o elevado teor do elemento Si (91,6% em massa) e os baixos teores de Fe, Al e Ca.

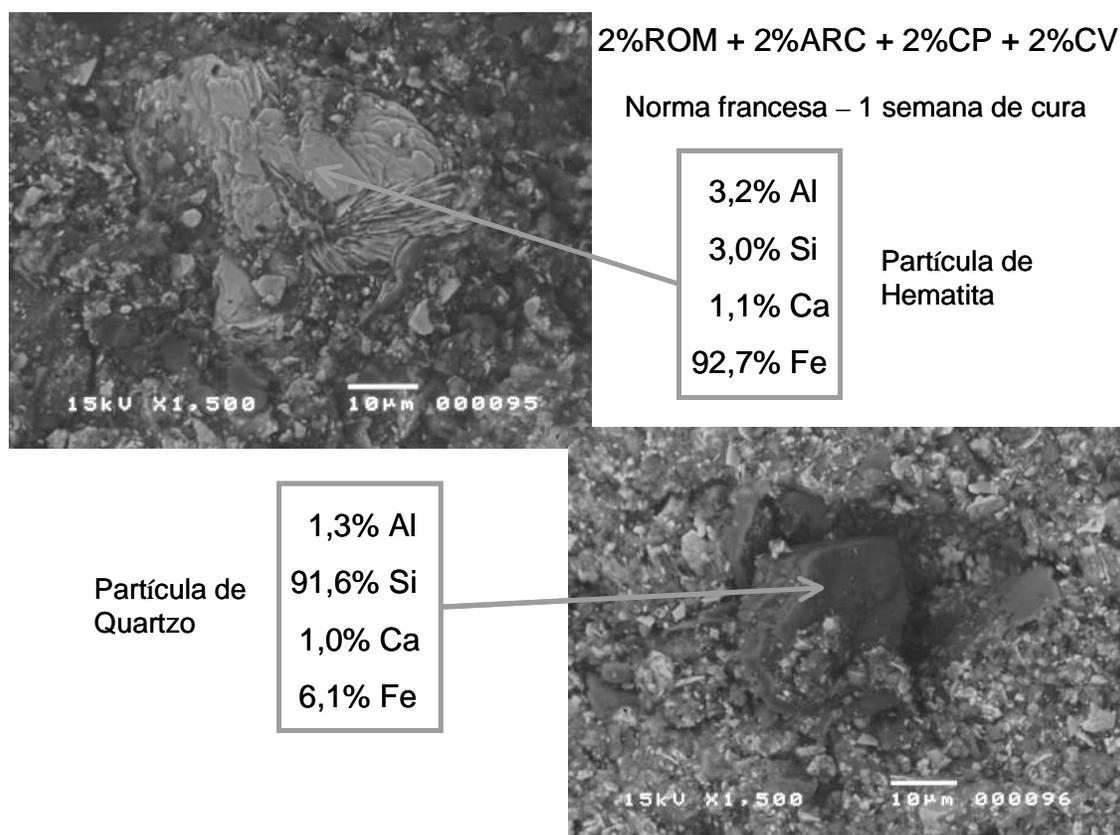


Figura 5.24: Imagens MEV obtidas via elétrons eletrospalhados; Superior: Partícula mais clara e brilhante de hematita detetada num corpo de prova cimentado com os ligantes dos 2 metacaulins (MK), cinzas volantes (CV) e cimento Portland (CP); Inferior: partícula mais escura que contém principalmente quartzo.

A Figura 5.25 superior mostra a presença de fissuras na superfície de fratura de um corpo de prova cimentado com 16% de ligantes (4% de cada MK, 4% de CV e 4% de CP). A

análise EDS mostra presença majoritária do elemento Fe (53,4%) e teores médios dos elementos Si (25,7%), Al (12,3%) e menores de Ca (5,8%) e Na (2,8%).

A Figura 5.25 inferior mostra uma partícula de forma acicular que é típica nas estruturas que contêm cimento portland. Não foi possível a determinação da análise EDS devido a seu pequeno tamanho e localização na amostra analisada.

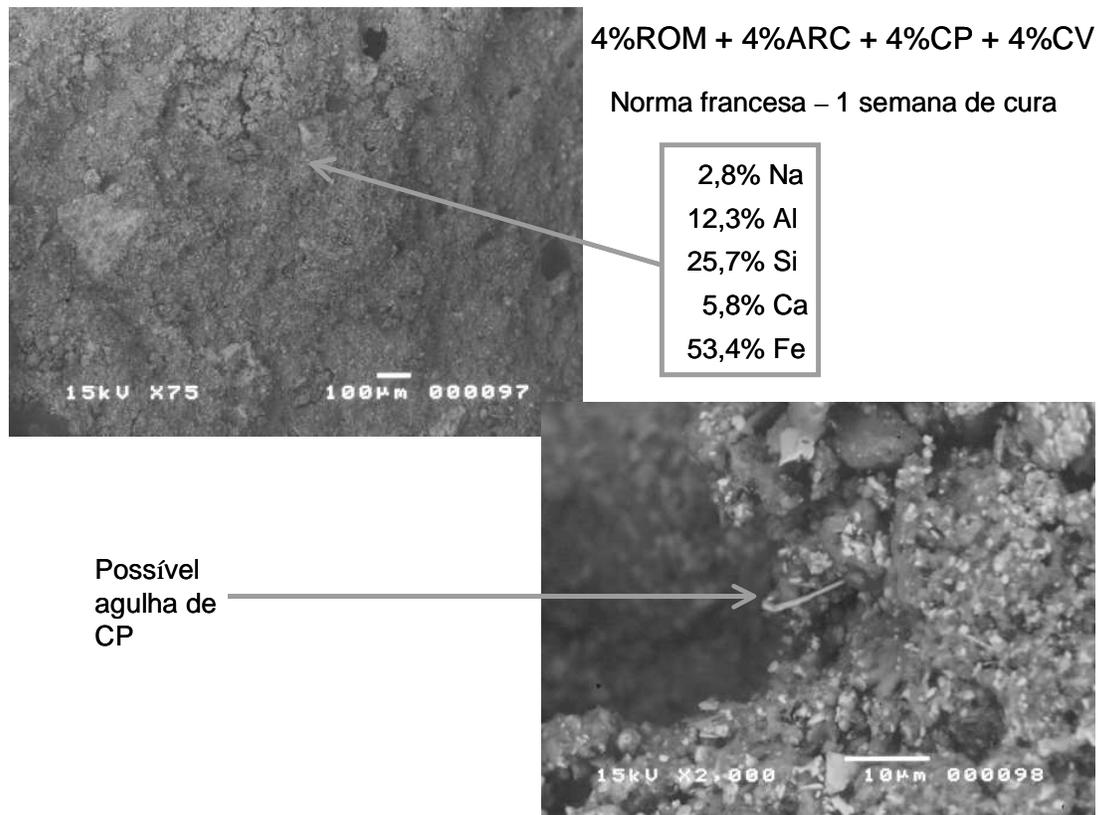


Figura 5.25: Imagens MEV obtidas via elétrons eletrospalhados; Superior: Vista geral da superfície de fratura de corpo de prova cimentado com os 4 ligantes; Inferior: possível partícula de forma acicular típica de estruturas cimentadas com cimento Portland.

A Figura 5.26 superior mostra a presença de fissuras na superfície de fratura de um corpo de prova cimentado com 12% de ligantes (4% de cada MK e 4% de CP). A análise EDS mostra presença principal do elemento Fe (55,4%) e teores médios dos elementos Si (25,8%), Al (12,5%) e menores de Ca (6,3%).

A Figura 5.26 inferior mostra a presença de fissuras na superfície de fratura de um corpo de prova cimentado com 16% de ligantes (4% de cada MK, 4% de CV e 4% de CP). Esse

corpo de prova foi obtido segundo a norma brasileira NBR 7215. Da imagem MEV observam-se grandes fissuras e porosidade.

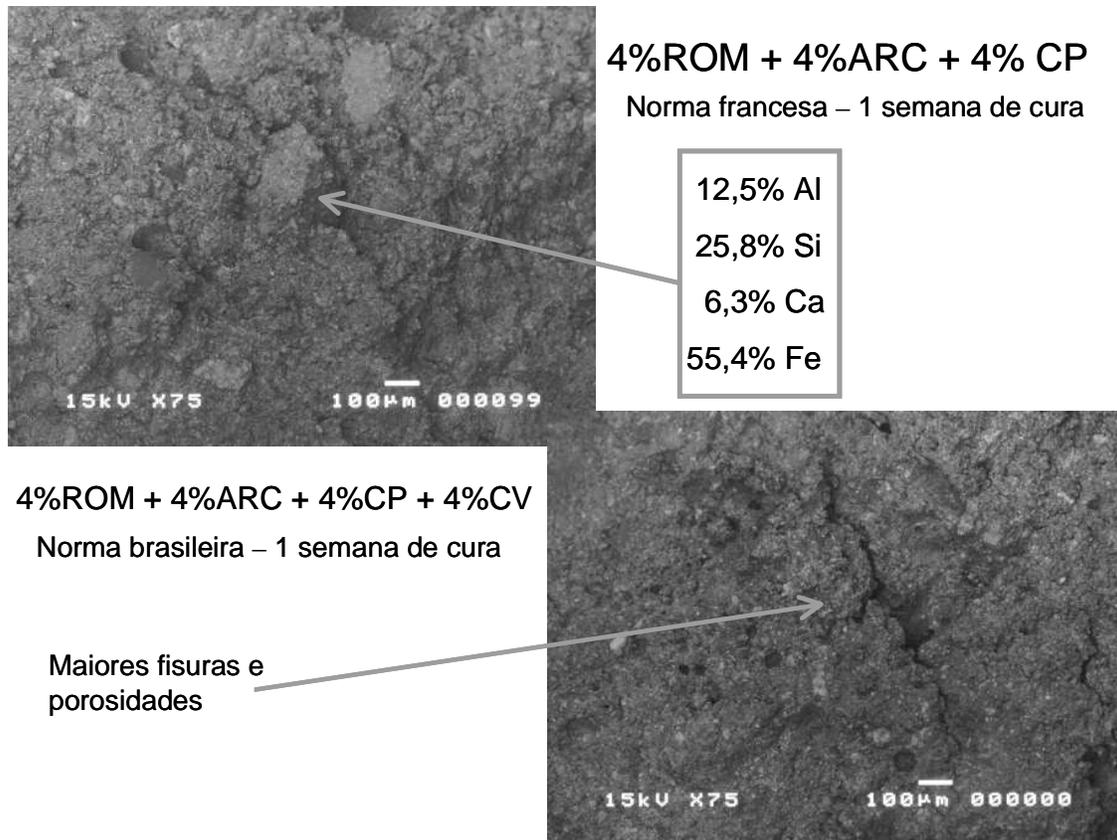


Figura 5.26 Imagens MEV obtidas via elétrons eletrospalhados; Superior: Vista geral da superfície de fratura de corpo de prova cimentado com os ligantes dos 2 metacaulins (MK) e cimento Portland (CP); Inferior: Vista geral de outra superfície de fratura que corresponde a um corpo de prova cimentado com os 4 ligantes estudados (16% do total).

A Figura 5.27 superior mostra a mesma partícula de hematita analisada na Figura 5.22 inferior com um maior aumento (750X). Pode-se observar uma forma cristalina bem definida e segundo a análise EDS observa-se grande quantidade de ferro na composição química (97,4% em massa) dessa partícula, com relativamente baixos teores dos elementos Al (1,3%) e Si (1,3%). A Figura 5.27 inferior mostra uma partícula de quartzo de cor mais escura e maior opacidade com cristalinidade típica. A análise EDS verificou a observação do MEV dada a elevada composição do elemento Si (100% em massa) e a ausência dos demais elementos.

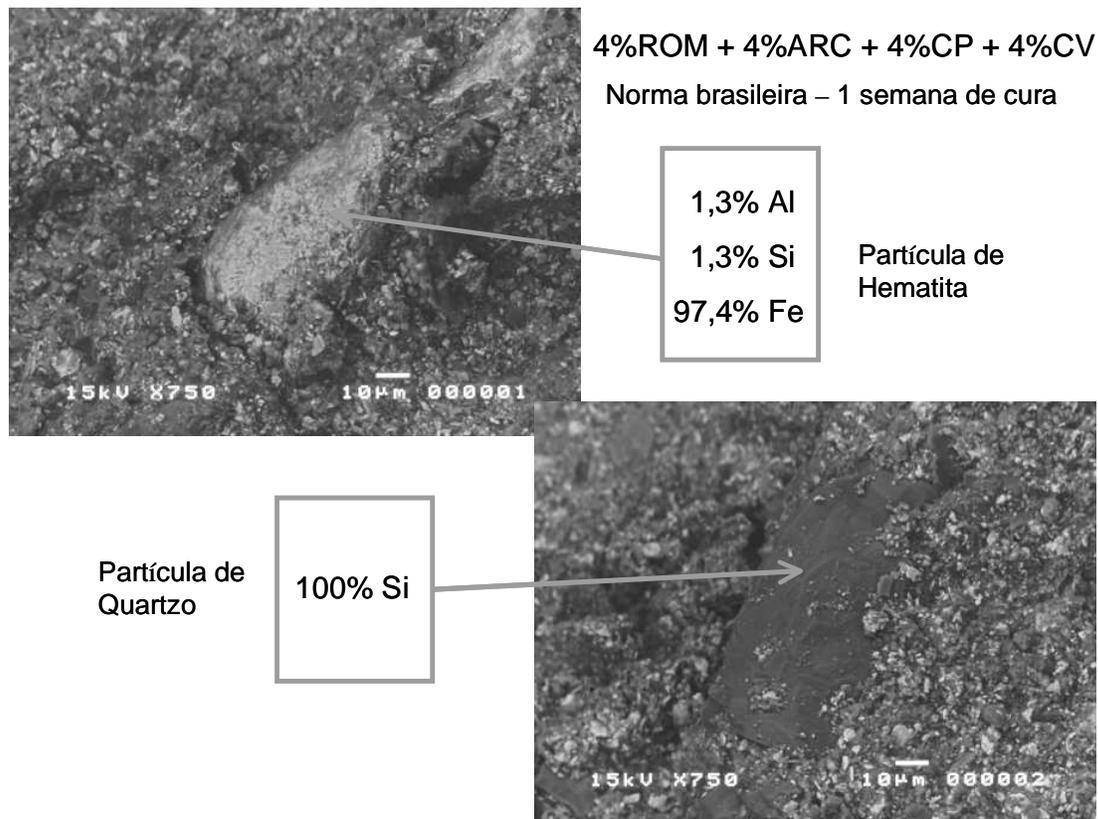


Figura 5.27: Imagens MEV obtidas via elétrons eletroespalhados; Superior: Partícula mais clara de hematita detetada num corpo de prova cimentado com os 4 ligantes; Inferior: partícula mais escura que contém principalmente quartzo.

Outra característica importante nas pastas minerais cimentadas corresponde a sua permeabilidade após o período de cura. Portanto, considerando as adições de ligantes que produziram as maiores resistências à compressão (4% de cada ligante; 4% CP + 4% ARC + 4% CV; 4% CP + 4% ARC + 4% CV e 4% CP) foram preparados corpos de prova para determinar a permeabilidade mediante o permeabilímetro de Karsten. Os resultados são apresentados na Tabela V.17, considerando 1 dia de cura em câmara úmida em todos os casos.

Analisando os valores do fluxo de água que atravessa os corpos de prova que foram apresentados na Tabela V.17, observa-se que o mais impermeável dos “pastefill” é aquele cimentado com 4% de cada ligante, enquanto que o mais permeável é aquele cimentado com 4% de CP.

Tabela V.17: Permeabilidade a água determinada no permeabilímetro de Karsten.

Adição de ligante (%)	Leitura N°	Tempo (min)	Volume de água (ml)	Fluxo de água $\times 10^4$ (ml/s)
4% de cada ligante	1	5	0,25	8,33
	2	10	0,45	7,5
	3	15	0,6	6,67
4%CP + 4%ARC + 4%CV	1	5	0,3	10
	2	10	0,5	8,33
	3	15	0,7	7,78
4%CP + 4%ROM + 4%CV	1	5	0,4	13,33
	2	10	0,7	11,67
	3	15	0,8	8,89
4%CP	1	5	0,45	15
	2	10	0,8	13,33
	3	15	0,9	10

6. CONCLUSÕES

As principais conclusões deste trabalho são as seguintes:

- a) as análises do sólido estudado indicam que o rejeito da mineração de ferro tem as seguintes características: granulometria fina, elevada ASE, principais espécies: hematita e quartzo;
 - b) os testes de abatimento (“slump”) e de calha (“flume”) mostraram ser ferramentas muito simples para caracterizar consistência e fluidez das pastas minerais mediante a determinação da % ABT e do ângulo de repouso;
- Quanto ao planejamento fatorial 2^2 pode-se concluir:
- c) o efeito da adição dos agregantes somente foi mais significativo nas respostas velocidade de sedimentação e % de abatimento no caso da pasta mineral de 75% de sólidos;
 - d) para o caso da polpa de 70% de sólidos não foram detectadas diferenças na resposta da % de abatimento já que em todas as condições estudadas foi de 90%;
 - e) a velocidade de sedimentação foi incrementada quase tres vezes ao adicionar 20g/t do coagulante e o comportamento reológico no ciclo rotacional 1-20-1 rpm foi mais tixotrópico, o que representa uma condição reológica mais favorável no caso da polpa de 70% de sólidos;
 - f) na pasta de 75% em sólidos esse incremento na velocidade de sedimentação quando adicionados 20g/t de coagulante foi de mais de 250%, e no caso da consistência medida através da %ABT, também a condição de agregação adicionando 20g/t de coagulante foi a melhor ao alcançar um 60% de “slump”, situação que também foi respaldada pelo comportamento mais tixotrópico na reologia da pasta;
 - g) os valores da interação entre os fatores estudados aparecem como mais relevantes ao considerar a resposta velocidade de sedimentação, já no caso da resposta % ABT mostrou menor importância se comparada com o efeito principal do fator dosagem de coagulante que foi o mais significativo;

h) dos modelos matemáticos obteve-se uma excelente correlação para a resposta % de abatimento na pasta de 75% de sólidos (99,15%), uma boa correlação para a resposta velocidade de sedimentação para a pasta de 75% de sólidos (83,61%) e de razoável a boa para o caso da resposta velocidade de sedimentação da polpa de 70% de sólidos (78,21%);

– Quanto ao planejamento fatorial 2^3 pode-se concluir:

i) a % de sólidos da mistura sólido-líquido mostrou efeitos positivos sobre a consistência e viscosidade aparente, o pH mostrou efeitos negativos sobre a consistência e viscosidade aparente e no caso do conteúdo de material fino mostrou um efeito positivo sobre a consistência e negativo sobre a viscosidade aparente;

j) a condição mais favorável para o transporte da mistura sólido líquido estaria representada pelo experimento 7 (70% de sólidos, pH equivalente a 9 e 80% de material fino), devido ao baixo valor da viscosidade aparente (281cP), seu comportamento totalmente tixotrópico no ciclo rotacional 1 – 20 – 1 rpm e seu elevado abatimento no teste de cone (90%);

k) quanto à disposição do rejeito, seria mais favorável a condição do experimento 6, dada a maior consistência da mistura sólido-líquido (somente 5% de abatimento);

l) para ambas as respostas estudadas (viscosidade aparente e %ABT) o efeito mais significativo foi aquele correspondente ao fator % de sólidos em massa (na faixa de estudo que foi 70 a 80%);

m) quanto aos modelos lineares tem-se que no caso da resposta % de abatimento obteve-se uma correlação boa de 85,16% e somente razoável para a viscosidade aparente de 61,07% (para 20 rpm de rotação da haste).

– Quanto ao planejamento fatorial 2^4 pode-se concluir:

n) a melhor combinação de ligantes resultou ser a adição de 4% de metacaulim preparado a partir do arcóseo, 4% de metacaulim preparado a partir do ROM, 4% de cinzas volantes e 4% de cimento portland, quanto à resposta resistência à

compressão (1599,577kPa), considerando as condições de cura em ambiente subaquático a 40°C dentro da estufa, segundo estabelece a procedimento sob pedido de patente da UFMG.

- o) a melhor combinação de ligantes resultou ser a adição de 4% de cinzas volantes, quanto à resposta resistência à compressão (5548,684kPa), considerando as condições de cura em ambiente seco a 40°C dentro da estufa, seguindo como referência o estabelecido pela procedimento sob pedido de patente da UFMG.
- p) ao aplicar a norma brasileira nas condições de maior resistência à compressão (obtida nos corpos de prova cimentados com 4% de cada um dos ligantes estudados), obteve-se um valor de 525kPa como resposta média dos ensaios.

Em relação ao efeito dos agregantes estudados, pode-se concluir que a adição de 20g/t do coagulante sulfato de alumínio representa a melhor condição de agregação para os sistemas de misturas sólido-líquido estudados.

Para o caso do efeito dos ligantes estudados pode-se concluir que a adição de 4% em massa de cada um dos ligantes estudados (CP, ROM, ARC e CV) representaria a melhor condição para obter a maior resistência à compressão, considerando a procedimento sob pedido de patente da UFMG de preparação de metacaulins.

A adição de 4% de cinzas volantes e a condição de cura a seco (40°C) também mostraram as mais altas resistências à compressão mas devem ser considerados aspectos econômicos e de disponibilidade deste insumo escasso no Brasil.

Finalmente, pode se concluir que essa nova alternativa de disposição de rejeitos que considera a formação de pasta mineral será incorporada nos novos projetos de mineração brasileira e latinoamericana e adaptada por alguns projetos em andamento devido às variadas vantagens e fortes pressões ambientais. Também devem ser considerados a utilização de ligantes que possam substituir o cimento portland, dado o alto custo de esse insumo, gerando materiais de adequada consolidação, e o uso de reagentes agregantes requeridos para melhorar as condições de manuseio e transporte dos “pastefill” como foi o caso de alguns daqueles considerados neste trabalho.

7. RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS

O sistema de disposição de rejeitos na forma de pasta mineral permite alcançar variadas vantagens frente ao sistema convencional requer o emprego de barragens de rejeitos. No contexto atual de América Latina, e do Brasil em particular, cada vez um maior número de usinas da mineração metálica vêm incorporando esse sistema de disposição mais adensado, o que tem demonstrado grande sucesso no mundo da mineração.

Foi também demonstrado neste estudo que os testes de abatimento (“slump”) e de calha (“flume”) são ferramentas muito simples de se utilizar e fornecem interessantes características dos sistemas de pasta mineral como a consistência e a fluidez.

As medidas da viscosidade aparente também são de muito interesse, junto aos comportamentos reológicos desses “pastefill”, por fornecerem importantes parâmetros para dimensionamento de equipamentos de separação sólido-líquido assim como de transporte.

Outro resultado de alta relevância é o melhor desempenho do coagulante sulfato de alumínio frente as respostas de consistência (%ABT) e sedimentação (velocidade de sedimentação) da pasta mineral de 75% de sólidos em massa. Também foi possível determinar uma equação linear que caracteriza a resposta de %ABT para a pasta mineral com uma correlação excelente (superior a 99%).

No planejamento fatorial 2^3 foram estudados os fatores % de sólidos, pH e % de material fino ($<37\mu\text{m}$) sobre as respostas reológica de viscosidade aparente e de consistência (%ABT). Da análise estatística foi determinado que o adensamento de sólidos da mistura sólido líquido foi o fator mais significativo sobre ambas respostas estudadas. Também o pH mostrou ser um significativo fator sobre as respostas estudadas.

Os resultados mais relevantes dos testes mecânicos de resistência à compressão daqueles “pastefill” que foram cimentados com 4 tipos diferentes de ligantes estudados foi alcançado com a adição de 16% de ligantes (4% de cada um) onde foram obtidas as maiores resistências à compressão, considerando condições de cura no ambiente subaquático (procedimento sob pedido de patente da UFMG). Verificou-se que tanto as condições do processo de cura quanto o tempo ou período de cura mostram importantes

efeitos na resistência do “pastefill” estudado. Assim por exemplo, quando foi considerado um processo de cura em ambiente seco a 40°C, obteve-se resultados muito promissores na resistência à compressão ao utilizar cinzas volantes como ligante.

De forma geral os resultados obtidos neste estudo mostram a possibilidade de se alcançar ângulos repouso dos “pastefill” mais elevados o que, em princípio, é bastante promissor no que se refere à disposição deste material. Os resultados indicam também que a ação dos agentes agregantes pode contribuir para a melhoria das características das pastas minerais.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A grande maioria dos objetivos planejados foram alcançados, mas alguns não puderam ser completados. Por exemplo, a determinação de medidas de tensão de escoamento (“yield stress”) devido a não contar com o equipamento necessário (reômetro) assim como a realização do ensaio triaxial dos corpos de prova cimentados com alguns dos ligantes estudados.

Outros aspectos que não foram abordados neste estudo, mas que sem dúvida são de altíssimo interesse no tema relativo às pastas minerais, são a temática relativa ao meio ambiente, gerenciamento do recurso aquoso, o gerenciamento dos rejeitos produzidos pela mineração, os projetos de equipamentos produtores de pasta e “pastefill”, recuperação das áreas onde os rejeitos foram dispostos, simulação dos processos de erosão e efeito do clima sobre os preenchimentos superficiais de rejeitos na forma de pasta.

Quanto ao uso de barragens de rejeitos que corresponde ao processo convencional de disposição dos rejeitos gerados pela mineração, que ainda é uma prática normal nas usinas sulamericanas, é interessante a caracterização dos rejeitos já dispostos na barragem (porosidade, densidade, características reológicas, etc.) assim como a alternativa de continuar seu enchimento com pasta mineral, aproveitando sua vida útil.

Outro trabalho que se visualiza como de grande interesse na temática da disposição de rejeitos de forma mais adensada é a mistura de rejeitos provenientes de diferentes correntes dos processos aplicados pela usina e pela mina (rocha estéril, rejeitos de processos de benefício como flotação ou separação magnética, lamas e ultrafinos gerados pelas operações de deslamagem, etc.), de modo de avaliar sua co-disposição.

Neste trabalho foi considerado um rejeito gerado pela mineração de ferro, mas a tecnologia de pasta mineral é aplicável a muitos outros tipos de mineração como são as de manganês, alumínio, zinco, ouro, cobre, etc., assim como também da mineração não metálica (carvão, diamante, fosfatos, dentre outros).

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Norma para Cimento Portland – Determinação da Finura pelo Método de Permeabilidade ao Ar (Método de Blaine) – NBR NM 76, Rio de Janeiro, 1998, p. 1-12.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Norma para Cimento Portland – Determinação da Resistência à Compressão, NBR 7215, Rio de Janeiro, 1998, p. 1-8.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Norma para Concreto – Determinação da Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone – NBR NM 67, Rio de Janeiro, 1998, p. 1-8.

ARAUJO, A. C., VALADÃO, G. E. S., GAMA, E. M., HERNÁNDEZ, C. A. Consistencia, Fluidez y Viscosidad de Pastas Minerales de Relaves de Hierro. *Información Tecnológica*. Vol. 17, Nº2, Abril de 2006. p. 71-79. Disponível on-line no website: www.scielo.cl, 2006.

ARAUJO, A. C., VALADÃO, G. E. S., HERNÁNDEZ, C. A. Novas Alternativas para Disposição dos Rejeitos: É Possível se Quebrar Alguns Paradigmas? In: XX ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS, 2004, Florianópolis – Santa Catarina, *Anais digitais*, Junho de 2004, p. 169-176.

ARAUJO, A. C., VALADÃO, G. E. S., HERNÁNDEZ, C. A. ¿Nueva Aplicación de los Relaves de Hierro? In: III CONGRESO INTERNACIONAL DE MINERIA, METALURGIA Y MATERIALES – CIM3, 2004, Iquique – Chile, *Anales digitalizados*, Agosto de 2004, p. 176-190.

ARAUJO, A. C. Conversa pessoal na Ufmg, Fevereiro 2004.

ARBUTHNOT, I. M., TRIGLAVCANIN, R. A. Designing for Paste Thickening – Testwork and Sizing for Paste Thickeners. In: VII INTERNATIONAL SEMINAR ON PASTE AND THICKENED TAILINGS, Santiago - Chile, *Apresentações digitais*. Santiago, Apr-2005.

BAKER & HUGHES. Apresentação Técnica: Deep Paste Thickener Systems for Tailings Disposal. In: III INTERNATIONAL SEMINAR OF HIGH DENSITY AND PASTE TAILINGS 2001, Pilanesburg – South Africa, *Apresentações digitais*. Pilanesburg, May-2001.

BEDELL, D., TUZUN, A., WIEBE, M., EASTICK, D. Non-Acid Generating Cover Material for Strathcona Tail Area. In: HIGH DENSITY & PASTE 2003 SEMINAR, May - 2003, Melbourne - Austrália, *Apresentações digitais*. Melbourne, May - 2003.

BENZAAZOUA, M., FALL, M., BELEM, T. A Contribution to Understanding the Hardening Process of Cemented Pastefill. *Minerals Engineering*, Quebec – Canada, Vol. 17, 2004, p. 141 - 152.

BENZAAZOUA, M., MARION, P., PICQUET, I., BUSSIÈRE, B. The Use of Pastefill as a Solidification and Stabilization Process for the Control of Acid Mine Drainage. *Minerals Engineering*, Quebec – Canada, Vol. 17, 2004, p. 233 - 243.

BOGER, D. V. I Workshop of Minerals Processing and Tailings Rheology. In: HIGH DENSITY & PASTE 2003 SEMINAR, May-2003, Melbourne - Austrália, *Apresentação digital*. Austrália, May-2003.

BOGER, D. V. Exploiting the Rheology of Mineral Tailings. In: HIGH DENSITY & PASTE 2003 SEMINAR, May - 2003, Melbourne - Austrália, *Apresentações digitais*. Melbourne, May - 2003.

BRACKEBUSCH, F. W. Aspectos Básicos de los Sistemas de Relleno en Pasta. In: PASTE TECHNOLOGY 2000 SEMINAR, April - 2000, Perth - Austrália, *Apresentações digitais*. Perth, April - 2000.

BRZEZINSKI, S. Surface Disposal of Thickened Tailings. In: PASTE TECHNOLOGY 2000 SEMINAR, April - 2000, Perth - Austrália, *Apresentações digitais*. Perth, April - 2000.

CHAMBERS, R. W., PLEWES, H. D., Evolving Tailings Technologies, In: HIGH DENSITY & PASTE 2002 SEMINAR, Santiago - Chile, *Apresentações digitais*. Santiago, Apr-2002.

CHINDAPRASIRT, P., JATURAPITAKKUL, Ch., SINSIRI, Th. Effect of Fly Ash Fineness on Compressive Strength and Pore Size of Blended Cement Paste. *Cement & Concrete Composites*, Thailandia, Vol. 27, 2005, p. 425 – 428.

CLAYTON, S., GRICE, T. G., BOGER, D. V. Analysis of the Slump Test for on-site Yield Stress Measurement of Mineral Suspensions. *International Journal of Mineral Processing*, Melbourne – Australia, No. 70, Jun-2003, p. 3-21.

COOKE, R. High Concentration Tailings Transportation System Optimisation. In: VII INTERNATIONAL SEMINAR ON PASTE AND THICKENED TAILINGS, Santiago - Chile, *Apresentações digitais*. Santiago, Apr-2005.

COXON, J., LI, T., SINGH, U., GRICE, T., SAINSBURY, D. Development and Application of Paste Fill Using Dry Tailings. In: HIGH DENSITY & PASTE 2003 SEMINAR, May - 2003, Melbourne - Austrália, *Apresentações digitais*. Melbourne, May - 2003.

DYMOND, B. Enhanced Tailings Management Solutions. In: HIGH DENSITY & PASTE 2003 SEMINAR, May - 2003, Melbourne - Austrália, *Apresentações digitais*. Melbourne, May - 2003.

FALL, M., BENZAAZOUA, M., OUELLET, S. Experimental Characterization of the Influence of Tailings Fineness and Density on the Quality of Cemented Paste Backfill. *Minerals Engineering*, Quebec – Canada, Vol. 18, 2005, p. 41 - 44.

FOURIE, A. Materials Characterics. In: HIGH DENSITY & PASTE 2002 SEMINAR, Apr-2002, Santiago - Chile, *Apresentações digitais*. Santiago, Apr-2002.

FOURIE, A. Materials Properties. In: HIGH DENSITY & PASTE 2003 SEMINAR, May - 2003, Melbourne - Austrália, *Apresentações digitais*. Melbourne, May - 2003.

GAMA, E. M., GOMES, A. M., GALÉRY, R., CARVALHO, A. N., EUSTÁQUIO, C. F., CALÁBRIA, J. Utilização de Estéreis de Mineração para a Fabricação de Meta Caulim. Relatório de pesquisa, projeto EDT14001/20 para a empresa Fapemig, Outubro de 2003, Brasil. p. 1-105.

GAMA, E. M., GALÉRY, R. Roteiro empresa CMM, Janeiro 2004.

GAMA, E. M. Conversa pessoal na Ufmg, Junho 2005.

GERMANI, D. J. A Mineração no Brasil, Relatório Final do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), Rio de Janeiro, p. 54, 2002.

GOMES, R. C., RIBEIRO, L. M. F., ALBUQUERQUE FILHO, L. H., REZENDE, C. H. Geotechnical Aspects of Eroded Sediments Relevant to Tailings Disposal Design. *ASCE Natural Hazards Review*, Vol. 4 (2), p. 65 – 70, 2003.

GL&V Austrália. Apresentação Técnica. In: HIGH DENSITY & PASTE 2003 SEMINAR, May - 2003, Melbourne - Austrália, *Apresentações digitais*. Melbourne, May - 2003.

GRUBER, K. A., RAMLOCHAN, T., BODDY, A., HOOTON, R. D., THOMAS, M. D. A. Increasing Concrete Durability with High-Reactivity Metakaolin. *Cement & Concrete Composites*, Thailandia, Vol. 23, 2001, p. 479 – 484.

HERNANDEZ, C. A. Caracterização de Pastas Mineraias, Dissertação de Mestrado do Cpgem, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil. Fevereiro de 2005.

HERNANDEZ, C. A. O., ARAUJO, A. C., VALADÃO, G. E. S., AMARANTE, S. C. Pasting Characteristics of Hematite/Quartz Systems. *Minerals Engineering*, Vol. 18, Jun-2005. p. 935-939. Disponível on-line no website: www.sciencedirect.com, 2005.

HUTCHESON, H. Thickening Fine Mineral Sands Tailings. In: PASTE TECHNOLOGY 2000 SEMINAR, April - 2000, Perth - Austrália, *Apresentações digitais*. Perth, April - 2000.

ILGNER, H. Advances in the Race between Paste and Other Minefill Types. In: VII INTERNATIONAL SEMINAR ON PASTE AND THICKENED TAILINGS, Santiago - Chile, *Apresentações digitais*. Santiago, Apr-2005.

JEWELL, R. Paste & Thickened Tailings (P&TT) in the Australian Mining Industry. In: HIGH DENSITY & PASTE 2002 SEMINAR, Apr-2002, Santiago - Chile, *Apresentações digitais*. Santiago, Apr-2002.

JEWELL, R. An Introduction to Thickened Tailings Applications. In: HIGH DENSITY & PASTE 2003 SEMINAR, May - 2003, Melbourne - Austrália, *Apresentações digitais*. Melbourne, May - 2003.

JOHNSON, J. M., VIALPANDO, J., LEE, C. Paste Tailings Management Alternative – Study Results for Molycorp’s Lanthanide Group Operations in Mountain Pass, California. *Mining Engineering*, USA, February 2005, p. 51 - 56.

JUNG, S. J., BISWAS, K. Review of Current High Density Paste Fill and its Technology. *Mineral Resources Engineering*, Idaho – USA, Vol. 11, No. 2, Jun 2002, p. 165-182.

KWAK, M., JAMES, D. F., KLEIN, K. A. Flow Behavior of Tailings Paste for Surface Disposal. *International Journal of Mineral Processing*, Toronto – Canadá, disponível on-line no website: www.sciencedirect.com, p. 1-15, 2005.

LANDRIAULT, D. The Surface Disposal of Industrial Waste: Slurry Placement v/s High Density Slurry Placement v/s Placement as a Paste. In: HIGH DENSITY & PASTE 2002 SEMINAR, Apr-2002, Santiago - Chile, *Apresentações digitais*. Santiago, Apr-2002.

LORD, T. Canadian Exemples of the Application of Paste and Thickened Tailings for Surface Disposal. In: HIGH DENSITY & PASTE 2003 SEMINAR, May - 2003, Melbourne - Austrália, *Apresentações digitais*. Melbourne, May - 2003.

LUKE, D., RANKINE, R. Spatial Variation in a Paste-Rock Filled Stope. In: HIGH DENSITY & PASTE 2003 SEMINAR, May - 2003, Melbourne - Austrália, *Apresentações digitais*. Melbourne, May - 2003.

MARTINSON, R., COOKE, R., STIPO, N. Cabildo Mine Backfill System. In: VII INTERNATIONAL SEMINAR ON PASTE AND THICKENED TAILINGS, Santiago - Chile, *Apresentações digitais*. Santiago, Apr-2005.

MPOFU, P., MENSAH, J. A., RALSTON, J. Flocculation and Dewatering Behaviour of Smectite Dispersions: Effect of Polymer Structure Type. *Minerals Engineering*, Adelaide - Austrália, Vol. 17, 2004, p. 411-423.

MULAR, A. L., ROBERTS R. B. (1966) A Simplified Method to Determine Isoelectric Points of Oxides. *Transactions of the Canadian Institute of Mining and Metallurgy* (1966), Canada, pp. 438 - 439.

NEWMAN, P., WHITE, R., CADDEN, A. Paste – The Future of Tailings Disposal?. In: III INTERNATIONAL SEMINAR OF HIGH DENSITY AND PASTE TAILINGS 2001, Pilanesburg – South Africa, *Apresentações digitais*. Pilanesburg, May-2001.

OZKAN, A., YEKELER, M. Coagulation and Flocculation Characteristics of Celestite with Different Inorganic Salts and Polymers. *Chemical Engineering and Processing*, Turquia, Vol. 43, 2004, p. 873-879.

PALMA, R. Chile Será Sede de Seminario de Pastas y Relaves Espesados, *Revista Minería Chilena*, N°281, Nov.-2004, Santiago - Chile, p. 75.

PATERSON, A. The Hydraulic Design of Paste Transport Systems. In: HIGH DENSITY & PASTE 2003 SEMINAR, May - 2003, Melbourne - Austrália, *Apresentações digitais*. Melbourne, May - 2003.

ROBINSKY, E. Site Planning for Thickened Tailings Disposal (TTD). In: HIGH DENSITY & PASTE 2002 SEMINAR, Apr-2002, Santiago - Chile, *Apresentações digitais*. Santiago, Apr-2002.

SABIR, B. B., WILD, S., BAI, J. Metakaolin and Calcined Clays as Pozzolans for Concrete: A Review. *Cement & Concrete Composites*, Wales – UK, Vol. 23, No. 6, p. 441-454, Dez - 2001.

SCALES, P. The Thickening Process (Compression). In: HIGH DENSITY & PASTE 2003 SEMINAR, May - 2003, Melbourne - Austrália, *Apresentações digitais*. Melbourne, May - 2003.

SCHEURENBERGE, R., OLIVEROS, U. S., LUNA, S., FOURIE, A. Pilot Testing for Disposal of Highly Thickened Tailings at Southern Peru Copper Corporation. VI INTERNATIONAL SEMINAR OF PASTE AND THICKENED TAILINGS 2004, Pilanesburg – South Africa, *Apresentações digitais*. Pilanesburg, May-2004.

SELLGREN, A., ADDIE, G., WITHLOCK, L. Technical-Economical Feasibility of Using Centrifugal Pumps in High-Density Thickened Tailings Slurry Systems. In: VII INTERNATIONAL SEMINAR ON PASTE AND THICKENED TAILINGS, Santiago - Chile, *Apresentações digitais*. Santiago, Apr-2005.

SHOU, G. Paste Pump-ability Evaluation. In: HIGH DENSITY & PASTE 2002 SEMINAR, Santiago - Chile, *Apresentações digitais*. Santiago, Apr-2002.

SLOTTEE, S. Recent Developments in Paste Thickeners (The Deep Bed Paste Thikener). In: HIGH DENSITY & PASTE 2003 SEMINAR, May - 2003, Melbourne - Austrália, *Apresentações digitais*. Melbourne, May - 2003.

SMART, R. C., ZBIK, M., MORRIS, G. E. The Controlling Role of Aggregate Structure (Initial and Flocculated) in Dewatering Rates and Solids Density. In: HIGH DENSITY & PASTE 2003 SEMINAR, May - 2003, Melbourne - Austrália, *Apresentações digitais*. Melbourne, May - 2003.

SOFRÁ, F., BOGER, D. V. Environmental Rheology for Waste Minimisation in the Minerals Industry. *Chemical Engineering Journal*, Melbourne – Austrália, No.86, p. 319-330, 2002.

THERON, M., ADDIS, P. C., WATES, J. A., MARTIN, V. Bulyanhulu Mine (Tanzania) Paste Tailings Facility: Relating the Unsaturated Properties of Gold Tailings to Rate of Rice. In: VII INTERNATIONAL SEMINAR ON PASTE AND THICKENED TAILINGS, Santiago - Chile, *Apresentações digitais*. Santiago, Apr-2005.

VIETTI, A., DUNN, F. The Thirsty Business of Diamond Mining. In: HIGH DENSITY & PASTE 2002 SEMINAR, Santiago - Chile, *Apresentações digitais*. Santiago, Apr-2002.

WANG, C., TANNANT, D. D., PADRUTT, A., MILLETTE, D. Influence of Admixtures on Cemented Backfill Strength. *Mineral Resources Engineering*, Hong Kong – China, Vol. 11, No. 3, Setember-2002, p. 261-270.

WILLIAMSON, R., OLIVEROS, U. S., PATERSON, A. Paste Tailings Disposal on a Major Scale at Southern Peru Copper Corporation – A Case Study. In: VI INTERNATIONAL SEMINAR OF PASTE AND THICKENED TAILINGS 2004, Pilanesburg – South Africa, *Apresentações digitais*. Pilanesburg, May-2004.

ZHOU, Z., SOLOMON, M. J., SCALES, P. J., BOGER, D. V. The Yield Stress of Concentrated Flocculated Suspensions of Size Distributed Particles. *Journal of Rheology*, Melbourne – Australia, Vol. 43 , No. 3 , p. 651-671, May/Jun 1999.

ANEXOS

ANEXO I: Espectros de Infravermelho (amostra de rejeito de Urucum e camada superficial depositada em alguns corpos de prova)

ANEXO II: Espectros e fichas da base de dados da DRX (amostra de rejeito de Urucum e camada superficial depositada em alguns corpos de prova)

ANEXO III: Planilhas de resultado dos testes de sedimentação das polpas e pastas minerais

ANEXO IV: Planilhas de resultado dos testes de viscosidade das polpas e pastas minerais

ANEXO V: Planilhas de resultado dos ensaios mecânicos de compressão simples

ANEXO VI: Principais publicações do grupo de Separação Sólido-Líquido do DEMIN-UFMG relacionadas com o tema de estudo:

- Efecto de Ligantes en la Consistència de una Pasta Mineral, trabalho apresentado e publicado nos anais das VIII Jornadas Argentinas de Tratamiento de Minerales –Jatrami, San Juan, Argentina, Outubro de 2006, p. 443-453.
- Tecnologia de Pasta Mineral Aplicada à Barragens de Rejeitos e Preenchimento de Minas Subterrâneas, trabalho apresentado e publicado nos

anais digitais do congresso IBRAM 2006, Belo Horizonte, Brasil, Setembro de 2006.

- Pasting Characteristics of Hematite/Quartz Systems, artigo publicado na revista Minerals Engineering, Vol. 18, Junho de 2005, p. 935-939 (disponível on-line: www.sciencedirect.com)
- Consistencia, Fluidéz y Viscosidad de Pastas Minerales de Relaves de Hierro, artigo publicado na revista Información Tecnológica, Vol. 17, Nº2, Abril de 2006, p. 71-79 (disponível on-line: www.scielo.cl)
- Effect of Aggregants on Mineral Pastes and High Density Slurries, trabalho já aceito para ser apresentado no Seminário Internacional Paste 2007 que será realizado na Austrália em Março de 2007.