

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA
E DE MINAS

Christian Anthony Hernández Osorio

"CARACTERIZAÇÃO DE PASTAS MINERAIS"

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia
Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais

Área de Concentração: Tecnologia Mineral

Orientador: Prof. George Eduardo Sales Valadão

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2005

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	01
.....	01
1.1. Definição de Alguns Conceitos Básicos	01
.....	01
1.2. Aspectos Ambientais da Disposição de Rejeitos	04
.....	04
2. OBJETIVOS	07
.....	07
2.1. Objetivo Geral	07
.....	07
2.1. Objetivos Específicos	07
.....	07
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	08
.....	08
3.1. Reologia de Suspensões Minerais	08
.....	08
3.2. Tecnologia da Preparação das Pastas de Rejeitos	11
.....	11
3.3. Fatores Relevantes para Preparação de uma Pasta	12
.....	12
3.3.1. Distribuição Granulométrica dos Rejeitos	12
.....	12
3.3.2. Efeito dos Aditivos Químicos	13
.....	13
3.4. Aplicações Industriais do Preenchimento com Pasta	15
.....	15
3.5. Testes Aplicados às Pastas Minerais	18
.....	18
3.5.1. Teste de "Slump"	18
.....	18

3.5.2. Medições da Viscosidade e Tensão de Escoamento	22
3.5.3. Teste de Calha (“Flume”)	27
3.5.4. Resistência à Compressão da Pasta	33
3.5.5. Ensaio Compressão - Deformação	38
3.5.6. Permeabilidade do "Pastefill"	39
3.6. Outras Características das Pastas Minerais	42
3.6.1. Efeito das Vibrações Mecânicas	42
3.7. Aspectos Econômicos	44
4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	45
4.1. Amostras Minerais	45
4.2. Caracterização do Sólido	45
4.2.1. Composição Química e Mineralógica do Sólido	46
4.2.2. Distribuição Granulométrica do Sólido	46
4.2.3. Massa Específica e Área Superficial Específica	47
4.3. Caracterização das Pastas Minerais	50
4.3.1. Medição da Viscosidade	50

4.3.2. Teste de Calha (“Flume”)	51
4.3.3. Teste de “Slump”	51
4.3.4. Ensaio Mecânico	52
4.3.5. Testes de Permeabilidade de Água	53
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
5.1. Caracterização das Amostras Sólidas	56
5.1.1. Densidade de Amostras Sólidas	56
5.1.2. Distribuição Granulométrica das Amostras Sólidas	56
5.1.3. Composição Química das Amostras Sólidas	61
5.1.4. Composição Mineralógica das Amostras Sólidas	62
5.1.5. Área Superficial Específica das Amostras Sólidas	70
5.1.6. Microeletroforese das Amostras Sólidas	71
5.2. Caracterização das Pastas Minerais	73
5.2.1. Viscosidade das Pastas Minerais	73
5.2.1.1. Pastas Minerais das Amostras Originais	74
5.2.1.2. Pastas Minerais das Misturas	82

5.2.2. Teste de “Slump”	97
5.2.3. Teste de Calha (“Flume”)	103
5.2.4. Ensaio Mecânico	110
5.2.5. Testes de Permeabilidade à Água	121
6. CONCLUSÕES	122
7. RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS	126
8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	127
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	128
ANEXOS	133

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Aspecto de uma pasta mineral utilizada na indústria mineira da Austrália	02
Figura 1.2: Definição teórica dos conceitos básicos tais como: polpa, polpa de alta densidade, pasta e torta	03
Figura 1.3: Ângulos de disposição para polpas de alta densidade e para pasta, em vários tipos de terreno	04
Figura 3.1: Aplicação da força F ao plano de área A e distância x ao plano paralelo que provoca seu deslocamento a velocidade v	08
Figura 3.2: Curvas de fluxo para suspensões concentradas: (a) relação entre tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento; (b) relação entre viscosidade e taxa de cisalhamento	09
Figura 3.3: Comportamento da viscosidade independente do tempo	10
Figura 3.4: Comportamento tixotrópico da viscosidade (dependente do tempo)	10
Figura 3.5: Espessador de alta densidade de cone profundo	11
Figura 3.6: Distribuição granulométrica de rejeito, cimento e mistura	12
Figura 3.7: Representação esquemática do teste de abatimento de cone ou "slump"	19
Figura 3.8: Gráfico da altura "slump" em função do conteúdo de água da pasta	21
Figura 3.9: Gráfico da tensão de escoamento em função da concentração de sólidos para uma ampla variedade de rejeitos minerais	22

Figura 3.10: Gráfico da viscosidade de equilíbrio em função da taxa de cisalhamento para várias pastas de rejeitos de bauxita	23
Figura 3.11: Resultados dos testes de "slump" em cone e cilindro junto com os modelos teóricos em termos adimensionais da altura de "slump" e da tensão de escoamento	24
Figura 3.12: Esquema do teste de "slump", mostrando as distribuições das tensões inicial e final	24
Figura 3.13: Gráfico da altura "slump" adimensional em função do valor adimensional da tensão de escoamento	25
Figura 3.14: Gráfico da tensão de escoamento das suspensões de alumina em função da fração volumétrica de sólidos ϕ , para o pH de $8,9 \pm 0,2$	26
Figura 3.15: Gráfico da tensão de escoamento em função do adensamento da pasta (% de sólidos em massa)	27
Figura 3.16: Teste de "flume" para uma pasta com "slump" de 71,12mm (2,8")	28
Figura 3.17: Plano inclinado e diagrama esquemático do fluido estacionário na calha	28
Figura 3.18: Consistência da mistura para disposição, seus correspondentes equipamentos de desagamento e bombeamento, ângulos de repouso e incremento de volume depositado	29
Figuras 3.19 a) e b): Disposições típicas para o sistema "pastefill"	31
Figura 3.20: Ângulo de repouso (% de "slope") em função da % de sólidos em massa, obtidos com uma pasta de rejeito de ouro na Venezuela	31
Figura 3.21: Ângulo de repouso (% de "slope") v/s % de sólidos em massa, obtidos no laboratório; observa-se também a estratificação do material	32

Figura 3.22: Gráfico de ângulo de repouso em função da % de sólidos em massa, para diferentes adições de cal	33
Figura 3.23: Resistência compressiva relativa da pasta de concreto em função do tempo de cura, com adições de 5, 10 e 15% de meta caulim (MK)	36
Figura 3.24: Efeito da adição de MK sobre a distribuição de poros de morteiros, considerando 100 dias de tempo de cura	36
Figura 3.25: Resistência compressiva de solo argiloso em função do tempo de cura, com adições de 6% PLB e com 4% de PC	37
Figura 3.26: Gráfico da resistência à compressão para diferentes tempos de cura, sob o efeito da adição e redução de material fino	37
Figura 3.27: Curvas experimentais tensão compressiva – deformação para diferentes adições de cimentos (2 – 16% em massa) e 7 dias de cura	38
Figura 3.28: Gráfico da permeabilidade mínima K_{min} (em escala logarítmica) em função do produto da porosidade pelo tamanho d_{10} em mm	40
Figura 3.29: Gráfico da idade do concreto em função do fluxo de água passante (permeabilidade) para: a) concreto bombeado, b) concreto comum	42
Figura 3.30: Gráfico da resistência à compressão do concreto bombeado em função do fluxo de água passante (permeabilidade)	42
Figura 3.31: Viscosidade aparente η_w em função do fator Af^2/D^3	43
Figura 4.1: Cyclosizer Warman de laboratório	47
Figura 4.2: Picnômetros de laboratório	47

Figura 4.3: Aparelho de Blaine para determinação da ASE	48
Figura 4.4: Unidade Tristar Nitrogen Adsorption	49
Figura 4.5: Viscosímetro Brookfield, modelo DV-III	50
Figura 4.6: Fotografias da calha construída em acrílico. Vista: a) isométrica; b) superior	51
Figura 4.7: Testes preliminares de cilindro slump com pasta de 72,5% de sólidos	52
Figura 4.8: Máquina Instron utilizada nos ensaios mecânicos	53
Figura 4.9: Aparelho de Germann para determinação do fluxo de água que passa através da pasta cimentada (GWT)	53
Figura 4.10: Fotografias mostrando: a) corpo de prova; b) forma de moldagem	54
Figura 4.11: Fotografias: a) do corpo de prova; b) tubo graduado colado no corpo de prova, necessário para as medições da permeabilidade de água	55
Figura 5.1: Distribuições granulométricas das amostras sólidas obtidas mediante granulômetro Sympatec	57
Figura 5.2: Distribuições granulométricas da amostra II, obtidas por classificação centrífuga (Cyclosizer), granulômetro Sympatec e peneiramento	60
Figura 5.3: Distribuições granulométricas da amostra III, obtidas por classificação centrífuga, Sympatec e peneiramento	60
Figura 5.4: Microfotografias MEV da amostra I: a) e ⁻ secundários, 3500X; b) e ⁻ secundários, 2000X; c) e ⁻ retroespalhados, 1000X; d) seção polida, e ⁻ retroespalhados, 750X	63

Figura 5.5: Microfotografias MEV da amostra II: a) e^- secundários, 2000X; b) e^- secundários, 3500X; c) e^- retroespalhados, 1000X; d) seção polida, e^- retroespalhados, 750X	64
Figura 5.6: Microfotografias MEV da amostra III: a) e^- secundários, 750X; b) e^- secundários, 500X; c) e^- retroespalhados, 1000X; d) seção polida, e^- retroespalhados, 500X	65
Figura 5.7: Difratoograma de raios X da amostra I	66
Figura 5.8: Espectro de infravermelho da amostra I	67
Figura 5.9: Difratoograma de raios X da amostra II	67
Figura 5.10: Espectro de infravermelho da amostra II	68
Figura 5.11: Difratoograma de raios X da amostra III	69
Figura 5.12: Espectro de infravermelho da amostra III	69
Figura 5.13: Valores do índice de Blaine para as amostras estudadas	71
Figura 5.14: Curvas de potencial zeta para as suspensões das amostras II e III	73
Figura 5.15: Gráfico da viscosidade em função da velocidade de rotação da haste para pastas preparadas com a amostra I no ciclo 2-100-2 rpm	75
Figura 5.16: Gráfico da viscosidade em função da velocidade de rotação da haste para algumas das pastas da amostra I no ciclo 1-21-1 rpm	75
Figura 5.17: Gráfico da viscosidade em função da velocidade de rotação da haste para algumas das pastas da amostra II	76

Figura 5.18: Comportamentos reológicos extremos dos “pastefill” da amostra II	77
Figura 5.19: Efeito do tempo sobre as medições da viscosidade em uma pasta de 64% de sólidos da amostra II	78
Figura 5.20: Efeito do tempo sobre as medições da viscosidade nas pastas da amostra II	78
Figura 5.21: Gráfico da viscosidade em função da velocidade de rotação da haste para algumas das pastas da amostra III	79
Figura 5.22: Efeito da velocidade de rotação da haste sobre as medições da viscosidade nas pastas da amostra III	80
Figura 5.23: Efeito do tempo sobre as medições da viscosidade nas pastas da amostra III, considerando adensamentos diferentes e para valores da velocidade de rotação da haste de: a) 20 rpm; b) 120 rpm; c) 250 rpm.	81
Figura 5.24: Efeito da velocidade de rotação da haste sobre as medições da viscosidade em uma pasta de 82% em sólidos da amostra III	82
Figura 5.25: Gráfico da viscosidade em função da velocidade de rotação da haste para algumas das pastas da amostra IV, para o ciclo 1-180-1 rpm.	83
Figura 5.26: Gráfico da viscosidade em função da velocidade de rotação da haste para algumas das pastas da amostra IV, para um ciclo 1-20-1 rpm.	84
Figura 5.27: Efeito da velocidade de rotação da haste e tempo da medição sobre o valor da viscosidade para diferentes pastas preparadas com a amostra IV	85
Figura 5.28: Gráfico da viscosidade em função da velocidade de rotação da haste para algumas das pastas da amostra V, para um ciclo 1-180-1 rpm.	86

Figura 5.29: Gráfico da viscosidade em função da velocidade de rotação da haste para algumas das pastas da amostra V, considerando um ciclo 1-20-1 rpm.	87
Figura 5.30: Efeito da velocidade de rotação da haste e tempo da medição sobre o valor da viscosidade para diferentes pastas preparadas com a amostra V	88
Figura 5.31: Gráfico da viscosidade em função da velocidade de rotação da haste para algumas das pastas da amostra VI, para um ciclo 1-180-1 rpm.	89
Figura 5.32: Gráfico da viscosidade em função da velocidade de rotação da haste para algumas das pastas da amostra VI, para um ciclo 1-20-1 rpm.	90
Figura 5.33: Efeito da velocidade de rotação da haste e tempo da medição sobre o valor da viscosidade para diferentes pastas preparadas com a amostra VI	91
Figura 5.34: Comportamentos reológicos no ciclo 1-180-1 rpm para pastas menos adensadas das diferentes amostras estudadas	92
Figura 5.35: Comportamentos reológicos no ciclo 1-20-1 rpm para pastas menos adensadas das diferentes amostras estudadas	93
Figura 5.36: Comportamentos reológicos no ciclo 1-180-1 rpm para pastas mais adensadas das diferentes amostras estudadas	94
Figura 5.37: Efeito do tempo sobre os valores da viscosidade para: a) pastas menos adensadas; b) pastas mais adensadas	95
Figura 5.38: Gráfico de altura “slump” em função do adensamento da pasta considerando amostras originais e misturas.	98
Figura 5.39: Fotografias de teste de cilindro “slump” para pastas da amostra I	99

Figura 5.40: Gráfico % de abatimento da altura “slump” em função do adensamento de pasta, considerando cone e cilindro	101
Figura 5.41: Fotografias dos testes de “slump” realizados com pastas da amostra V, utilizando geometrias cônica e cilíndrica	102
Figura 5.42: Gráfico do ângulo de repouso em função da inclinação da base, para “pastefill” da amostra I, na faixa de 70 a 76% em sólidos	104
Figura 5.43: Gráfico do ângulo de repouso em função do adensamento da pasta	106
Figura 5.44: Fotografias de testes de “flume” de pastas da amostra I	107
Figura 5.45: Fotografias de testes de “slump” e “flume” de pastas da amostra III	109
Figura 5.46: Gráfico tensão instantânea em função do tempo para amostra I	112
Figura 5.47: Comportamento mecânico de corpos de prova de cimento puro	113
Figura 5.48: Gráfico da tensão de ruptura em função dos “pastefill” estudados	115
Figura 5.49: Fotografias de corpos de prova da amostra II cimentado com 4% CP e 7 dias de cura, a) antes do rompimento, c) após ruptura	116
Figura 5.50: Fotografias de corpos de prova da amostra V cimentado com 4% CP e 7 dias de cura, a) antes do rompimento, c) após ruptura	116
Figura 5.51: Fotografias de corpos de prova da amostra III cimentado com 4% CP e 7 dias de cura, a) antes do rompimento, c) após ruptura	117
Figura 5.52: Fotografias de corpos de prova da amostra III cimentado com 4% (MK+CaO) e 7 dias de cura, a) e b) antes de rompimento, c) após ruptura	117

Figura 5.53: Fotografias de imagens MEV com elétrons retroespalhados de diferentes corpos de prova fraturados: a) cimento puro, 2000X; b) amostra I + 4% CP, 2000X; c) amostra III + 4%CP, 2000X; d) amostra III + 4% (MK + CaO), 1000X

.....119

LISTA DE TABELAS

Tabela I.1: Incidentes e impactos ambientais relacionados com mineração no ano 2000	06
Tabela III.1: Resistência a tração (R_T) e módulo de elasticidade (E_T) para 90 e 180 dias de cura	14
Tabela III.2: Propriedades da cinza volante	15
Tabela III.3: Aplicações industriais do preenchimento com "pastefill"	18
Tabela III.4: Dimensões e material de construção de três cilindros para teste de "slump" de laboratório, utilizados nos experimentos de Clayton, Grice e Boger	20
Tabela III.5: Propriedades físicas das amostras da Mutuca – MBR	22
Tabela III.6: Área superficial e tamanhos volumétricos médios das partículas de alumina utilizadas para a formação das suspensões: d_n , d_s , d_v , d_{90} , d_{50} , d_{10} , d_v/d_n	26
Tabela III.7: Valores de altura "slump" e ângulo de repouso para pastas com diferentes conteúdos de sólidos	30
Tabela III.8: Resistência uniaxial compressiva para a pasta de preenchimento, após 7 e 28 dias de cura	34
Tabela III.9: Resistência compressiva não confinada (UCS) do "pastefill" em MPa	35
Tabela III.10: Módulo de elasticidade para diferentes pastas cimentadas, considerando 7 e 28 dias de cura	39
Tabela III.11: Valores de permeabilidade relativa de preenchimentos hidráulicos cimentados	41

Tabela III.12: Classificação standard de concretos segundo o teste de permeabilidade (usando equipamento GWS) e de acordo ao fluxo de água passante	41
Tabela III.11: Porcentagens típicas dos custos operacionais do sistema "backfill"	44
Tabela IV.1: Técnicas e equipamentos requeridos para determinação de características e propriedades do componente sólido das pastas	45
Tabela IV.2: Técnicas e equipamentos requeridos para determinação de características e propriedades das pastas de rejeitos	50
Tabela V.1: Densidades obtidas através de picnometria simples e a gás expressas em (g/cm ³)	56
Tabela V.2: Tamanhos d ₁₀ , d ₅₀ e d ₉₀ das amostras sólidas estudadas	57
Tabela V.3 - a: Distribuições granulométricas obtidas mediante granulômetro Sympatec	58
Tabela V.3 - b: Distribuições granulométricas obtidas mediante classificação centrífuga	59
Tabela V.3 - c: Distribuições granulométricas obtidas através do peneiramento	59
Tabela V.4: Análise química quantitativa das amostras I, II e III	62
Tabela V.5: Tempos de passagem de ar e valores de ASE segundo Blaine	70
Tabela V.6 - a: Condições experimentais e valores de potencial zeta obtidos nas suspensões da amostra II	72
Tabela V.6 - b: Condições experimentais e valores de potencial zeta obtidos nas suspensões da amostra III	72
Tabela V.7: Condições dos testes reológicos aplicados nas amostras originais	74

Tabela V.8: Condições experimentais e características das amostras chamadas misturas	82
Tabela V.9: Alturas de “slump” obtidas usando geometria cilíndrica	97
Tabela V.10: Adensamento necessário para abatimento de 50% da altura “slump”	99
Tabela V.11: Altura e % de abatimento (% ABT) do “slump” usando geometria cônica	100
Tabela V.12: Ângulos de repouso em função do adensamento do “pastefill” da amostra I	103
Tabela V.13: Ângulos de repouso em função do adensamento da pasta	105
Tabela V.14: Valores de altura “slump” e ângulo de repouso para amostras originais	108
Tabela V.15: Condições experimentais e características dos corpos de prova	110
Tabela V.16: Resultados dos ensaios mecânicos de compressão simples	111
Tabela V.17 - a): Valores das resistências e tensões de ruptura alcançadas pelos corpos de prova das amostras II, III e V, para tempo de cura de 7 dias	114
Tabela V.17 - b): 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	114
Tabela V.18: Porosidade e densidade de alguns dos corpos de prova ensaiados	118
Tabela V.19 – a): Dados experimentais e calculados dos testes de permeabilidade ao água para “pastefill” da amostra II	121
Tabela V.19 – b): Dados experimentais e calculados dos testes de permeabilidade ao água para “pastefill” da amostra V	121

LISTA DE NOTAÇÕES

A	Área transversal
ASE	Área superficial específica
A_w^2	Aceleração cíclica
b	% em massa do cimento na matriz do “pastefill”
B	Área do micrômetro no teste de permeabilidade a água
BET	Isoterma do tipo BET
C	Gradiente do campo elétrico aplicado na microeletroforese
CAF	Sistema de preenchimento com agregado cimentado
C_{cp}	Coefficiente de permeabilidade do concreto ou do “pastefill”
CHF	Sistema de preenchimento hidráulico cimentado
CP	Cimento portland
CPF	Sistema de preenchimento com pasta cimentada ou “pastefill”
CSN	Companhia Siderúrgica Nacional
D_{80}	Diâmetro médio de 80% do material passante pela malha de corte
d_n	Diâmetro nominal da partícula
d_s	Diâmetro médio considerando superfície da partícula
d_v	Diâmetro médio considerando volume da partícula
d_{10}	Diâmetro superficial médio de partícula para 10% passante
d_{50}	Diâmetro superficial médio de partícula para 10% passante
d_{90}	Diâmetro superficial médio de partícula para 10% passante
dZ	Diferencial de altura Z no teste de cone “slump”
Deep Cone	Espessador de cone profundo
DEMIN	Departamento de Engenharia de Minas
DRX	Difração de raios X
EAA	Espectrofotometria de absorção atômica
EIV	Espectroscopia infravermelha
EUA	Estados Unidos de América
EE-UFMG	Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais
F	Força aplicada
F_p	Fração de sólidos em massa
F_v	Fração de sólidos em volume
FRX	Fluorescência de raios X

g	Aceleração da gravidade
g ₁	Leitura número 1 em mm feita no micrômetro
g ₂	Leitura número 2 em mm feita no micrômetro
GWT	Aparelho de Germann para medição da permeabilidade
H	Altura do cone deformado
h _p	Altura não deformada
h ₀	Altura de “slump” não deformada
h ₁	Altura de “slump” deformada
H	Altura total do cone ou cilindro de “slump”
H _S	Altura de “slump”
H ₁	Altura terminal da pasta no final da calha no teste de “flume”
H ₂	Altura terminal da pasta no início da calha no teste de “flume”
I	Intensidade da corrente elétrica
IV	Infravermelho
JPCDS-ICDD	Base de dados para difração de raios X (do International Centre for Diffraction Data)
K	Constante do aparelho de Blaine
K _{min}	Permeabilidade mínima
L	Comprimento da pasta no teste de “flume”
L'	Comprimento do corpo de prova onde é aplicada a pressão ΔP
M	Mobilidade eletroforética
MBR	Minerações Brasileiras Reunidas
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MK	Meta caulim
MO	Microscopia ótica
n	Número inteiro da equação de Bragg
P ₈₀	Tamanho do produto com 80% passante pela malha de corte
PC	Cimento portland
PIE	Ponto isoelétrico
PLB	Mistura de 70% pozolana com 30% de cal
PG	Picnometria a gás
PS	Picnometria simples
PZ	Potencial zeta
r	Direção radial

rpm	Rotações por minuto
s	Altura de “slump”
s/H	Razão de abatimento “slump”
SM	Separação magnética
s'	Altura de “slump” adimensional
t	Tempo em (s) no teste de permeabilidade a ar (Blaine) e a água
T_M	Tempo médio
TTD	Disposição de rejeitos adensados
UCS	Resistência compressiva não confinada
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
v	Velocidade
V	Voltagem
V_M	Velocidade média
X	Aumento ou magnificação da imagem
x	Distância no plano x
WDS	Espectrômetro dispersivo de raios X
Z	Número atômico
ϵ	Porosidade
ϵ_{min}	Porosidade mínima do leito
ϕ	Fração volumétrica de sólidos
γ	Taxa de cisalhamento
η	Viscosidade
η_N	Viscosidade newtoniana
η_w	Viscosidade aparente
λ	Comprimento de onda
θ	Ângulo de difração
θ_R	Ângulo de repouso
ρ	Massa específica ou densidade do material
τ	Tensão de cisalhamento
τ_y	Tensão de escoamento pelo cisalhamento
τ'_y	Tensão de escoamento pelo cisalhamento adimensional
ΔP	Valor selecionado da pressão de água no GWT
Δv	Variação ou deslocamento da velocidade

Δx	Deslocamento na direção do eixo x
"	Polegadas
%ABT	% de abatimento "slump"

RESUMO

O sistema de disposição de rejeitos na forma de pasta vem ganhando no último tempo uma importante participação nas usinas da mineração no contexto mundial. No caso particular do Brasil também esta tendência está sendo mais comum cada dia, deslocando o sistema convencional de disposição de rejeitos em forma de polpas minerais contidas em barragens ou bacias de rejeitos. A disposição de rejeitos em forma de pasta apresenta variadas vantagens entre as que podem destacarse as seguintes: menores custos de investimento e de operação, menores impactos ambientais, maiores recuperações de águas de processo permitindo sua reciclagem, maiores recuperações de mina.

Uma pasta mineral pode ser conceituada como um sistema coloidal que se apresenta como um fluido homogêneo, no qual não acontece segregação de partículas, e que se disposto de forma suave em superfícies estáveis, não apresenta drenagem significativa de água.

As pastas minerais podem ser dispostas de forma superficial ou também ser empregadas para preencher cavas subterrâneas, operação conhecida como “backfill”. Ao utilizar “backfill” podem ser alcançadas maiores recuperações de mina além de aproveitar material rejeitado no processamento mineral. Pode também ser empregado o processo de “rockfill” que involucra a utilização de rocha estéril misturada com pastas de rejeitos. Normalmente estas pastas minerais são cimentadas com ajuda de algum ligante, que classicamente é cimento portland, mas algumas alternativas mais econômicas tem sido utilizadas com muito sucesso, como é o caso de cinza volante, meta caulim, cal, dentre outras.

Dentre as características das pastas minerais podem-se mencionar sua viscosidade, tensão de cisalhamento e escoamento ou ruptura, altura de abatimento (“slump”), ângulo de repouso, resistências à compressão, cisalhamento, permeabilidade, etc.

O objetivo geral deste trabalho foi caracterizar reológica, física e químicamente pastas minerais preparadas a partir de diferentes rejeitos do processamento de minérios de ferro, provenientes do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais.

Dentre as conclusões mais relevantes deste trabalho podem ser destacadas as seguintes:

- O valor da viscosidade de pastas minerais aumentou na razão direta do aumento da porcentagem de sólidos, nas mesmas condições de operação, sendo as pastas mais viscosas aquelas preparadas com a amostra II (lamas da ciclonação).

- Quanto ao comportamento reológico das pastas preparadas com as amostras originais e misturas, tem-se que amostra III (rejeito de flotação) apresentou as pastas mais reotrópicas se comparadas com as outras pastas estudadas. As misturas apresentaram pastas mais tixotrópicas, enquanto que a amostra II mostrou pastas de comportamento duplo (tixo e reotrópicas).
- Quanto ao teste de abatimento (“slump”) foram as amostras de granulometria mais fina aquelas que precisaram de maiores proporções de água para formar pasta mineral (abatimentos entre 0 e 100%).
- No teste de calha (“flume”) determinou-se que para maiores inclinações de calha se produzem menores ângulos de repouso nas pastas estudadas, agora para menores adensamentos a queda absoluta destes ângulos foi cada vez mais gradual. Alcançaram-se ângulos de repouso de até 15° nas pastas ensaiadas em laboratório.
- No caso das pastas cimentadas com 4 e 8% de cimento portland obtem-se um comportamento característico nas curvas que mostram quedas e recuperações no gráfico da tensão instantânea em função do tempo.
- Ao utilizar uma mistura de meta caulim e cal como ligante na pasta mineral se logrou uma aglomeração das partículas sólidas das pastas, já no caso da adição de cimento portland podem-se alcançar maiores resistências de ruptura devido as estruturas do concreto assim formadas.

ABSTRACT

Important participation in the world mining usines have winning the tailings disposition system in form of paste. In the particular case of Brazil, this tendence is more comum everyday, remplacing the convencional system of disposition of tailings in large dam embankments in form of minerals slurries. The paste disposition form presents various advantages: lower capital and operations costs, lower enviromental impacts, higher water recuperations for recicly in the process, higher mine recuperations.

A mineral paste can be defined as well colloidal system equivalent to homogeneous liquidus, without solid particulate segregation, no presents significatives water losses when softly disposit on stable surface.

The minerals pastes can be disposed superficially (pastefill) or filled underground cavities (backfill). Higher mine recuperations can be reached to use backfill te be usefull mineral processing wastes. Other alternative can be used is rockfill process, wich misture waste rock and tailings pastes. Normally, these minerals pastes are cemented with binder, the clasic portland cement, or successly more economical alternatives: fly ash, metakaolim, lime, etc.

As minerals pastes characterics can be mencionated are viscosity, shear stress, yield stress, slump, repose angle, compression and shear resistances, permeability, etc.

This work objective was rheological, physical and chemical characterization of mineral pastes prepared with different tailings of iron mineral processing origined of Minas Gerais ferriferous quadrilate.

As principals conclusions of this work can be destacated:

- The minerals pastes viscosity incresed in direct relationship to solids concentration, with equivalent operation conditions, resulting pastes more viscous in contrast with those prepared with a sample II (slimes of cyclosizing).
- In reference to rheological behavior of pastes prepared with original and blended samples, a sample III (flotation tailings) showed reotropic pastes if compared with others studied pastes. Blended pastes present more tixotropic, whereas sample II (slimes) pastes present both reotropic and tixotropic behavior.

- Slump test showed fine distribution size samples required highest water proportions to form mineral paste (slump between 0 and 100%).
- In the flume test was determined for higher slopes of plane produced lower studied pastes repose angles, for lower solids concentrations more gradual drop have in repose angles. Angles increased up to 15° in laboratory tested pastes.
- For cemented pastes with 4 and 8% of Portland cement observed characteristic behavior with ups and downs in the curves of instantaneous stress with time.
- A use of blended with metakaolin and lime how mineral paste binder permitted solids particle agglomeration, while a Portland cement addition higher yield stress can be reached because formed concrete structures.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil destaca-se no setor mineiro-metalúrgico na produção de ferro e aço. Principal exportador mundial de matéria-prima contendo ferro, o país tem vastíssimos recursos potenciais e grandes reservas de minérios de ferro. A produção de minérios de ferro concentra-se em três regiões do país. Em Minas Gerais e nos estados vizinhos do Rio de Janeiro e Espírito Santo concentra-se também a produção nacional de aço nas siderúrgicas integradas, fazendo da região sudeste do país o foco principal de produção e exportação de produtos tanto da indústria de mineração de ferro como da indústria siderúrgica.

O volume de rejeitos da mineração de ferro, que atualmente é disposto nas barragens de rejeitos no Brasil, alcança valores entre 50 e 60 milhões de toneladas por ano. Esse fato se constitui em um impacto ambiental severo. (Araujo, 2004)

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

As afirmações anteriores fazem muito interessante a idéia de dispor os rejeitos da mineração de uma maneira tecnicamente mais eficiente e que signifique um menor impacto ambiental. Portanto, a disposição de rejeitos adensados na forma de pasta aparece como uma alternativa atrativa de ser estudada, enfocando o tema a partir de uma perspectiva da mineração de ferro. Essa tecnologia já está sendo aplicada em alguns países como Austrália, Canadá, EUA, Japão, Tanzânia, África do Sul, contudo não se conhecem aplicações industriais em mineração de ferro.

1.1 DEFINIÇÃO DE ALGUNS CONCEITOS BÁSICOS

Segundo os trabalhos de Jewell (2002) e de Araujo e colaboradores (2003), uma pasta mineral pode ser conceituada como um sistema coloidal 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 dos métodos:

- Teste de cone ou cilindro (teste de "slump")
- Teste de calha (teste de "flume")

O aspecto visual de uma pasta mineral pode ser observado na Figura 1.1, considerando diferentes adensamentos.



Figura 1.1: Aspecto de uma pasta mineral utilizada na indústria mineira da Austrália. (Jewell, 2002)

As características do comportamento das pastas são devidas ao adensamento em sólidos, fazendo que, a partir de uma determinada porcentagem de sólidos, não haja segregação das partículas sólidas na mistura. Como resultado, pode-se obter ângulos de disposição mais elevados do que ao utilizar polpas, por exemplo na faixa de 2 até 5%, representando um ganho importante em termos de volumes a serem dispostos, sobretudo para grandes áreas, características das disposições em barragens. (Araujo et al., 2003)

É importante destacar que, dentre as propriedades de uma pasta ou "pastefill" para a disposição dos rejeitos adensados, destacam-se: tensão de ruptura da pasta; altura de "slump", que é determinada através do teste de abatimento ou "slump"; ângulo de repouso, que pode ser determinado através do teste de calha ou "flume"; viscosidade da mistura sólido-líquido; resistência à compressão que pode ser determinada através de um ensaio mecânico de tensão – deformação; permeabilidade do preenchimento obtido.

Laudriault (2002), na Figura 1.2, apresenta um gráfico esquemático da tensão de ruptura em função do adensamento da mistura sólido-líquido, na qual observam-se distintos estados possíveis: polpa, polpa de alta densidade, pasta e torta. Também são indicados alguns dos equipamentos utilizados nas tarefas de desaguamento, bombeamento e filtragem dessas misturas sólido-líquido, os regimes e velocidades de fluxo possíveis e as características de segregação das partículas sólidas.

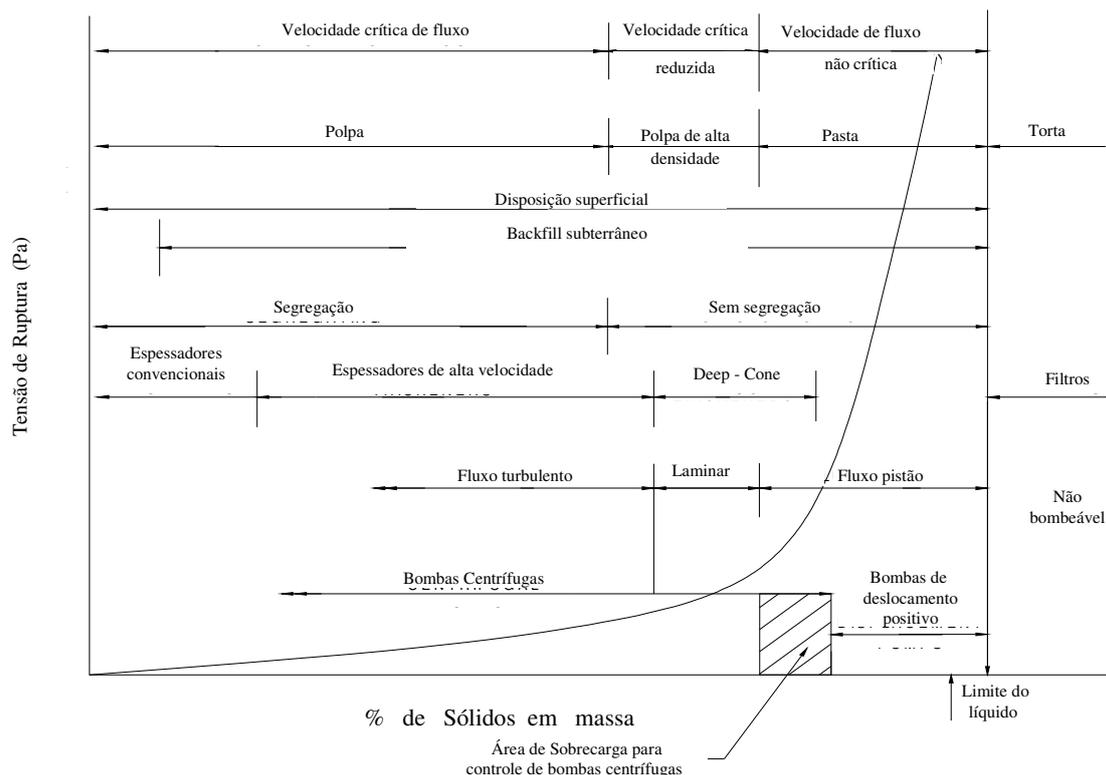


Figura 1.2: Definição teórica dos conceitos básicos tais como: polpa, polpa de alta densidade, pasta e torta. (Laudriault, 2002)

Wang e colaboradores (2002) estabelecem a existência de diferentes tipos de material utilizados para backfill cimentado (preenchimento subterrâneo), dentre esses: preenchimento com agregado cimentado (CAF), preenchimento hidráulico cimentado (CHF) e preenchimento com pasta cimentada ou “pastefill” (CPF).

Segundo Sofrá e Boger (2002), o “pastefill” é uma pasta preparada com rejeitos da mineração, utilizada para preenchimento de cavidades subterrâneas, que melhora as propriedades de suporte da estrutura permitindo reduzir a disposição superficial dos rejeitos. Esses rejeitos devem ser primeiramente espessados para formar a pasta e, normalmente, são misturados com pequenas quantidades de cimento (3 – 5%) para incrementar suas características de resistência. A pasta flui através de um duto com a ajuda da gravidade e após é disposta de forma horizontal ao fazer o preenchimento.

A Figura 1.3 apresenta os ângulos possíveis para a disposição de uma polpa de alta densidade e para uma pasta mineral, em uma visão de caráter qualitativo.

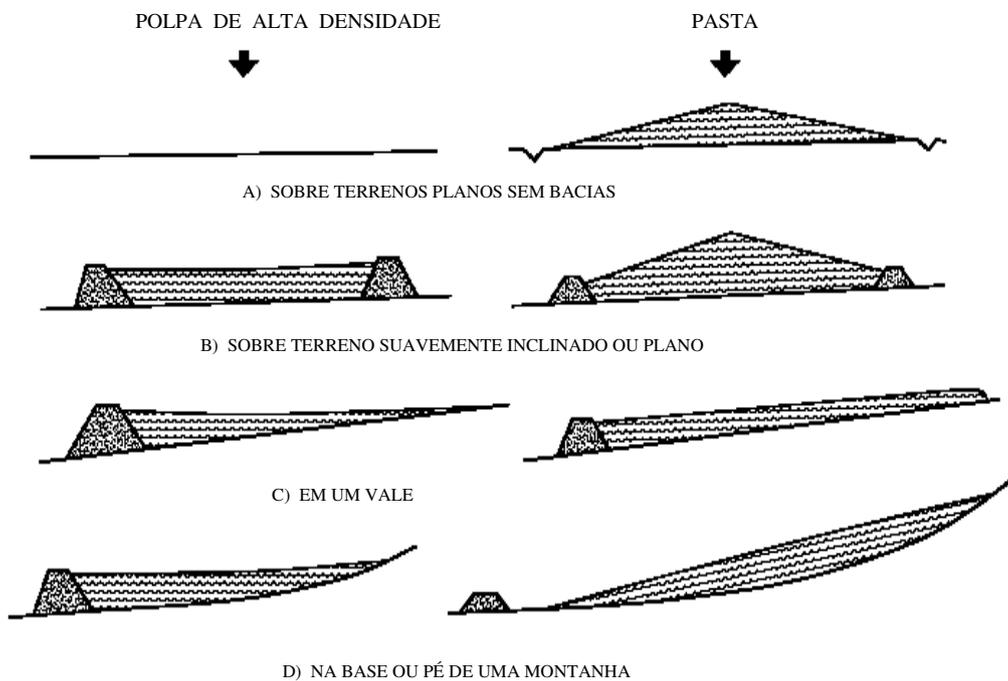


Figura 1.3: Ângulos de disposição para polpas de alta densidade e para pasta, em vários tipos de terreno. (Laudriault, 2002)

1.2. ASPECTOS AMBIENTAIS DA DISPOSIÇÃO DE REJEITOS

Segundo Jung e Biswas (2002), o problema dos depósitos de rejeitos, dispostos em áreas de baixo impacto aparente, é que podem ser ambientalmente mais sensíveis do que se pensa. Depois da disposição, os rejeitos podem causar efeitos ambientalmente adversos, devido, por exemplo, a lixiviação de metais pesados e outros poluentes, além da geração de ácido sulfúrico causada pela oxidação de sulfetos presentes nos rejeitos.

Dessa forma, a disposição de rejeitos no meio ambiente é uma fonte de efluente aquoso e poluição que podem criar potenciais perigos à saúde pública.

Desde os anos 60, os rejeitos da flotação têm sido coletados em depósitos superficiais conhecidos como barragens de rejeitos, o que tem significado considerável impacto ambiental.

A existência das barragens de rejeitos na atualidade representa uma preocupação constante. O trabalho de Rice (2002) mostra que um rompimento da barragem de rejeitos pode significar entre outros efeitos: perda de vidas humanas, dano ambiental severo, impacto direto nos custos de produção da usina, imagem negativa da empresa, responsabilidade legal, publicidade negativa instantânea.

O trabalho de Sofrá e Boger (2002) também indica que os métodos convencionais a úmido utilizados para a disposição de rejeitos são problemáticos devido ao risco de contaminação do solo com as águas da barragem ou bacia de rejeitos e a difícil recuperação do terreno. Na década de 70 foram registrados em torno de 35 falhas de barragens no mundo inteiro, resultando em pelo menos 471 mortes de seres humanos, com um grande dano ambiental associado. Além da problemática ambiental, existe uma tendência mundial à minimização do uso da água para reduzir assim os custos operacionais, melhorando a eficiência da usina. Portanto, uma alternativa que apresenta vantagens significativas, quanto a segurança e outros fatores, seriam as técnicas de disposição a seco, utilizando rejeitos que devem ser espessados ou desaguados antes de sua disposição. Dentre as aplicações desses métodos a seco está a preparação de “pastefill”, que corresponde a uma pasta de preenchimento. A produção de “pastefill” melhora fatores como recuperação de reagentes e água, além de diminuir os volumes dos rejeitos a dispor, facilitando a posterior recuperação do solo.

No trabalho de van Deventer e Luckey (2003) são apresentados alguns acidentes geotécnicos na mineração mundial acontecidas no ano 2000 (ver Tabela I.2). Além disso, é mostrado que desde 1975 até hoje os incidentes ambientais reportados na mineração são causados em 76% dos casos pelos acidentes geotécnicos das barragens de rejeitos, em 18% pelas falhas na tubulação de transporte e em 6% devido a acidentes de transporte.

Quanto às polpas minerais com 60 – 80% de água em massa, muitos estudos já foram feitos, mas pouca atenção tem-se dado às polpas muito concentradas em sólido (por exemplo na faixa 75 – 90% de sólidos em massa), como é o caso das pastas minerais utilizadas para preenchimento de cavidades subterrâneas, processo mais conhecido como "backfill" com pasta ou simplesmente "pastefill". Para aumentar a

resistência à compressão da pasta de preenchimento é muito utilizada a adição de cimento portland.

A substituição parcial de cimento portland por cinza volante (NaOH) não só permite aumentar a resistência da pasta de preenchimento ou "pastefill", a custos menores, mas também alivia um pouco o problema meio ambiental associado com os depósitos de cinza volante nos Estados Unidos da América do Norte.

No caso do Brasil, algumas empresas estão utilizando "pastefill" cimentados com meta caulim em substituição ao cimento portland, fato que significa uma diminuição significativa nos custos associados a esse insumo, segundo o trabalho de Gama e colaboradores (1997).

Tabela I.1: Incidentes e impactos ambientais relacionados com mineração no ano 2000. (van Deventer e Luckey, 2003)

DATA	LOCAÇÃO	FALHA	PRODUÇÃO	MORTES
30-Janeiro-2000	Baia Mare, Romênia	Rompimento da barragem	Cianeto	Não
10-Março-2000	Borsa, Romênia	Rompimento da barragem	Metais pesados	Não
21-Março-2000	Papua – Nova Guiné	Acidente no transporte	Cianeto	Não
24-Julho-2000	Romênia	Falha na linha da tubulação	Chumbo e Zinco	Não
09-Setembro-2000	Galivare, Suécia	Falha da barragem pelo drenagem no filtro	Cobre	Não
14-Setembro-2000	Papua – Nova Guiné	Acidente no transporte	Diesel	Não
29-Setembro-2000	Shanxi, China	Derrame de 5,2 ton de NaCN no rio Shuangjiang	Cianeto	Não
11-Outubro-2000	Inez, EUA	Falha da barragem dentro da mina subterrânea	Polpa de descarte de carvão	Não
18-Outubro-2000	Nandan, China	Colapso da barragem, ≈100 famílias danificadas	Cobre	29 mortos, 100 desaparecidos

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

- Caracterizar reológica, física e quimicamente pastas minerais preparadas a partir de diferentes rejeitos do processamento de minérios de ferro, provenientes do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais.

2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Fazer um estudo do estado do arte relativo a utilização de pastas minerais para a disposição de rejeitos da mineração e de outras aplicações.
- Caracterizar as amostras de rejeitos do processamento de minério de ferro de várias origens, determinando algumas características tais como: massa específica, distribuição granulométrica, composição química e mineralógica, área superficial e potencial zeta.
- Preparar e caracterizar as pastas minerais correspondentes a cada rejeito utilizado, de forma a determinar e estudar:
 - * Comportamento da viscosidade (viscosidade em função do adensamento, % de sólidos)
 - * Comportamento da fluidez e consistência da pasta:
 - Teste de “flume” (ângulo de repouso)
 - Teste de “slump” (altura de Slump)
 - * Características da resistência da pasta cimentada:
 - Resistência à compressão
 - Resistência à tração
 - Resistência ao cisalhamento
 - * Módulo elástico
 - * Permeabilidade da pasta cimentada
- Correlacionar as propriedades dos rejeitos com as pastas minerais correspondentes.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. REOLOGIA DE SUSPENSÕES MINERAIS

Nos trabalhos de Dealy (1995) e de Klein (2002), apresentam-se algumas definições básicas da reologia de suspensões minerais e que serão de vital importância para um melhor entendimento deste estudo. A reologia pode ser definida como a ciência que estuda a deformação do fluxo da matéria. Uma das propriedades ou características reológicas importantes é a tensão de cisalhamento, τ , que por definição é a força aplicada por unidade de área, segundo a equação 3.1, a seguir:

$$\tau = F / A \quad (3.1)$$

Dentre as unidades de τ , normalmente a mais utilizada é o Pascal.

Outra característica ou resposta reológica de interesse é a taxa de cisalhamento, a qual corresponde à mudança da velocidade dividida pela distância de separação de dois planos paralelos, entre os quais encontra-se o fluido em estudo, conforme indicado na equação 3.2 e observado na Figura 3.1:

$$\dot{\gamma} = \Delta v / \Delta x \quad (3.2)$$

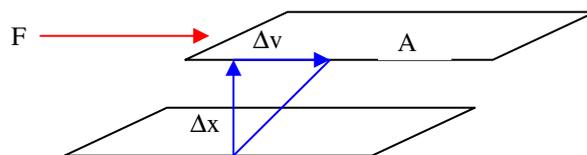


Figura 3.1: Aplicação da força F ao plano de área A e distância x ao plano paralelo que provoca seu deslocamento a velocidade v . (Klein, 2002)

Aqueles fluidos que obedecem a lei de fluxo viscoso de Newton são os que exibem um comportamento mais simples, com tensão de cisalhamento sendo diretamente proporcional a taxa de cisalhamento. A constante de proporcionalidade, nesse caso, corresponde à viscosidade newtoniana, η_N , que é característica nesse tipo de

fluidos. As suspensões com baixo conteúdo de sólidos normalmente apresentam esse comportamento newtoniano. A grande maioria das suspensões utilizadas no tratamento de minérios apresentam um comportamento não newtoniano, e suas curvas de tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento mostram-se como não lineares. Dessa forma, essas suspensões não têm uma viscosidade simples e sim uma viscosidade aparente, que é variável com a taxa de cisalhamento. Essa viscosidade aparente é definida como a inclinação de uma linha que passa pela origem e intercepta a curva de fluxo na taxa específica de cisalhamento.

Segundo Tadros (1987), exemplos de distintos tipos de comportamento reológico para suspensões concentradas podem ser representados pelas Figuras 3.2 a) e b). Na Figura 3.2 a) apresenta-se o gráfico de tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento, enquanto na Figura 3.2 b) mostra-se o gráfico de viscosidade em função da taxa de cisalhamento.

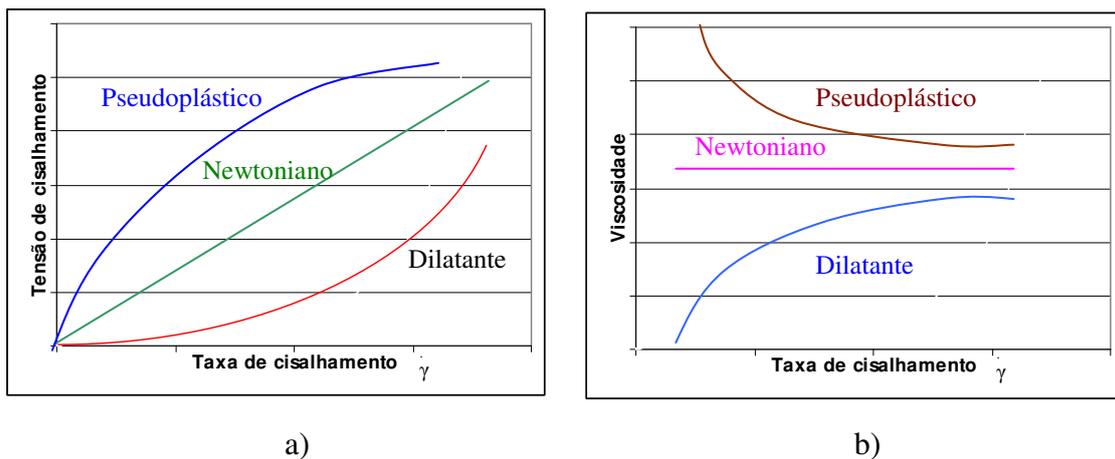


Figura 3.2: Curvas de fluxo típicas para suspensões concentradas: (a) relação entre tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento; (b) relação entre viscosidade e taxa de cisalhamento. (Tadros, 1987)

Nas curvas apresentadas, em ambos casos, podem ser observados os comportamentos newtoniano, pseudoplástico e dilatante. No comportamento pseudoplástico, típico das argilas, pode-se ver uma redução na viscosidade com a taxa de cisalhamento, enquanto que no caso do comportamento de fluxo dilatante, tem-se um incremento da viscosidade com a taxa de cisalhamento. Portanto as características de fluxo, que definem o comportamento reológico da suspensão, normalmente são

determinadas pela fração volumétrica da fase dispersa, a magnitude das forças de interação entre as partículas e a estrutura dos agregados formados.

Segundo Boger (2003), a viscosidade de suspensões concentradas pode mostrar um comportamento reversível e independente do tempo como aquele mostrado na Figura 3.3. Isto significa que o valor da viscosidade voltará a seu valor original quando cessar o torque aplicado.

Alternativamente, as polpas podem exibir um comportamento de sua viscosidade dependente do tempo. Nesse caso, um dos comportamentos possíveis é o tixotrópico, no qual a viscosidade decresce com o tempo (Figura 3.4). Um exemplo do comportamento tixotrópico é aquele usualmente observado na adição de polímeros a uma polpa mineral. Existe o comportamento chamado reoforético ou reotrópico, que é pouco comum e no qual o valor da viscosidade η cresce com o tempo.

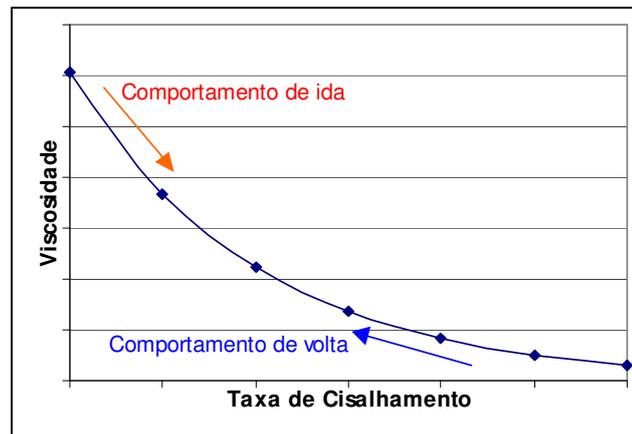


Figura 3.3: Comportamento da viscosidade independente do tempo. (Boger, 2003)

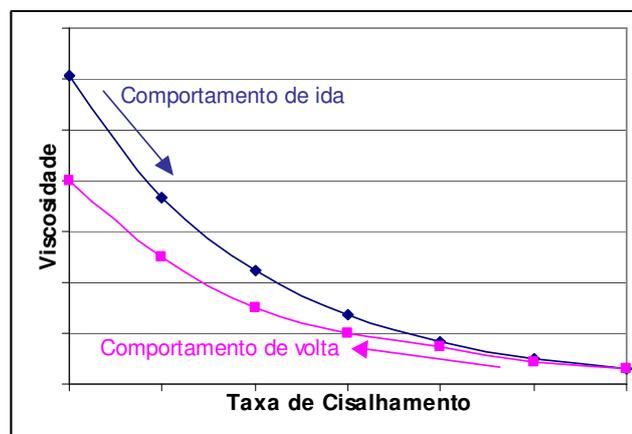


Figura 3.4: Comportamento tixotrópico da viscosidade (dependente do tempo). (Boger, 2003)

Outro parâmetro reológico importante é a chamada tensão de ruptura ou escoamento, que fornece informações sobre as características para o projeto e desempenho do processo. Ela é definida como o valor da tensão que deve ser alcançado para iniciar o fluxo de material. Portanto, esse parâmetro é uma propriedade do material que denota a transição entre o estado sólido e o comportamento de líquido.

A tensão de ruptura existe nas suspensões de partículas agregadas, sendo a resultante das forças inter-partículas de atração, formando uma verdadeira estrutura de tecido tridimensional. Existem métodos diretos e indiretos para sua determinação experimental, sendo estes últimos os mais utilizados. (Klein, 2002)

3.2. TECNOLOGIA DA PREPARAÇÃO DAS PASTAS DE REJEITOS

Na preparação do "pastefill", existem muitos métodos desenvolvidos e que atualmente são utilizados na indústria mineral. No método convencional, a primeira etapa de desaguamento é realizada pelo espessador. Assim, sua descarga é ainda uma polpa, que pode ser bombeada facilmente. Normalmente, utiliza-se um filtro a vácuo, seja de disco ou de tambor, para formar a pasta.

O espessador de alta densidade tem sido utilizado para produzir pasta mineral, a partir de polpas diluídas de rejeito. A Figura 3.5 mostra um espessador industrial de alta densidade de cone profundo ("deep cone").

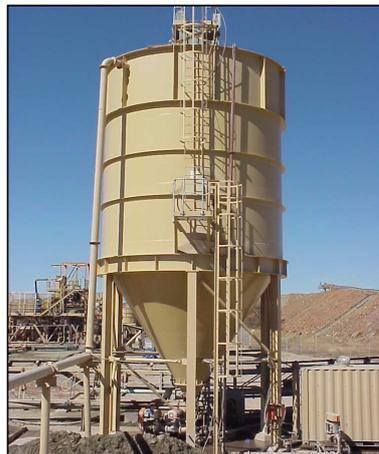


Figura 3.5: Espessador de alta densidade de cone profundo. (Jewell, 2002)

3.3. FATORES RELEVANTES PARA PREPARAÇÃO DE UMA PASTA

3.3.1. DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS REJEITOS

A distribuição granulométrica do sólido é importante pois influencia a porosidade e a resistência da pasta. Usualmente, a adição de cimento na preparação de pastas de preenchimento melhora tanto as propriedades de bombeamento quanto de resistência. Isso é atribuído à presença de partículas muito finas que reduzem a perda por separação do componente água da pasta. Essas partículas permitem também a minimização da fricção entre as superfícies internas do tubo e a pasta, por exemplo quando esta última é transportada.

A Figura 3.6 mostra as curvas de distribuição granulométrica para rejeitos de mina, cimento e a mistura rejeito com 8% em massa de cimento.

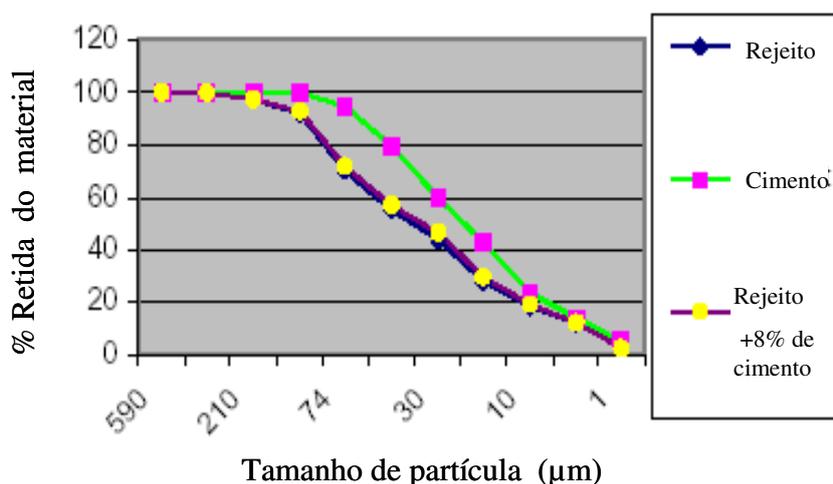


Figura 3.6: Distribuição granulométrica de rejeito, cimento e mistura. (Jung et al., 2002)

Segundo Jung et al. (2002), o excesso da quantidade de partículas finas pode produzir uma redução da resistência da pasta, ainda que uma certa quantidade de material fino (tamanho $< 20\mu\text{m}$) seja necessária para bombear a pasta através do tubo sem perdas da resistência requerida para preenchimento.

3.3.2. EFEITO DOS ADITIVOS QUIMICOS

Os aditivos são componentes incorporados na mistura de pasta de cimento, antes ou durante o processo de mistura. Pode-se estimar que 80% do concreto produzido na indústria da construção de América do Norte contém um ou mais tipos de aditivos. Esses aditivos melhoram as propriedades do concreto e são utilizados mundialmente. As dificuldades associadas à preparação, transporte e disposição do preenchimento podem ser reduzidas, em grande parte, com o uso desses aditivos. (Wang et al., 2002)

Os aditivos podem ser empregados para diminuir a quantidade de água, para incorporar ar, para acelerar ou retardar a fixação e para reduzir a permeabilidade ou para redução dos volumes de misturas.

Nos Estados Unidos, normalmente são utilizados como aditivos para as pastas de preenchimento: cinza volante, escórias, meta caulim e fumo de sílica. Eles só têm um papel complementar aos cimentos ou ligantes. O objetivo de sua adição é a redução de custos tanto na mineração como na indústria da construção. Nesse último caso, os aditivos incorporam benefícios físicos e econômicos no concreto.

É importante indicar que na indústria mineira o número de aditivos utilizados é bastante reduzido em comparação com a indústria da construção.

A classificação geral desses aditivos considera quatro categorias: aceleradores, retardadores, redutores de água e super-plasticidores.

Segundo Gama (2004), os aditivos para "pastefill" representam um problema econômico e de disponibilidade de recursos em um determinado país.

3.3.2.1. EFEITO DA POZOLANA OU META CAULIM

As pozolanas, localizadas principalmente na região de Montes Claros e Nordeste do Brasil, representam uma opção viável técnica e econômica para produção de "pastefill" utilizado para preenchimentos. Outra alternativa ainda mais econômica seria a preparação de meta caulim, com um custo de produção da ordem de 0,047 US\$/t (Gama, 2004). Nesse caso há um aumento do módulo de elasticidade e da resistência à tração da pasta, tanto para os solos mais grossos quanto finos, estudados no trabalho de Gama e colaboradores (2001). A Tabela III.1 mostra alguns resultados obtidos.

Tabela III.1: Resistência a tração (R_T) e módulo de elasticidade (E_T) para 90 e 180 dias de cura. (Gama et al., 2001)

Cura	Teor ligante (%)	90 dias		180 dias	
		R_T (MPa)	E_T (MPa)	R_T (MPa)	E_T (MPa)
Cura seca a 20°C	6 PC	---	---	1.17	14147
	6 (MK+CaO)	0.19	2458	---	---
	10% (MK+CaO)	0.29	4574	0.92	9393
Cura de imersão a 20°C	6 (MK+CaO)	0.16	2170	0.41	7711
	10% (MK+CaO)	0.22	3362	0.74	10864

3.3.2.2. EFEITO DA CINZA VOLANTE

A cinza volante é um dos componentes mais usados com sucesso nas misturas de "backfill". Sua inclusão nesses sistemas afeta as propriedades da pasta de preenchimento. A cinza volante atua em parte como agregado fino e como um agente ligante.

Na maioria das aplicações nos Estados Unidos, a cinza volante é utilizada com o propósito de alcançar os seguintes benefícios: (Jung et al., 2002)

- a) reduzir o conteúdo de cimento, baixando assim os custos do "backfill";
- b) melhorar a plasticidade e/ou as propriedades reológicas;
- c) alcançar níveis requeridos para a resistência do "backfill" após 90 dias de cura.

O desenvolvimento de um "backfill" de alta densidade cimentado pode significar uma promissora alternativa para os depósitos de descarte da mina. As pastas cimentadas e os "pastefill" de alta densidade têm as seguintes propriedades e vantagens:

- i) reduzem ou eliminam os confinamentos dos rejeitos;
- ii) reduzem ou eliminam a contaminação da água sub-superficial com metais pesados;
- iii) baixam os níveis de armazenamento de descartes perigosos.

Alguns dos fatores que afetam o bombeamento e a resistência de um "backfill" de alta densidade são os seguintes: (Jung et al., 2002)

- superfície específica dos agregados;
- conteúdo de cimento;
- conteúdo de água;
- características físicas dos componentes do "backfill".

A permeabilidade da mistura pode ser fortemente reduzida e decrescerá mais ainda com o tempo, isto como resultado da cristalização pozolânica, com a adição da cinza volante. A Tabela III.2 mostra as propriedades físicas de uma cinza volante utilizada por Jung et al. (2002).

Tabela III.2: Propriedades da cinza volante. (Jung et al., 2002)

Propriedade	Valor
Massa específica	2,25
Máxima densidade seca (pcf)	103,2
Umidade (%)	0,06
Perda ou baixa da secagem – 22 dias (%)	0,005
Porção do material +325 # peneira Sieve (%)	25,75
Permeabilidade (*10 ⁻⁵ cm/s)	0,9

A substituição de cimento por cinza volante permite alcançar uma resistência mais apropriada e homogênea, a um custo mais baixo.

3.4. APLICAÇÕES INDUSTRIAIS DO PREENCHIMENTO COM PASTA

Alguns exemplos de operações mineiras que trabalham com pastas minerais para preenchimento de cavas no mundo, segundo Jung et al., 2002, são mostrados a seguir:

- O sistema de "backfill" com pasta na mina subterrânea de Ag–Pb–Zn da empresa BHP-Cannington é aplicação pioneira na Austrália, em operação desde 1997. Esse sistema utiliza rejeitos já moídos com aproximadamente 60% em massa de sólidos e um P₈₀ na faixa de 80 até 100µm. Durante a produção da pasta, os processos de adição de cimento e controle de qualidade são totalmente automatizados. A descarga de produto é favorecida com o uso de vácuo.
- As minas Getchell e Merkle, da empresa Barrick Gold, incorporam aditivos na etapa de "backfill". No caso da usina Getchell, são usados aditivos redutores de água, o que permite alcançar maiores valores de resistência a compressão. No caso da mina Merkle é utilizado um aditivo ligante para tratar "in-situ" o estéril já disposto. A mistura de sólido para preenchimento é a seguinte: rocha (66%), areia (25%) e lama (9%). Nesse caso, foram adicionados na mistura cimento, dispersante e aditivos para o controle de hidratação. O dispersante atuava sobre o aumento da fluidez enquanto o aditivo sobre o manuseio de trabalho da pasta.

- Na mina Jiaojia, na China, um novo ligante recentemente desenvolvido é chamado de material condensado com alto conteúdo de água, capaz de solidificar uma mistura em que o volume de água seja nove vezes o volume do sólido. Ao misturar esse tipo de ligante com uma polpa mineral, obtêm-se resistências médias à compressão maiores que 2MPa após 2 dias de cura. A mistura considera 7% em massa do ligante em uma polpa de 64% de sólidos de rejeito. É importante destacar que pode-se obter resistências similares, ao adicionar cimento portland, apenas depois de 28 dias de cura.
- A mina Neves Corvo, em Portugal, também utiliza preenchimentos com pasta para suas cavas. O nível de produção da usina de beneficiamento é de aproximadamente 2 milhões de toneladas de concentrado por ano, composto principalmente de cobre e cobre/estanho. O rejeito tem concentração de 65% em massa de sólidos com uma granulometria 100% < 200µm com um D₈₀ na faixa de 30 – 40µm. O conteúdo de cimento na pasta para preenchimento vai de 1 até 7% em massa, dependendo do método de mineração usado. Um novo ligante para "backfill" chamado "sungeric" é adicionado em uma razão de 35/1 (areia/ligante), mostrando bom desempenho pois reduz a dificuldade do transporte da pasta, aumenta a resistência à compressão e reduz os custos de preenchimento.

Outra alternativa para substituição de cimento é o uso de gesso calcinado. Em uma pasta com 75% de sólidos em massa, gesso calcinado foi adicionado obtendo-se uma resistência de 1MPa com muito pouco tempo de cura. A mesma resistência, utilizando-se cimento, é obtida com quantidades 2 – 3,5 vezes maiores de gesso calcinado.

O conteúdo de sólidos de uma pasta de preenchimento é dependente de sua porosidade e do conteúdo de finos. Por exemplo, rejeitos de ouro com porosidade de 47% apresentavam 75% de sólidos na pasta. Quando esses rejeitos foram misturados com areias aluviais e rocha com porosidade inferior a 30%, o resultado foi uma pasta com 85% de sólidos em massa.

Os rejeitos que vem da moagem são espessados em um espessador de alta capacidade, que alimenta um tanque indo depois para um filtro de disco até alcançar 15% de umidade antes da adição do ligante.

- Na Kinross Gold Corporation, os rejeitos já moídos são diluídos até 10 - 15% de sólidos e misturados com flocculante. Depois são levados para o espessamento, produzindo uma pasta com menos de 60% de sólidos. Assim, o processo convencional de três estágios para a preparação de pasta é reduzido só à etapa de espessamento. Logo, a pasta é misturada com areia e ligante antes de realizar o preenchimento.
- A mina Enterprise, na Austrália, substituiu seu sistema de preenchimento hidráulico pelo sistema de "pastefill". Nessa planta a mistura é preparada considerando a descarga do filtro de correia, que processa os rejeitos de cobre provenientes do underflow do hidrociclone e a descarga do espessador que trata o overflow do hidrociclone. Para o ajuste das características da pasta, são usados a água e os ligantes. Normalmente, essa planta produz uma pasta de 76% de sólidos.
- A mina Henty Gold, na Austrália, normalmente utiliza pasta de rejeitos filtrados que são misturados com polpas cimentadas. Atualmente, o estéril da mina é adicionado à pasta de rejeitos para melhorar sua resistência e reduzir o consumo de cimento em 50%.
- No ano 1996, a mina Brunswick da Noranda Inc., no Canadá, modificou seu sistema de "backfill" de "rockfill" cimentado e não cimentado, para preenchimento com pasta. Os rejeitos com 50 – 60% de sólidos são atualmente usados para preparar "pastefill". A pasta é transportada aproveitando a gravidade para preenchimento das cavas subterrâneas, distribuída por tubos de 200mm de diâmetro. O conteúdo de cimento (como ligante) varia de 2 – 7%, para satisfazer os requerimentos de resistência.
- Na mina japonesa Hard Rock, em Toyoha, cuja usina processa minério contendo Pb – Zn – Ag, o processo de preparação do "pastefill" é realizado em alta temperatura. Nesse caso, o cimento é utilizado para melhorar a resistência da pasta, com adições que variam entre 3 e 7% na mistura.

A Tabela III.3 apresenta algumas aplicações industriais que utilizam o sistema de preenchimento com "pastefill".

Tabela III.3: Aplicações industriais do preenchimento com "pastefill"

Nome da usina	Localidade/Pais	Produção	Características do sistema pastefill
Cannington	Austrália	Pb-Ag-Zn	Uso de PC
Jiaojia	China		7% outro ligante
Neves Corvo	Portugal	Cu e Cu/Sn	1-7% PC
Enterprise	Austrália	Cu	Uso de outros ligantes
Brunswick	Canadá		2-7% PC
Hard Rock	Toyoha/Japão	Pb-Zn-Ag	3-7% PC
Bulyanhulu	Tanzânia	Au	Descarga zero de água
Colstrip	Montana/EUA		Cinza volante
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		Realiza mistura de 2 tipos de rejeitos
Mt - Keith	Austrália	Ni	Uso só de espessamento
Line Creek	BC - Canadá	Carvão	Sistema TTD
Cluff Lake	Canadá	U	Sistema TTD
Ekati	Nor-oeste, Canadá	Diamante	Sistema TTD
Vandreuil	Québec - Canadá		Produz pasta desde 1.987

3.5. TESTES APLICADOS ÀS PASTAS MINERAIS

3.5.1. TESTE DE "SLUMP"

Verifica-se do trabalho de Clayton, Grice e Boger (2003), que o teste de slump foi originalmente idealizado para medir a consistência ou plasticidade de misturas de concreto, sendo normalizado pela norma ASTM a partir de 1998. A Figura 3.3 mostra uma representação esquemática do teste de "slump". Nesse teste, o cone é preenchido com concreto até completar todo seu volume, quando o cone é retirado verticalmente, verificando-se a diferença entre a altura original e a final, a que é chamada de altura de abatimento ou "slump".

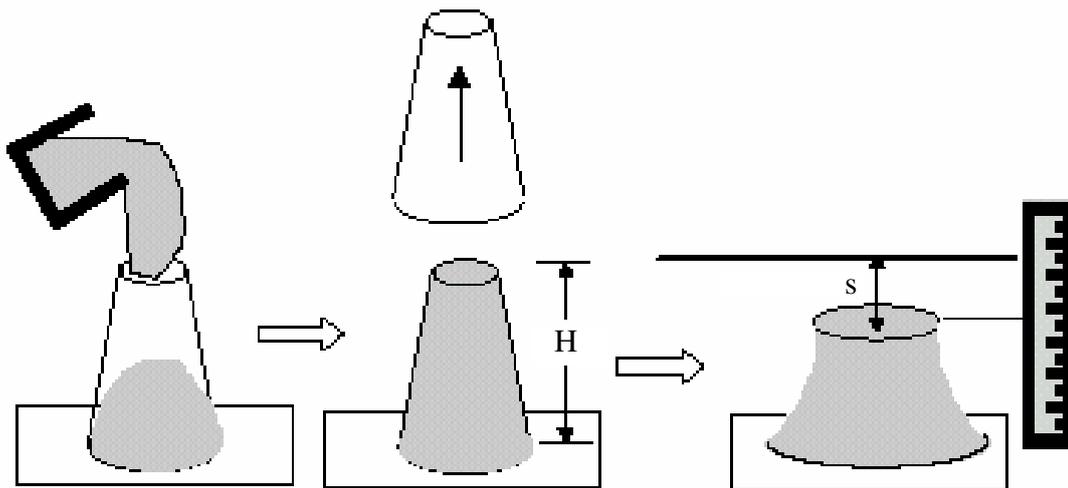


Figura 3.7: Representação esquemática do teste de abatimento de cone ou "slump". (Clayton et al., 2003)

O teste de "slump" tem sido utilizado para medir a consistência de fluídos inelásticos, incluindo-se suspensões de rejeitos minerais.

A altura de "slump" é utilizada como parâmetro de controle, para avaliação da consistência de uma pasta. Essa altura é dependente tanto da tensão de escoamento quanto da densidade do material. No contexto mineiro, esses fatores poderiam variar com as mudanças no origem do minério ou mudanças em seu processamento. Como resultado, a utilização da altura de "slump" como o único parâmetro para avaliação da consistência para o sistema de disposição de rejeitos potencialmente pode não ser suficiente.

Pode-se utilizar uma superfície cilíndrica de forma alternativa ao cone. A Tabela III.4 mostra alguns tamanhos de cilindro utilizado por Clayton, Grice e Boger (2003).

Tabela III.4: Dimensões e material de construção de três cilindros para teste de "Slump" de laboratório, utilizados nos experimentos de Clayton, Grice e Boger (2003).

Cilindro	Altura, H (mm)	Diâmetro, D (mm)	Material de construção
1	75	75	PVC
2	102	102	PVC
3	120	120	Perspex
4	200	200	Lâmina metálica

Para aplicações industriais, o teste do cilindro tem várias vantagens sobre o teste de cone "slump", sendo algumas delas as seguintes:

- determinação mais precisa da tensão de escoamento, com respeito à simetria do cone;
- o modelo cilíndrico, matematicamente mais fácil para um modelamento;
- maior facilidade para o enchimento com menor quantidade de bolhas de ar que podem afetar os resultados;
- a forma do material que passou pelo teste de "slump" é mais consistente, especialmente para valores elevados de tensão de escoamento;
- as medições do teste de cilindro de "slump" podem ser completadas usando uma seção do tubo, enquanto que as medições de cone só podem ser feitas com um cone manufaturado com um maior número de especificações.

Na indústria mineral, o teste de "slump" encontra uma importante aplicação para avaliação de materiais para "pastefill".

Para maximizar a disposição de rejeitos e minimizar o uso de cimento, os sistemas de "pastefill" operam, normalmente, na faixa de concentração de sólidos entre 70 até 90% em massa. Nessas altas concentrações, a tensão de escoamento da pasta é muito sensível às mudanças na concentração de sólidos e, portanto, é vital um controle efetivo da consistência da pasta. (Clayton et al., 2003)

Segundo Jung et al. (2002), utilizando testes de "slump" de acordo a norma ASTM C143, foram encontradas correlações consistentes entre os valores da altura de "slump" e os conteúdos de água das misturas ou pastas estudadas. Isso foi muito útil para estabelecer uma apropriada consistência da mistura com cimento, já que um adequado conteúdo de água foi compatível com os critérios de projetos existentes.

As medidas de altura de slump de 5,25(") – 5,75(") mostraram que o conteúdo de água em massa estava na faixa de 21 a 22% em massa das misturas totais. A Figura 3.8 mostra as alturas de "slump" para os conteúdos de água que foram estudados. O tipo de material utilizado nesse caso, não é especificado pelos autores no artigo original.

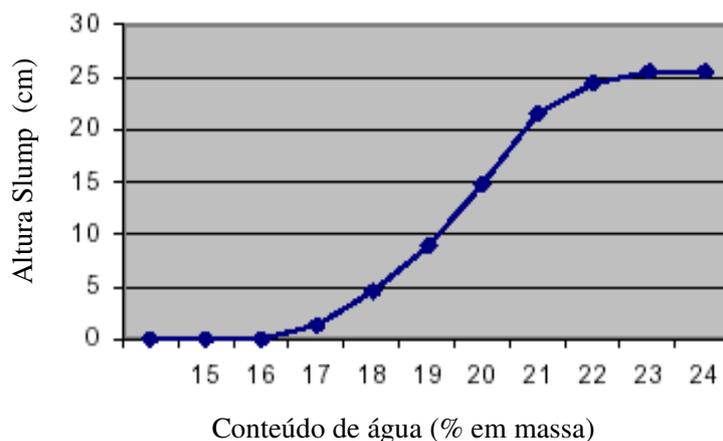


Figura 3.8: Gráfico altura de "slump" em função do conteúdo de água ou umidade da pasta. (Jung et al., 2002)

No trabalho dos pesquisadores Araujo, de Souza e Amarante (2003), são apresentados resultados de testes reológicos feitos com rejeitos e lamas da usina Mutuca da empresa Minerações Brasileiras Reunidas - MBR, que mostram-se muito promissores, indicando a possibilidade de se produzir rejeitos adensados com até 75% de sólidos em massa e alturas de "slump" na faixa 225 – 250mm, utilizando espessadores de alta capacidade ou espessadores de pasta.

Na Tabela III.5 apresentam-se algumas características físicas das amostras estudadas.

Tabela III.5: Propriedades físicas das amostras da Mutuca – MBR (Araujo et al., 2003)

Método	Conteúdo de Sólidos (% em massa)	Massa específica do sólido (g/cm ³)	Granulometria (< 20µm)
GL&V – amostra 01	71	4,5	78,8
EIMCO – amostra 01	67 - 72	4,3	71,0
EIMCO – amostra 02	66 – 68	4,3	71,0
GOLDER (175mm slump)	77	4,5	86,7
GOLDER (250mm slump)	74	4,5	86,7

3.5.2. MEDIÇÕES DE VISCOSIDADE E TENSÃO DE ESCOAMENTO

Como já foi dito no capítulo introdutório, os parâmetros reológicos viscosidade, tensão de cisalhamento e tensão de escoamento são importantes variáveis a ser estudadas.

Assim, por exemplo, o trabalho de Sofrá e Boger (2002) apresenta um interessante estudo do comportamento reológico de algumas espécies minerais presentes na mineração da Austrália, como é o caso da bauxita, manganês, ouro, níquel e carvão. Na Figura 3.9 apresenta-se um gráfico da tensão de escoamento em função da concentração de sólidos para uma ampla variedade de pastas de rejeitos minerais, e a Figura 3.10 mostra o comportamento da viscosidade em função da taxa de cisalhamento para diferentes concentrações de sólido de uma pasta de uma lama de bauxita.

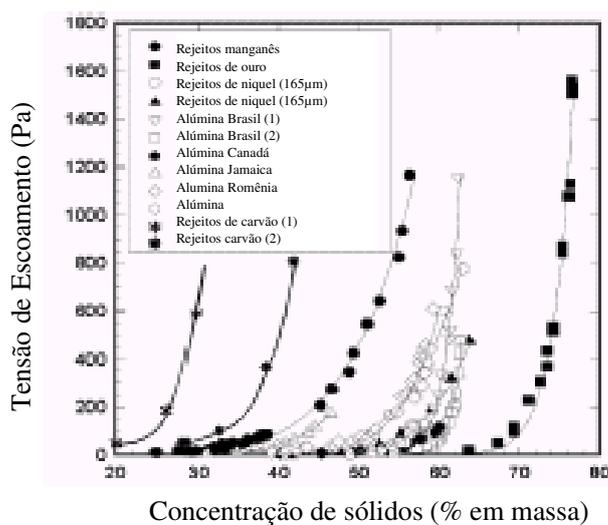


Figura 3.9: Gráfico da tensão de escoamento em função da concentração de sólidos para uma ampla variedade de rejeitos minerais. (Sofrá et al., 2002)

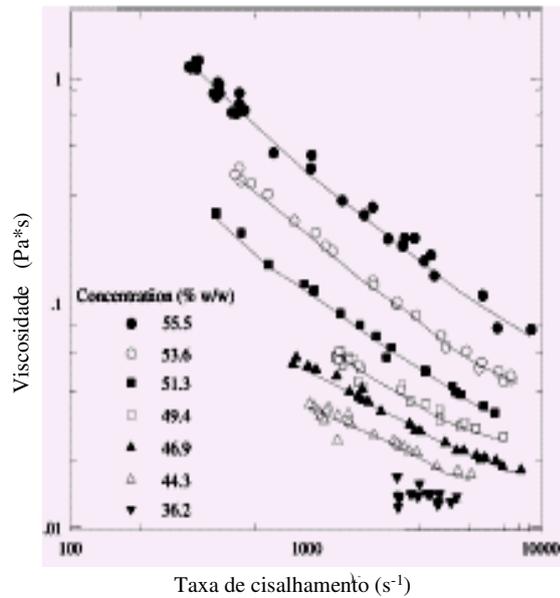


Figura 3.10: Gráfico da viscosidade de equilíbrio em função da taxa de cisalhamento para várias pastas de rejeitos de bauxita. (Sofrá et al., 2002)

Na Figura 3.10 observa-se que uma maior concentração de sólidos na polpa significa um aumento de sua viscosidade.

Segundo Thomas et al. (1979), é recomendado que o valor ótimo da concentração de sólidos em uma polpa (ou pasta), para a maioria dos preenchimentos hidráulicos, fique na faixa de 65 até 70% em massa. Possivelmente, o uso de aditivos melhore a operação, mas deve ser feita a avaliação econômica correspondente.

Segundo Clayton et al, 2003, a faixa de 70 até 90% de sólidos em massa, dependendo do material, é aquela recomendada para trabalhar com pastas para preenchimentos.

Essa discrepância é apresentada na Figura 3.9, que mostra os diferentes tipos de materiais com distintos níveis de densidade crítica de sólidos, considerando uma faixa que varia de 30 até 80% de sólidos em massa.

Clayton et al. 2003 fizeram uma comparação direta dos modelos do cone e cilindro para medidas da tensão de escoamento de suspensões minerais. A análise mostra de forma clara que o modelo do cilindro prediz de maneira mais precisa o valor da tensão de escoamento do material, fato que é mostrado na Figura 3.11.

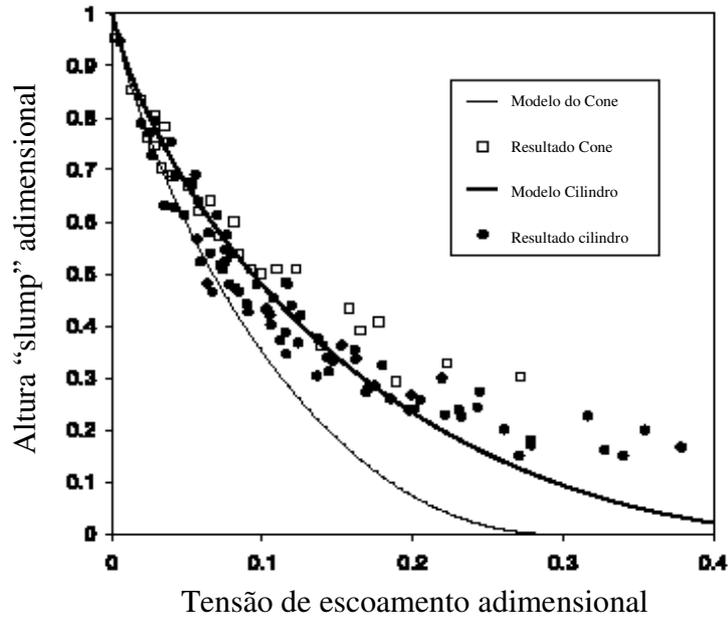


Figura 3.11: Resultados dos testes de "slump" em cone e cilindro colocados junto aos modelos teóricos em termos adimensionais da altura "slump" e da tensão de escoamento. (Clayton et al., 2003)

Os parâmetros adimensionais da altura "slump" e da tensão de escoamento, que são mostrados pela Figura 3.11, são definidos segundo a Figura 3.12 e as seguintes equações, a seguir:

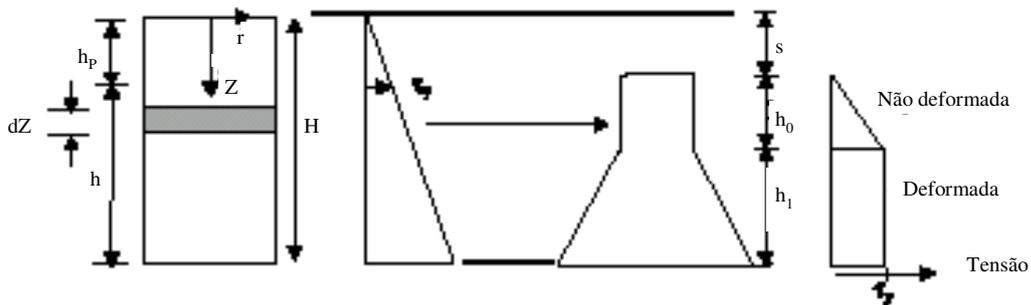


Figura 3.12: Esquema do teste de "slump", mostrando as distribuições das tensões inicial e final. (Clayton et al., 2003)

$$\tau'_y = \tau_y / (\rho g H) \tag{3.3}$$

$$s' = s / H \quad (3.4)$$

Onde:

τ'_y é a tensão de escoamento adimensional

τ_y é a tensão de escoamento do material

ρ é a densidade do material

g é a aceleração da gravidade

H é a altura total do cilindro slump

s' é a altura de slump adimensional

s é a altura de slump

Showalter e Christensen (1998) apresentam um estudo que utiliza o teste de cone "slump". Os resultados obtidos mostram uma boa correlação com aqueles obtidos por outros pesquisadores, segundo o modelo plástico de Bingham. Os dados obtidos no "mini-testes de slump" (em escala de laboratório) também apresentam boa concordância com os demais dados, segundo pode-se observar na figura 3.13.

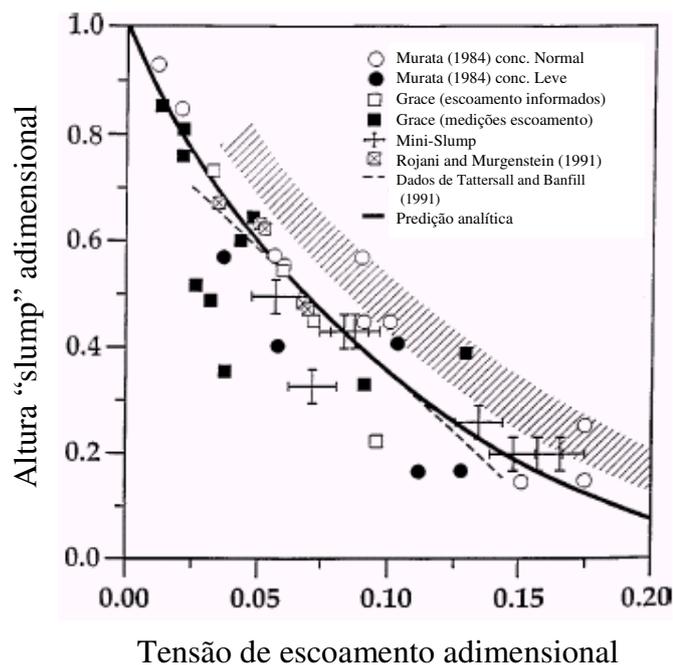


Figura 3.13: Gráfico da altura "slump" adimensional em função do valor adimensional da tensão de escoamento. (Showalter e Christensen, 1998)

Zhou et al. (1999) apresentam um estudo feito com suspensões de alumina. As amostras sólidas de alumina são caracterizadas pelos parâmetros granulométricos

mostrados na Tabela III.6. O comportamento da tensão de escoamento em relação à variação da fração volumétrica de sólidos das suspensões estudadas é apresentado na Figura 3.14. Dessa figura, observa-se o efeito da granulometria das partículas da suspensão sobre o valor crítico da concentração de sólido para o qual a tensão de escoamento cresce significativamente.

Tabela III.6: Área superficial e tamanhos volumétricos médios das partículas de alumina utilizadas para a formação das suspensões: d_n , d_s , d_v , d_{90} , d_{50} , d_{10} , d_v/d_n . (Zhou et al., 1999)

Amostra	BET (m^2/g)	d_n (μm)	d_s (μm)	d_v (μm)	d_{90} (μm)	d_{50} (μm)	d_{10} (μm)	d_v / d_n
AKP-15	3.8	0.369	0.580	0.690	0.945	0.548	0.267	1.87
AKP-20	4.3	0.208	0.401	0.558	0.761	0.332	0.147	2.68
AKP-30	6.8	0.146	0.247	0.326	0.451	0.169	0.109	2.23
AKP-50	10.5	0.135	0.185	0.250	0.391	0.140	0.107	1.85

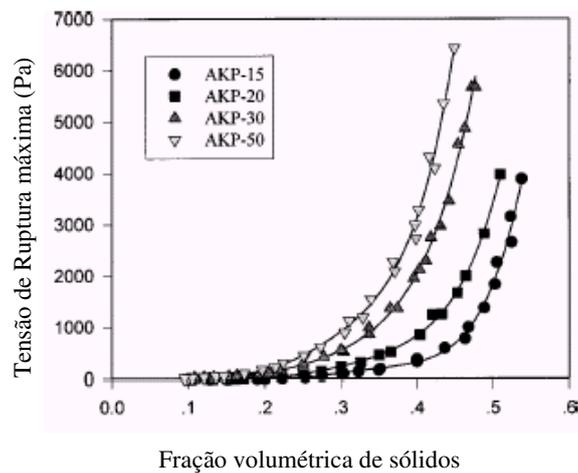


Figura 3.14: Gráfico da tensão de escoamento ou ruptura das suspensões de alumina em função da fração volumétrica de sólidos, para o pH de $8,9 \pm 0,2$. (Zhou et al., 1999)

Araujo et al. (2003) mostraram resultados dos testes de tensão de escoamento em função da concentração de sólidos na pasta, que foram realizados para amostras representativas da descarga de espessador de lamas, e que são apresentados na Figura 3.15.

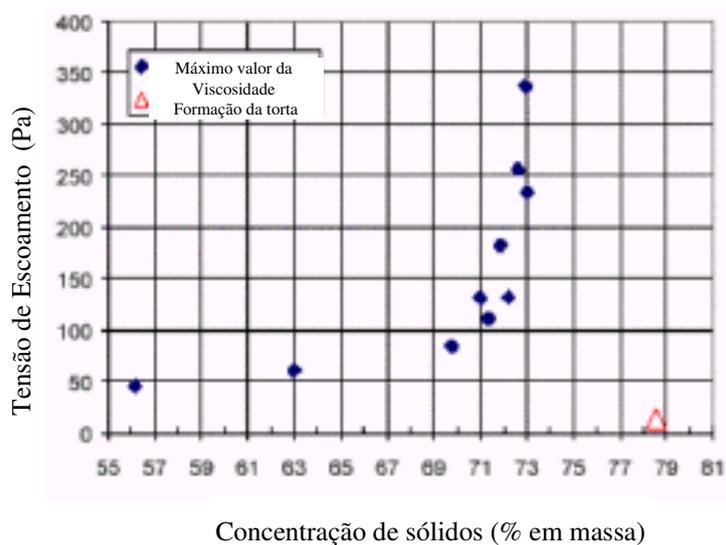


Figura 3.15: Gráfico da tensão de escoamento em função do adensamento da pasta (% de sólidos em massa). (Araujo et al., 2003)

Dessa figura pode-se observar o comportamento típico da pasta quando acontece o incremento significativo da tensão de escoamento para uma concentração de sólido de aproximadamente 70%. Acha-se também indicado como referência o ponto de formação da torta da filtragem (78% de sólidos).

3.5.3. TESTE DE CALHA (“FLUME”)

Outra importante propriedade desses sistemas quase coloidais, denominados pastas, é seu ângulo de repouso, que pode ser determinado através do teste de calha ou “flume”. Esse teste consiste em determinar o ângulo máximo possível no qual a pasta ainda mantém-se no repouso. Chambers et al. (2002) mostram para uma pasta sem excesso de água e com uma altura de "slump" de 71,12mm (2,8"), o seu comportamento frente ao teste de “flume” (Figura 3.16).



Figura 3.16: Teste de “flume” para uma pasta com "slump" de 71,12mm (2,8").
(Chambers et al., 2002)

O plano inclinado utilizado para realizar o teste de “flume” por Sofrá et al. (2002) e um diagrama esquemático do fluido estacionário no plano são apresentados na Figura 3.17.

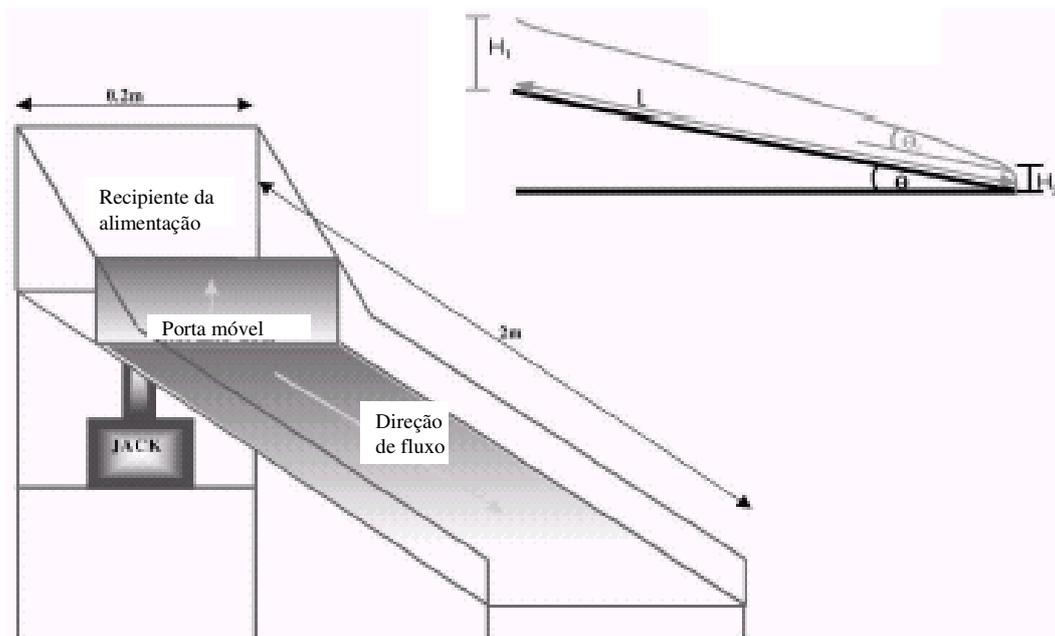


Figura 3.17: Plano inclinado e diagrama esquemático do fluido estacionário na calha.
(Sofrá et al., 2002)

Segundo a Figura 3.17, o ângulo de repouso, θ_R , fica definido pela seguinte equação:

$$\theta_R = \arctan \{(H_1 - H_2) / L\} \quad (3.5)$$

Laudriault (2002) apresenta uma comparação (Figura 3.18) entre as distintas opções de disposição de um rejeito da mineração: as características de consistência das misturas, os tipos de equipamentos requeridos para o desaguamento e transporte em cada caso, os possíveis ângulos de repouso e o incremento no volume depositado.

Dessa figura observa-se que quanto mais adensada é a polpa ou pasta, maiores ângulos de repouso são possíveis de se obter, atingindo-se, também, maiores volumes de material disposto por unidade de área superficial.

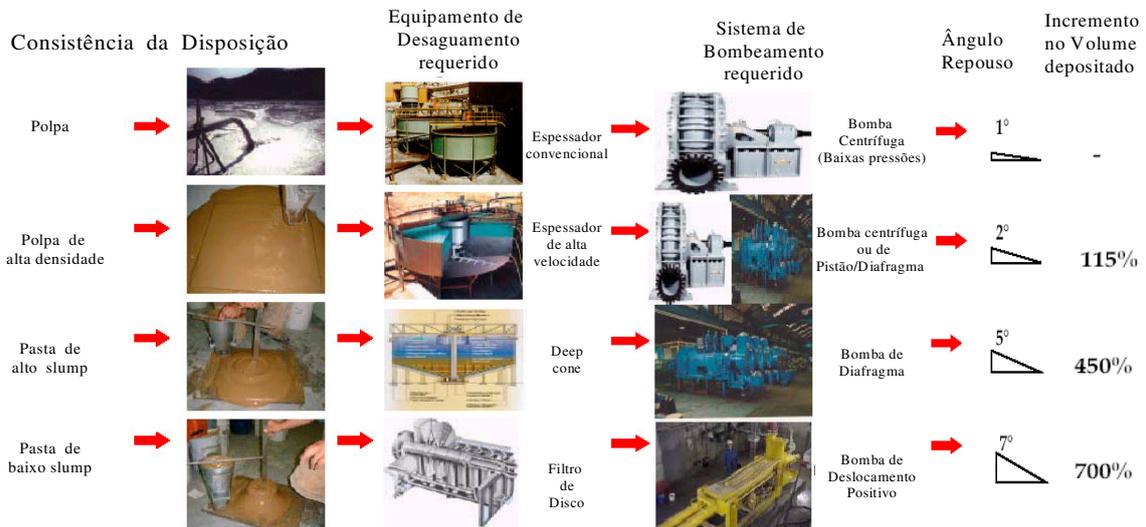


Figura 3.18: Consistência da mistura para disposição, seus correspondentes equipamentos de desaguamento e bombeamento, ângulos de repouso e incremento de volume depositado. (adaptado de Laudriault, 2002)

Chambers (2002) apresenta na Tabela III.7 uma correlação entre os valores de altura "slump" e os ângulos de repouso para diferentes misturas de sólido e líquido. Esses valores estão de acordo com aqueles mostrados no trabalho de Laudriault (2002) e indicados na Figura 3.18.

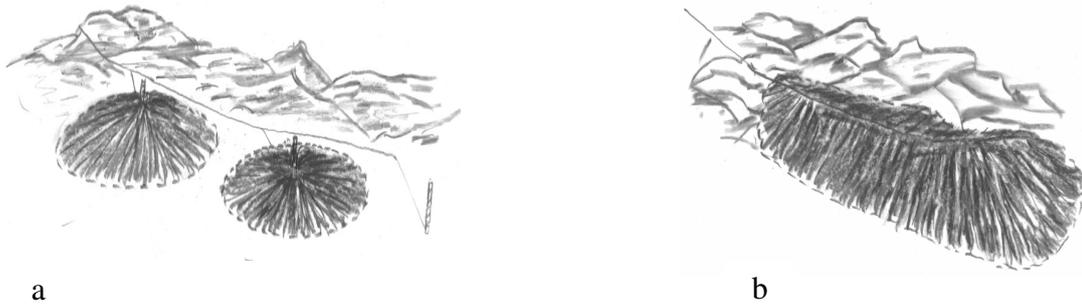
Tabela III.7: Valores de altura de "slump" e ângulo de repouso para pastas com diferentes conteúdos de sólidos. (Chambers et al., 2002)

Altura de "Slump" (mm / polegadas)	Conteúdo de sólidos (% em massa)	Ângulo de repouso (% de inclinação)
177,8 / 7	67,7	13
203,2 / 8	65,5	---
213,4 / 8,4	---	8,9
228,6 / 9	63,1	---
254 / 10	60,2	1,4

Dessa tabela pode-se ver que ao aumentar a concentração de sólidos na pasta, obtém-se menores alturas de "slump" e maiores ângulos de repouso (expressos como % de inclinação).

Segundo Robinsky (2002), o sistema de disposição de rejeitos adensados (TTD) requer mais dados do desempenho que o sistema convencional de disposição de rejeitos (emprego de barragens de rejeitos). No caso convencional, a abordagem considera que as propriedades dos rejeitos são fixadas pela planta de processos, enquanto no sistema TTD, as propriedades dos rejeitos e seu depósito são pensados para situar-se na topografia da área da disposição. O comportamento dos rejeitos em ambas abordagens é completamente diferente. No depósito convencional, os rejeitos segregam devido ao fluxo e sedimentam até ficar como um depósito plano. No sistema TTD obtém-se uma superfície inclinada. A diferença principal é que com esse novo sistema os rejeitos são espessados antes de serem descarregados para ter uma consistência boa e homogênea que resulte em um fluxo laminar sem segregação, considerando uma curta distância para a descarga. Isso permite obter um depósito com suporte mais seguro com lados inclinados, conforme mostrado na Figura 3.19 (a e b).

Robinsky (2002) mostrou que podem ser feitos testes de laboratório nos quais os rejeitos adensados pelo espessamento são descarregados em seu estado pastoso, usando diferentes densidades de sólidos pelo que obtém-se diferentes ângulos de repouso.



Figuras 3.19 a) e b): Disposições típicas para o sistema "pastefill". (Robinsky, 2002)

Na Figura 3.20 pode-se observar o gráfico do ângulo de repouso em função do conteúdo de sólidos (% em massa) para um teste feito em uma mina de ouro na Venezuela.

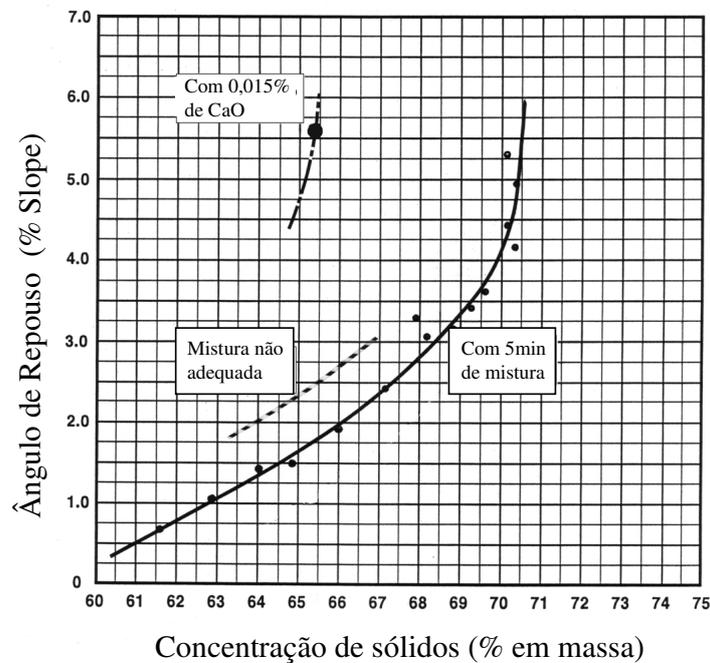


Figura 3.20: Ângulo de repouso (% de "slope") em função da % de sólidos em massa de uma pasta de rejeito de ouro na Venezuela. (Robinsky, 2002)

A Figura 3.21 apresenta o resultado de um teste realizado com rejeitos grossos e finos, mostrando a classificação dos materiais utilizados, quando espessados, em concordância com a lei de Stokes.

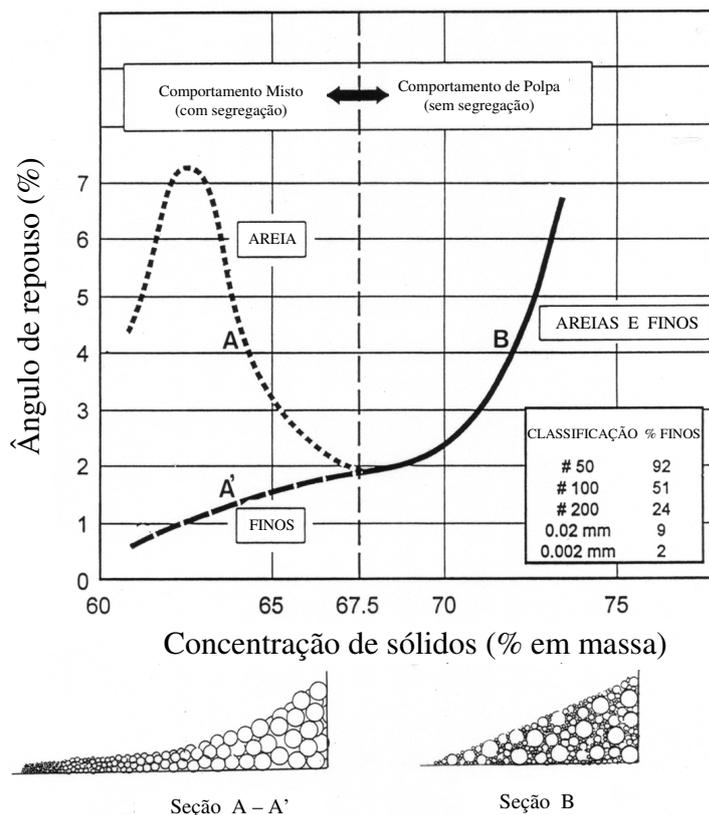


Figura 3.21: Ângulo de repouso (% de "slope") em função da % de sólidos em massa, obtidos no laboratório; observa-se também a estratificação do material. (Robinsky, 2002)

Da Figura 3.21, observa-se que a fração mais fina torna-se a matriz que leva os grossos no fluxo laminar. O fator homogeneidade é um requisito vital para o sistema TTD, embora os rejeitos de grão fino, tais como as operações de alumina, não mostrem, ao menos visualmente, esse comportamento.

Em algumas operações de disposição de rejeitos pode-se utilizar aditivos, como por exemplo cal, para mudar a condição de pH da pasta ou polpa espessada pelo espessamento, ou seja, para alterar as interações inter-partículas. O resultado é um incremento no ângulo de repouso ou % de inclinação, segundo mostra-se na Figura 3.22. Em alguns casos, esse fato pode ser utilizado para reduzir a dosagem de floculante, tamanho e/ou número de espessadores.

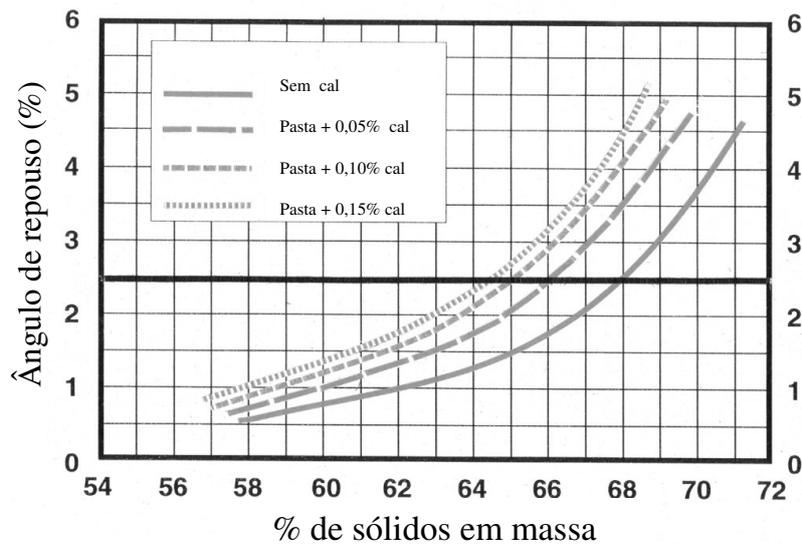


Figura 3.22: Gráfico de ângulo de repouso em função da % de sólidos em massa, para diferentes adições de cal. (Robinsky, 2002)

3.5.4. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DA PASTA

Uma característica importante a ser determinada em uma pasta mineral é sua resistência à compressão. Segundo Jung e Biswas (2002), existem muitos fatores que podem afetar a resistência, entre outros: quantidade de cimento, distribuição granulométrica do sólido, presença de agregados, efeito de aditivos, tempo de cura.

Na Tabela III.8 são mostradas as resistências de uma pasta para preenchimento após 7 e após 28 dias de cura.

Dessa tabela, observa-se que se alcança uma maior resistência ao considerar um maior tempo de cura. Além disso, um alto conteúdo de partículas finas permite obter um material denso que melhorará a resistência do "backfill" além de dar um caráter mais plástico. As partículas mais grossas proporcionam um melhor efeito de fricção entre as partículas, melhorando assim, também, sua resistência.

Tabela III.8: Resistência uniaxial compressiva para a pasta de preenchimento, após 7 e 28 dias de cura. (Jung et al., 2002)

Slump (cm)	Cimento Portland (%)	Amostra	Densidade polpa (%)	Resistência (kPa)
Dia 7				
20	3	A	79.5	377
20	3	B	79.5	457
20	6	A	79.5	1089
20	6	B	79.5	1027
20	9	A	79.5	2021
20	9	B	79.5	1587
20	9	C	79.5	1618
20	12	A	79.5	3324
20	12	B	79.5	2469
20	12	C	79.5	2570
Dia 28				
20	3	A	79.5	800
20	3	B	79.5	822
20	6	A	79.5	2228
20	6	B	79.5	2365
20	9	A	79.5	4553
20	9	B	79.5	4333
20	12	A	79.5	5646
20	12	B	79.5	4996

As amostras "C" foram utilizadas só quando as resistências das amostras A e B tenham grande variação.

Quando uma pasta é muito espessa e apresenta uma elevada densidade, pode-se dizer também que seu conteúdo de água é baixo. As vantagens das misturas ou pastas com baixo conteúdo de água são as seguintes: (Jung et al., 2002)

- redução no uso de cimento para alcançar uma determinada resistência;
- densidade resultante é mais elevada no lugar do preenchimento;
- mínima decantação de água pelo sistema de desaguamento da mina.

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.9 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 $100\% < 250\mu\text{m}$.

Tabela III.9: Resistência compressiva não confinada (UCS) do "pastefill" em MPa (Wang et al., 2002)

Amostra	No.	UCS individual	Média da UCS	% relativo controle
Controle	1	0.585	0.641	100
	2	0.654		
	3	0.683		
Pozolana 334N	1	0.771	0.767	120
	2	0.810		
	3	0.722		
MMR01	1	0.800	0.834	130
	2	0.839		
	3	0.863		

Observa-se na Tabela III.9 que a incorporação de ambos aditivos em estudo, proporcionam 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 fluidez, este aditivo mostrou um melhor desempenho em comparação com a pozolana 334N.

Sabir e colaboradores (2001) mostram o efeito positivo da adição de insumos como cinza volante e meta caulim nas pastas cimentadas, tanto para características da resistência do concreto quanto para aspectos ambientais e econômicos, 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 3.23. O efeito particular do meta caulim sobre a redução da porosidade da pasta de concreto pode ser observado na Figura 3.24.

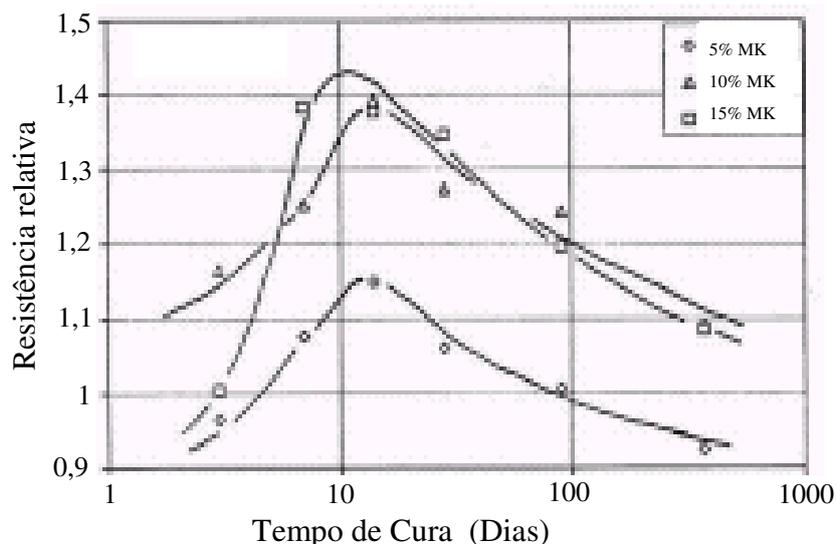


Figura 3.23: Resistência compressiva relativa da pasta de concreto em função do tempo de cura, com adições de 5, 10 e 15% de meta caulim (MK). (Sabir et al., 2001)

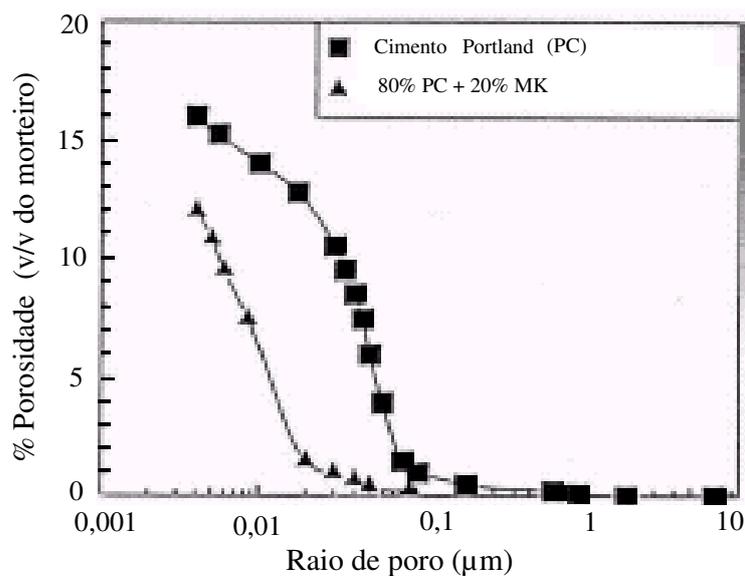


Figura 3.24: Efeito da adição de MK sobre a distribuição de poros de morteiros, considerando 100 dias de tempo de cura. (Sabir et al., 2001)

Os resultados obtidos por Salvador et al. (2000) e Gama et al. (2001) estão de acordo com os anteriormente indicados. No primeiro caso, foram obtidas resistências à compressão muito similares para concretos cimentados com 4% de PC e uma pasta cimentada com 6% de PLB (mistura de 70% pozolana e 30% cal), conforme observado na Figura 3.25.

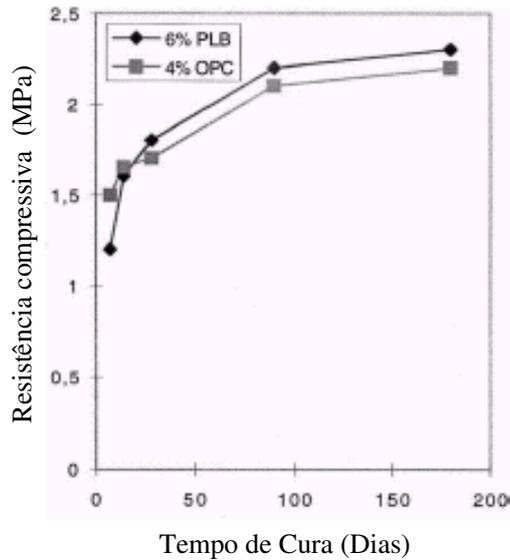


Figura 3.25: Resistência compressiva do solo argiloso em função do tempo de cura, com adições de 6% PLB e com 4% de PC. (Salvador et al., 2000)

No caso do trabalho de Gama e colaboradores (2001), já foi apresentada a tabela III.1, na qual observa-se o efeito positivo da adição do meta caulim sobre os valores do módulo de elasticidade e a resistência à tração, para o caso dos solos grossos e finos.

Segundo Thomas et al. (1979), uma característica importante das pastas usadas para preenchimento não cimentado é a coesão aparente que elas apresentam. Sem essa força de coesão, a pasta não seria capaz de realizar sua função de forma satisfatória. Entre outros fatores, essa força de coesão depende da distribuição granulométrica, forma das partículas, densidade de empacotamento. O efeito de uma maior ou menor proporção de material fino presente na pasta de preenchimento pode ser observado na Figura 3.26.

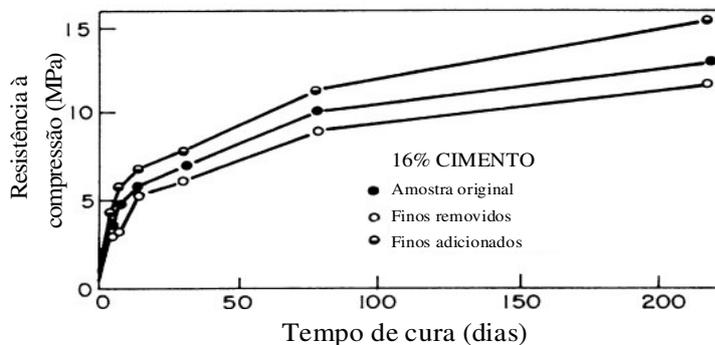


Figura 3.26: Gráfico da resistência à compressão para diferentes tempos de cura, sob o efeito da adição e remoção de material fino. (Thomas et al., 1979)

Da Figura 3.26 observa-se que a resistência é aumentada em aproximadamente 10% ao adicionar material fino (de granulometria aproximada 55% < 200# Tyler), e reduzida na mesma proporção ao baixar o conteúdo de material fino.

3.5.5. ENSAIO COMPRESSÃO - DEFORMAÇÃO

Através das típicas curvas de resistência à compressão em função da deformação, pode-se determinar o valor do módulo elástico da pasta, justamente na zona de comportamento elástico da curva, a qual é caracterizada por sua linearidade. A Figura 3.27 mostra um gráfico da resistência à compressão em função da deformação, para preenchimentos com distintas adições de cimento. (Thomas et al., 1979).

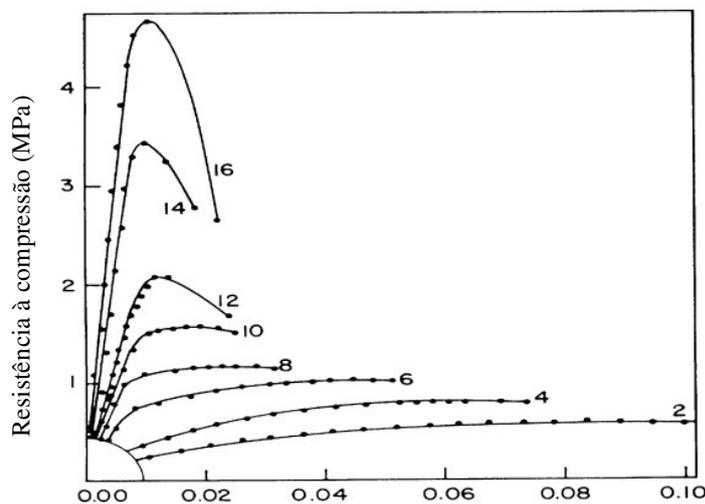


Figura 3.27: Curvas experimentais resistência à compressão – deformação para diferentes adições de cimento (2 – 16% em massa) e 7 dias de cura. (Thomas et al., 1979)

Observa-se da Figura 3.27 que para os valores mais baixos de 2 e 4% de adição de cimento, não se verifica o comportamento elástico. Para maiores adições de cimento portland, o valor da resistência à compressão do preenchimento também vai aumentando, de forma semelhante à extensão da zona elástica da curva.

A Tabela III.10 mostra valores de módulos de elasticidade obtidos por Thomas et al. (1979) para preenchimentos cimentados após 7 e 28 dias de cura.

Tabela III.10: Módulo de elasticidade para diferentes pastas cimentadas, considerando 7 e 28 dias de cura. (Thomas et al., 1979)

Conteúdo de cimento Portland (% em massa)	Módulo de elasticidade (MPa)	
	7 dias de cura	28 dias de cura
2*	$1,21 \times 10$	$2,57 \times 10$
4*	$2,48 \times 10$	$4,76 \times 10$
6	$9,10 \times 10$	$9,03 \times 10$
8	$1,39 \times 10^2$	$1,85 \times 10^2$
10	$1,67 \times 10^2$	$2,06 \times 10^2$
12	$2,06 \times 10^2$	$3,01 \times 10^2$
14	$3,94 \times 10^2$	$4,67 \times 10^2$
16	$5,58 \times 10^2$	$6,43 \times 10^2$

Nota: * não apresentam secção linear da curva tensão-deformação, pelo que os valores de módulo de elasticidade foram apenas estimados.

Da Tabela III.10 pode-se observar que o módulo elástico cresce, quase na totalidade dos dados, com o tempo de cura, de maneira semelhante à resistência à compressão, segundo mostram as Figuras 3.25 e 3.26.

3.5.6. PERMEABILIDADE DO "PASTEFILL"

A permeabilidade é outra importante característica dos preenchimentos cimentados, mesmo considerando-se a dificuldade de avaliação experimental existente. Os dados disponíveis na literatura são muito escassos, sendo normalmente aceito que um valor de taxa de percolação de 100mm/h seria adequado para a maioria das situações.

Uma das metodologias para estimar a taxa de percolação foi proposta por Thomas no ano 1969. A base desta técnica considera duas propriedades do meio poroso:

- a) ϵ_{\min} : porosidade mínima para a qual a amostra de preenchimento pode ser reduzida por uma vibração estendida e substancialmente forte.
- b) d_{10} : 10% mais fino do tamanho da distribuição granulométrica do sólido.

Portanto, o valor de ϵ_{\min} é o único parâmetro que descreve a distribuição de tamanho das partículas (em uma base relativa) e a forma das partículas, ou seja, ela dá uma idéia da tortuosidade do meio poroso. O valor de d_{10} é um simples descritor do

tamanho absoluto dos canais de fluxo, e esse fluxo é controlado provavelmente pelo mesmo meio poroso, o que revela a importância das partículas finas nessa função.

A permeabilidade mínima é definida então pelo menor valor da porosidade, ϵ , sendo expressa pela seguinte equação matemática:

$$K_{\min} = \epsilon^3 / (1 + \epsilon) \quad (3.6)$$

A Figura 3.28 mostra o resultado da técnica de Thomas ao apresentar o gráfico da permeabilidade mínima, K_{\min} (em escala logarítmica), em função do produto da porosidade mínima, ϵ_{\min} , pelo tamanho d_{10} .

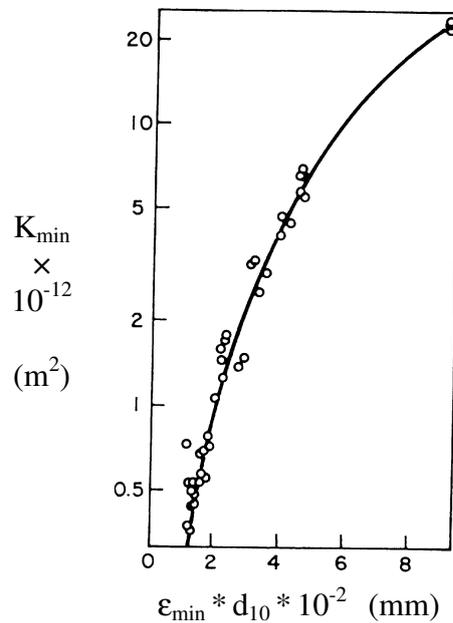


Figura 3.28: Gráfico da permeabilidade mínima, K_{\min} (em escala logarítmica) em função do produto da porosidade pelo tamanho d_{10} em mm. (Thomas et al., 1979)

No caso dos preenchimentos hidráulicos cimentados, tem-se que a adição de cimento portland reduz fortemente a permeabilidade do meio. A Tabela III.11 apresenta valores de permeabilidade relativa obtidos ao adicionar de 4 até 16% em massa de cimento. É importante indicar que os valores da porosidade foram alcançados ao utilizar tensões de compactação constantes para o preenchimento.

Tabela III.11: Valores da permeabilidade relativa de preenchimentos hidráulicos cimentados. (Thomas et al., 1979)

Conteúdo de cimento (% em massa)	Porosidade	Permeabilidade relativa (%)
0	0,689	100
4	0,664	25,4
8	0,644	10,1
12	0,646	5,03
16	0,603	2,43

Mais recentemente, Gomes e colaboradores (2003) apresentam uma classificação relativa ao grau de permeabilidade dos concretos, utilizando o equipamento para medir permeabilidade de Germann (GWT). Essa classificação é mostrada pela Tabela III.12.

Tabela III.12: Classificação standard de concretos segundo o teste de permeabilidade (usando equipamento GWT) e de acordo ao fluxo de água passante. (Gomes et al., 2003)

Item	Fluxo de água (mm/s)	Categoria
1	$\geq 1,0 \times 10^{-3}$	Permeabilidade alta
2	$1,0 \times 10^{-3}$ a $1,0 \times 10^{-4}$	Permeabilidade média
3	$1,0 \times 10^{-5}$ a $1,0 \times 10^{-6}$	Permeabilidade baixa
4	$1,0 \times 10^{-6}$ a $1,0 \times 10^{-7}$	Impermeabilidade alta
5	$1,0 \times 10^{-7}$ a $1,0 \times 10^{-9}$	Impermeabilidade muito alta

Gomes et al. (2003) determinaram que a dependência da idade do concreto e de sua resistência à compressão são inversas ao fluxo de água passante sob pressão, nos testes de permeabilidade, segundo pode ser observado nas Figuras 3.29 e 3.30, para dois tipos de concretos (bombeado e comum).

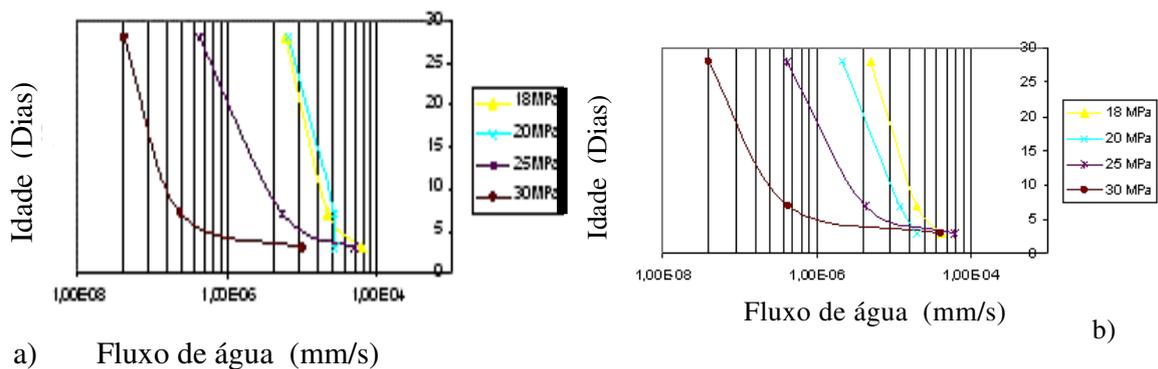


Figura 3.29: Gráfico da idade do concreto em função do fluxo de água passante (permeabilidade) para: a) concreto bombeado, e b) concreto comum. (Gomes et al., 2003)

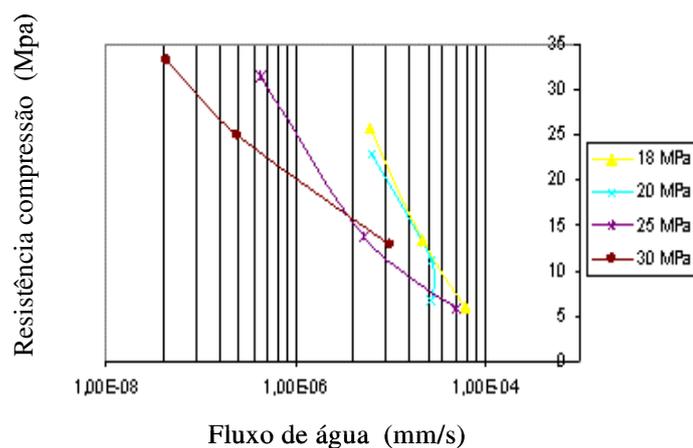


Figura 3.30: Gráfico da resistência à compressão do concreto bombeado em função do fluxo de água passante (permeabilidade). (Gomes et al., 2003)

3.6 OUTRAS CARACTERISTICAS DAS PASTAS

3.6.1. EFEITO DAS VIBRAÇÕES MECÂNICAS

Deysarkar e Turner (1981) fizeram medições reológicas para determinar o comportamento de uma pasta mineral preparada com um minério de ferro, com uma concentração de sólidos de 84% (16% em massa de água), que estava fluindo por um tubo vibrado mecanicamente. A faixa de frequência cíclica utilizada foi 15 – 30Hz e da amplitude máxima entre os picos 0,508 – 1,270mm.

As vibrações mecânicas têm a propriedade de "fazer mais líquidas" as pastas.

Supondo-se que não existe deslizamento da pasta nas paredes do tubo vibrado, então a viscosidade calculada para qualquer diâmetro do tubo pode-se correlacionar com a aceleração cíclica, A_w^2 . Na Figura 3.31 mostra-se o gráfico da viscosidade aparente, η_w , em função do fator, A_f^2/D^3 , onde A_f é a medida do pico da aceleração cíclica em $(\text{Hz})^2$ e D é o diâmetro do tubo.

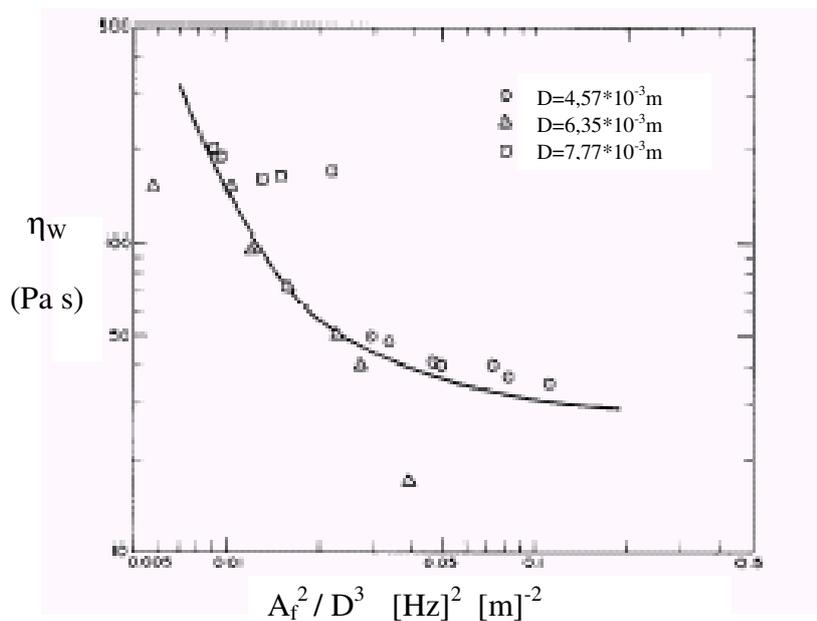


Figura 3.31: Viscosidade aparente, η_w , em função do fator A_f^2/D^3 . (Deysarkar et al., 1981)

Da Figura 3.31 pode-se observar que a dependência inversa da viscosidade como uma função do diâmetro do tubo poderia ser uma consequência da dificuldade que a onda vibratória tem de ser transmitida da parede do tubo à pasta ou através da mesma pasta.

Agora sob a suposição que, se existe deslizamento entre a pasta e as paredes do tubo, tem-se que as vibrações teriam dificuldade para transmitir-se através das paredes ao corpo da pasta, e portanto, ela apresenta menor probabilidade de influenciar suas propriedades reológicas. Ou seja, a pasta tenderia a um comportamento similar a uma barra sólida.

Além do anterior, o uso de diferentes aparelhos mostrou um comportamento distinto nas pastas que foram sujeitas a vibração mecânica.

3.7. ASPECTOS ECONÔMICOS

Segundo Jung et al. (2002), para a maioria das usinas mineiras, as análises de custos de um sistema de preenchimento depende dos custos de investimento e de operação. Além disso, muitas combinações de materiais devem ser avaliadas para ambos tipos de custos. O custo de investimento de um sistema de preenchimento depende de como seja o projeto do "pastefill". O maior custo, nesse caso, é relacionado com o bombeamento e instalações de mistura. O maior custo de operação será o cimento, como mostra a Tabela III.13. Para o desenvolvimento de um novo sistema de preenchimento com pasta, devem ser avaliados em detalhe os custos de investimento e de operação.

Tabela III.13: Porcentagens típicas dos custos operacionais do sistema "backfill". (Jung et al., 2002)

Descrição	Custo total	Custo preenchimento/t	Custo minério/t
- Tarefa:			
Manutenção/hora	6%	6%	6%
Operação/hora	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%

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1. AMOSTRAS MINERAIS

Para alcançar os objetivos planejados, foram estudadas e caracterizadas as amostras dos rejeitos e/ou lamas provenientes de duas das usinas de minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais: Mutuca – MBR e Mineração Casa de Pedra – CSN. Foram caracterizados tanto os componentes sólidos quanto as pastas formadas com adição da água industrial correspondente em cada caso.

Foram utilizados nos testes de resistência mecânica das pastas, cimento portland de alta pureza (CP-05), meta caulim (MK) que foi preparado previamente peneirando e calcinado a 650°C e CaO desidratada.

4.2. CARACTERIZAÇÃO DO SÓLIDO

Para a caracterização do componente sólido das amostras em estudo, foram utilizadas técnicas e equipamentos que são apresentados na Tabela IV.1.

Tabela IV.1: Técnicas e equipamentos requeridos para determinação de características e propriedades do componente sólido das pastas.

Propriedade	Técnica utilizada	Equipamento(s) requerido(s)
Densidade	Picnometria	- Picnômetro simples - Picnômetro a hélio
Granulometria	Peneiramento e classificação centrífuga	- Peneiras de laboratório - Cyclosizer
Composição química	- Fluorescência de raios X (FRX) - Absorção atômica	- Espectrômetro de raios X dispersivo (WDS) - Espectrofotômetro de absorção atômica
Composição mineralógica	- Difração de raios X (DRX) - Espectrometria de Infra Vermelha (EIV) - Emissão de raios X - Microscopia ótica - Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	- Espectrômetro de raios X - Espectrômetro de luz infra-vermelha - Micro-sonda eletrônica - Microscópio ótico - Microscópio eletrônico de varredura (MEV)
Área superficial específica	- Adsorção de nitrogênio (BET) - Método de Blaine (Permeabilidade ao ar)	- Sistema automático de determinação de ASE e porosidade de pós (BET) - Aparelho de Blaine
Potencial zeta	Microeletroforese (para mobilidade eletroforética)	- Célula de laboratório para microeletroforese

Para a obtenção dos sólidos a partir das polpas industriais, foi realizada filtragem e secagem no Laboratório de Tratamento de Minérios do Departamento de Engenharia de Minas da UFMG. Posteriormente, foram obtidas amostras representativas para determinação de algumas propriedades físicas e químicas deste componente sólido das pastas minerais, de modo que foi caracterizado de forma física, química, mineralógica.

4.2.1.- COMPOSIÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA DO SÓLIDO

Para a determinação da composição química dos componentes das amostras do sólido em estudo, foram utilizadas as seguintes técnicas e equipamentos:

- Absorção atômica (quantitativa), espectrofotômetro de AA, modelo A-Analyst 200.
- Fluorescência de raios X (qualitativa), espectrômetro de raios X modelo PW3710 – Phillips.

No caso da determinação da composição mineralógica dos componentes das amostras do sólido em estudo, foram empregadas as seguintes técnicas:

- Observação microscópica ótica e MEV (qualitativas), microscópio eletrônico de varredura, modelo JSM 5410 – Jeol.
- Espectroscopia de Infravermelho (qualitativa), espectrômetro de luz infravermelha, modelo PE 735 – Perkin Elmer.
- Difração de raios X (qualitativa), Espectrômetro de raios X, modelo PW3710 – Phillips.

4.2.2.- DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO SÓLIDO

Por tratar-se de amostras de rejeito fino e lama de minério de ferro, o estudo de sua distribuição granulométrica foi feito considerando apenas as peneiras mais finas e o Cyclosizer Warman, mostrado pela Figura 4.1.

Também foi utilizado o granulômetro Sympatec - Helos para a obtenção das curvas de distribuição granulométrica das amostras sólidas. Nesse caso, foi preparada uma suspensão de no máximo 20% de sólidos em massa, que era desagregada usando ultrassom. Posteriormente, a suspensão já dispersada era colocada no granulômetro que entrega os resultados já prontos mediante o uso do software correspondente.

Para o presente estudo foram utilizados o Cyclosizer do Laboratório de Tratamento de Minérios e o granulômetro Sympatec - Helos do Laboratório de Fenômenos de Interface do Departamento de Engenharia de Minas da UFMG.



Figura 4.1: Cyclosizer Warman de laboratório. (www.weirminerals.com)

4.2.3.- MASSA ESPECÍFICA E ÁREA SUPERFICIAL ESPECÍFICA

A determinação da massa específica do material sólido foi realizada por meio da picnometria simples e a gás (hélio). A Figura 4.2 apresenta uma fotografia de picnômetros de uso normal no laboratório.



Figura 4.2: Picnômetros de laboratório. (www.particletechlabs.com)

No caso da determinação da área superficial específica ou ASE do material sólido em estudo, foram utilizados o método Blaine, que baseia-se na resistência que um fluxo de ar apresenta ao passar por um leito poroso é o método de BET, que utiliza adsorção de nitrogênio na superfície sólida.

O aparelho de Blaine é apresentado de forma esquemática na Figura 4.3.

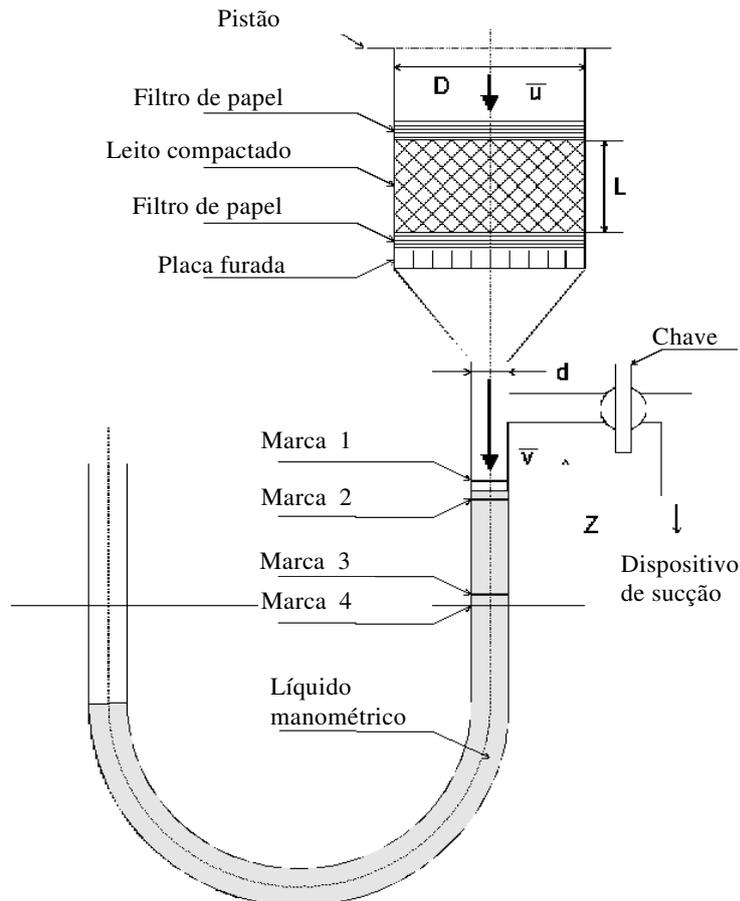


Figura 4.3: Aparelho de Blaine para determinação da ASE . (www.vt1.tu-harburg.de)

O procedimento utilizado foi aquele apresentado na Norma NBR NM 76, utilizada usualmente para determinação da finura do cimento portland. A equação básica para a determinação é mostrada abaixo:

$$ASE = K / \rho \times \epsilon^{3/2} / (1+\epsilon) \times (t / 0,1\eta)^{1/2} \quad (3.7)$$

O permeabilímetro utilizado é um aparelho construído segundo as especificações da norma NBR NM 76, do Laboratório de Fenômenos de Interface do Departamento de Engenharia de Minas da UFMG.

As amostras caracterizadas através da metodologia Blaine foram as chamadas amostras puras e também aquelas denominadas misturas das amostras puras, de forma a verificar a correlação esperada segundo as granulometrias das amostras.

A Figura 4.4 mostra uma unidade de adsorção de nitrogênio BET, como a utilizada nesse estudo (Laboratório de Hidrometalurgia do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG).



Figura 4.4: Unidade Tristar Nitrogen Adsorption. (www.particletechlabs.com)

Na tabela IV.2 apresentam-se os métodos e equipamentos requeridos para a caracterização de pastas minerais.

Dentre as técnicas e equipamentos indicados na tabela IV.2, para caracterização das pastas minerais, os mais importantes para o estudo proposto são apresentados em detalhe a seguir. Nesse caso, inclui-se viscosímetro, calha para o teste de “flume”, cilindro e cone de “slump”, prensa hidráulica para testes mecânicos e permeabilímetros a água.

Tabela IV.2: Técnicas e equipamentos requeridos para determinação de características e propriedades das pastas de rejeitos.

Propriedade	Técnica utilizada	Equipamento(s) requerido(s)
Estrutura microscópica	- Microscopia ótica - Microscopia eletrônica de varredura	- Microscópio ótico - MEV
Adensamento da pasta	- Pesagem de sólido e líquido - Medição direta de % sólidos	- Balança de laboratório - Balança Marcy
Viscosidade	- Viscosimetria	- Viscosímetro Brookfield com interface ao computador
Consistência e fluidez da pasta	Teste de calha (“flume”)	- Plano inclinado (ângulo de repouso)
Consistência e fluidez da pasta	Teste de “slump”	- Cone slump - Cilindro slump
Resistência a compressão	Ensaio de compressão	- Máquina MTS
Módulo elástico	Ensaio de compressão	- Máquina MTS
Permeabilidade (Taxa de percolação)	- Teste de permeabilidade a água	- Aparelho de Germann para determinação da permeabilidade a água (GWT).

4.3. CARACTERIZAÇÃO DAS PASTAS MINERAIS

4.3.1. MEDIÇÃO DA VISCOSIDADE

A Figura 4.5 mostra um viscosímetro digital Brookfield, modelo DV-III, semelhante ao utilizado nos testes considerados neste estudo. O viscosímetro utilizado foi Brookfield modelo DV-III do Laboratório de Fenômenos de Interface do Departamento de Engenharia de Minas da UFMG, que dispõe de interface para computador. Através do software rheocalc foi possível a coleta de dados reológicos.



Figura 4.5: Viscosímetro Brookfield, modelo DV - III. (www.brookfieldengineering.com)

Mediante a utilização do Viscosímetro Brookfield modelo DV-III, foi possível estudar o comportamento reológico das diferentes pastas minerais, ou seja, realizando testes com crescentes velocidades de rotação da haste ou “spindle” até alcançar um valor máximo e logo retornar ao ponto inicial, se determinou se o sistema de “pastefill” comporta-se em forma tixo ou reotrópica. Também, foram utilizados aqueles testes que medem a viscosidade conforme transcorre o tempo, para um valor fixo da rotação da haste. Foi preciso o uso das hastes ou “spindles” LV-3 e LV-4, que permitem registrar maiores valores da viscosidade.

4.3.2. TESTE DE CALHA (“FLUME”)

Uma calha foi construída para a realização dos testes de “flume”, constituída de material em acrílico com 100cm de comprimento, 20cm de largura e 20cm de altura. A Figura 4.6 mostra uma fotografia do aparelho especialmente construído para esta finalidade.



Figura 4.6: Fotografias da calha construída em acrílico. Vista: a) isométrica; b) superior.

4.3.3. TESTE DE “SLUMP”

Os testes de “slump” foram realizados considerando-se uma norma NBR NM67, utilizando-se nesse caso cilindro de PVC de 10cm de diâmetro e 10cm de altura. Também foi usado o cone “slump” em escala piloto de dimensões: 10cm de raio superior, 20cm de raio inferior e 30 cm de altura. Foram estudadas as três amostras

básicas mais aquelas outras três correspondentes às misturas, conhecidas como amostras IV, V e VI.

Na Figura 4.7 são mostradas fotografias dos testes de cilindro “slump” para uma pasta de 72,5% em sólidos.



Figura 4.7: Testes preliminares de cilindro "slump" com pasta de 72,5% de sólidos.

4.3.4. ENSAIOS MECÂNICOS

Dentre os ensaios mecânicos indicados na Tabela IV.2, os mais importantes para este estudo correspondem aos ensaios de compressão, que foram feitos tanto no caso das pastas cimentadas com CP quanto com MK. Dentre os equipamentos mais utilizados para realizar esse tipo de ensaio estão as máquinas MTS e Instron, a qual é mostrada na Figura 4.8. Este tipo de máquina é um equipamento muito versátil que permite ensaiar uma grande variedade de materiais, tais como metais, cerâmicos, plásticos, material particulado, misturas de cimentos, etc., e considerando, além disso, diferentes tipos de ensaio como tração, compressão, “creep” (frio ou quente), dentre muitos outros. Neste estudo foram utilizadas as máquinas EMIC e MTS do Laboratório de Concretos do Departamento de Construção Civil e Materiais da UFMG.

Os testes mecânicos considerados neste trabalho para a caracterização dos sistemas de pastas minerais, foram aplicados às amostras puras de cimento portland

(CP-05), “pastefill” puro, “pastefill” cimentado com CP-05, “pastefill” cimentado com meta caulim (MK), “pastefill” cimentado com uma mistura de 95% MK e 5% CaO (Gama, 2004). Foram consideradas inicialmente as dosagens de 4 e 8% em massa do componente ligante, segundo as informações tiradas das referências consultadas. Para a fabricação dos corpos de prova foi considerado como ponto de consistência ótimo aquele definido pelo abatimento de 50% no teste de cone de “slump”.



Figura 4.8: Máquina Instron utilizada nos ensaios mecânicos. (www.instron.com)

4.3.5. TESTES DE PERMEABILIDADE DE ÁGUA

Para a determinação da permeabilidade dos corpos de prova das pastas consideradas no presente estudo, foi utilizado o aparelho de Germann para determinação do fluxo de água que passa através da pasta cimentada (GWT). Este aparelho é mostrado na Figura 4.9.



Figura 4.9: Aparelho de Germann para determinação do fluxo de água que passa através da pasta cimentada (GWT). (Gomes et al., 2003)

Para fazer medidas comparativas de fluxo de água, q , pode ser usada a seguinte equação:

$$q = \frac{B (g_1 - g_2)}{A t} \quad (4.1)$$

Onde a área B é equivalente a $78,54\text{mm}^2$ para um diâmetro do pin do micrômetro igual a 10mm , a área A é equivalente a 3019mm^2 (diâmetro de 62mm). Desta forma, a equação 3.8 pode ser reduzida à seguinte expressão:

$$q = 0,026 \times (g_1 - g_2) / t \quad (4.2)$$

Mediante a aplicação da Lei de Darcy, o coeficiente da permeabilidade do material, C_{cp} , pode ser expresso segundo a equação 3.10 a seguir:

$$C_{cp} = q / (b \times (\Delta P / L')) \quad (4.3)$$

C_{cp} fica expresso nas unidades de mm/s .

Na preparação dos corpos de prova, foram utilizadas formas de moldagem de $15 \times 15\text{cm}$ com uma altura que permita obter “pastefill” cimentados de no mínimo 2cm . Nesse caso foram construídos em madeira, e sua forma pode ser vista na Figura 4.10.



Figura 4.10: Fotografias mostrando: a) corpo de prova; b) forma de moldagem.

No caso da técnica de permeabilidade de Karsten, são apresentados na Figura 4.11, os corpos de prova e os tubos graduados utilizados para a determinação da permeabilidade à passagem de água.



a



b

Figura 4.11: Fotografias: a) do corpo de prova; b) tubo graduado colado no corpo de prova, necessário para as medições da permeabilidade de água.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS SÓLIDAS

5.1.1. DENSIDADE DAS AMOSTRAS SÓLIDAS

Os valores de densidade das amostras sólidas, que são a base deste estudo, podem ser conferidos na Tabela V.1, a seguir:

Tabela V.1: Densidades obtidas através de picnometria simples e a gás expressas em (g/cm³)

Nome da amostra	Origem/Características	Densidade (g/cm ³) (PS)*	Densidade (g/cm ³) (PG)**	Densidade Média (g/cm ³)
Amostra I	Mutuca-MBR/Mistura de rejeito SM*** e lama de Fe	4,295	4,530	4,413
Amostra II	Casa de Pedra-CSN/Lama da ciclonagem secundária	3,550	3,760	3,655
Amostra III	Casa de Pedra-CSN/Rejeito de flotação	3,320	3,300	3,310

(*) PS – Picnometria simples; (**) PG – Picnometria à gás; (***) SM - Processo de separação magnética.

Ao comparar os valores obtidos mediante a aplicação de ambas técnicas de picnometria, são observadas diferenças que atingem erros relativos menores a 6% para as três amostras, indicando uma boa correlação dos resultados.

5.1.2. DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS AMOSTRAS SÓLIDAS

Para determinar as distribuições granulométricas das amostras sólidas consideradas bases do presente estudo, foram consideradas as metodologias de classificação em peneiras de laboratório, classificação centrífuga mediante o uso do Ciclosizer e também utilizando o método de difração de laser através do granulômetro Helos – Sympatec.

As distribuições granulométricas das três amostras estudadas, obtidas mediante esse granulômetro, são apresentadas na Figura 5.1, a seguir:

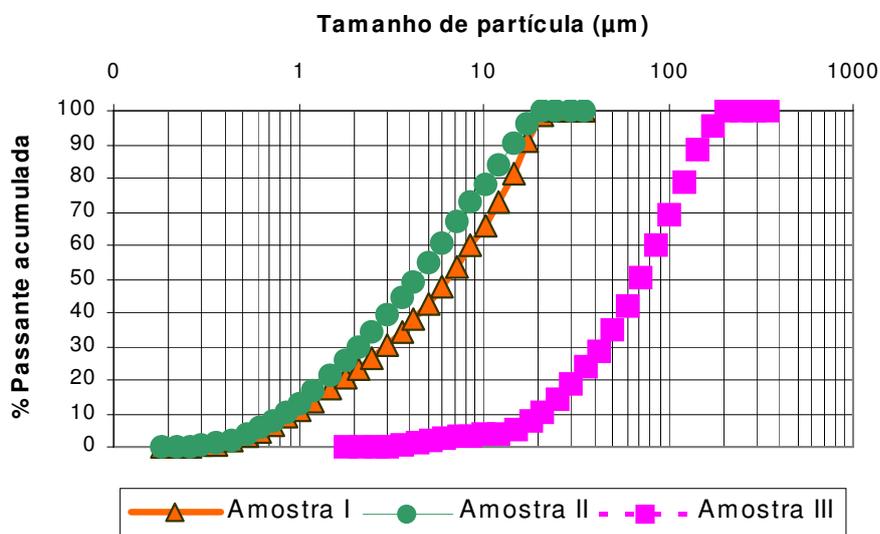


Figura 5.1: Distribuições granulométricas das amostras sólidas obtidas mediante granulômetro Symptec.

Essa análise via granulômetro Sympatec também fornece os parâmetros de alguns tamanhos típicos que caracterizam uma determinada distribuição granulométrica. Neste caso são apresentados na Tabela V.2 os tamanhos d_{10} , d_{50} e d_{90} expressos em μm para as três amostras sólidas. Estes valores representam o tamanho de partícula para o qual tem-se uma fração de material passante de 10, 50 e 90% respectivamente.

Tabela V.2: Tamanhos d_{10} , d_{50} e d_{90} das amostras sólidas estudadas

Nome da amostra	Origem/Características	d_{10} (μm)	d_{50} (μm)	d_{90} (μm)
Amostra I	Mutuca-MBR/Mistura de rejeito da SM e lama de Fe	0,94	6,44	17,10
Amostra II	Casa de Pedra-CSN/Lama da cicloneagem secundária	0,84	4,34	14,52
Amostra III	Casa de Pedra-CSN/Rejeito de flotação	20,72	71,54	152,59

Da Tabela V.2 observa-se que as duas primeiras amostras apresentam uma distribuição de tamanho de partículas muito fina, como esperado já que são compostas

de lamas e ultrafinos. Já a amostra III é muito mais grosseira, fato que pode ser observado por meio dos parâmetros fornecidos.

Se este resultado é comparado com os outros obtidos através de uso do Cyclosizer e peneiras de laboratório, obtém-se uma boa concordância, o que pode ser apreciado ao observar tanto as Tabelas V.3 - a, b e c, quanto a Figura 5.2, a qual mostra o resultado das três técnicas usadas para caracterizar a amostra II.

Tabela V.3 - a: Distribuições granulométricas obtidas pela análise Sympatec

Amostra I		Amostra II		Amostra III	
d (µm)*	F ₃ (%)**	d (µm)	F ₃ (%)	d (µm)	F ₃ (%)
0,18	0,00	0,18	0,00	1,80	0,00
0,22	0,00	0,22	0,00	2,20	0,00
0,26	0,10	0,26	0,08	2,60	0,00
0,30	0,34	0,30	0,34	3,00	0,15
0,36	0,89	0,36	0,97	3,60	0,54
0,44	1,89	0,44	2,14	4,40	1,20
0,52	3,09	0,52	3,56	5,20	1,88
0,62	4,73	0,62	5,55	6,20	2,62
0,74	6,76	0,74	8,03	7,40	3,22
0,86	8,74	0,86	10,47	8,60	3,54
1,00	10,89	1,00	13,17	10,00	3,72
1,20	13,67	1,20	16,72	12,00	4,06
1,50	17,33	1,50	21,51	15,00	5,34
1,80	20,54	1,80	25,83	18,00	7,57
2,10	23,38	2,10	29,73	21,00	10,25
2,50	26,68	2,50	34,30	25,00	13,95
3,00	30,27	3,00	39,19	30,00	18,54
3,60	34,15	3,60	44,33	36,00	23,76
4,20	37,80	4,20	49,01	42,00	28,57
5,00	42,44	5,00	54,62	50,00	34,54
6,00	47,85	6,00	60,69	60,00	41,78
7,20	53,74	7,20	66,84	72,00	50,32
8,60	59,74	8,60	72,70	86,00	59,72
10,20	65,79	10,20	78,15	102,00	69,19
12,20	72,94	12,20	83,96	122,00	79,01
14,60	81,59	14,60	90,22	146,00	88,23
17,40	91,03	17,40	96,24	174,00	95,75
20,60	98,43	20,60	100,00	206,00	100,00
24,60	100,00	24,60	100,00	246,00	100,00
29,40	100,00	29,40	100,00	294,00	100,00
35,00	100,00	35,00	100,00	350,00	100,00

(*) d – tamanho de partícula; (**) F₃ – % acumulada passante

Tabela V.3 - b: Distribuições granulométricas obtidas mediante classificação centrífuga

Amostra I		Amostra II		Amostra III	
d (µm)	F ₃ (%)	d (µm)	F ₃ (%)	D (µm)	F ₃ (%)
8	51,5	8	64,8	8	1,8
10	55,7	10	69,5	10	3,0
14,4	68,9	14,4	80,7	14,4	4,0
20	87,3	20	89,9	20	11,0
28	93,7	28	96,5	28	22,0

Tabela V.3 - c: Distribuições granulométricas obtidas através do peneiramento

Amostra I		Amostra II		Amostra III	
d (µm)	F ₃ (%)	d (µm)	F ₃ (%)	D (µm)	F ₃ (%)
74	99,000	74	99,900	360	99,944
56	97,880	56	99,110	255	99,327
37	94,710	37	98,030	181	94,694
-----	-----	-----	-----	128	84,983
-----	-----	-----	-----	91	66,432
-----	-----	-----	-----	64	53,742
-----	-----	-----	-----	49	40,83
-----	-----	-----	-----	41	33,764

Ao observar a Figura 5.2, se pode visualizar que tanto a classificação centrífuga quanto o peneiramento fornecem uma distribuição de tamanho de partículas mais grosseira que a exibida pela análise do granulômetro Sympatec. Provavelmente, isso pode ser explicado pelas limitações das primeiras técnicas quando se está em presença de um material de granulometria muito fina, como é o caso certamente da amostra II.

No caso da amostra III, que apresenta uma granulometria mais grosseira, tem-se que as curvas de distribuição de tamanho de partículas, obtidas através dessas diferentes técnicas, são bem mais próximas de acordo com a Figura 5.3.

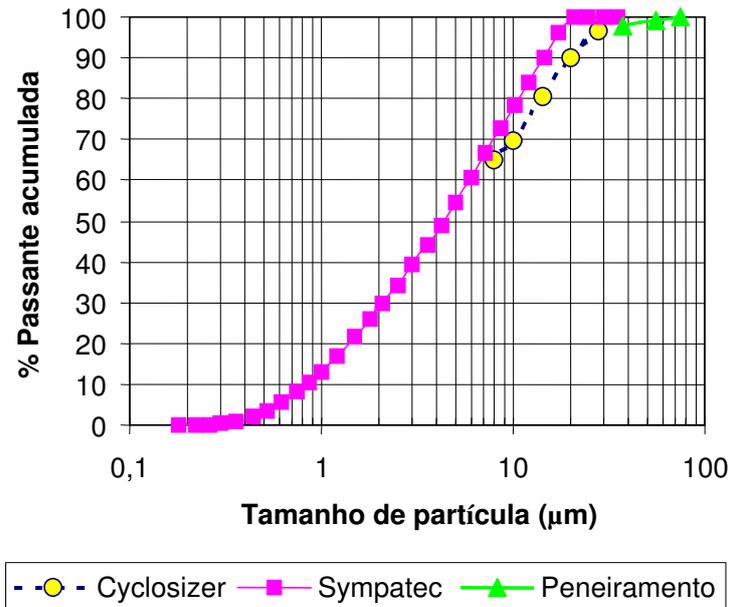


Figura 5.2: Distribuições granulométricas da amostra II, obtidas por classificação centrífuga, Sympatec e peneiramento.

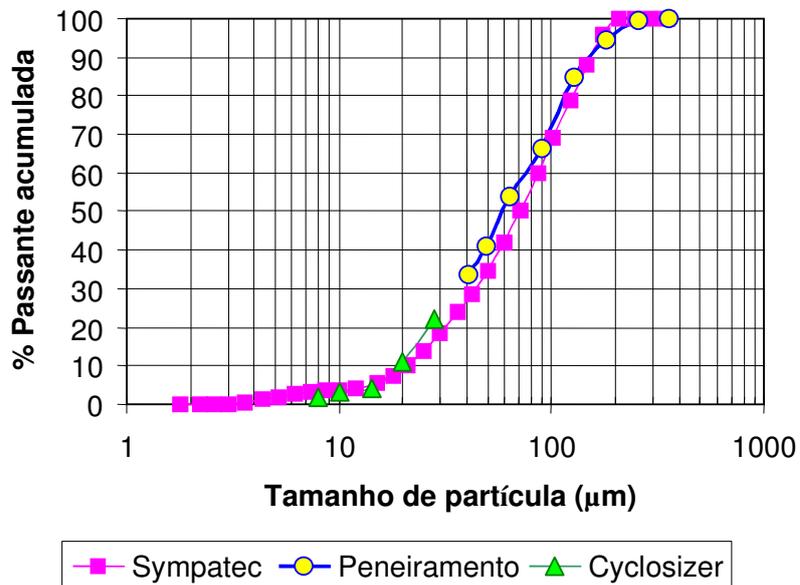


Figura 5.3: Distribuições granulométricas da amostra III, obtidas por classificação centrífuga (Cyclosizer), Sympatec e peneiramento.

Da Figura 5.3 e dos valores obtidos em cada uma das distribuições, pode-se observar que a máxima dispersão dos tamanhos típicos como d_{10} , d_{50} e d_{90} não supera a barreira de 15% para a amostra III. No caso da amostra II, as dispersões podem

alcançar valores de até 27%, como é o caso do parâmetro d_{90} predito pelo granulômetro Sympatec e pelo Cyclosizer (ver Figura 5.2).

5.1.3. COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS AMOSTRAS SÓLIDAS

Os espectros de FRX, apresentados no Anexo I deste trabalho, indicam:

- Amostra I: presença do elemento ferro como principal componente da amostra, ao ser utilizado o cristal LiF200. Foram determinados como elementos importantes o silício e o alumínio, isto com o uso dos cristais de liga InSb e do orgânico PE. O uso do cristal PX-1 revelou uma baixa participação do elemento oxigênio e, secundariamente de Mg. Os elementos presentes em quantidades muito pequenas, como o caso do enxofre e fósforo, foram detectados com a ajuda do cristal de liga InSb e do cristal de Ge.

- Amostra II: presença do elemento ferro como principal componente da amostra, e uma presença importante do elemento manganês, ao ser utilizado o cristal LiF200. Aparecem também outros elementos importantes como o silício e o alumínio, isto com o uso dos cristais de liga InSb e do orgânico PE. O uso do cristal PX-1 revelou uma significativa presença do elemento oxigênio, e secundárias de Mg e Na. Elementos presentes em pequenas quantidades, como o caso do enxofre e fósforo, foram detectados com a ajuda do cristal de Ge.

- Amostra III: presença do elemento ferro como um dos componentes majoritários da amostra, e uma presença menos importante do elemento manganês (em comparação com a amostra II), ao ser utilizado o cristal LiF200. Aparecem também outros elementos importantes como o silício, que apresentou elevados picos, e em grau muito menor o alumínio, detectado com o uso dos cristais de liga InSb e do orgânico PE. O uso do cristal PX-1 revelou uma significativa presença do elemento oxigênio, e secundárias de Mg e Na. Os elementos presentes em pequenas quantidades, como o caso do enxofre e fósforo, foram detectados com a ajuda do cristal de Ge.

As análises químicas quantitativas, que foram obtidas através de EAA e por via úmida da amostra I, indicam o elemento ferro como predominante, com conteúdos baixos de silício e alumínio, que são muito mais significativos para o caso das amostras II e, em alto grau, na amostra III quanto ao silício. A amostra II apresenta importantes

conteúdos de elementos tais como Al, Mn e voláteis. A Tabela V.4 apresenta os resultados das análises químicas das três amostras.

Tabela V.4: Análise química quantitativa das amostras I, II e III

Elemento/espécie (% em massa)	Amostra I	Amostra II	Amostra III
Fe total	60,21	51,67	30,81
SiO ₂	5,07	9,65	52,35
Al ₂ O ₃	3,86	8,97	0,30
Mn	0,24	-----	-----
Mg	-----	0,128	0,016
P	0,100	0,087	0,017
PPC*	3,62	6,63	0,46

(*) PPC – Perda por gravimetria

5.1.4. COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA DAS AMOSTRAS SÓLIDAS

Da observação no microscópio MEV, são apresentadas as Figuras 5.4, 5.5 e 5.6, que mostram fotografias das amostras sólidas puras (I, II e III), preparadas com diferentes técnicas. Em primeiro lugar, a Figura 5.4 apresenta quatro fotografias da amostra I.

Nas Figuras 5.4 – a e 5.4 – b, as amostras sólidas foram dispersadas utilizando hexametáfosfato de sódio a 0,5% p/v, e depositadas sobre uma fita de grafita. De ambas fotografias pode-se apreciar a morfologia da estrutura cristalina e o tamanho fino das partículas. A Figura 5.4 – c, mostra a microfotografia de uma amostra utilizando somente a fita de grafita sem dispersante. Nessa fotografia podem-se visualizar uma partícula maior de hematita (cor mais clara) e duas menores de quartzo (de cor mais escura). A Figura 5.4 – d, mostra uma microfotografia na qual pode ver-se, em sua parte superior, uma partícula de hematita (cor mais clara), outra de quartzo (cor mais escura) e imediatamente abaixo da anterior e no centro, uma partícula mista.

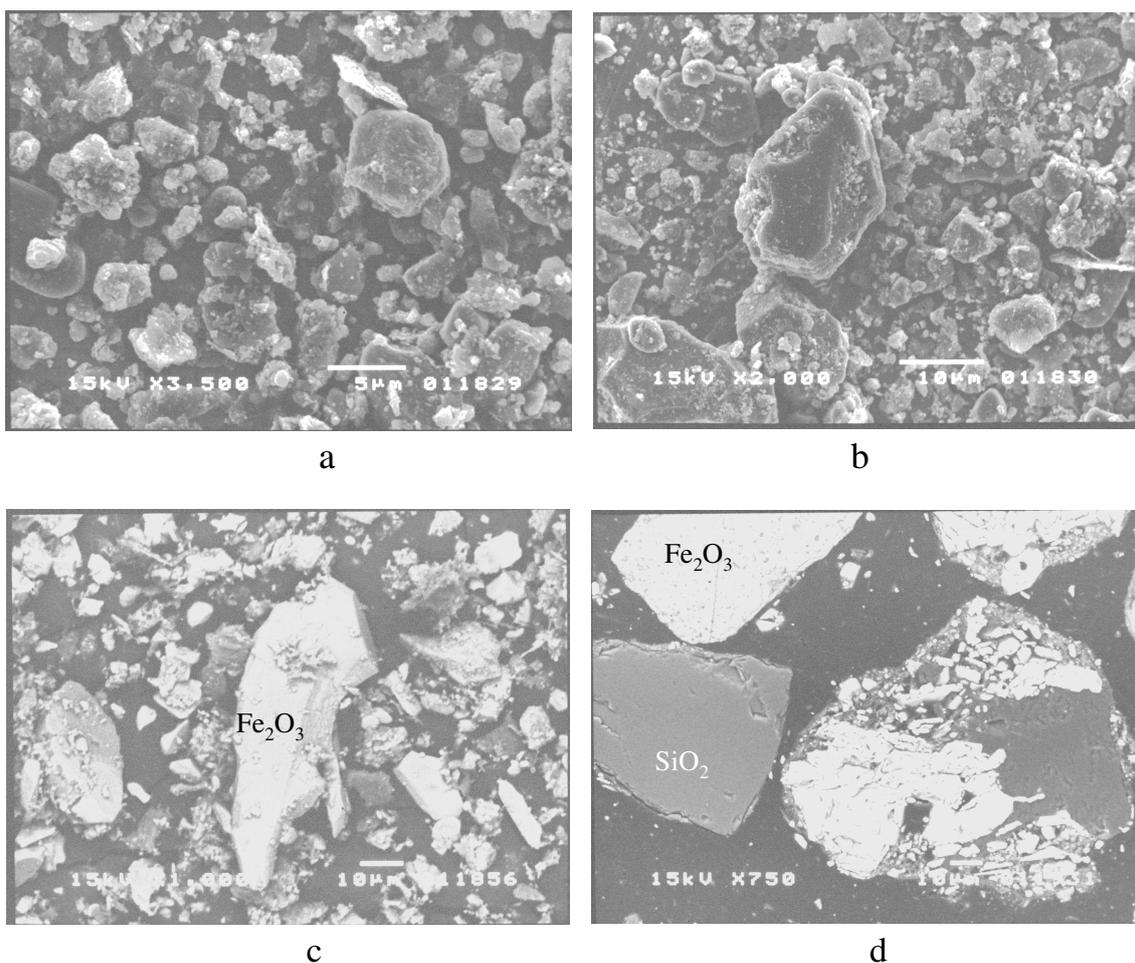


Figura 5.4: Microfotografias MEV da amostra I: a) e^- secundários, 3500X; b) e^- secundários, 2000X; c) e^- retroespalhados, 1000X; d) seção polida, e^- retroespalhados, 750X.

Na Figura 5.5 são apresentadas quatro fotografias correspondentes à amostra II. Especificamente, as Figuras 5.5 - a e 5.5 - b mostram as imagens MEV das amostras sólidas que foram dispersadas da mesma maneira que a amostra I e depositadas sobre uma fita de grafita. De ambas fotografias pode-se apreciar a morfologia da estrutura cristalina e o tamanho fino das partículas. Na Figura 5.5 - b observa-se uma partícula maior e muitas outras de tamanho menor, isto considerando o aumento de 3500X. No caso da Figura 5.4 - c, na qual a imagem foi obtida através dos elétrons retroespalhados, pode-se ver uma série de partículas aglomeradas as quais correspondem tanto a minerais de ferro (principalmente de hematita) e de quartzo (da cor mais escura). A Figura 5.4 - d mostra uma fotografia em cuja parte superior

esquerda pode-se ver uma partícula de hematita (cor mais clara) e outras duas de quartzo (cor mais escura), uma maior na parte inferior esquerda e outra no extremo superior direito do campo.

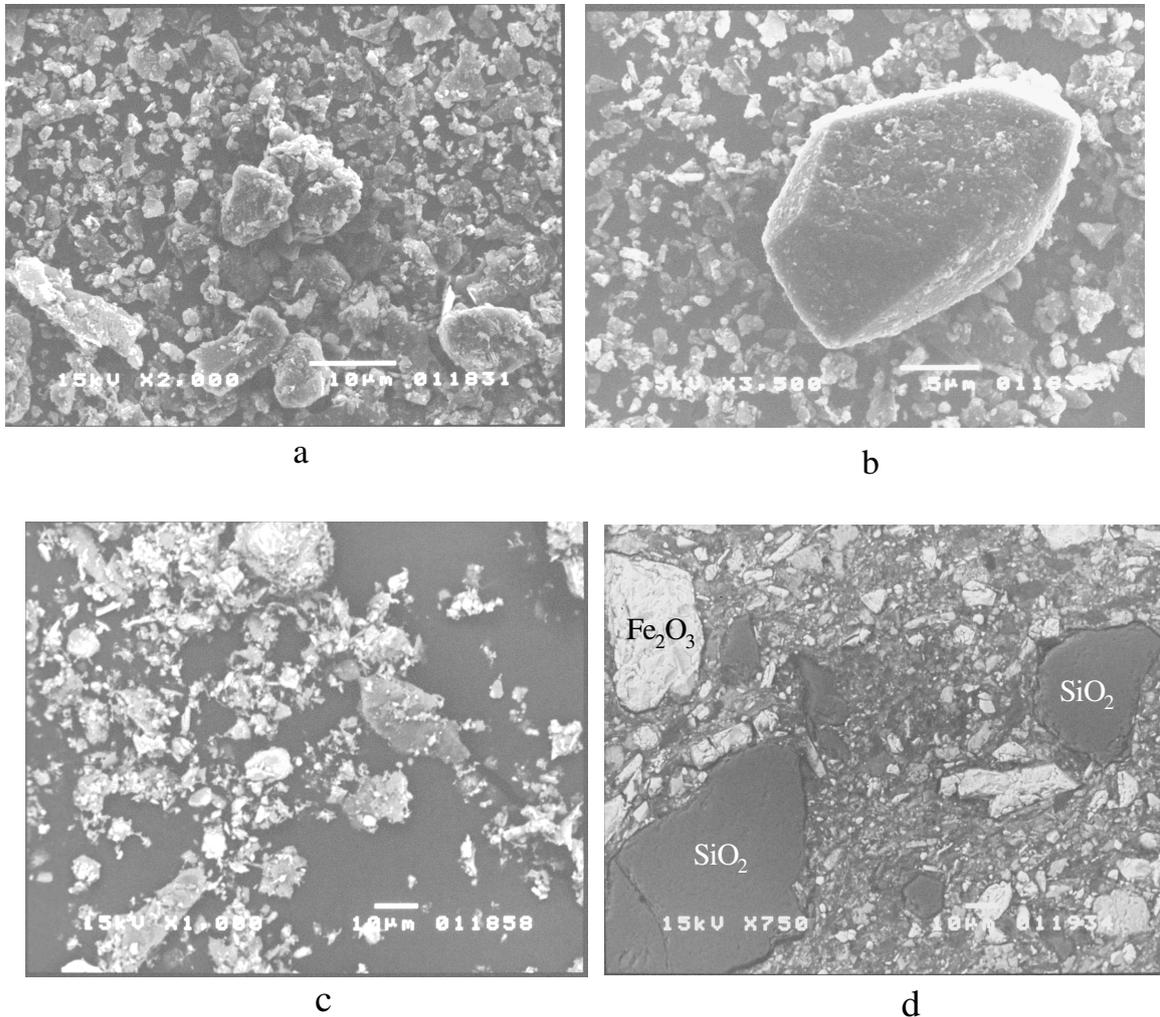


Figura 5.5: Microfotografias MEV da amostra II: a) e^- secundários, 2000X; b) e^- secundários, 3500X; c) e^- retroespalhados, 1000X; d) seção polida, e^- retroespalhados, 750X.

Na Figura 5.6 são apresentadas quatro fotografias correspondentes à amostra III. As duas primeiras foram preparadas e colocadas sobre a fita de grafita e suas imagens obtidas através dos elétrons secundários, enquanto que as duas últimas foram obtidas através dos elétrons retroespalhados.

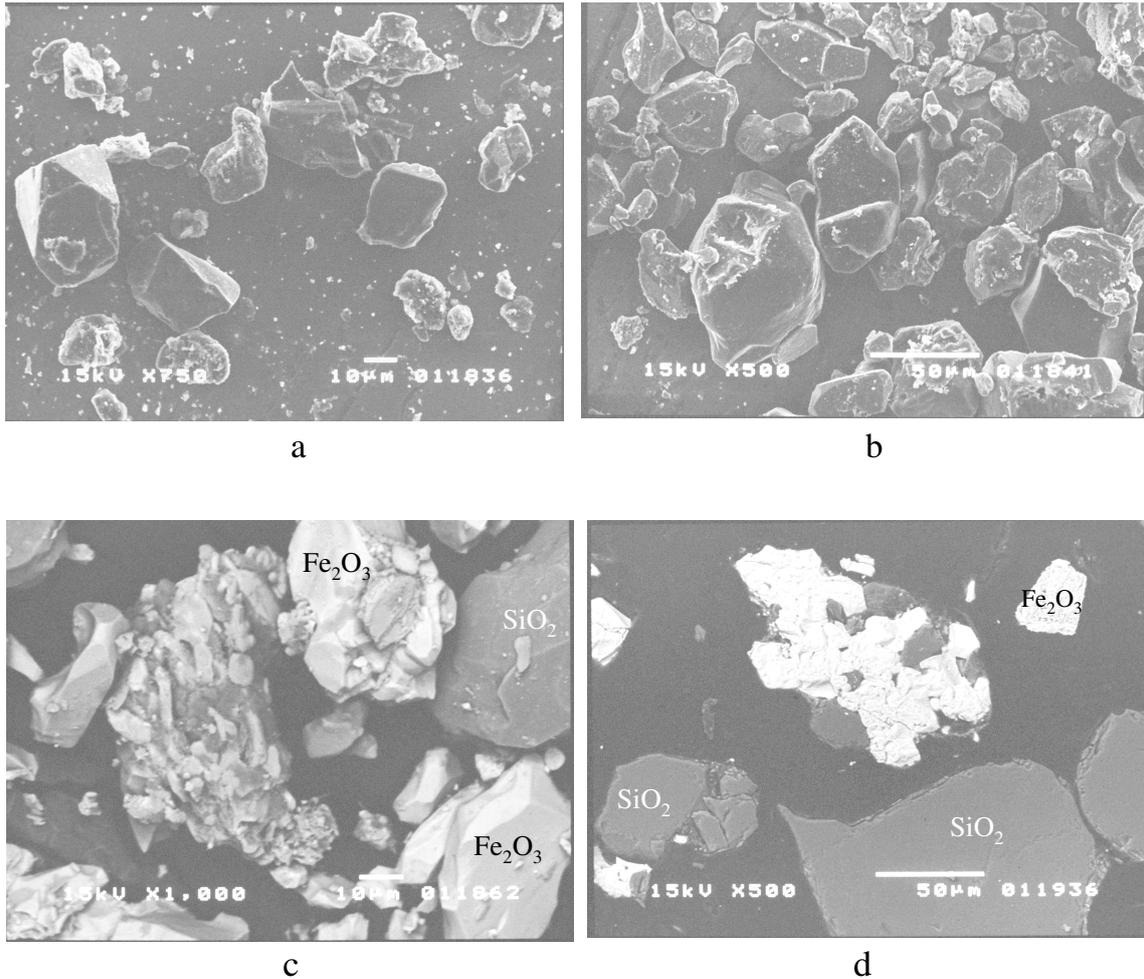


Figura 5.6: Microfotografias MEV da amostra III: a) e^- secundários, 750X; b) e^- secundários, 500X; c) e^- retroespalhados, 1000X; d) seção polida, e^- retroespalhados, 500X.

As Figuras 5.6 - a e 5.6 - b mostram as imagens MEV das amostras sólidas que foram dispersadas da mesma maneira que a amostra I e depositadas sobre uma fita de grafita. A morfologia das partículas (cúbica) e o tamanho evidenciam a diferença em relação às amostras I e II. Na Figura 5.6 - c, na qual a imagem foi obtida através dos elétrons retroespalhados, pode-se ver algumas partículas de minerais de ferro (principalmente de hematita), de quartzo (de cor mais escura) e uma partícula mista no setor esquerdo da fotografia. A Figura 5.6 - d apresenta uma fotografia da imagem obtida através dos elétrons retroespalhados, em que podem-se distinguir partículas de quartzo na zona inferior, uma partícula mista na zona superior, acompanhada de uma partícula menor de hematita.

No difratograma de raios X correspondente à amostra I, mostrado pela Figura 5.7, observa-se, de forma qualitativa, a presença das seguintes espécies mineralógicas: hematita (Fe_2O_3) que é predominante, quartzo (SiO_2), goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$), gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) e caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$). Na mesma Figura 5.7 aparecem identificados os picos correspondentes a cada um desses minerais.

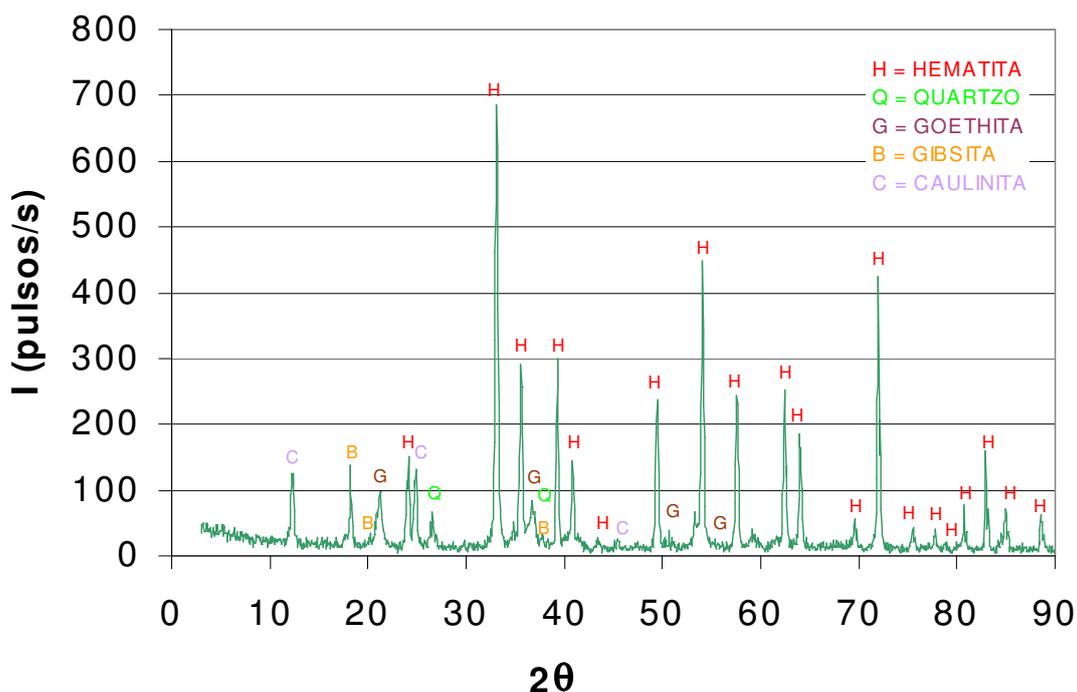


Figura 5.7: Difratograma de raios X da amostra I

Mediante o emprego da técnica analítica de espectrometria de infravermelho (EIV), foi ratificada a presença das espécies minerais hematita, goethita e caulinita. A Figura 5.8 apresenta o espectro infravermelho correspondente à amostra I, na qual são indicados os valores dos picos de absorção correspondentes.

Especificamente, da Figura 5.8 podem-se distinguir os valores dos picos de absorção correspondentes às espécies: hematita (462 e 536cm^{-1}), goethita (798 , 912 , 3240 e 3244cm^{-1}) e caulinita (1007 , 1018 , 1032 , 3616 e 3690cm^{-1}).

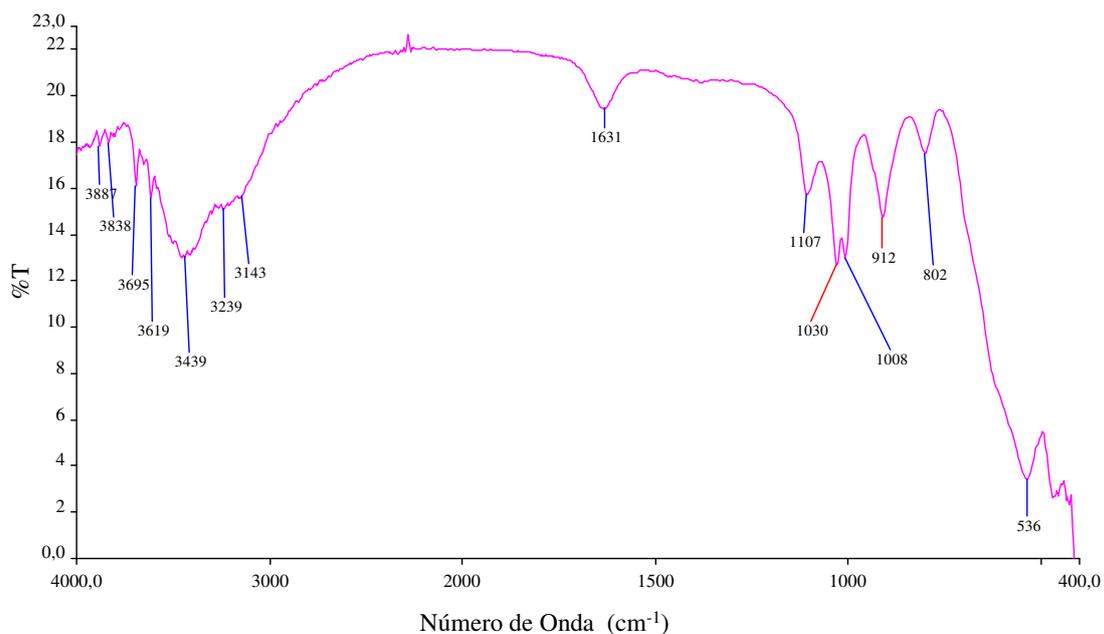


Figura 5.8: Espectro de infravermelho da amostra I

O difratograma de raios X correspondente à amostra II é mostrado na Figura 5.9. Verifica-se a presença das seguintes entidades mineralógicas: hematita (Fe_2O_3) que é predominante, goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$), pirolusita (MnO_2), talco ($\text{Mg}_3(\text{OH})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}$) e caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$).

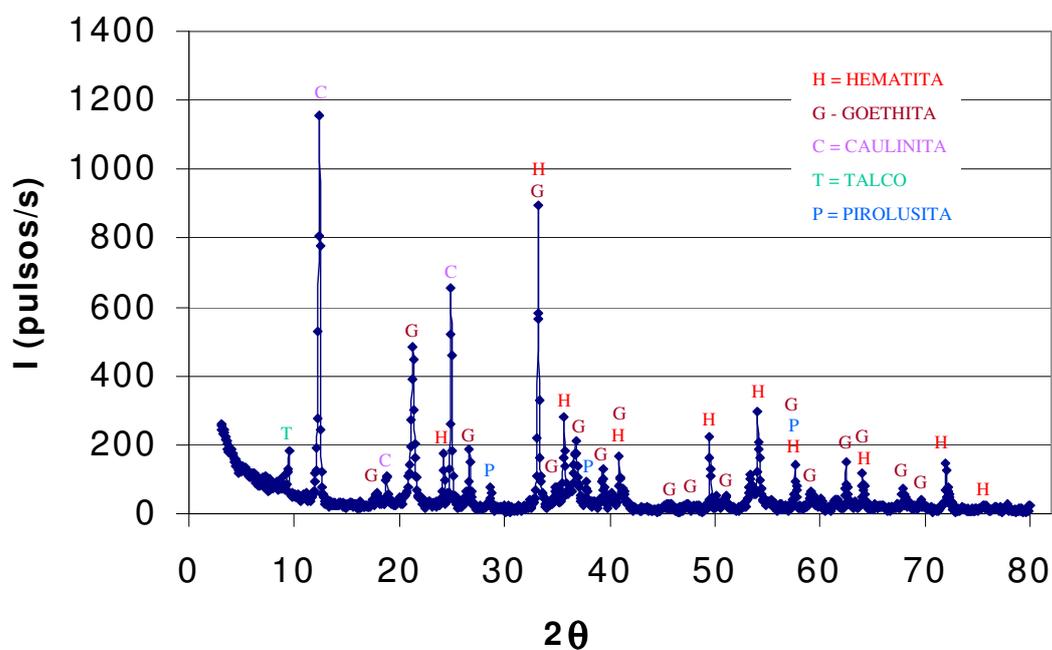


Figura 5.9: Difratograma de raios X da amostra II

Mediante espectrometria de infravermelho, foi observada a presença das espécies minerais hematita, goethita, talco e caulinita. A Figura 5.10 apresenta o espectro de infravermelho correspondente à amostra II, incluídas as bandas de absorção correspondentes.

Especificamente, podem-se distinguir os valores dos picos de absorção correspondentes às espécies: hematita (470 e 538cm^{-1}), goethita (797 , 912 e 3153cm^{-1}), talco (1106 e 3676cm^{-1}) e caulinita (1031 , 3618 , 3651 e 3694cm^{-1}).

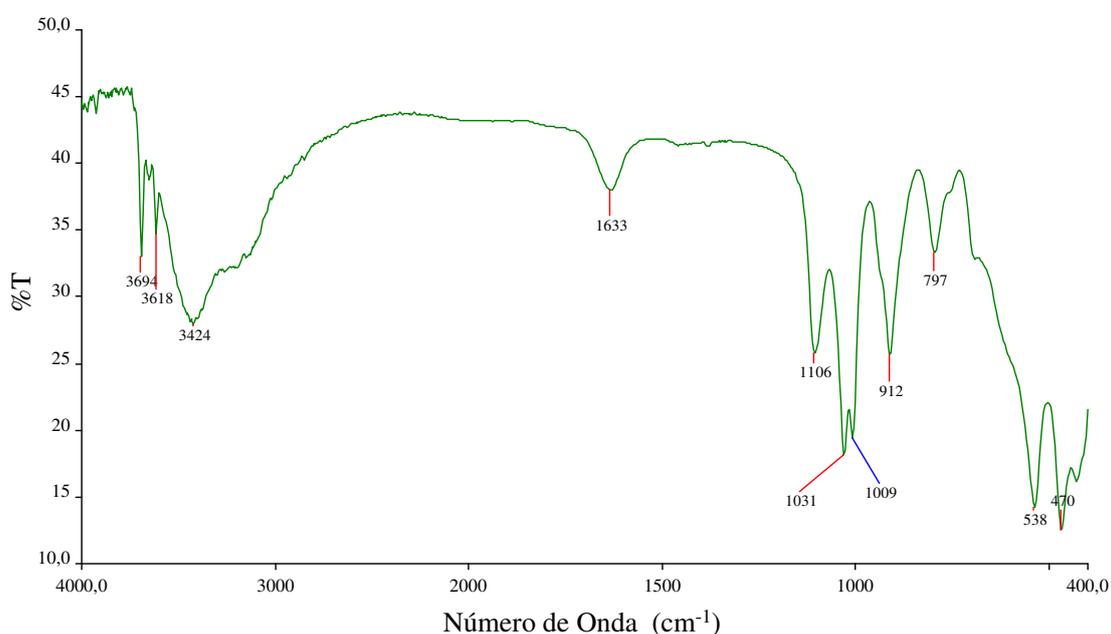


Figura 5.10: Espectro de infravermelho da amostra II

O difratograma de raios X para a amostra III é mostrado pela Figura 5.11. Observa-se a presença das seguintes espécies mineralógicas: quartzo (SiO_2) que é predominante, hematita (Fe_2O_3) que tem uma significativa participação como componente dessa amostra, gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) e caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), estas últimas em quantidades menores.

Mediante espectrometria de infravermelho, foi ratificada a presença das espécies minerais hematita e quartzo. A Figura 5.12 apresenta o espectro de infravermelho correspondente à amostra III, no qual estão incluídos os valores dos picos de absorção correspondentes.

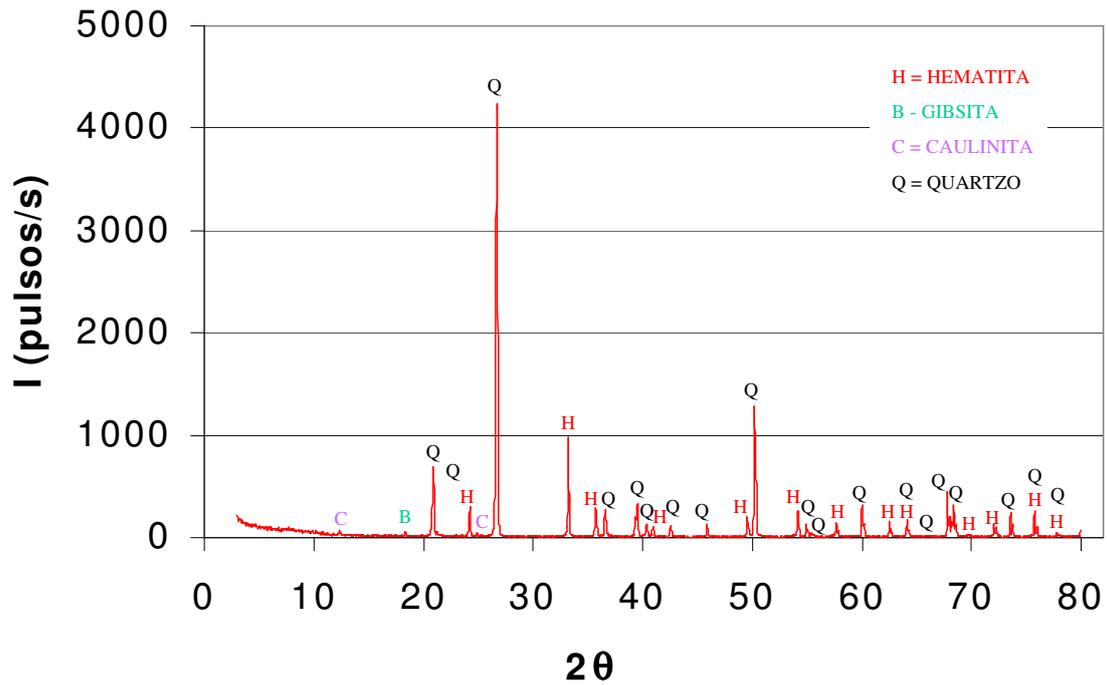


Figura 5.11: Difratoograma de raios X da amostra III

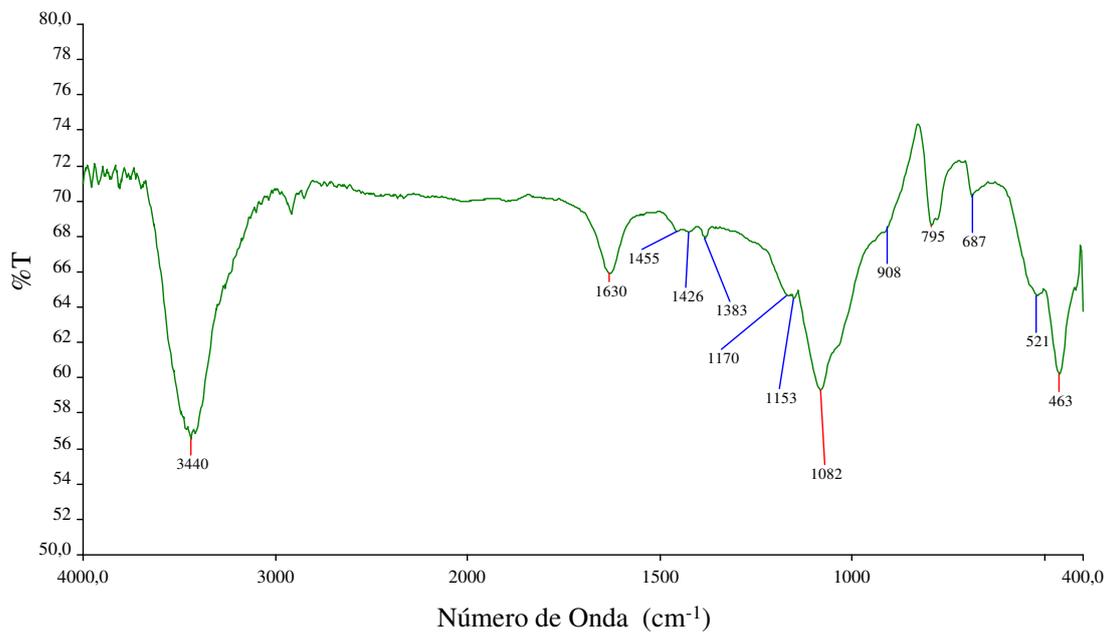


Figura 5.12: Espectro de infravermelho da amostra III

Especificamente, podem-se distinguir os valores dos vales correspondentes as espécies: quartzo ($690, 795, 1082$ e 3440cm^{-1}) e hematita (463 e 520cm^{-1}).

No caso da amostra I observa-se na Figura 5.8 um espectro de infravermelho com baixas transmissões se comparados com aqueles mostrados pelas Figuras 5.10 e 5.12 correspondentes às amostras II e III, isso devido provavelmente a resíduos de amina que não estariam presentes na amostra I.

5.1.5. ÁREA SUPERFICIAL ESPECÍFICA DAS AMOSTRAS SÓLIDAS

Foram caracterizadas as três amostras sólidas já apresentadas nos resultados anteriores, mais três misturas das amostras II e III, considerando as proporções em massa de 25 – 75; 50 – 50 e 75 – 25, as quais serão consideradas de agora em diante como as amostras IV, V e VI, respectivamente.

Os resultados do índice de Blaine, obtidos para as amostras originais e misturas, podem ser visualizados na Tabela V.5:

Tabela V.5: Tempos de passagem de fluxo de ar e valores de ASE segundo Blaine

Nome da amostra	Origem e/ou Características	Tempo (s)	ASE (cm ² /g)
Amostra I	Mutuca-MBR/Mistura de rejeito da Sep. Magnética e lama de Fe	204,61	4.680,10
Amostra II	Casa de Pedra-CSN/Lama da ciclonagem secundária	537,99	9.541,61
Amostra III	Casa de Pedra-CSN/Rejeito de flotação	3,66	813,11
Amostra IV	Mistura de 75% Amostra II e 25% Amostra III	84,72	3.753,60
Amostra V	Mistura de 50% Amostra II e 50% Amostra III	57,94	3.149,79
Amostra VI	Mistura de 25% Amostra II e 75% Amostra III	31,62	2.358,00

Dos valores de ASE (Índice de Blaine), nota-se a tendência, já esperada, de aumento do valor de resistência à passagem de ar quando o material do leito sólido apresenta uma distribuição granulométrica mais fina, fato que também é observado nos valores dos tempos de passagem de líquido pelas marcas do aparelho de Blaine.

Para o caso específico das amostras com distribuições de tamanho mais fina como I, II e IV, tem-se que os valores do índice de Blaine são mais elevados (superiores a 3.750 cm²/g), fato que indica uma maior presença de material ultrafino e lamas.

A dependência entre a granulometria da amostra e seu índice de Blaine obviamente não é linear. Assim, na Figura 5.13 pode-se observar como varia o valor da ASE ou índice de Blaine em função das diferentes granulometrias consideradas.

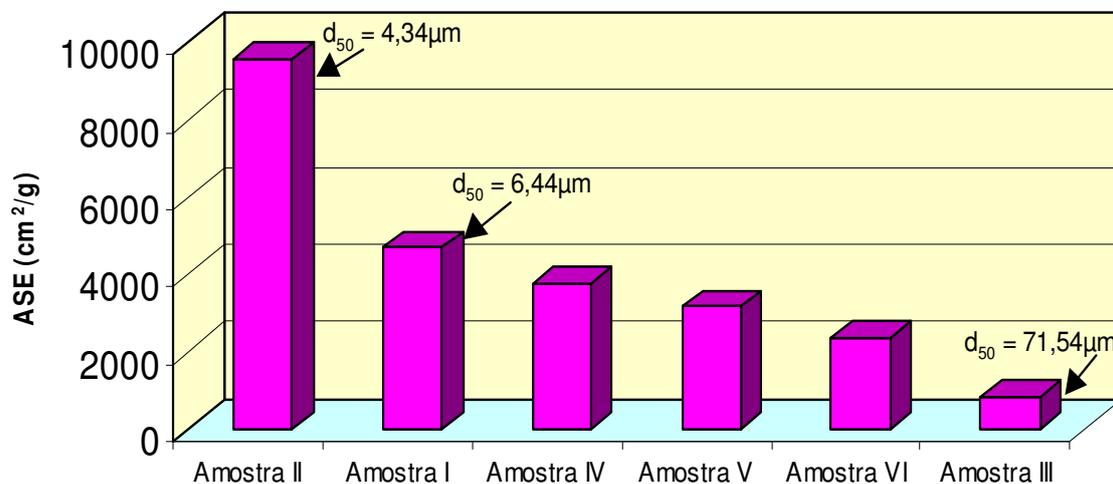


Figura 5.13: Valores do índice de Blaine para as amostras estudadas

Se corrobora ao observar a Figura 5.13 que o valor do índice de Blaine da amostra I é significativamente inferior ao da amostra II, ainda que suas distribuições granulométricas sejam próximas, conforme ilustrado na Figura 5.1. A afirmativa anterior ratifica-se ao analisar a variação do parâmetro d_{50} , o qual somente aumenta de 4,34 (amostra I) para 6,44 μm (amostra II). Portanto, o valor do índice de Blaine, que representa a Área Superficial Específica, é muito mais sensível para um material de granulometria mais fina. No caso das misturas, os valores do d_{50} não foram determinados.

5.1.6. MICROELETROFORESE DAS AMOSTRAS SÓLIDAS

Os resultados dos ensaios para a determinação da mobilidade eletroforética e potencial zeta das amostras II e III são apresentados na Tabela V.6 e na Figura 5.14.

Tabela V.6: Condições experimentais e valores mobilidade eletroforética (M) e potencial zeta (PZ) para as amostras II e III

Amostra II							
pH	I (μA)	V (Volts)	T_M (s)	V_M ($\mu\text{m/s}$)	C (V/cm)	[M] ($\mu\text{m}^*\text{cm/V/s}$)	PZ (mV)*
2,5	70	80	45,56	10,97	10,07	1,090	+ 13,982
4,2	70	90	90,32	5,54	11,33	0,489	+ 6,269
6,1	60	90	205,18	2,44	11,33	0,215	+ 2,760
7,0	80	85	150,30	3,33	10,70	0,311	-3,992
8,1	70	90	56,30	8,88	11,33	0,784	-10,057
10,0	75	90	32,15	15,55	11,33	1,373	- 17,611
11,2	80	85	21,91	22,82	10,70	2,132	-27,359
Amostra III							
pH	I (μA)	V (Volts)	T_M (s)	V_M ($\mu\text{m/s}$)	C (V/cm)	[M] ($\mu\text{m}^*\text{cm/V/s}$)	PZ (mV)*
2,40	100	80	19,32	25,88	10,07	2,570	+32,967
3,10	90	83	57,81	8,65	10,45	0,828	+10,621
3,95	80	92	110,50	4,53	11,58	0,391	+5,018
5,02	60	80	110,33	4,53	10,07	0,450	- 5,771
6,50	40	80	62,19	8,04	10,07	0,798	- 10,244
8,01	30	90	23,15	21,60	11,33	1,906	- 24,450
10,20	30	90	19,51	25,63	11,33	2,262	- 29,021
11,20	70	90	11,78	42,44	11,33	3,746	- 48,064

(*) Os valores de PZ foram calculados através da equação de Smoluchowski.

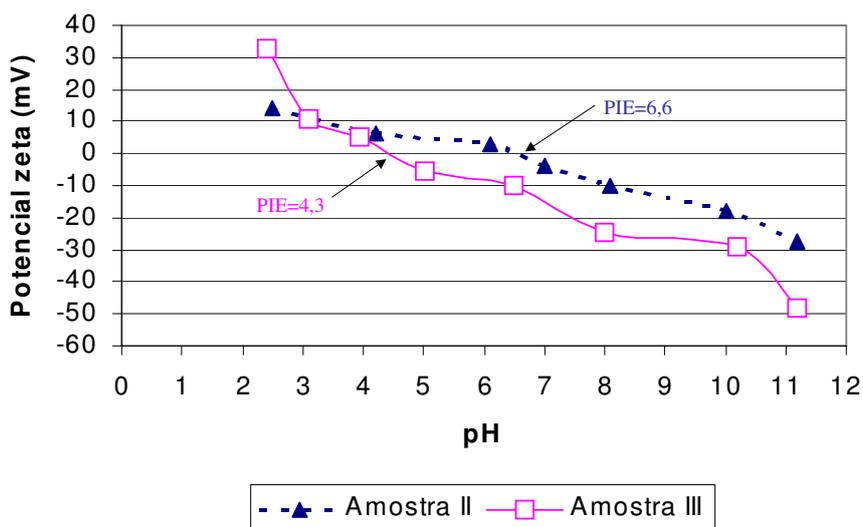


Figura 5.14: Curvas de potencial zeta para as suspensões das amostras II e III

A Figura 5.14 mostra as curvas de potencial zeta das suspensões aquosas preparadas com as amostras II e III. Também são apresentados os valores dos pontos isoelétricos (PIE), correspondendo a um valor de pH igual a 4,3 para a amostra III e pH de 6,6 para a amostra II. Esses valores estão em concordância com o informado pela bibliografia, se consideram-se as tendências mostradas pelas espécies mineralógicas majoritárias das amostras. A primeira delas está composta principalmente por hematita (67% em massa) e a segunda, pelas espécies quartzo (52% em massa) e hematita (44% em massa), e segundo a bibliografia (Deo et al., 2001), acham-se valores do PIE para quartzo puro na faixa 2 - 3, quanto que no caso da hematita próximo da faixa 6 - 8.

5.2. CARACTERIZAÇÃO DAS PASTAS MINERAIS

5.2.1. VISCOSIDADE DAS PASTAS MINERAIS

Em seguida apresentam-se os resultados obtidos com as pastas preparadas com as amostras originais I, II e III e com as misturas (IV, V e VI). As tabelas de dados correspondentes são apresentadas no anexo IV. Foram estudados os ciclos reológicos 1-20-1 rpm (baixas rotações da haste) e 1-100-1, 1-180-1 rpm (altas rotações da haste) e o comportamento da viscosidade da pasta no tempo.

5.2.1.1. VISCOSIDADE DE PASTAS DAS AMOSTRAS ORIGINAIS

As amostras sólidas chamadas originais foram estudadas nas faixas de adensamento nas quais seu comportamento foi de pasta (isto segundo os resultados preliminares do teste de “slump”). Estas e outras características dos ensaios são apresentadas na Tabela V.7:

Tabela V.7: Condições dos testes reológicos aplicados nas amostras originais

Nome da amostra	Origem e/ou Características	%S	Haste N°	Temperatura (°C)
Amostra I	Mutuca-MBR/Mistura de rejeito da Sep. Magnética e lama de Fe	60 – 73	LV-4	18 e 19
Amostra II	Casa de Pedra-CSN/Lama da ciclonagem secundária	60 – 77	LV-4	21 e 22
Amostra III	Casa de Pedra-CSN/Rejeito de flotação	60 – 81	LV-3 e LV-4	22

A Figura 5.15 mostra um gráfico correspondente ao comportamento reológico de duas pastas preparadas com a amostra I com adensamentos de sólidos diferentes. Em ambos casos verifica-se um comportamento tixotrópico, fato que pode ser confirmado ao revisar a Tabela I do anexo IV.

Na Figura 5.15 pode observar-se também, comportamentos muito similares em ambas pastas minerais, atingindo maiores valores de viscosidade naquela pasta mais adensada, em toda a faixa de rotações consideradas para a haste. Neste caso, o ciclo reológico considerado foi aquele que considera os trajetos de ida: 2 - 100 rpm, e de volta: 100 - 2 rpm (ciclo 2-100-2 rpm).

Deve-se observar que os dois primeiros e os dois últimos valores das medições realizadas da viscosidade não foram considerados de uma maneira geral, na construção dos correspondentes gráficos em virtude do crescimento muito significativo da viscosidade para valores extremamente baixos de velocidade de rotação da haste.

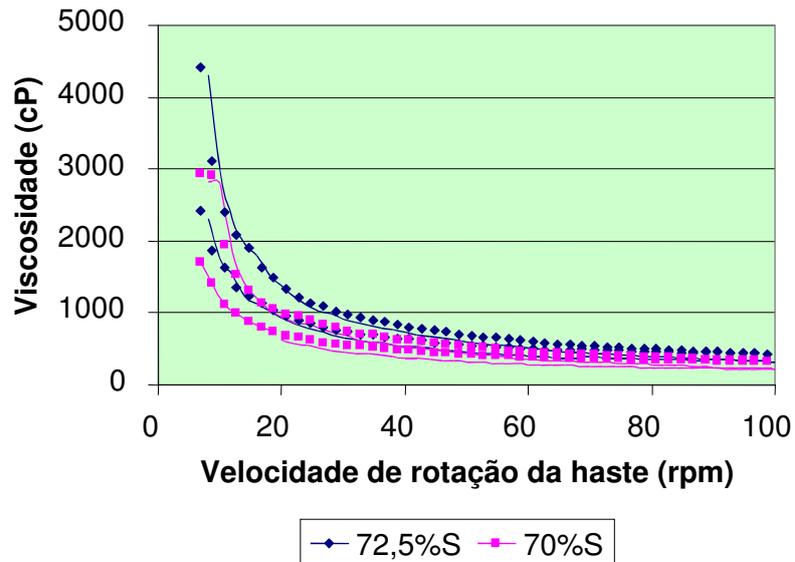


Figura 5.15: Gráfico da viscosidade em função da velocidade de rotação da haste para pastas preparadas com a amostra I no ciclo 2-100-2 rpm.

Também foram considerados ciclos reológicos para baixas velocidades de rotação da haste, ou seja, para a faixa de 1 até 21 rpm, cujos principais resultados são apresentados na Figura 5.16, a seguir:

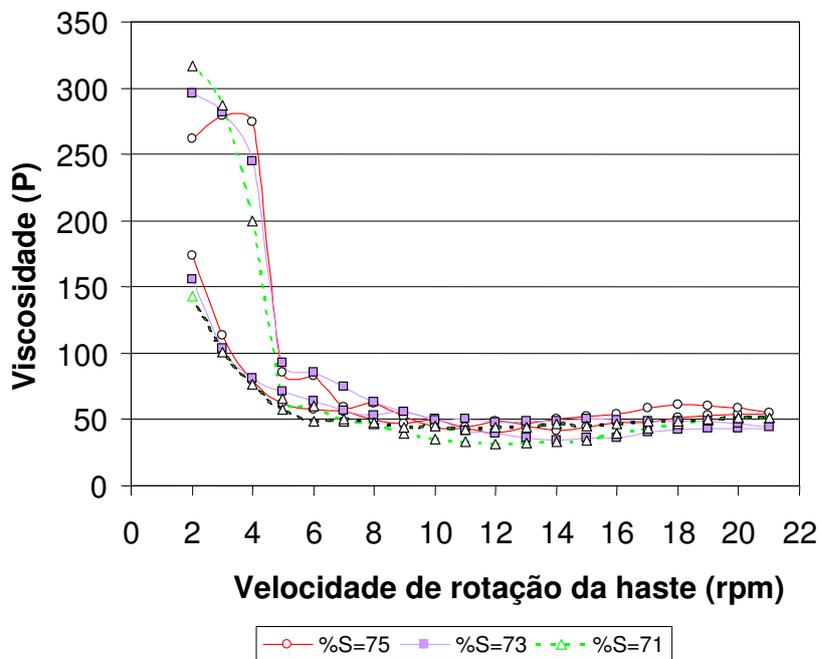


Figura 5.16: Gráfico da viscosidade em função da velocidade de rotação da haste para algumas das pastas da amostra I no ciclo 1-21-1 rpm

Segundo a Figura 5.16 observa-se que não há um comportamento único quanto ao caráter reológico das pastas, ou seja, em parte do ciclo a pasta apresenta-se tixotrópica (mais baixas velocidades de rotação) e reotrópica (para as maiores velocidades de rotação). Além disso, à medida que a pasta se apresenta como mais adensada, o caráter tixotrópico cresce e o reotrópico diminui.

Ao comparar as Figuras 5.15 e 5.16 verifica-se que aquelas pastas submetidas ao ciclo reológico 1-21-1 rpm apresentam valores muito mais elevados da viscosidade que aquelas que foram submetidas ao ciclo 2-100-2 rpm.

Na Figura 5.17 são mostrados os comportamentos reológicos de pastas preparadas com a amostra II. Neste caso, o ciclo reológico considerado foi aquele que considera os trajetos de ida: 1 - 180 rpm, e de volta: 180 - 1 rpm (ciclo 1-180-1 rpm).

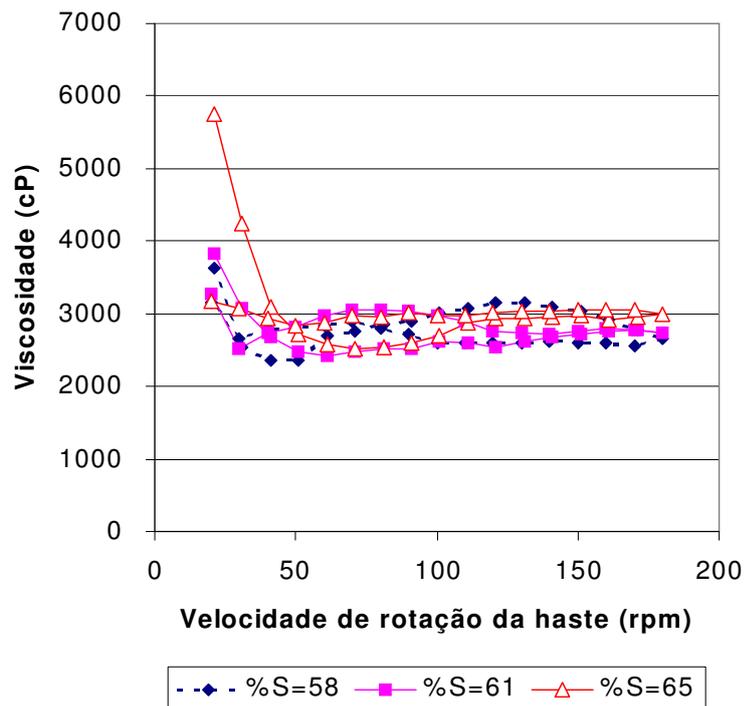


Figura 5.17: Gráfico da viscosidade em função da velocidade de rotação da haste para pastas da amostra II.

A Figura 5.17 mostra os comportamentos reológicos das pastas com 58, 61 e 65% de sólidos em massa. Verifica-se que não há um comportamento reológico único,

pois, em algumas etapas do ciclo, o comportamento é tixotrópico e em outras é reotrópico. Assim, naquelas pastas com menores adensamentos (58 e 61% de sólidos) nota-se uma diminuição do valor da viscosidade no trajeto de retorno do ciclo, ou seja apresentam-se como tixotrópicas, enquanto que no caso da pasta mais adensada (65%S), pode observar-se um maior predomínio do comportamento reotrópico, dado aos maiores valores registrados na viscosidade ao retorno do ciclo (ver Tabela II do anexo IV).

Os casos extremos estudados para as pastas da amostra II correspondem aos adensamentos de 58 e 65% em massa de sólidos. A Figura 5.18 apresenta o comportamento reológico que está em concordância com o observado na Figura 5.17. Verifica-se um caráter mais tixotrópico na pasta menos adensada (58% em sólidos) e mais reotrópico naquela de maior adensamento (65% de sólidos).

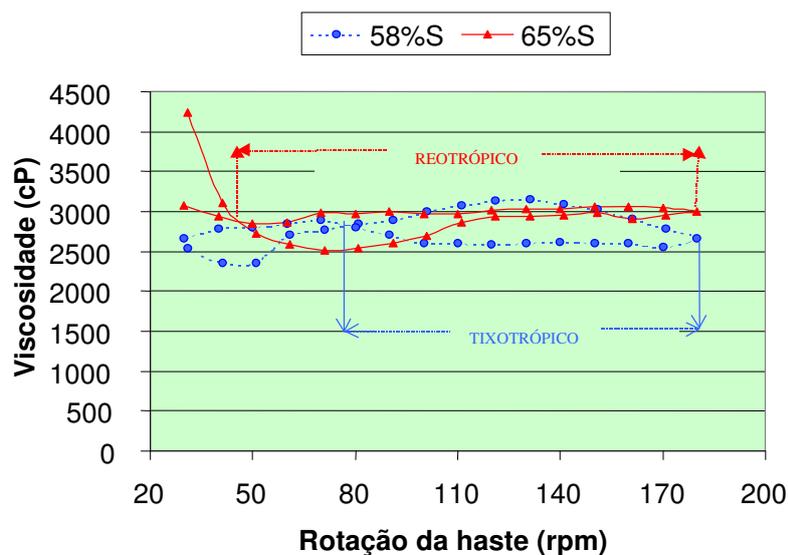


Figura 5.18: Comportamentos reológicos extremos dos “pastefill” da amostra II

O efeito do tempo de registro sobre os valores de viscosidade, considerando um mesmo ciclo de 1-180-1 rpm na velocidade de rotação da haste, para 64% em sólidos para a amostra II, pode ser visualizado na Figura 5.19.

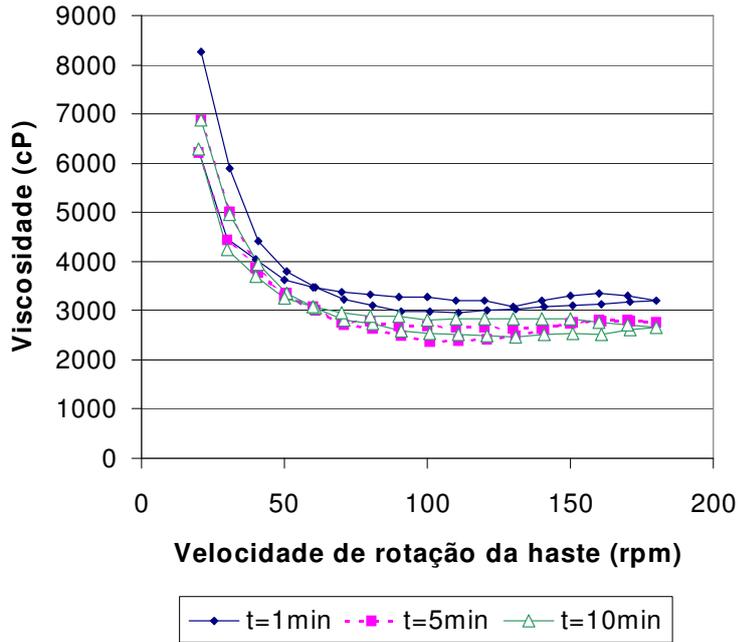


Figura 5.19: Efeito do tempo sobre as medições da viscosidade em uma pasta de 64% de sólidos da amostra II

A Figura 5.19 mostra que as diferenças dos valores de viscosidade são grandes (da ordem de 15% ou mais), concorrendo para este fator a sedimentação do sólido. Este dado indica que a determinação da viscosidade deve ser realizada, neste caso, em menores intervalos de tempo.

A variação da viscosidade em função do tempo, para valores fixos de velocidade de rotação da haste, para a amostra II, pode ser vista na Figura 5.20.

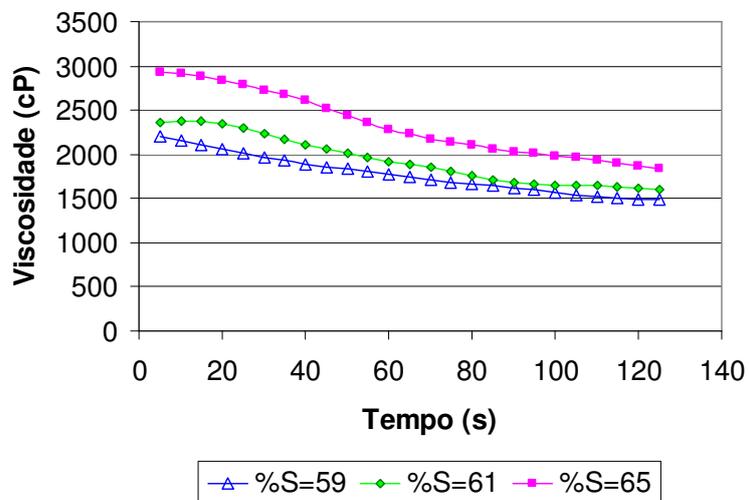


Figura 5.20: Efeito do tempo sobre as medições da viscosidade nas pastas da amostra II

Da Figura 5.20 observa-se que as medidas da viscosidade vão experimentando uma queda em seu valor conforme transcorre o tempo do teste, confirmando o comportamento não newtoniano da amostra II. Verifica-se também a ordem decrescente dos valores de viscosidade, à medida que a pasta se torna menos adensada.

Na Figura 5.21 são mostrados os comportamentos reológicos de pastas preparadas com a amostra III, especificamente para os adensamentos de 78, 80 e 82% de sólidos em massa. Neste caso, pode-se visualizar um comportamento predominantemente reotrópico, em todas as pastas estudadas no ciclo 1-180-1 rpm (ver Tabela III do anexo IV).

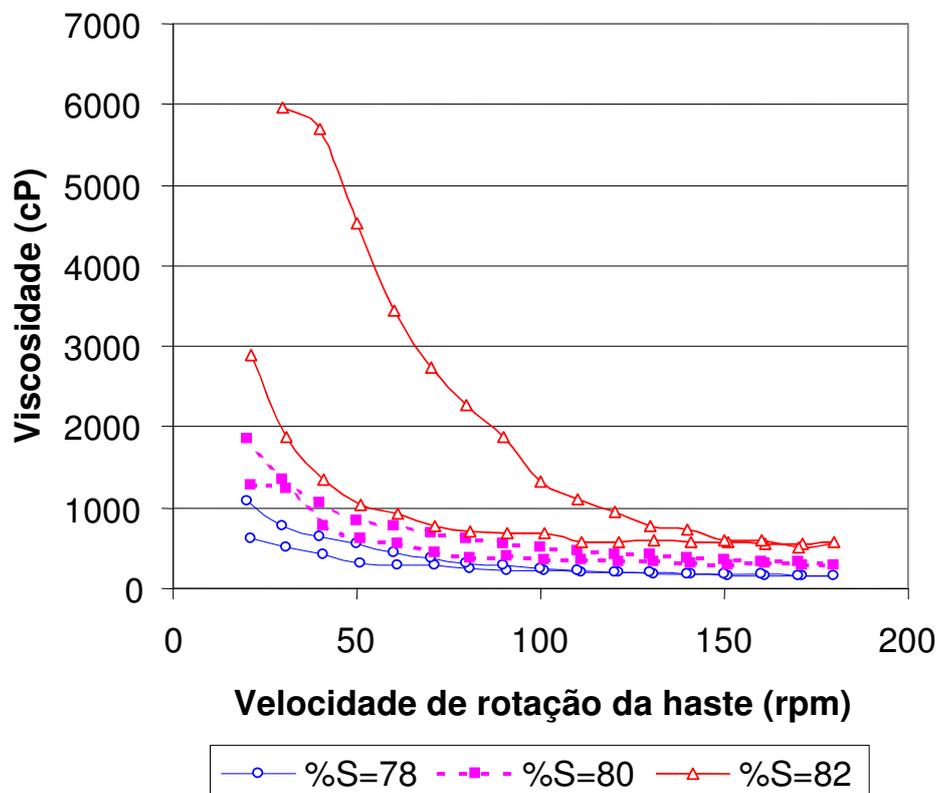


Figura 5.21: Gráfico da viscosidade em função da velocidade de rotação da haste para algumas das pastas da amostra III

A Figura 5.22 mostra a variação da viscosidade em função do tempo, para três valores distintos de velocidade de rotação da haste, para uma pasta com 75% de sólidos em massa preparada com a amostra III.

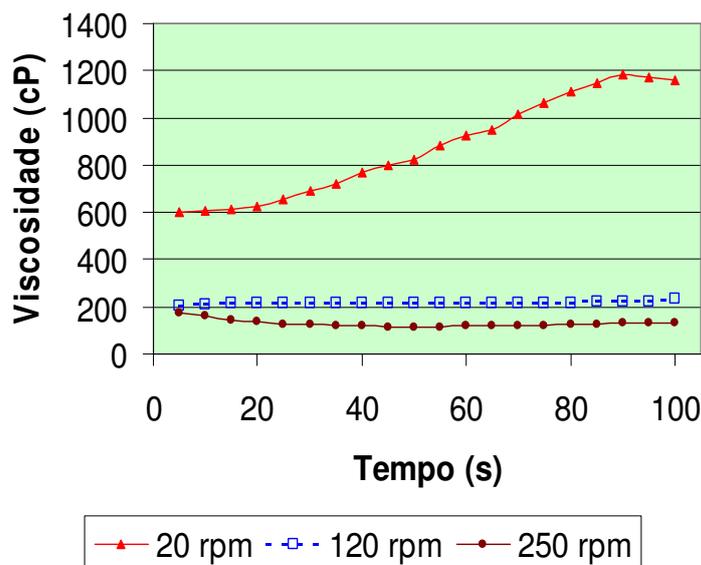


Figura 5.22: Efeito da velocidade de rotação da haste sobre as medições da viscosidade em pasta com 75% de sólidos em massa da amostra III

Na Figura 5.22 pode observar-se que para uma velocidade de rotação da haste de 20rpm, a pasta mineral apresenta um comportamento crescente na viscosidade com o tempo (20 - 80s), o que confirma o caráter mais reotrópico da pasta. Para velocidades de rotação de 250rpm há uma tendência à estabilidade nos valores da viscosidade do sistema, a partir dos 40s aproximadamente. A viscosidade mostrou um valor constante para a rotação de 120rpm, o que poderia, sem uma análise detalhada, indicar uma característica de fluido newtoniano nestas condições.

A Figura 5.23 apresenta o efeito do tempo sobre a viscosidade para pastas com três adensamentos distintos da amostra III, considerando-se três valores de rotação da haste.

Ao observar a Figura 5.23, verifica-se que, para velocidades baixas de rotação da haste (20rpm), a viscosidade apresenta elevados valores e uma tendência ao crescimento com o tempo. Para a velocidade de 120rpm, tem-se um comportamento com tendência à estabilidade, mostrando valores intermediários no que diz respeito à viscosidade. No caso das maiores velocidades (250rpm), verificam-se de forma geral, os menores valores da viscosidade, sendo a maior variação nesta viscosidade encontrada para a pasta mais adensada.

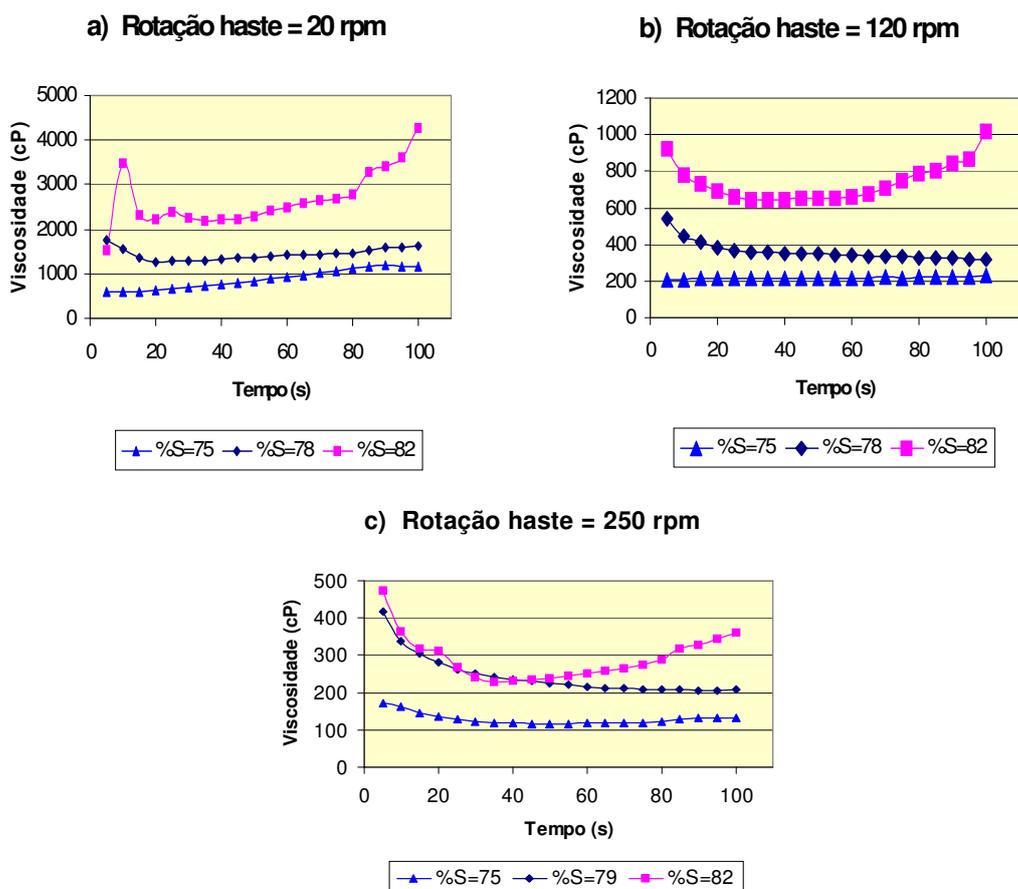


Figura 5.23: Efeito do tempo sobre os valores de viscosidade em pastas da amostra III, considerando-se adensamentos diferentes e três valores da velocidade de rotação da haste: 20, 120 e 250rpm.

O efeito da velocidade de rotação da haste sobre o valor medido da viscosidade da pasta em função do tempo, no caso do adensamento máximo de 82% em massa de sólidos utilizando a amostra III, para cinco velocidades de rotação: 20, 50, 120, 180 e 250rpm, é mostrado na Figura 5.24.

Há nesse caso, uma tendência geral, independentemente da velocidade de rotação da haste, ao crescimento no valor da viscosidade da pasta, a qual era a mais adensada das pastas da amostra III (82% em sólidos), e segundo já foi verificado como um comportamento mais reotrópico (ver Figura 5.21).

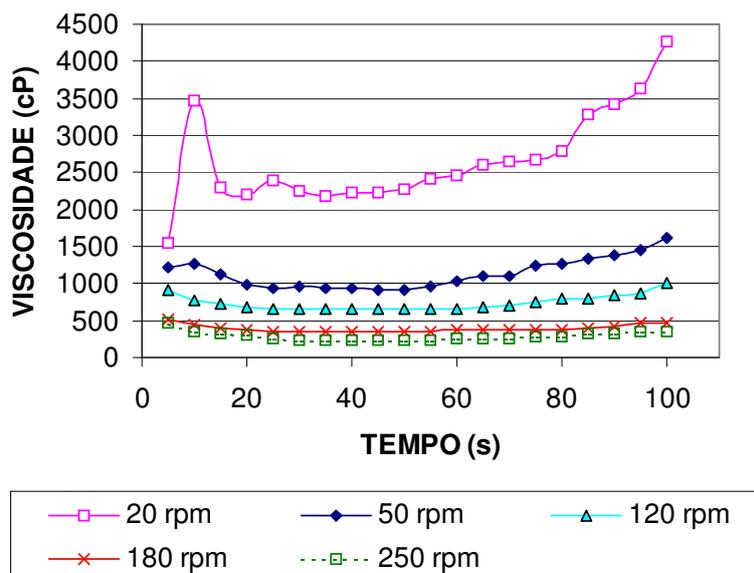


Figura 5.24: Efeito da velocidade de rotação da haste sobre o valor da viscosidade em uma pasta de 82% em sólidos da amostra III.

5.2.1.2. VISCOSIDADE DAS PASTAS MINERAIS DE MISTURAS

As misturas das amostras sólidas originais, foram estudadas nas condições experimentais e características apresentadas pela Tabela V.8:

Tabela V.8: Condições experimentais e características das amostras chamadas misturas

Nome da mistura	Origem e/ou Características	%S	Haste N°	Temperatura (°C)
Amostra IV	Mistura de 75% Amostra II e 25% Amostra III	60 – 73	LV-4	20 e 22
Amostra V	Mistura de 50% Amostra II e 50% Amostra III	60 – 77	LV-4	21
Amostra VI	Mistura de 25% Amostra II e 75% Amostra III	60 – 81	LV-4	22

Na Figura 5.25 são mostrados os comportamentos reológicos de algumas das pastas estudadas e preparadas com a amostra IV, considerando o ciclo 1-180-1 rpm.

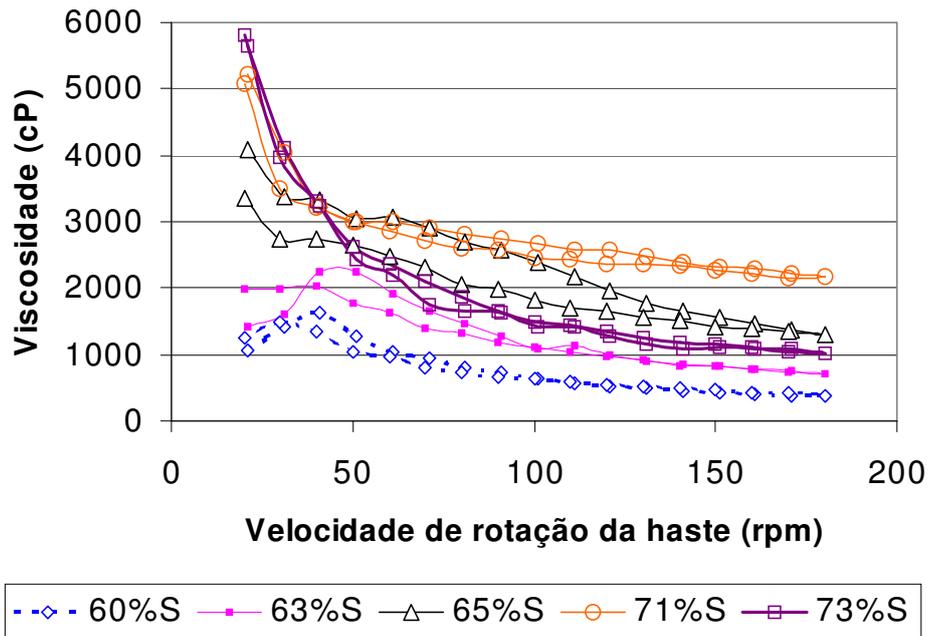


Figura 5.25: Gráfico da viscosidade em função da velocidade de rotação da haste para pastas da amostra IV, para o ciclo 1-180-1 rpm.

Ao se observar a Figura 5.25 e a Tabela IV do anexo IV, nota-se o duplo caráter reológico de todas as pastas preparadas com esta amostra IV, apresentando, contudo, neste ciclo de 1-180-1 rpm, uma maior tendência à tixotropia. Há um ordenamento nos valores da viscosidade segundo os correspondentes adensamentos, com exceção da pasta mais adensada de 73% em sólidos que, a partir de 40 rpm de rotação da haste, apresenta menores valores na viscosidade em comparação as pastas de 65 e 71% em sólidos.

Na Figura 5.26 são mostrados os comportamentos reológicos de pastas preparadas com a amostra IV. Neste caso, são apresentados os resultados obtidos ao utilizar um ciclo reológico de 1-20-1 rpm.

Ao observar a Figura 5.26 e a Tabela IV do anexo IV, verifica-se o duplo caráter reológico de todas as pastas preparadas com esta amostra IV, apresentando neste ciclo de 1-20-1 rpm, no entanto, uma maior tendência à reotropia. Ao se observar as diferentes curvas apresentadas no gráfico anterior, verificam-se maiores valores de viscosidade naquelas pastas mais adensadas, em faixas de baixa velocidade de rotação da haste (1-10rpm). Em rotações mais elevadas (15-20rpm) os valores da viscosidade são muito mais próximos.

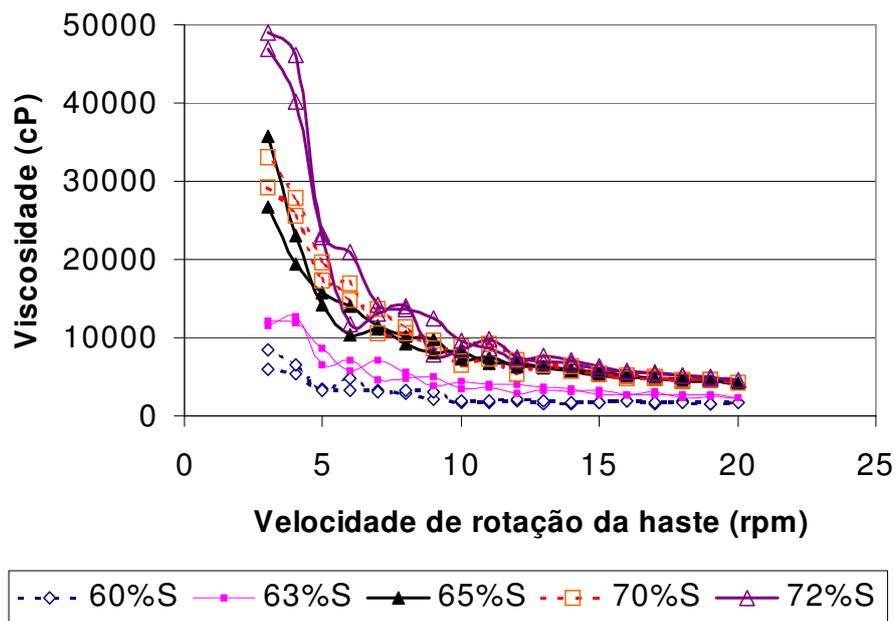


Figura 5.26: Gráfico da viscosidade em função da velocidade de rotação da haste para algumas das pastas da amostra IV, para um ciclo 1-20-1 rpm.

Os efeitos da velocidade de rotação da haste e do tempo são apresentados na Figura 5.27, considerando-se adensamentos de 61, 65, 70 e 71% de sólidos.

Nas Figuras 5.27-a) e 5.27-b) são mostrados os comportamentos das pastas de 61 e 65% em massa de sólidos, os quais são similares, dado que para 20rpm na rotação da haste observam-se os mais elevados valores da viscosidade, tanto para a pasta testada a 1min quanto aquela de 5min. Especificamente, na pasta de 61% de sólidos, os valores registrados na viscosidade apresentam grande oscilação, efeito que diminui com o tempo. Para a pasta de 65% de sólidos, não se nota essa mesma oscilação, e as diferenças nos registros da viscosidade em 1 e 5min, apresentam-se somente ao início do teste, pois transcorridos os primeiros 30s seus valores ficaram muito próximos. Para as maiores velocidades de rotação, verifica-se uma tendência à queda dos valores da viscosidade, mostrando importantes diferenças nos valores medidos em 1 e 5min.

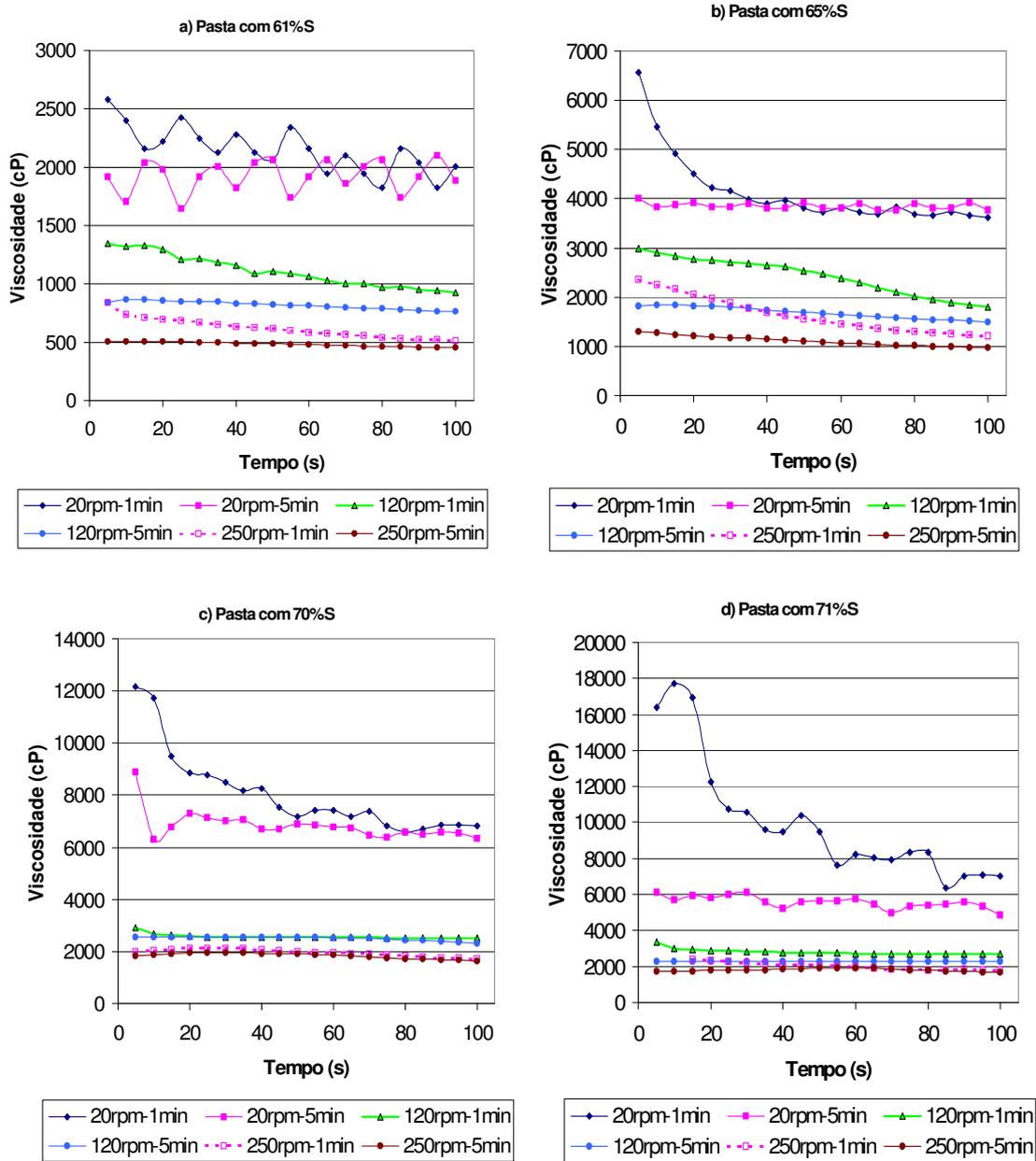


Figura 5.27: Efeito da velocidade de rotação da haste e tempo da medição sobre o valor da viscosidade para diferentes pastas preparadas com a amostra IV, a) 61%S; b) 65%S; c) 70%S; d) 71%S.

Nas Figuras 5.27-c) e 5.27-d) são mostrados os comportamentos das pastas com 70 e 71% em massa de sólidos. Apesar de serem próximos os valores de adensamento, o comportamento reológico é diferenciado para a curva de 20rpm de rotação da haste e

1min, para a quase totalidade dos pontos. Nas demais curvas, há uma tendência na obtenção de valores similares de viscosidade.

Na Figura 5.28 são mostrados os comportamentos reológicos de algumas das pastas estudadas e preparadas com a amostra V, considerando o ciclo 1-180-1 rpm.

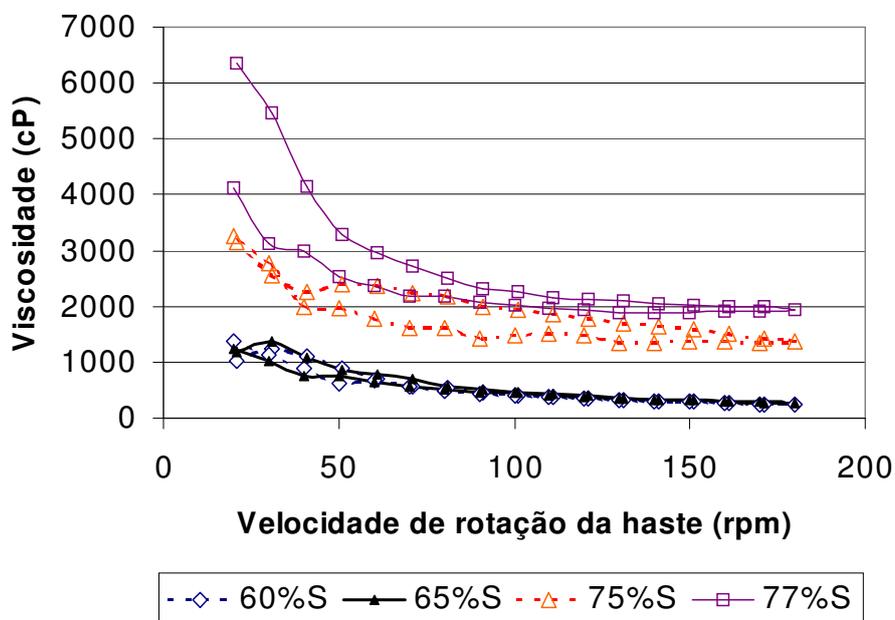


Figura 5.28: Gráfico da viscosidade em função da velocidade de rotação da haste para pastas da amostra V, para um ciclo 1-180-1 rpm.

A Figura 5.28 mostra que as pastas menos adensadas (60 e 65% de sólidos) apresentam comportamentos muito similares. As pastas mais adensadas, de 75 e 77% de sólidos, mostram curvas com maiores valores de viscosidade. Ao se observar a Tabela V do anexo VI, nota-se que nos adensamentos menores, o comportamento reológico não é único, mas com uma maior tendência ao tixotropismo. Para os adensamentos maiores, as curvas apresentam-se totalmente tixotrópicas.

Na Figura 5.29 são mostrados os comportamentos reológicos de pastas preparadas com a amostra V. Neste caso, são apresentados os resultados obtidos ao utilizar um ciclo 1-20-1 rpm.

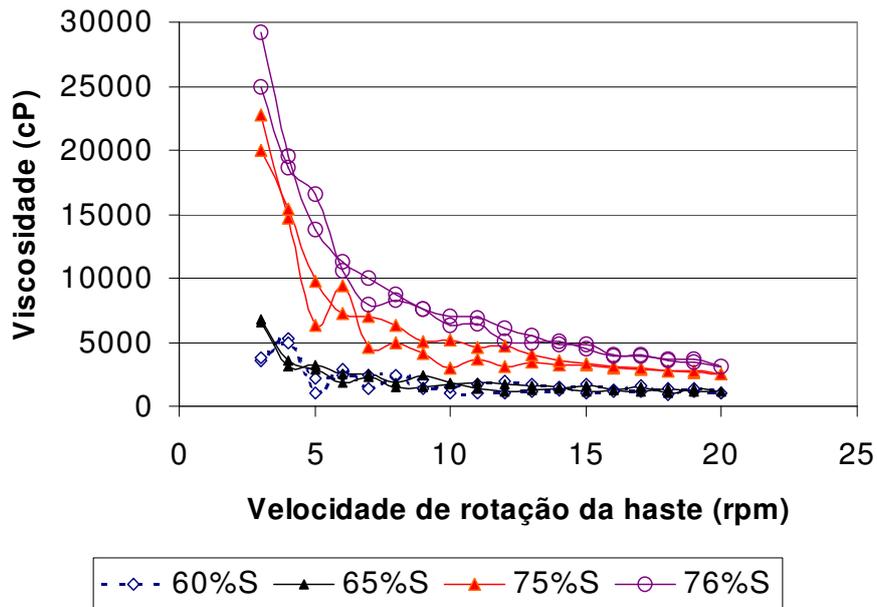


Figura 5.29: Gráfico da viscosidade em função da velocidade de rotação da haste para pastas da amostra V, considerando um ciclo 1-20-1 rpm.

Pode se observar, considerando-se a Figura 5.29, que as pastas menos adensadas (60 e 65% de sólidos) mostram comportamentos muito similares. As pastas mais adensadas de 75 e 76% de sólidos apresentam curvas com maiores valores de viscosidade e claramente diferenciadas, observando-se também alta histerese. Ao se observar a Tabela V do anexo IV, verifica-se que em todos os adensamentos estudados, o comportamento reológico é duplo, com uma maior tendência ao reotropismo, efeito que se acentua nos adensamentos maiores.

Os efeitos da velocidade de rotação da haste e do tempo são apresentados na Figura 5.30, considerando-se adensamentos de 60, 65, 75 e 77% de sólidos.

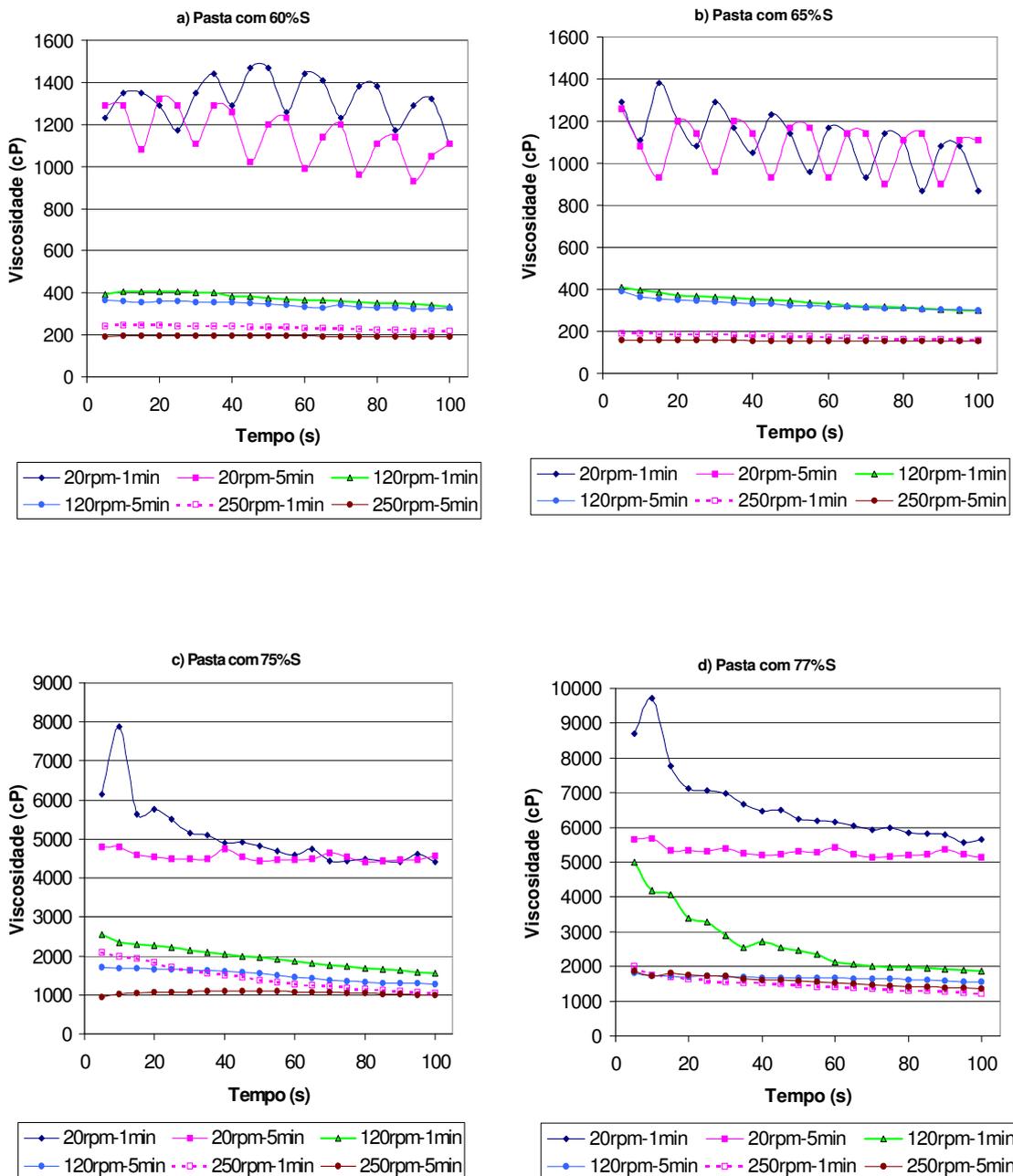


Figura 5.30: Efeito da velocidade de rotação da haste e do tempo da medição sobre o valor da viscosidade para diferentes pastas preparadas com a amostra V.

Nas Figuras 5.30 – a e 5.30 - b são mostrados os comportamentos reológicos das pastas de 60 e 65% em massa de sólidos. Para a pasta de 60% de sólidos, nota-se grande oscilação nos valores de viscosidade para baixas rotações da haste, observando-se valores mais elevados em 1min em comparação com aqueles obtidos em 5min. De

forma semelhante, para a pasta de 65% de sólidos, os valores de viscosidade apresentam oscilação. Para as maiores velocidades de rotação há uma tendência na queda dos valores da viscosidade, mostrando pequena diferença nos valores medidos em 1 e 5min.

Nas Figuras 5.30 - c e 5.30 - d são mostrados os comportamentos das pastas de 75 e 77% em massa de sólidos. Para ambos casos, observam-se tendências bem similares. No caso da baixa velocidade de rotação (20rpm), a curva para 1min mostra uma tendência à queda na viscosidade, já na curva de 5min há uma tendência à estabilidade. Para altas velocidades de rotação da haste, existem diferenças mínimas nas curvas reológicas em 1 e 5min a partir do início. O comportamento também é similar quando se comparam as rotações de 20 e 120rpm.

Na Figura 5.31 são mostrados os comportamentos reológicos de pastas preparadas com a amostra VI, no ciclo 1-180-1 rpm.

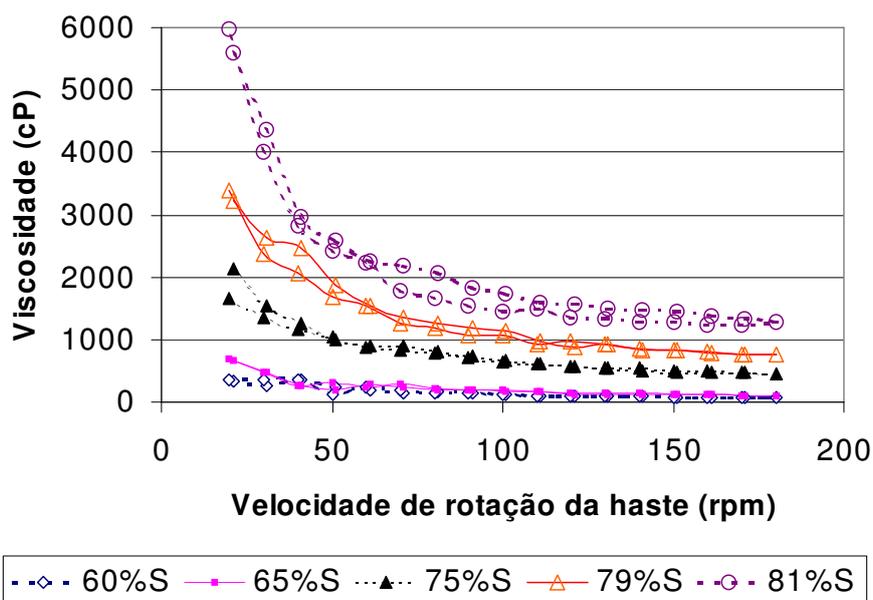


Figura 5.31: Gráfico da viscosidade em função da velocidade de rotação da haste para pastas da amostra VI, para um ciclo 1-180-1 rpm.

Neste caso, observa-se um duplo comportamento em todas as pastas estudadas. De forma mais específica, é possível estabelecer que para as pastas menos adensadas (60 até 75% S) predomina o comportamento reotrópico, e para aquelas mais adensadas (78 até 81% S) o tixotropismo é cada vez mais dominante (ver Tabela VI do Anexo IV).

Na Figura 5.32 são mostrados os comportamentos reológicos de pastas preparadas com a amostra VI. Neste caso, são apresentados os resultados obtidos ao utilizar um ciclo 1-20-1 rpm.

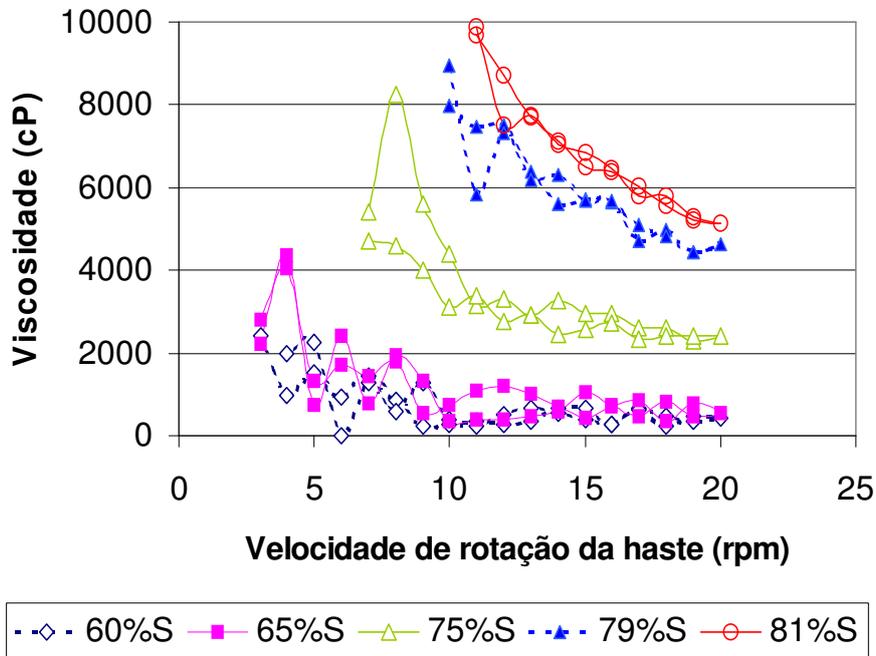


Figura 5.32: Gráfico da viscosidade em função da velocidade de rotação da haste para algumas das pastas da amostra VI, para um ciclo 1-20-1 rpm.

Da Figura 5.32 observa-se que não há um comportamento único em todas as pastas estudadas. De forma mais específica, pode se estabelecer que para as pastas menos adensadas (60 até 65%) predomina o comportamento reotrópico, e para aquelas mais adensadas (75 até 81%) o tixotropismo é cada vez mais dominante (ver Tabela VI do Anexo IV).

O efeito da velocidade de rotação da haste e do tempo sobre a viscosidade, considerando os adensamentos de 60, 65, 76 e 81% de sólidos, é apresentado na Figura 5.33.

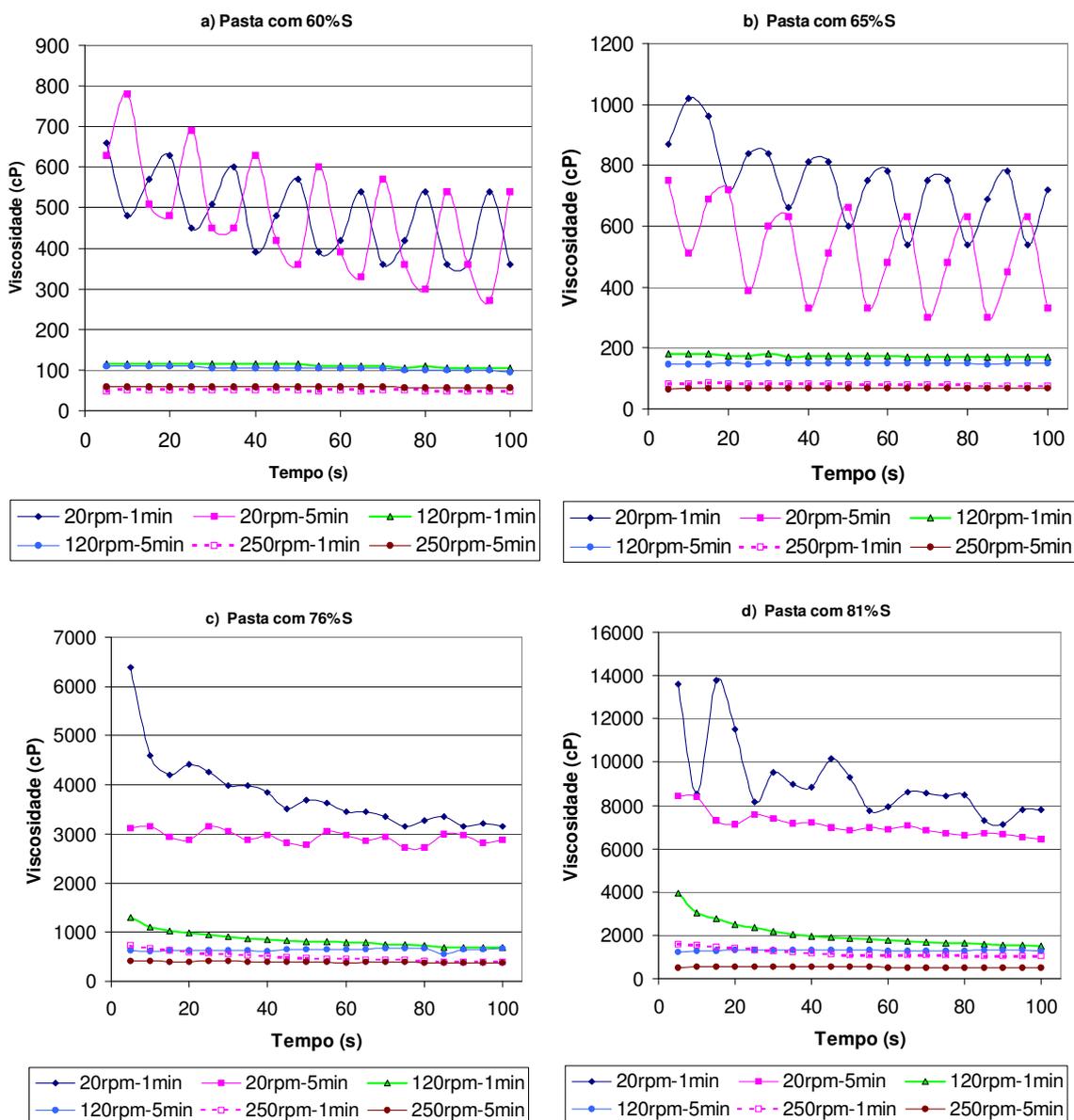


Figura 5.33: Efeito da velocidade de rotação da haste e do tempo da medição sobre o valor da viscosidade para diferentes pastas preparadas com a amostra VI.

Nas Figuras 5.33 – a e 5.33 - b são mostrados os comportamentos bastante similares das pastas de 60 e 65% de sólidos em massa. Observa-se que para 20rpm na rotação da haste, há grande oscilação nos valores da viscosidade, tanto para a pasta testada em 1min quanto para aquela em 5min. Especificamente, na pasta de 60% de sólidos, os valores de viscosidade são bem próximos. Para a pasta de 65% de sólidos, a viscosidade mostra uma queda importante em seu valor, após 5min do início do teste.

Nas Figuras 5.33 - c e 5.33 - d são mostrados os comportamentos das pastas de 76 e 81% em massa de sólidos, que também apresentam tendências similares. Em 20rpm, observa-se uma queda nos valores de viscosidade a medida que aumenta o tempo do ensaio. Nas velocidades de rotação superiores (120 e 250rpm) essa tendência vai diminuindo, tendendo a valores constantes de viscosidade.

A Figura 5.34 apresenta um ciclo reológico 1-180-1 rpm, para as pastas das amostras originais II e III e das misturas chamadas amostras IV, V e VI.

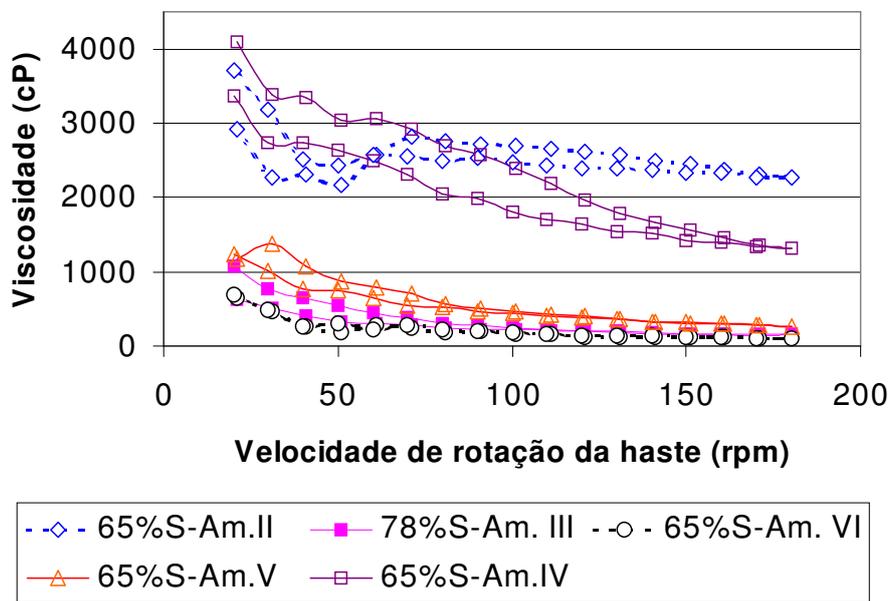


Figura 5.34: Comportamentos reológicos no ciclo 1-180-1 rpm para pastas menos adensadas das diferentes amostras estudadas.

Nesta figura observa-se que os maiores valores da viscosidade são apresentados pela pasta com 65%S da amostra IV para baixas velocidades de rotação da haste (<80rpm) e pela pasta de 65%S da amostra II para maiores velocidades (80-180rpm). Ambas apresentam duplo comportamento reológico, sendo a pasta da amostra IV mais tixotrópica e a correspondente à amostra II, de predomínio reotrópico.

As outras três pastas consideradas apresentam valores da viscosidade e tendências similares, com a consideração que a pasta da amostra III contém 78% em sólidos enquanto que as pastas das misturas (amostras V e VI) somente contém 65% em sólidos. Quanto a seu comportamento reológico, pode verificar-se que as pastas

preparadas com as amostras III e VI são reotrópicas nessas condições. No caso da pasta da amostra V tem-se um comportamento também misto com maior predomínio do tixotropismo, fato que poderia atribuir-se a maior quantidade de material fino contido nessa amostra (50% amostra II e 50% amostra III).

A Figura 5.35 apresenta o ciclo reológico 1-20-1 rpm, nas pastas preparadas com 65% de sólidos das amostras II, IV, V e VI.

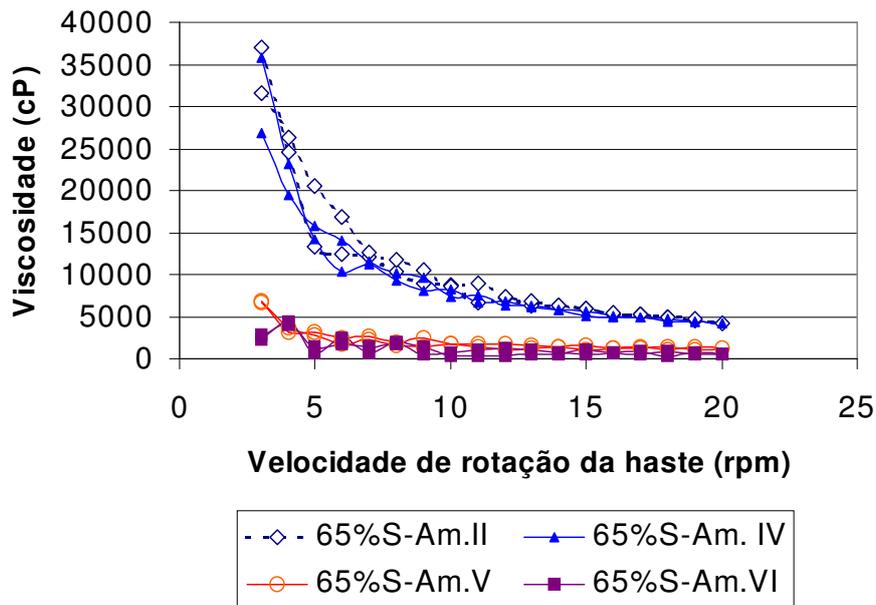


Figura 5.35: Comportamentos reológicos no ciclo 1-20-1 rpm para pastas menos adensadas das diferentes amostras estudadas

Na Figura 5.35 observa-se que os maiores valores da viscosidade são apresentados pela pasta com 65% de sólidos da amostra II, superando o máximo de 35.000cP, para 3rpm de rotação da haste. A pasta da amostra IV também apresenta altos valores na viscosidade com curvas próximas daquela correspondente à pasta da amostra II. Seus valores estão incluídos na faixa de 5.000 à 35.000cP aproximadamente. Já no caso das pastas das amostras V e VI com 65% de sólidos, são observados valores muito inferiores na viscosidade (ver gráfico da Figura 5.35). Quanto ao caráter reológico das pastas, tem-se que todas têm predominância reotrópica, sendo menos acentuado no caso das amostras IV e V. Isto pode ser explicado pelo fato de estar considerando um ciclo com valores baixos de velocidade de rotação da haste.

A Figura 5.36 mostra as curvas reológicas para um ciclo 1-180-1 rpm, no caso das pastas preparadas com as amostras originais (II e III) e as misturas (IV, V e VI), de forma mais adensada.

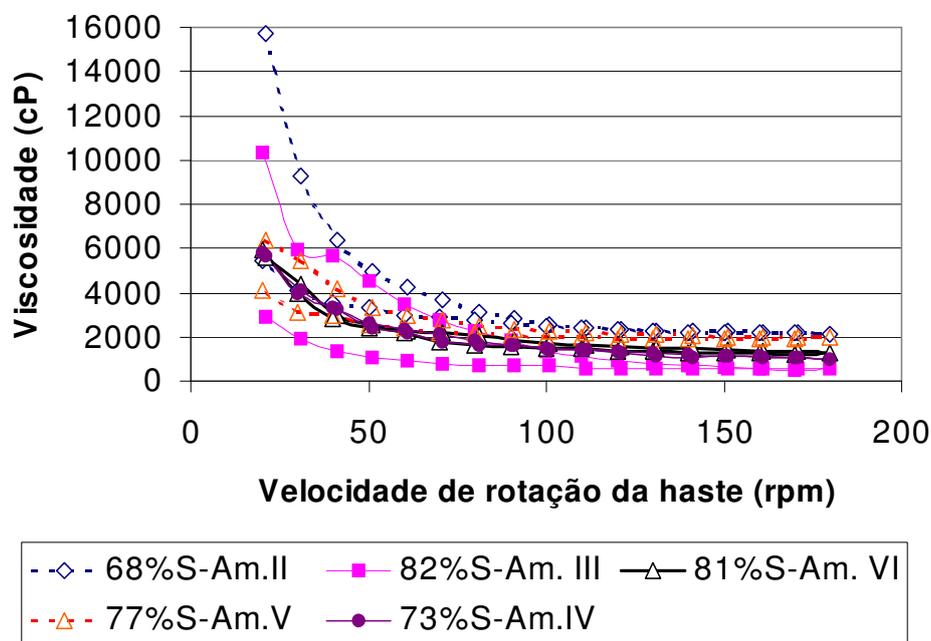


Figura 5.36: Comportamentos reológicos no ciclo 1-180-1 rpm para pastas mais adensadas das diferentes amostras estudadas.

A Figura 5.36 mostra que os maiores valores da viscosidade são alcançados pela pasta de 68% de sólidos preparada com a amostra II (faixa de 2.000 a 16.000cP). É interessante observar que o resultado mostrado pela pasta de 82% em sólidos da amostra III, que apresenta elevados valores de viscosidade nas baixas velocidades de rotação da haste (<100rpm) no retorno do ciclo. No trajeto de ida seus valores são os mais baixos, segundo pode-se ver na mesma Figura 5.36. As demais pastas com altos adensamentos de sólidos, preparadas como misturas, apresentam curvas com tendências similares. Quanto ao comportamento reológico destes sistemas de pastas, pode dizer-se que predomina o tixotropismo na quase totalidade das pastas consideradas nesta análise. Há, nesse caso, somente uma exceção que é a pasta da amostra III, que mostrou ser altamente reotrópica.

Na Figura 5.37 é mostrado o efeito do tempo sobre os valores registrados na viscosidade, considerando 120rpm de rotação da haste e 5min de tempo para registro de dados.

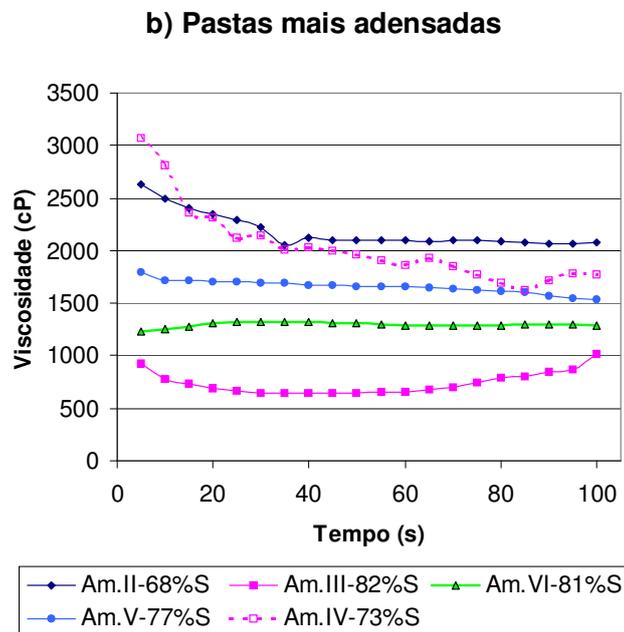
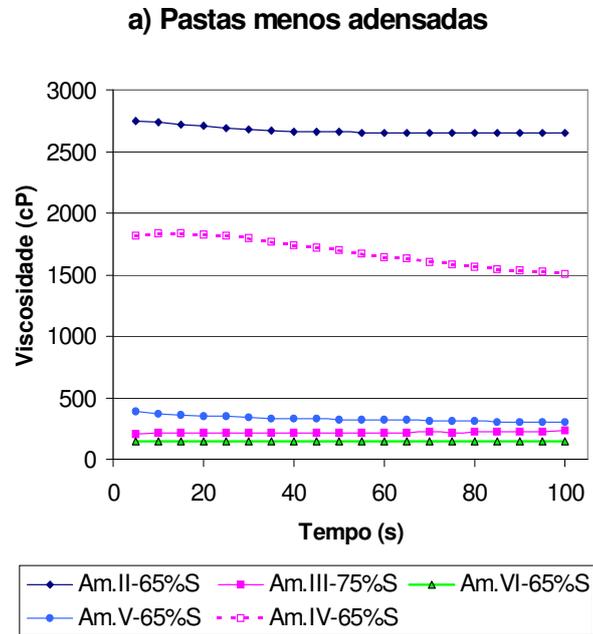


Figura 5.37: Efeito do tempo sobre os valores da viscosidade: a) pastas menos adensadas; b) pastas mais adensadas.

Na Figura 5.37 – a observa-se que a grande maioria das curvas mostradas apresentam tendências a valores constantes da viscosidade, sendo a pasta com 65% de sólidos da amostra II aquela de maiores valores registrados (na faixa 2.654 à 2.744cP), depois aparece a curva da pasta com 65%S da amostra IV, com valores da viscosidade na faixa entre 1.505 e 1.840cP. Finalmente, mostram-se muito próximas as curvas reológicas correspondentes às pastas minerais com 65% de sólidos das amostras V e VI e 75% em sólidos da amostra III, também com tendências a alta estabilidade.

Na Figura 5.37 - b correspondente às pastas mais adensadas, observa-se uma maior variabilidade nos valores registrados da viscosidade, se comparada com a Figura 5.37 - a. Especificamente, para a pasta com 68% de sólidos da amostra II, pode-se notar que a curva com maiores valores na viscosidade, a partir de 20s do início, já que nos primeiros segundos, é a pasta com 73% de sólidos da amostra IV a que registra os maiores valores na viscosidade. A pasta preparada com 77% de sólidos da amostra V exibe um comportamento intermediário. As curvas correspondentes as pastas com 81% de sólidos da amostra VI e 82% de sólidos da amostra III mostram os menores valores de viscosidade, mesmo tendo maior proporção de sólidos. A distribuição granulométrica muito mais grosseira poderia explicar este resultado.

5.2.2. TESTE DE SLUMP

Os resultados do teste de “slump”, utilizando geometria cilíndrica em escala de laboratório, são apresentados na Tabela V.9 e na Figura 5.38, a seguir:

Tabela V.9: Alturas de “slump” obtidas usando geometria cilíndrica

%S	Altura “slump”, H _s (cm)					
	Amostra I	Amostra II	Amostra III	Amostra IV	Amostra V	Amostra VI
60	-----	6,70	-----	-----	-----	-----
61	-----	5,40	-----	-----	-----	-----
62	-----	4,80	-----	-----	-----	-----
63	-----	4,40	-----	-----	-----	-----
64	-----	3,75	-----	-----	-----	-----
65	-----	2,50	-----	-----	-----	-----
66	-----	-----	-----	-----	-----	-----
67	-----	-----	-----	-----	-----	-----
68	-----	-----	-----	-----	-----	-----
69	-----	-----	-----	-----	-----	-----
70	7,70	-----	-----	8,00	-----	-----
71	7,55	-----	-----	7,50	-----	-----
72	7,00	-----	-----	5,70	-----	-----
73	6,50	-----	-----	4,80	8,10	-----
74	5,75	-----	-----	4,00	7,20	-----
75	4,40	-----	-----	3,20	6,20	-----
76	3,50	-----	-----	2,40	4,60	7,70
77	2,50	-----	-----	1,80	4,10	7,10
78	2,10	-----	8,50	1,30	3,70	4,80
79	-----	-----	7,00	0,85	2,50	3,40
80	1,50	-----	6,20	0,65	1,40	2,50
81	-----	-----	4,40	-----	0,75	1,80
82	0,85	-----	2,90	-----	-----	1,20

(-----) indica que o teste não foi realizado naquela condição.

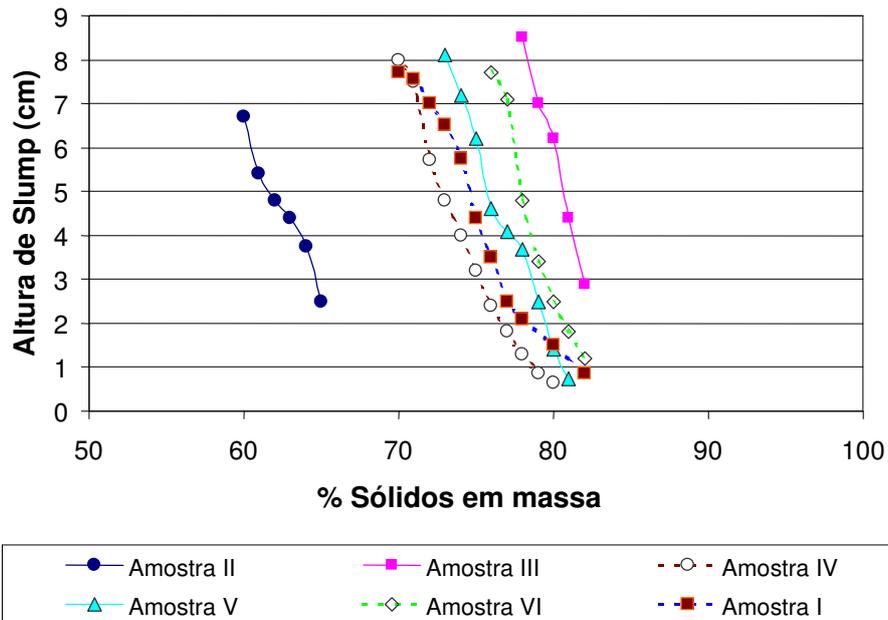


Figura 5.38: Gráfico de altura “slump” em função do adensamento da pasta considerando amostras originais e misturas.

Da Tabela V.9 e da Figura 5.38, observa-se o comportamento esperado para todas as pastas estudadas, ou seja, menores alturas de “slump”, à medida que cresce o adensamento da pasta. Observa-se, também, um ordenamento das curvas obtidas: para granulometrias mais finas, precisa-se de faixas de adensamento cada vez menores (maiores consumos de água), de modo a obter uma mesma resposta no teste de “slump”. Essa resposta tem a ver com a consistência da correspondente pasta mineral.

Para o caso da amostra I, que corresponde a uma origem diferente das demais amostras, nota-se um comportamento muito similar ao apresentado pela amostra IV, cuja distribuição granulométrica, ASE e composição química mais se aproximam desta (ver Tabelas V.4 e V.5).

É importante destacar, que na totalidade das pastas minerais estudadas, a faixa de adensamento na qual apresentam-se valores de altura “slump” mensuráveis é estreita, fato que pode ser melhor observado na Figura 5.39 que mostra o comportamento “slump” de pastas preparadas com a amostra I e adensamentos de 73 e 75% em massa de sólidos.

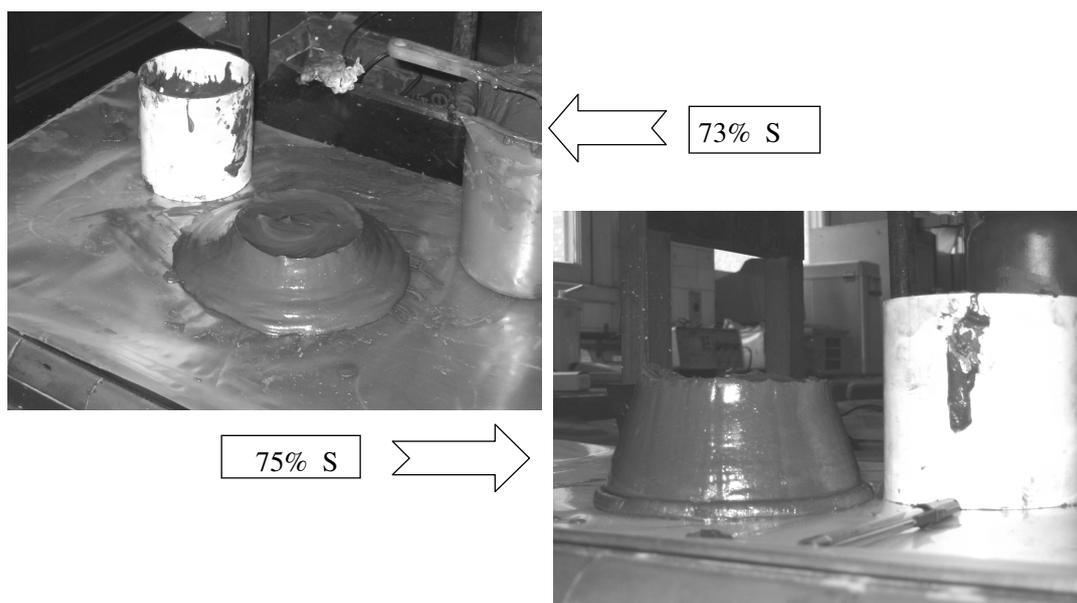


Figura 5.39: Fotografias de teste de cilindro “slump” para pastas da amostra I para adensamentos de 73 e 75% de sólidos.

Para se poder comparar os resultados de “slump”, foi preparada uma maior quantidade de amostra para ser levada ao cone “slump” de escala piloto, de modo a analisar o adensamento necessário para atingir um abatimento em 50% da altura inicial do cone ou cilindro. Para as amostras testadas, o resultado é apresentado na Tabela V.10 a seguir:

Tabela V.10: Adensamento necessário para abatimento de 50% da altura “slump”

# da amostra	%S para 50% de abatimento em cilindro laboratório D = 10cm, H = 10cm	%S para 50% de abatimento em cone planta piloto D = 20, d = 10, H = 30cm	Diferença absoluta (%)
I	74,6%	79,8%	5,2
II	61,7%	75,2%	13,5
III	80,7%	81,0%	0,3
V	75,8%	78,8%	3,0

Dos resultados mostrados na Tabela V.10, no caso da amostra II, observa-se a maior diferença (superior aos 13 pontos percentuais) nos valores de adensamento de sólidos necessário para atingir 50% de abatimento na altura de “slump”, ao considerar

geometria cônica ou cilíndrica. No caso das amostras I e IV, que correspondem a misturas de lamas e rejeitos, observam-se valores mais próximos, já que suas diferenças são de 3 e 5,2%. Finalmente, no caso da amostra III, aquela diferença é quase nula, fato que pode ser explicado pela distribuição granulométrica mais grosseira desta amostra.

Outra análise comparativa, também referida à geometria do teste de “slump”, foi realizada registrando uma série de dados da altura “slump” obtida, para o caso das pastas preparadas com amostras originais (II e III) e uma mistura (V). Na Tabela V.11 são apresentados os valores da altura “slump” e % de abatimento, obtidos no teste de cone, para as pastas preparadas com as amostras II, III e V. A Figura 5.40 apresenta um gráfico com os valores dos % de abatimento da altura “slump” no caso das pastas preparadas com as amostras II, III e V, considerando ambas geometrias.

Tabela V.11: Altura e % de abatimento (% ABT) do “slump” usando geometria cônica

%S	Amostra II		Amostra III		Amostra V	
	H _S (cm)	% ABT	H _S (cm)	% ABT	H _S (cm)	% ABT
71,7	23,00	76,67	-----	-----	-----	-----
72,5	22,50	75,00	-----	-----	-----	-----
73,4	21,00	70,00	-----	-----	-----	-----
74,2	20,00	66,67	-----	-----	-----	-----
75,0	17,00	56,67	-----	-----	-----	-----
76,0	12,00	40,00	-----	-----	-----	-----
77,1	-----	-----	-----	-----	22,50	75,00
77,9	-----	-----	-----	-----	20,50	68,33
78,1	-----	-----	-----	-----	20,00	66,67
78,7	-----	-----	-----	-----	15,50	51,67
79,4	-----	-----	22,50	75,00	-----	-----
79,5	-----	-----	-----	-----	10,00	33,33
80,3	-----	-----	18,50	61,67	-----	-----
81,2	-----	-----	14,50	48,33	-----	-----
82,1	-----	-----	8,40	28,00	-----	-----
83,1	-----	-----	5,50	18,33	-----	-----
84,0	-----	-----	3,50	11,67	-----	-----

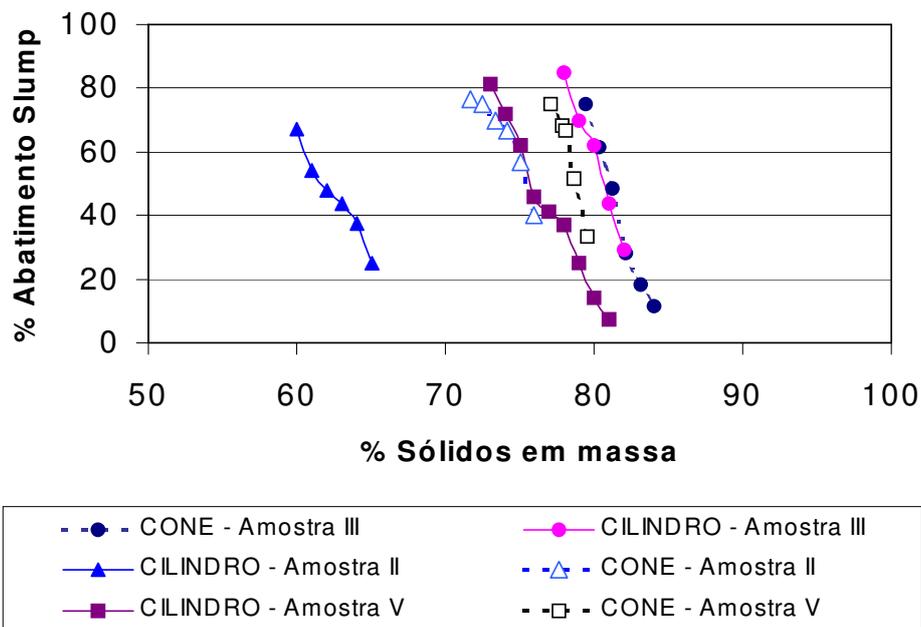


Figura 5.40: Gráfico % de abatimento da altura “slump” em função do adensamento de pasta, considerando cone e cilindro.

Ao se observar a Figura 5.40 nota-se que, em geral, o cilindro prediz sempre adensamentos menores de pasta para atingir uma mesma altura “slump”. Especificamente, para as pastas estudadas, observa-se que a maior diferença obtida corresponde ao sistema de pasta da amostra II, que apresenta a distribuição granulométrica mais fina, seguida da amostra V que corresponde a mistura de 50% da amostra II e 50% da amostra III e por último a amostra III, que apresenta uma diferença mínima.

Na Figura 5.41 são apresentadas fotografias dos testes de cone e cilindro “slump” realizados com a amostra V, indicando também os valores dos correspondentes adensamentos de pasta e frações de abatimento do “slump”.

As Figuras 5.41 – a, 5.41 – c e 5.41 – e mostram as fotografias correspondentes aos testes de cone “slump”, enquanto as Figuras 5.41 – b, 5.41 – d e 5.41 – f exibem os perfis dos testes de cilindro “slump”, realizados com as pastas da amostra V. As indicações dos adensamentos utilizados e da resposta, expressa como % de abatimento do cone ou cilindro, são mostrados nesta mesma figura.

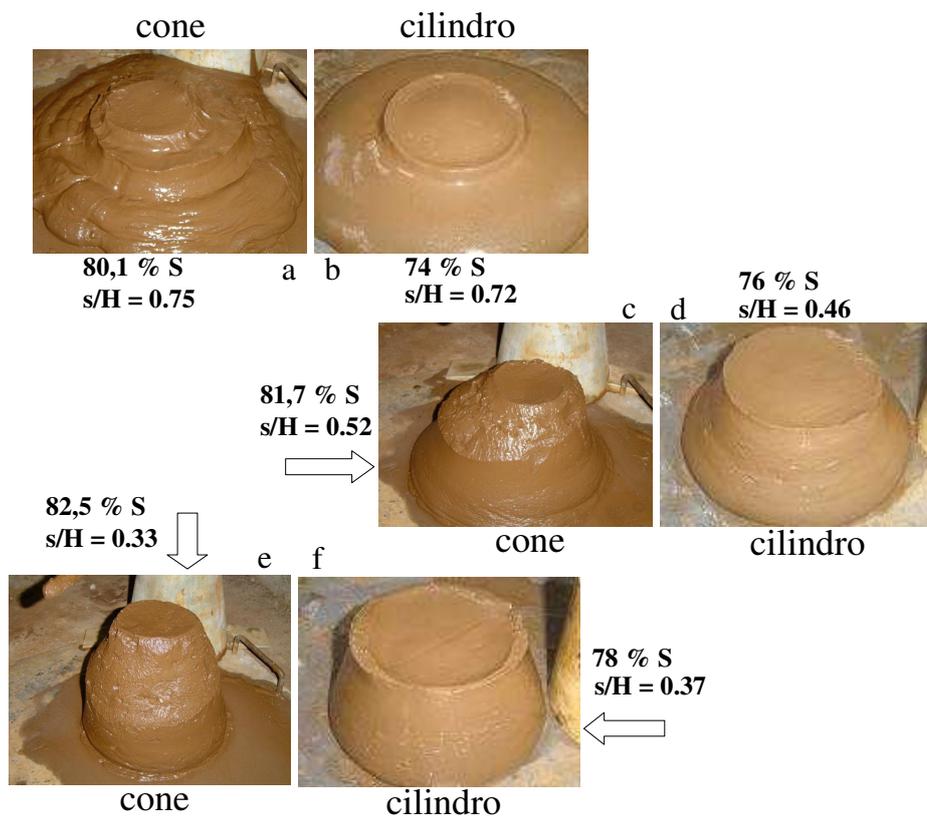


Figura 5.41: Fotografias dos testes de “slump” realizados com pastas da amostra V, utilizando geometrias cônica e cilíndrica.

A Figura 5.41 ilustra as diferenças que foram registradas na totalidade das amostras estudadas, as quais são certamente menores no caso da amostra de granulometria mais grosseira (amostra III), o que pode ser observado na Figura 5.40 anterior, e muito mais significativa para o caso da amostra II de granulometria mais fina (a qual alcança mais de 13 pontos percentuais).

5.2.3. TESTE DE CALHA (“FLUME”)

O sistema de “pastefill” formado a partir da amostra I foi estudado com inclinações de base de 0, 1, 2 e 3% para uma altura fixa de pasta na caixa da alimentação (13cm aproximadamente) correspondente a um volume de 5.148cm³. A Tabela V.12 mostra os resultados obtidos considerando os valores dos parâmetros experimentais H₁, H₂ e L, mediante os quais foi possível calcular os valores dos ângulos de repouso, θ_R .

Tabela V.12: Ângulos de repouso em função do adensamento do “pastefill” da amostra I

%S	Inclinação da base (%)	L (cm)	H ₁ (cm)	H ₂ (cm)	θ_R (°)
70	0	> 100	2,9	0,3	1,49
	1	>100	2,5	0,3	1,26
	2	> 100	2,1	0,3	1,03
	3	>100	1,9	0,3	0,92
71	0	> 100	3,1	0,4	1,55
	1	>100	2,9	0,3	1,49
	2	> 100	2,6	0,3	1,32
	3	>100	2,3	0,4	1,09
72	0	> 100	3,8	0,5	1,89
	1	>100	3,4	0,4	1,72
	2	> 100	3,0	0,5	1,43
	3	>100	2,8	0,5	1,32
73	0	95,0	4,2	0,2	2,18
	1	>100	3,9	0,6	1,89
	2	>100	3,7	0,5	1,83
	3	>100	3,5	0,5	1,72
74	0	92,5	5,0	0,9	2,35
	1	>100	4,7	0,9	2,18
	2	>100	4,6	0,9	2,12
	3	>100	4,2	0,8	1,95
75	0	71,5	4,9	0,9	3,20
	1	73,0	4,7	0,8	2,35
	2	85,2	4,4	0,9	2,35
	3	87,7	4,4	0,9	2,29
76	0	58,2	5,6	0,9	4,62
	1	59,6	5,2	0,7	4,32
	2	64,8	5,0	0,6	3,88
	3	71,5	4,7	0,5	3,36

A Figura 5.42 apresenta o gráfico do ângulo de repouso, θ_R em função da inclinação da base (expressa em %) para os adensamentos de 70 até 76% de sólidos em massa, considerados para as pastas da amostra I.

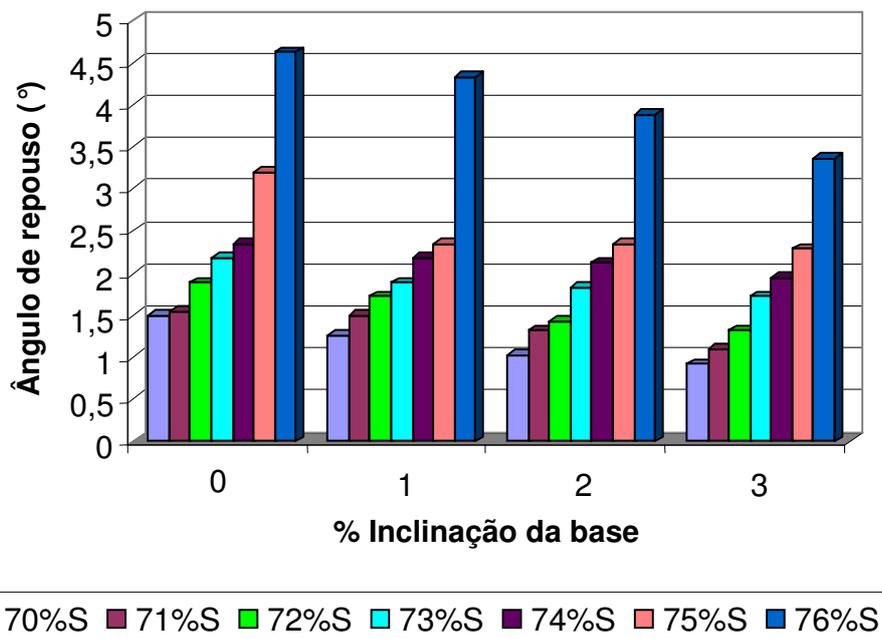


Figura 5.42: Gráfico do ângulo de repouso em função da inclinação da base, para “pastefill” da amostra I, na faixa de 70 a 76% em sólidos.

Considerando-se a Tabela V.12 e a Figura 5.42, observa-se uma tendência à queda nos valores do ângulo de repouso das pastas, quando a inclinação da base da calha vai sendo incrementada, efeito que se apresenta na totalidade das pastas estudadas. Essa queda é cada vez mais gradual em termos absolutos, conforme a pasta encontra-se mais diluída. Isto pode ser verificado fazendo-se a comparação das pastas com 70 e 76% em sólidos. Na pasta de 70% de sólidos, o ângulo de repouso cai em 0,23°, 0,46° e 0,57° em referência do valor inicial sem inclinação da base; já para a pasta de 76% de sólidos, o ângulo de repouso cai em 0,30°, 0,74° e 1,26° nas mesmas condições anteriores.

A Tabela V.13 mostra os valores de ângulo de repouso obtidos para as 6 amostras estudadas, considerando-se a inclinação da base da calha de 0 e 3%.

Tabela V.13: Ângulos de repouso em função do adensamento da pasta

%S	Inclinação base (%)	Ângulo de repouso, θ_R (°)					
		Amostra I	Amostra II	Amostra III	Amostra IV	Amostra V	Amostra VI
57	0	----	2.63	----	----	----	----
	3	----	1.89	----	----	----	----
58	0	----	3.53	----	----	----	----
	3	----	2.68	----	----	----	----
59	0	----	4.68	----	----	----	----
	3	----	3.39	----	----	----	----
60	0	----	5.62	----	----	----	----
	3	----	4.76	----	----	----	----
61	0	----	7.77	----	----	----	----
	3	----	6.26	----	----	----	----
62	0	----	9.46	----	----	----	----
	3	----	8.47	----	----	----	----
63	0	----	12.56	----	----	----	----
	3	----	11.44	----	----	----	----
64	0	----	16.62	----	----	----	----
	3	----	15.58	----	----	----	----
65	0	----	8.28	----	----	----	----
	3	----	8.63	----	----	----	----
68	0	----	----	----	5,5	----	----
	3	----	----	----	5,0	----	----
69	0	----	----	----	7,2	----	----
	3	----	----	----	6,5	----	----
70	0	1,49	----	----	10,5	----	----
	3	0,92	----	----	9,9	----	----
71	0	1,55	----	----	12,3	----	----
	3	1,09	----	----	11,8	----	----
72	0	1,89	----	----	16,0	----	----
	3	1,32	----	----	15,4	----	----
73	0	2,18	----	----	13,1	5,0	----
	3	1,72	----	----	12,5	4,3	----
74	0	2,35	----	1,15	10,4	7,0	----
	3	1,95	----	0,86	10,0	6,4	----
75	0	3,20	----	1,43	----	11,5	----
	3	2,29	----	1,09	----	10,7	----
76	0	4,62	----	1,83	----	15,9	----
	3	3,36	----	1,2	----	14,7	----
77	0	----	----	3,23	----	10,0	----
	3	----	----	2,23	----	8,9	----
78	0	----	----	4,43	----	----	4,12
	3	----	----	4,07	----	----	2,98
79	0	----	----	9,42	----	----	6,32
	3	----	----	9,34	----	----	5,48
80	0	----	----	15,61	----	----	10,79
	3	----	----	16,54	----	----	9,71
81	0	----	----	15,26	----	----	15,04
	3	----	----	14,48	----	----	14,88
82	0	----	----	12,77	----	----	6,12
	3	----	----	10,11	----	----	3,47

A Figura 5.43 mostra a relação entre os ângulos de repouso dos “pastefill” em função dos adensamentos considerados nas diferentes pastas estudadas.

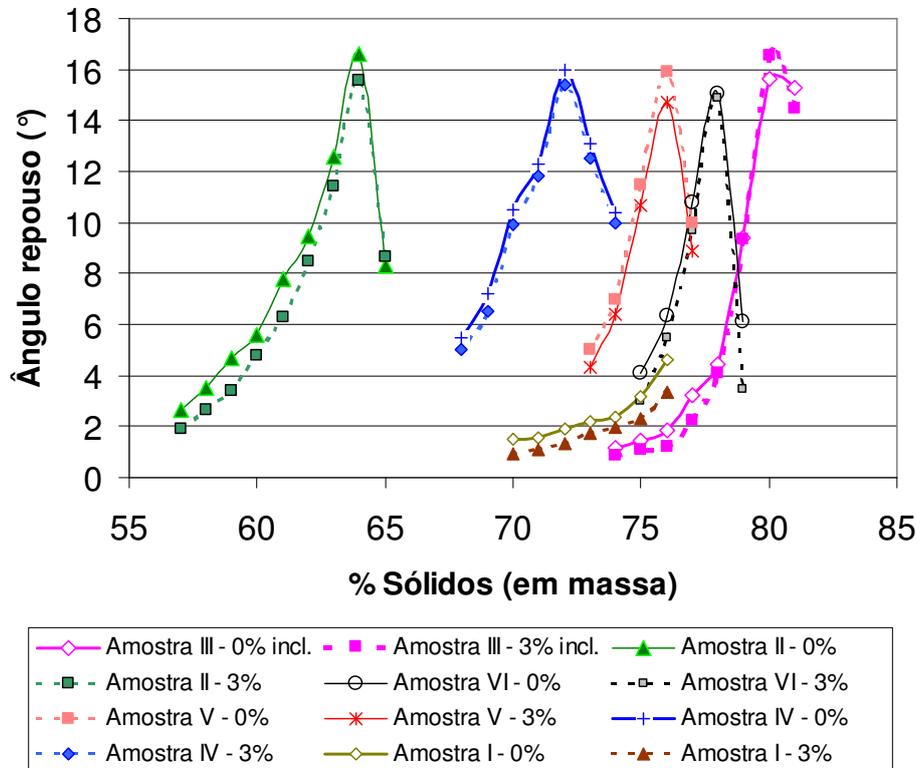


Figura 5.43: Gráfico do ângulo de repouso em função do adensamento da pasta.

Da Tabela V.13 e da Figura 5.43 observa-se que há um ordenamento das curvas correspondentes ao ângulo de repouso dos sistemas de “pastefill” estudados em função do adensamento da pasta, aparecendo como extremos as correspondentes as amostras II e III. Um fato a ser ressaltado, neste caso, é que os menores valores obtidos para o caso da pasta da amostra I, que corresponde a uma mistura de rejeitos da separação magnética e de lamas de ferro, não superaram os 5°, já que, na realidade, não foi atingido seu máximo valor como nos demais sistemas. De qualquer forma, um valor de 5° de ângulo de repouso é interessante na hora de se projetar a disposição final desse material. Todas as demais curvas superaram o valor de 15° no ângulo de repouso, valor muito mais elevado que o normalmente utilizado nas minerações que empregam este tipo de sistema de disposição. Cabe destacar o fato que obteve-se uma ampla faixa de adensamento de sólidos dos “pastefill”, para os quais diferentes sistemas de rejeitos e lamas de ferro podem apresentar valores muito atrativos na necessidade de disposição destes materiais, sejam preenchimentos subterrâneos ou superficiais.

É também importante salientar o fato de que a maior inclinação da base causa redução no possível ângulo de repouso do “pastefill”, que está relacionado diretamente com o tipo de terreno considerado para a disposição do material.

A maior ou menor inclinação no terreno, no qual vai ser disposto o material de tipo “pastefill”, pode influenciar outros aspectos como é o caso da eliminação da água da pasta. Este e outros fenômenos são apresentados na Figura 5.44.

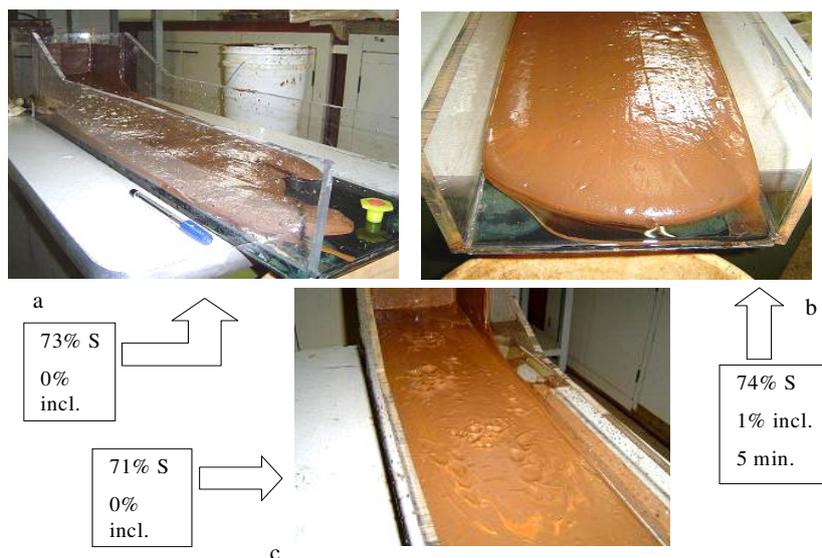


Figura 5.44: Fotografias de testes de “flume” de pastas da amostra I.

Na Figura 5.44 - a pode-se apreciar o perfil da calha após realizado um teste de “flume” usando uma pasta com adensamento de 73% de sólidos e com 0% de inclinação da base da calha. Na Figura 5.44 – b mostra-se o detalhe do perfil final de uma pasta mais adensada (74% em sólidos) e considerando uma inclinação de 1% na calha, observou-se maior facilidade de separar da água quando foram decorridos 5 minutos do início do teste. Na Figura 5.44 - c observa-se a aparição de estrias, que seria outra característica do fluxo de “pastefill”, neste caso em uma pasta com menor adensamento que as anteriores (71% em sólidos) e sem inclinação na calha.

Uma correlação entre os resultados de altura de “slump” e do ângulo de repouso determinado através da realização do teste de “flume” pode ser facilmente obtida ao contrastar esses resultados para quaisquer das pastas estudadas. Como exemplo, podem ser consideradas as amostras I, II e III, cujas respostas a aqueles parâmetros são apresentadas na Tabela V.14.

Tabela V.14: Valores de altura “slump” e ângulo de repouso para amostras originais

%S	Inclinação base (%)	Amostra I		Amostra II		Amostra III	
		H _S (cm)	θ _R (°)	H _S (cm)	θ _R (°)	H _S (cm)	θ _R (°)
57	0	-----	-----	-----	2,63	-----	-----
	3		-----		1,89		-----
58	0	-----	-----	-----	3,53	-----	-----
	3		-----		2,68		-----
59	0	-----	-----	-----	4,68	-----	-----
	3		-----		3,39		-----
60	0	-----	-----	6,70	5,62	-----	-----
	3		-----		4,76		-----
61	0	-----	-----	5,40	7,77	-----	-----
	3		-----		6,26		-----
62	0	-----	-----	4,80	9,46	-----	-----
	3		-----		8,47		-----
63	0	-----	-----	4,40	12,56	-----	-----
	3		-----		11,44		-----
64	0	-----	-----	3,75	16,62	-----	-----
	3		-----		15,58		-----
65	0	-----	-----	2,50	8,28	-----	-----
	3		-----		8,63		-----
66	0	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	3		-----		-----		-----
67	0	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	3		-----		-----		-----
68	0	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	3		-----		-----		-----
69	0	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	3		-----		-----		-----
70	0	7,70	1,49	-----	-----	-----	-----
	3		0,92		-----		-----
71	0	7,55	1,55	-----	-----	-----	-----
	3		1,09		-----		-----
72	0	6,50	1,89	-----	-----	-----	-----
	3		1,32		-----		-----
73	0	5,75	2,18	-----	-----	-----	-----
	3		1,72		-----		-----
74	0	4,40	2,35	-----	-----	-----	1,15
	3		1,95		-----		0,86
75	0	3,50	3,20	-----	-----	-----	1,43
	3		2,29		-----		1,09
76	0	2,50	4,62	-----	-----	-----	1,83
	3		3,36		-----		1,2
77	0	2,10	-----	-----	-----	-----	3,23
	3		-----		-----		2,23
78	0	-----	-----	-----	-----	8,50	4,43
	3		-----		-----		4,07
79	0	1,50	-----	-----	-----	7,00	9,42
	3		-----		-----		9,34
80	0	-----	-----	-----	-----	6,20	15,61
	3		-----		-----		16,54
81	0	0,85	-----	-----	-----	4,40	15,26
	3		-----		-----		14,48
82	0	-----	-----	-----	-----	2,90	12,77
	3		-----		-----		10,11

Assim, a Figura 5.45 apresenta fotografias dos testes de “slump” e “flume” realizados com pastas da amostra III. Observa-se a correlação que existe entre os parâmetros reológicos H_S e θ_R , que caracterizam esses sistemas de “pastefill”.

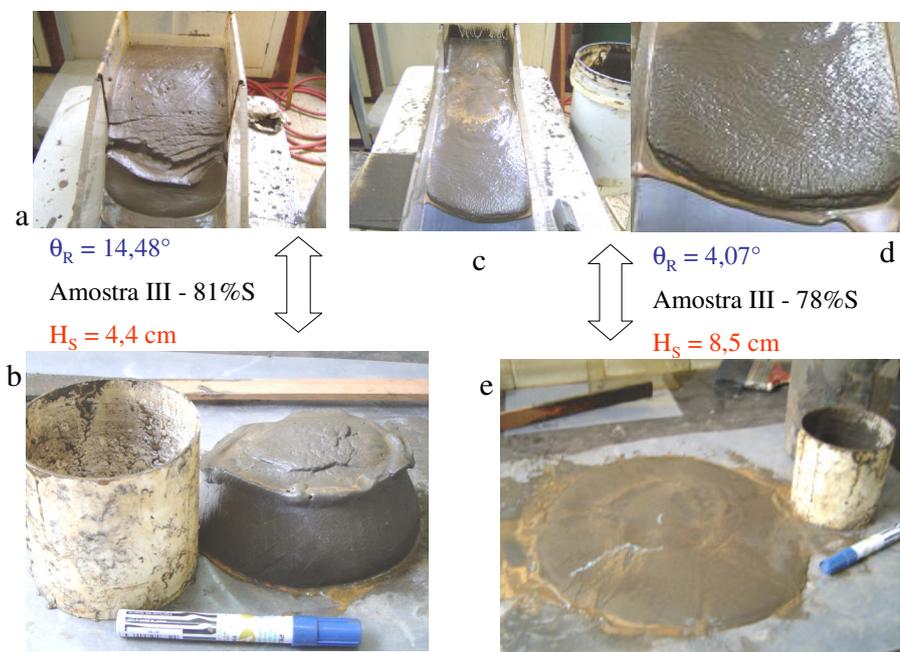


Figura 5.45: Fotografias de testes de “slump” e “flume” de pastas da amostra III.

A Figura 5.45 mostra uma grande diferença de comportamento das pastas com adensamentos próximos como 78 e 81% em sólidos. A pasta com 81% de sólidos apresenta alto valor do ângulo de repouso ($14,48^\circ$, Figura 5.45 - a) e uma altura de “slump” muito apropriada de 4,4cm no cilindro de laboratório (44% de abatimento, Figura 5.45 - b). A forma do “slump” formado neste caso revela um comportamento diferente ao tradicional abatimento com forma de cone truncado, fato que pode ser explicado dada a origem particular desse tipo de material, que corresponde a um rejeito do processo de flotação, e que, portanto, deve apresentar um mais alto grau de hidrofobicidade. A pasta com 78% de sólidos depositada com uma inclinação da base da calha de 3%, apresenta $4,07^\circ$ para o ângulo de repouso (Figura 5.45 - c), que é um valor menor que o anterior, e uma altura de “slump” muito grande (8,5cm que representa um abatimento de um 85%, Figura 5.45 - e). Na fotografia mostrada pela Figura 5.45 - d, nota-se desprendimento da água da pasta ao final do teste, fato que está de acordo com o caráter mais hidrofóbico da amostra III.

5.2.4.- ENSAIOS MECÂNICOS

Os resultados apresentados neste capítulo são aqueles obtidos nos testes de compressão simples, aplicados aos corpos de prova fabricados segundo a norma NBR 7215 de cimento portland, e com as condições experimentais apresentadas na Tabela V.15:

Tabela V.15: Condições experimentais e características dos corpos de prova

Amostra sólida usada	Tempo de cura (dias)	Adição de ligante (%)	Data de elaboração	Data de rompimento	Nº de corpos de prova
Cimento puro (CP-05)	7	-----	28-10-2004	04-11-2004	3
	21	-----	28-10-2004	18-11-2004	3
	28	-----	28-10-2004	25-11-2004	3
	35	-----	28-10-2004	02-12-2004	3
Amostra I	21	4 e 8% de CP-05	28-10-2004	18-11-2004	6
	35	CP-05	28-10-2004	02-12-2004	6
Amostra I	21	4 e 8% de MK	28-10-2004	18-11-2004	6
	35	MK	28-10-2004	02-12-2004	6
Amostra II	7	4% de CP-05	22-12-2004	29-12-2004	4
	28		22-12-2004	19-01-2005	4
Amostra III	7	4% de CP-05	22-12-2004	29-12-2004	4
	28		22-12-2004	19-01-2005	4
Amostra III	7	4% de (MK + CaO)	22-12-2004	29-12-2004	4
	28		22-12-2004	19-01-2005	4
Amostra V	7	4% de CP-05	22-12-2004	29-12-2004	4
	28		22-12-2004	19-01-2005	4

Os resultados desses testes de compressão simples são apresentados na Tabela V.16.

Ao observar de forma geral os valores da Tabela V.16, verifica-se que tanto para as amostras de cimento portland puro (CP-05) quanto para o “pastefill” da amostra I, os valores máximos da tensão de ruptura são alcançados para os 21 dias de cura. Ao analisar os valores das tensões de ruptura do “pastefill” da amostra I observa-se claramente que todos os registros superam a cota de 2MPa, ao considerar 21 e 35 dias de cura. Apreciam-se diferenças entre as tensões obtidas com “pastefill” cimentado com 4 e 8% de CP, sendo maiores no segundo caso (quase 1MPa a mais, considerando os valores médios).

Tabela V.16: Resultados dos ensaios mecânicos de compressão simples

Nº corpo de prova	Tempo de cura (dias)	Adição de ligante (%)	Data de fabricação	Data de rompimento	Tensão de ruptura (MPa)
1 (CP-05)	7	----	28-10-2004	18-11-2004	15,48
2 (CP-05)	7	----	28-10-2004	18-11-2004	16,14
3 (CP-05)	7	----	28-10-2004	18-11-2004	14,79
1 (CP-05)	21	----	28-10-2004	18-11-2004	30,14
2 (CP-05)	21	----	28-10-2004	18-11-2004	28,58
3 (CP-05)	21	----	28-10-2004	18-11-2004	29,78
1 (CP-05)	28	----	28-10-2004	18-11-2004	25,11
2 (CP-05)	28	----	28-10-2004	18-11-2004	28,55
3 (CP-05)	28	----	28-10-2004	18-11-2004	26,81
4 (CP-05)	35	----	28-10-2004	02-12-2004	26,55
5 (CP-05)	35	----	28-10-2004	02-12-2004	25,30
6 (CP-05)	35	----	28-10-2004	02-12-2004	27,68
7 (Am. I)	21	4% CP-05	28-10-2004	18-11-2004	2,450
8 (Am. I)	21	4% CP-05	28-10-2004	18-11-2004	2,101
9 (Am. I)	21	4% CP-05	28-10-2004	18-11-2004	2,227
10 (Am. I)	35	4% CP-05	28-10-2004	02-12-2004	2,165
11 (Am. I)	35	4% CP-05	28-10-2004	02-12-2004	2,066
12 (Am. I)	35	4% CP-05	28-10-2004	02-12-2004	----
13 (Am. I)	21	8% CP-05	28-10-2004	18-11-2004	3,014
14 (Am. I)	21	8% CP-05	28-10-2004	18-11-2004	2,947
15 (Am. I)	21	8% CP-05	28-10-2004	18-11-2004	3,102
16 (Am. I)	35	8% CP-05	28-10-2004	02-12-2004	2,547
17 (Am. I)	35	8% CP-05	28-10-2004	02-12-2004	2,694
18 (Am. I)	35	8% CP-05	28-10-2004	02-12-2004	3,168

Nas Tabelas do Anexo V são apresentados os dados dos testes de compressão simples, aplicados aos corpos de prova de cimento puro e dos pastefill estudados.

Na Figura 5.46 são apresentadas as curvas dos gráficos da tensão instantânea em função do tempo, para a amostra I cimentada com 4% e 8% de CP para tempos de cura de 21 e 35 dias.

Da Figura 5.46 observa-se um comportamento de constantes quedas e recuperações nos valores da carga aplicada, o qual foi comum em todos os corpos de prova dos “pastefill” estudados. Especificamente nesta figura, foram apresentados resultados de corpos de prova individuais e não de valores médios calculados. Também foram informados os valores da tensão de ruptura (T_R) para as quatro curvas apresentadas, as que revelam que o maior valor corresponde ao “pastefill” cimentado

com 8% de CP e curado de 21 dias (3,01MPa), enquanto que o menor valor de 2,10MPa corresponde ao “pastefill” cimentado com 4% de CP e curado de 21 dias. Os perfis das curvas correspondentes à adição de 8% de CP como ligante apresentam um máximo e logo um decaimento no valor da tensão instantânea. No caso dos corpos de prova cimentados com 4% de CP como ligante aprecia-se uma tendência a estabilidade no valor da tensão.

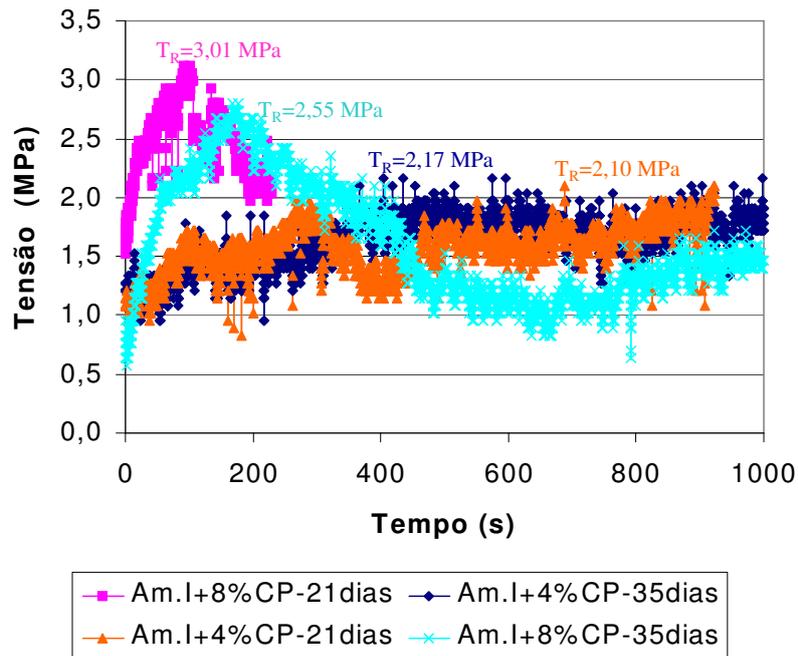


Figura 5.46: Gráfico tensão instantânea em função do tempo para amostra I.

Outro aspecto interessante que mostra a Figura 5.46 é a longa duração desses testes de compressão, que alcançaram valores equivalentes a 1000s (corpos de prova curados durante 35dias), em comparação com os de cimento puro, que registraram ciclos máximo de ruptura equivalentes aos 200s. Para chegar a este resultado foi preciso trabalhar com a mínima velocidade da prensa hidráulica, que neste caso correspondeu à aquela velocidade mínima da máquina (V_1). Observa-se também ao visualizar os valores de tensão instantânea, que existem ciclos de queda e recuperação nos valores da carga aplicada, segundo mostram as curvas do gráfico da Figura 5.46 e que caracteriza o comportamento mecânico destes sistemas de “pastefill”, efeito não observado no caso do cimento puro, segundo mostra-se na Figura 5.47.

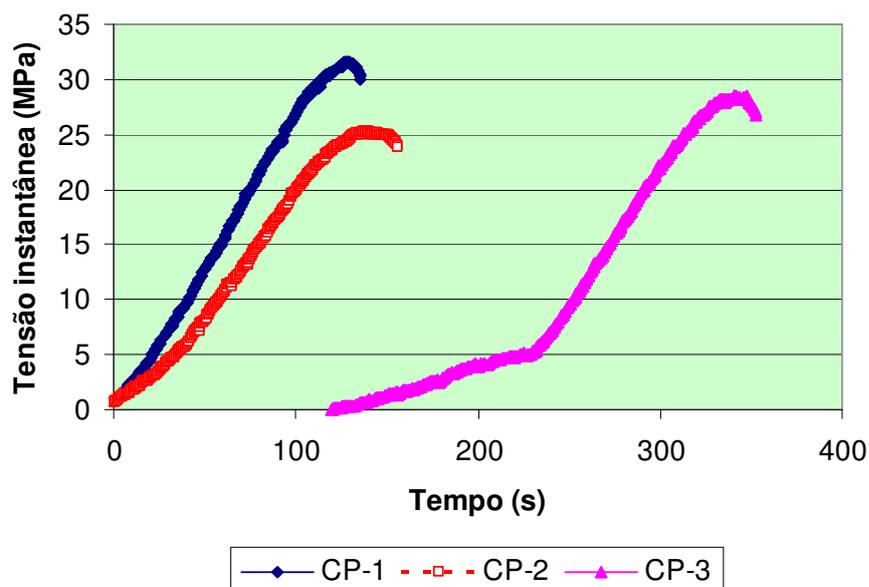


Figura 5.47: Comportamento mecânico de corpos de prova de cimento puro.

Da Figura 5.47 observa-se que para as três curvas apresentadas que correspondem a três corpos de prova (CP-1, CP-2 e CP-3) de cimento puro com tempo de cura de 35 dias, existe uma tendência ao crescimento até alcançar o valor máximo da tensão de ruptura. A curva se apresenta sem oscilações dos valores, diferentemente do comportamento mostrado pelos corpos de prova dos diferentes “pastefill” cimentados. Além disso, observa-se valores de resistência (tensão de ruptura) muito maiores que os atingidos pelo cimento puro CP-05, que em média alcançou o valor equivalente a 28MPa.

Uma comparação dos comportamentos mecânicos das amostras originais II e III e da mistura, chamada amostra V, considerando os tempos de cura de 7 e 28 dias, empregando os ligantes CP e (MK+CaO), é apresentada na Tabela V.17.

Deve-se mencionar o fato que neste último caso (estudo das amostras II, III e V) foi utilizada outra prensa hidráulica para realizar os ensaios de compressão simples, dado que a máquina mais moderna e conectada ao computador através de uma interface, não estava em operação na data programada para os rompimentos. A máquina usada neste caso não conseguia alcançar as baixas velocidades de aplicação de carga desejadas, essa seria a explicação dos menores valores das resistências à compressão obtidas.

Tabela V.17 - a): Valores das resistências e tensões de ruptura alcançadas pelos corpos de prova das amostras II, III e V, para tempo de cura de 7 dias

# corpo prova	Amostra	Ligante	Resistência Ruptura (kgf)	Tensão Ruptura (MPa)	Tensão Ruptura média (MPa)
1	II	4% CP	200	1,039	1,169
2	II	4% CP	260	1,350	
3	II	4% CP	200	1,039	
4	II	4% CP	240	1,246	
1	III	4% CP	220	1,142	1,298
2	III	4% CP	250	1,298	
3	III	4% CP	280	1,454	
4	III	4% CP	250	1,298	
1	V	4% CP	400	2,077	2,207
2	V	4% CP	450	2,337	
3	V	4% CP	450	2,337	
4	V	4% CP	400	2,077	
1	III	4% (MK+CaO)	-----	-----	-----
2	III	4% (MK+CaO)	-----	-----	
3	III	4% (MK+CaO)	-----	-----	
4	III	4% (MK+CaO)	-----	-----	

Tabela V.17 - b): 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

# 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)	-----	-----	

Para esquematizar os valores obtidos da tensão média de ruptura nos diferentes corpos de prova estudados, é apresentado o gráfico ilustrado na Figura 5.48. Neste gráfico de barras foram considerados os valores médios das tensões de ruptura alcançadas nos corpos de prova das amostras II, III e V para tempos de cura de 7 e 28 dias e para os elementos ligantes 4% de CP e 4% de (MK+CaO), devido a que a adição de meta caulim sozinho não apresentou o resultado esperado.

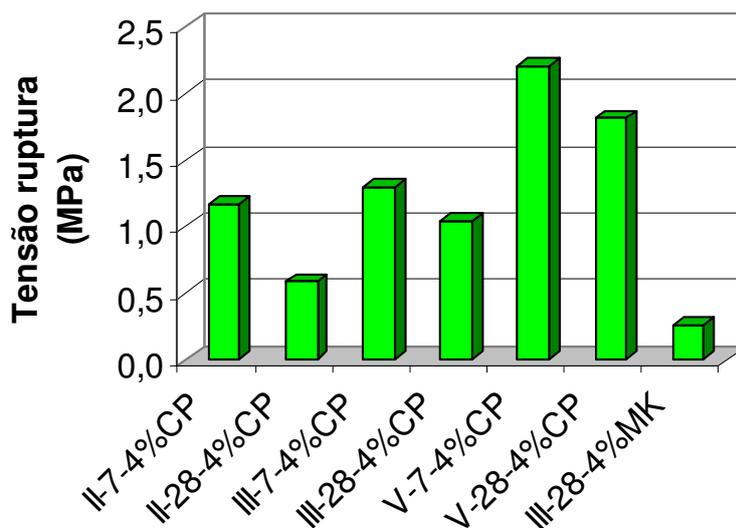


Figura 5.48: Gráfico da tensão de ruptura para os “pastefill” estudados.

A Figura 5.48 mostra que a maior resistência e, portanto, maior tensão de ruptura alcançada é aquela exibida pelo “pastefill” preparado com a amostra V com 7 dias de cura e 4% de CP usado como ligante, a qual supera a cota dos 2MPa de resistência da mesma forma que os corpos de prova testados com a amostra I (ver Tabela V.12 e Figura 5.46), ainda considerando a maior velocidade de aplicação de carga na prensa hidráulica utilizada. No caso do “pastefill” preparado com a amostra III tem-se um comportamento médio similar ao apresentado por aquele da amostra II, com a diferença que este cresceu no valor da tensão de ruptura ao aumentar o tempo de cura (de 7 para 28 dias). No caso da amostra cimentada com MK e CaO, tem-se a resistência mais baixa, que apenas supera a cota dos 0,25MPa. Este resultado é muito interessante dado que o ligante utilizado não contém cimento, ainda que somente foi possível medir resistência à compressão em dois corpos de prova daqueles com 28 dias de cura. Deve mencionar-se que a consistência do “pastefill” obtido com o ligante MK e CaO é aquela

requerida para a disposição superficial ou subterrânea, dado seu maior tempo de endurecimento, além de que o custo associado é muito menor.

Sob um ponto de vista mais macroscópico, são apresentadas fotografias dos corpos de prova antes e após o rompimento nos testes de compressão não confinada, que podem ser vistas nas Figuras 5.49 até 5.52.

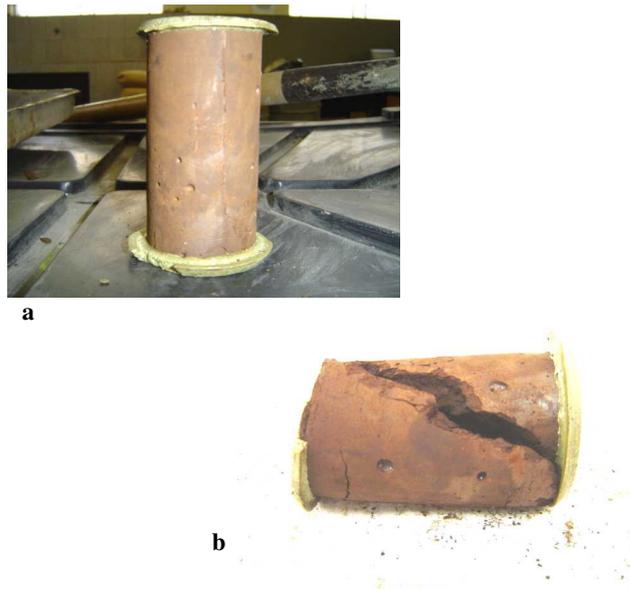


Figura 5.49: Fotografias de corpos de prova da amostra II cimentado com 4% CP e 7 dias de cura, a) antes do rompimento, c) após ruptura

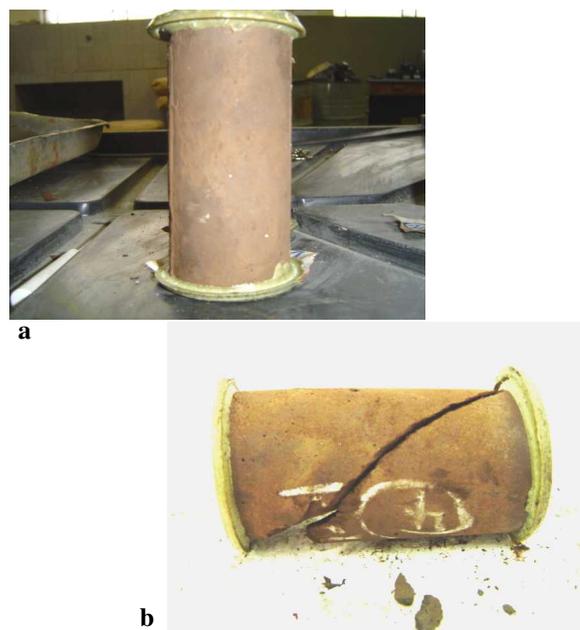


Figura 5.50: Fotografias de corpos de prova da amostra V cimentado com 4% CP e 7 dias de cura, a) antes do rompimento, c) após ruptura

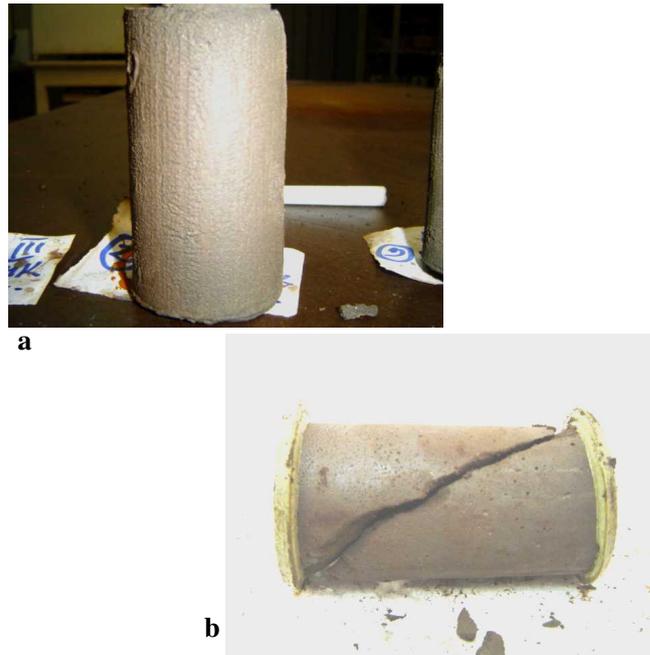


Figura 5.51: Fotografias de corpos de prova da amostra III cimentado com 4% CP e 7 dias de cura, a) antes do rompimento, c) após ruptura

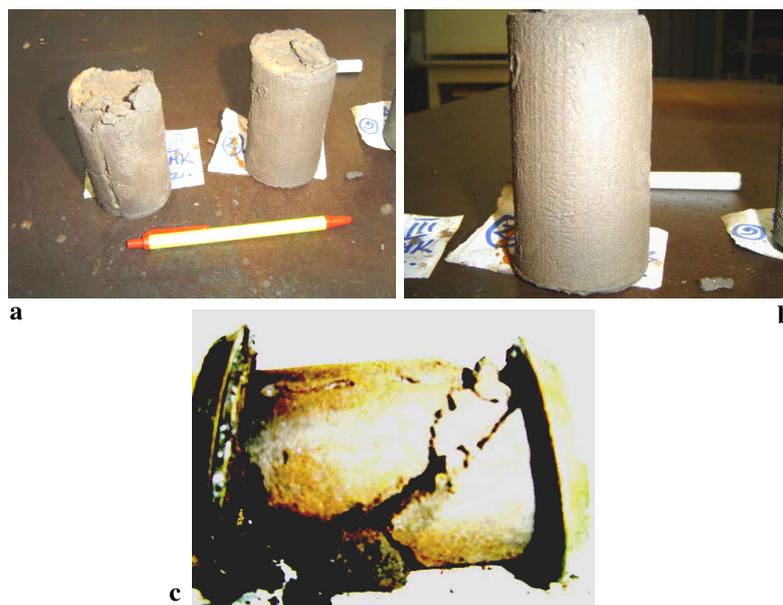


Figura 5.52: Fotografias de corpos de prova da amostra III cimentado com 4% (MK+CaO) e 7 dias de cura, a) e b) antes de rompimento, c) após ruptura

É muito interessante destacar que o tipo de fratura é o mesmo apresentado nos dois períodos de cura considerados (7 e 28 dias), oblíqua no sentido vertical do corpo de prova.

As propriedades físicas de permeabilidade e densidade, foram determinadas para alguns dos corpos de prova ensaiados. Os resultados são apresentados na Tabela V.18 a seguir:

Tabela V.18: Porosidade e densidade de alguns dos corpos de prova ensaiados

Corpo prova	Amostra	Ligante	Tempo cura (dias)	ϵ (cm ³ /cm ³)	Densidade (g/cm ³)
1	CP-05	100% CP	35	0,648	2,516
2	I	4% CP	35	0,665	3,950
3	I	8% CP	35	0,698	3,643
4	II	4% CP	28	0,720	3,450
5	V	4% CP	28	0,670	3,332
6	III	4% CP	28	0,475	3,628
7	III	4% (MK+CaO)	28	0,542	3,043

A Tabela V.18 mostra que o corpo de prova de cimento puro tem a menor densidade em relação aos demais corpos de prova ensaiados e uma porosidade significativa em relação aos demais (0,648). Destacam-se como casos extremos o corpo de prova da amostra I com a maior densidade (3,95) e aqueles da amostra III que foram cimentados com CP e a mistura (MK+CaO), os quais mostram-se com a mais baixa porosidade (0,475) e mais baixa densidade dentro dos “pastefill” cimentados (3,043), respectivamente.

Nota-se que a adição de meta caulim e cal causa uma queda no valor da densidade do material (já que o valor da amostra III era de 3,31 g/cm³), incrementando a porosidade do “pastefill” (ao comparar com aquele cimentado com CP), e claro, melhorando sua resistência à compressão, mediante seu papel de aglomerante. Esta afirmação é somente válida no caso da amostra III, que foi a única testada com a adição dessa mistura ligante. No caso do ligante CP dependendo da granulometria do “pastefill” empregado, pode ocasionar quedas nos valores da densidade dos “pastefill” de granulometria mais fina (caso das amostras I e II) ou aumentos naqueles de granulometria mais grosseria (caso da amostra III). Isso pode ser observado ao comparar os resultados apresentados nas Tabelas V.1 e V.18.

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) forneceu algumas informações sobre a morfologia das partículas e aglomerados formados no caso das pastas cimentadas que foram estudadas. Na Figura 5.53 são apresentadas as fotografias de

MEV correspondentes aos corpos de prova já fraturados, cujas superfícies somente foram metalizadas. São incluídos os corpos de prova fraturados do cimento puro CP-05, do “pastefill” da amostra I cimentada com 4% de CP, ambos com 35 dias de cura. Também os corpos de prova dos “pastefill” preparados com a amostra III e cimentados com 4% de CP e com 4% da mistura MK e CaO, ambos com períodos de cura de 7 dias, foram analisados.

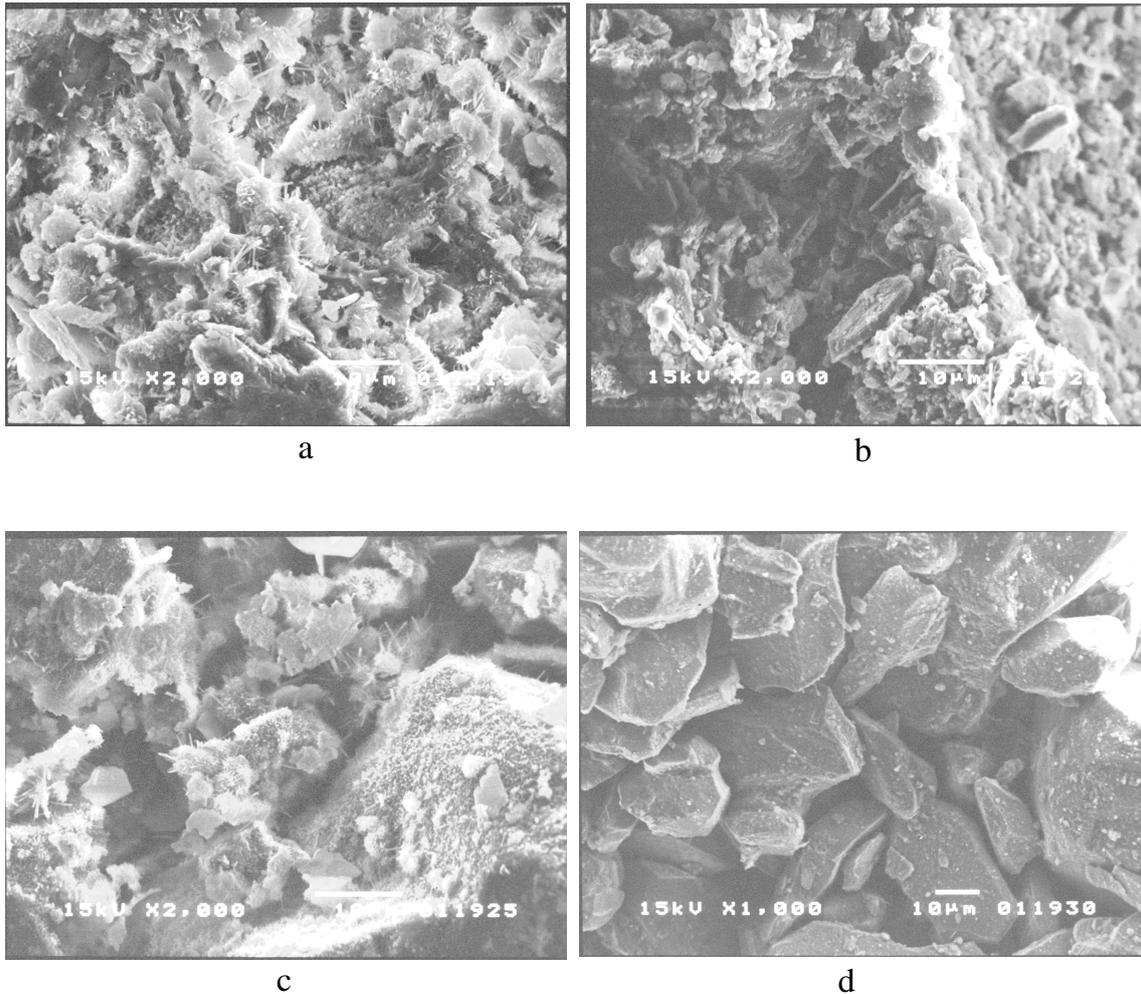


Figura 5.53: Fotografias de imagens MEV com elétrons retroespalhados de diferentes corpos de prova fraturados: a) cimento puro, 2000X; b) amostra I + 4% CP, 2000X; c) amostra III + 4%CP, 2000X; d) amostra III + 4% (MK + CaO), 1000X

A Figura 5.53 – a mostra a estrutura do corpo de prova de cimento puro CP-05, fraturado após 35 dias de cura. Observa-se que não aparecem grãos, e se apreciam estruturas de tipo agulhas, as quais são típicas das amostras cimentadas.

A Figura 5.53 – b, que apresenta a estrutura do corpo de prova da amostra I cimentada com 4% de CP, fraturado após 35 dias de cura, mostra uma estrutura mais cristalina que a anterior e menos agregada. Além disso, nota-se uma região de poros (direita) e as típicas formas de agulhas em mais baixa proporção (zona central).

A Figura 5.53 – c apresenta a estrutura do corpo de prova da amostra III cimentada com 4% de CP, fraturado após 7 dias de cura, mostrando uma estrutura cristalina com partículas de maior tamanho que a apresentada na Figura 5.24 – b, apreciando-se as típicas formas de agulhas das amostras cimentadas com CP.

Finalmente, a Figura 5.53 – d apresenta a estrutura do corpo de prova da amostra III cimentada com 4% da mistura de MK e CaO, também fraturado após 7 dias de cura, apresentando uma estrutura cristalina com partículas de granulometria mais grosseira que a ilustrada na Figura 5.53 – b, apreciando-se uma formação mais aglomerada das partículas minerais, provavelmente devido à ação da adição do meta caulim nesses sistemas de “pastefill”.

5.2.5.- TESTES DE PERMEABILIDADE À ÁGUA

Não foi possível obter resultados de testes de permeabilidade com os corpos de prova das amostras II, III e V, cimentados com 4 e 8% de CP, de dimensões 15cm×15cm e 2cm de espessura, empregando o permeabilímetro de Germann, dada a baixa resistência mecânica dos corpos de prova. Optou-se em fazer a determinação da permeabilidade de Karsten, que é uma técnica que não aplica tensão sobre o corpo de prova. Os resultados obtidos neste caso são apresentados na Tabela V.19. É importante mencionar que somente se conseguiu registrar valores dentro da escala de medida, em dois dos cinco corpos de prova ensaiados.

Tabela V.19 – a): Dados experimentais e calculados dos testes de permeabilidade à água para pastefill da amostra II

Dosagem Ligante CP (%)	Leitura N°	Tempo (min)	Volume de água (ml)	Fluxo de água ×10 ⁴ (ml/s)
8	1	3	0,4	22,22
8	2	6	0,7	19,44
8	3	10	0,7	11,67
8	4	90	4,0	7,41

Tabela V.19 – b): Dados experimentais e calculados dos testes de permeabilidade à água para pastefill da amostra V

Dosagem Ligante CP (%)	Leitura N°	Tempo (min)	Volume de água (ml)	Fluxo de água ×10 ⁴ (ml/s)
8	1	3	0,5	27,78
8	2	6	0,7	19,44
8	3	10	1,0	16,67
8	4	90	5,0	9,26

Dos valores apresentados nas Tabelas V.19 – a e V.19 – b, observa-se que ambos “pastefill” apresentaram uma menor permeabilidade que os demais corpos de prova (amostra III com 4 e 8% de CP, das mesmas amostras II e V cimentadas com 4% de CP), e além disso aparece um pouco menos permeável ao fluxo de água o pastefill preparado com a amostra II que aquele da amostra V. Deve mencionar-se que o tempo de cura destes corpos de prova ensaiados foi de apenas 7 dias.

6.- CONCLUSÕES

Segundo a revisão bibliográfica considerada neste estudo de caracterização de pastas minerais, pode-se concluir que a medida que o tempo avança cada vez cresce mais o número de usinas mineiras que praticam o sistema de disposição de rejeitos de seu processo produtivo na forma de pastas minerais. Este tipo de disposição apresenta variadas vantagens sobre o tratamento convencional de disposição dos rejeitos, que contempla a utilização de bacias ou barragens de rejeitos, que confinam esses produtos na forma de polpas.

Quanto às amostras sólidas estudadas, pode-se concluir o seguinte:

- As amostras sólidas originais (I, II e III) foram originadas em distintos estágios do tratamento de minério de ferro e apresentaram características físicas e químicas muito diferentes.

A amostra I apresentou a maior densidade ($4,41 \text{ g/cm}^3$), uma distribuição granulométrica bastante fina (d_{50} equivalente a $6,44\mu\text{m}$), e elevado valor do índice de Blaine ($4680 \text{ cm}^2/\text{g}$).

A amostra II mostrou uma densidade intermediária em relação às amostras originais ($3,66 \text{ g/cm}^3$), distribuição granulométrica mais fina (d_{50} equivalente a $4,34\mu\text{m}$), e o mais alto valor do índice de Blaine ($9545 \text{ cm}^2/\text{g}$).

A amostra III apresentou o mais baixo valor da densidade ($3,31 \text{ g/cm}^3$), a distribuição granulométrica mais grosseira de todas (d_{50} equivalente a $71,54\mu\text{m}$), e o mais baixo dos valores obtidos para o índice de Blaine ($813 \text{ cm}^2/\text{g}$).

- Quanto às características químicas das amostras sólidas, como a composição química, composição mineralógica e comportamento da carga superficial, pode-se concluir:

A amostra I mostrou a espécie mineralógica hematita como a predominante (80% em massa aproximadamente), acompanhada de outras espécies como quartzo (5%) e alumina (4%), o que pode ser afirmado com base nos resultados das técnicas de EAA, e DRX, respaldados pelos obtidos através de FRX, MEV e EIV.

A amostra II também mostrou a espécie mineralógica hematita como a predominante (60% em massa aproximadamente), além de outras espécies como quartzo (10%), caulinita, talco e pirolusita, dentre outras.

A amostra III mostrou a predominância de duas espécies mineralógicas, o quartzo (52% em massa) e a hematita (44% em massa).

- Através da técnica de MEV, pode-se corroborar qualitativamente a presença de espécies de maior predominância em cada uma das amostras.

- Quanto ao comportamento da carga superficial das partículas, foram estudadas as suspensões aquosas das amostras II e III, devido a suas características físicas e químicas tão desiguais. Pode-se concluir que o valor de pH determinado para o ponto isoelétrico (PIE) para a amostra II foi de 6,6 e para a amostra III, 4,3. Ambos valores estão em concordância com os informados na literatura científica, pH do PIE na faixa 7 – 8 para a hematita, e na faixa 2 – 3 para quartzo.

- Com a finalidade de comparar os valores da ASE das amostras originais e das misturas, foi determinado o índice de Blaine de todas as amostras em sua forma sólida. Conclui-se que os valores da ASE registrados ao usar a metodologia de Blaine, apresentaram a ordem crescente que seria a correspondente às amostras: III, VI, V, IV e II.

Quanto às pastas minerais estudadas, pode-se concluir:

- De uma maneira geral, o valor da viscosidade das pastas minerais aumentou na razão direta do aumento da porcentagem de sólidos, nas mesmas condições de operação, as pastas preparadas com a amostra II apresentaram os maiores valores de viscosidade, tanto nos ciclos reológicos mais lentos (1 – 20 – 1 rpm) quanto naqueles mais rápidos (1 – 180 – 1 rpm).

- Quanto às leituras da viscosidade em função do tempo para velocidades de rotação da haste fixas, pode dizer-se que, em geral, os menores valores na viscosidade foram registrados naqueles “pastefill” preparados com a amostra III.

- Quanto ao comportamento reológico das pastas preparadas com as amostras originais e misturas, tem-se que a amostra III se apresentou mais reotrópica em comparação aos demais “pastefill” estudados. Em geral, as misturas apresentam-se

como mais tendentes a tixotropia, enquanto que a amostra II se mostrou quase sempre com regimes reológicos duplos (tixo e reotrópicos).

- A viscosidade normalmente cresce de forma muito significativa quando consideram-se baixas velocidades na rotação da haste, quando aumenta o adensamento da pasta e quando é maior a proporção de material fino e ultrafino.

- No teste de “slump”, realizado com cilindro, as amostras de granulometria mais fina foram as que precisaram de maiores proporções de água para obter abatimentos de “slump” compreendidos entre 0 e 100%.

- Especificamente, a amostra II mostrou as medidas de “slump” na faixa de adensamento 60 – 65% de sólidos em massa, na amostra V na faixa 73 –81 % de sólidos e a amostra III entre os valores 78 e 82%S, sendo neste último caso, uma faixa muito mais estreita quanto o adensamento.

- Ao comparar as simetrias cilíndrica e cônica do “slump”, observa-se que o teste de cone piloto, requer de maiores adensamentos para fornecer a mesma resposta de abatimento que o cilindro de laboratório, diferença que é muito mais significativa nas pastas de granulometria menor (amostra II) e quase nula no caso da granulometria mais grosseira, como a amostra III.

- Quanto ao comportamento reológico das pastas no teste de calha, conclui-se que através desta simples ferramenta pode-se determinar o ângulo de repouso dos “pastefill” em estudo. Quando foi estudado o comportamento de pastas preparadas com a amostra I, a calha foi inclinada 1, 2 e 3% em referência à horizontal. Determinou-se que para uma maior inclinação da base de calha, se produzem menores ângulos de repouso e quando os adensamentos foram menores, a queda absoluta do θ_R foi cada vez mais gradual.

- Pode-se concluir que é possível alcançar valores do ângulo de repouso de até 15° ou mais, no caso das pastas preparadas com as demais amostras sólidas, cota que corresponde a um valor muito interessante na hora de pensar na disposição final deste material.

- Para os “pastefill” cimentados obtém-se um comportamento muito especial com curvas que apresentam quedas e recuperações no gráfico da tensão instantânea

como uma função do tempo, fato que não é observado nos corpos de prova de cimento puro.

- Para a amostra I, com 21 e 35 dias de cura, pode-se alcançar tensões de ruptura superiores a 2MPa, sendo menores os valores no caso de 21 dias. Esses resultados foram obtidos com adições de ligante de 4 e 8% em massa.

- As fotografias das imagens MEV mostraram que a ação da mistura de MK e CaO é no sentido de aglomerar as partículas do “pastefill”, já o uso do cimento portland permite alcançar tensões de ruptura mais elevadas, devido à sua reação com a água, que gera estruturas diferentes. Os corpos de prova dos “pastefill” cimentados com CP-05 e aqueles próprios de cimento puro mostram, em sua estrutura, a formação das formas aciculares típicas desses sistemas.

- Finalmente, em referência às medidas de permeabilidade de Karsten à água dos “pastefill” cimentados com CP-05, conclui-se que uma maior presença de ligante aumenta a impermeabilidade deste material, considerando um período de cura de 7 dias.

7. RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS

Como já foi indicado nas conclusões, este sistema de disposição de rejeitos na forma de pasta mineral, permite alcançar variadas vantagens frente ao ainda empregado sistema convencional que utiliza as bacias ou 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 este sistema de sistema de disposição de forma mais adensada, a qual tem demonstrado grande sucesso no mundo mineiro.

Especificamente analisando os resultados obtidos neste estudo de caracterização de pasta mineral, destaca-se o fato de alcançar ângulos repouso dos “pastefill” estudados da ordem de 15°, valor muito promissor ao se pensar na disposição deste material.

Outro resultado relevante é, sem dúvida, a consistência adequada e a aceitável resistência mecânica da pasta cimentada com a mistura de meta caulim e cal, que é suficiente para disposição dos rejeitos numa cavidade subterrânea ou em um depósito superficial da mineração.

São muito interessantes os resultados dos testes mecânicos de resistência à compressão daqueles “pastefill” que foram cimentados com cimento portland (CP-05), já que para baixas velocidades de aplicação da carga, obtêm-se níveis de resistência à ruptura muito adequados já que superam a barreira dos 2MPa, com adição de apenas 4% em massa deste ligante.

Foi também demonstrado neste estudo, que os testes de “slump” e de “flume” são ferramentas muito simples de realizar, mas a importância de seus resultados reológicos fornecem uma informação muito apropriada do material que está sendo caracterizado. As medidas da viscosidade também são de muito interesse, junto aos comportamentos reológicos destes “pastefill”, devido a que forneceram importantes parâmetros para dimensionamento de equipamentos de separação sólido-líquido e de transporte, principalmente.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A grande maioria dos objetivos planejados foram alcançados, mas alguns não puderam ser completados. Por exemplo, a determinação dos módulos elásticos dos “pastefill” cimentados é uma tarefa que ficou pendente. Do mesmo modo, a caracterização dos “pastefill” cimentados com meta caulim ou sem adição de ligantes, através de ensaios de caracterização de solos, como são os testes de cisalhamento direto e triaxial, também é um desafio que está pendente. A determinação de características físicas como o ângulo de atrito ou a coesão do material em estudo, também seria de muito interesse.

Outros aspectos que não foram abordados neste estudo, mas que sem dúvida são de altíssimo interesse no tema relativo às pastas minerais, é a temática relativa ao meioambiente, gerenciamento do recurso aquoso, gerenciamento dos rejeitos produzidos pela mineração, dimensionamento dos equipamentos produtores de 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, estudo de outros elementos ligantes de potencialidade técnica e econômica, influência de reagentes (como o uso de floculantes poliméricos), dentre outros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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., SOUZA, C. C., AMARANTE, S. C. Rejeitos Adensados para Disposição em Superfície - Nova Tecnologia em Minério de Ferro. In: IV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO, IV, 2003, Ouro Preto, *Anais...* Ouro Preto, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2003, p. 610-619.

ARAUJO, A. C., CASTRO, L. F. A., GALÉRY, R., GIRODO, A. C., PERES, A. E. C., PINTO, C. L. L., SANTOS, L. D., TAVARES, R. P., VALADÃO, G. E. S. Minério de Ferro: Processos de Obtenção e Sua Utilização na Siderurgia. Curso de Educação Continuada da ABM, 2003, Belo Horizonte, *Anais...* Belo Horizonte, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2003, p. 9-10; 253; 426-432.

ARAUJO, A. C., Conversa pessoal, Belo Horizonte – Brasil, Março-2004.

BOGER, D. V. I Workshop of Minerals Processing and Tailings Rheology. In: 2003 International Seminar on Paste and Thickened Tailings, May-2003, Melbourne - Austrália, *Apresentação digital*. Austrália, May-2003.

BRANDÃO, P. R., ARAUJO, A. C., PERES, A. E. C. Espectrometria Infravermelha na Investigação de Espécies Adsorvidas. In: SIMPÓSIO EPUSP DE CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA NA ENGENHARIA E INDUSTRIA

MINERAL, 1990, São Paulo, *Anais...* São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Depto de Engenharia de Minas, 1990, p. 212-230.

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

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.

DEALY, J. M. Official Nomenclature for Material Functions Describing the Response of a Viscoelastic Fluid to Various Shearing and Extensional Deformations. *Journal of Rheology*, Montreal - Canada, Vol. 39, No. 1, Jan-Feb 1995, p. 253-265.

DEO, N, K. A. NATARAJAN, P. SOMASUNRADAN. Mechanisms of Adhesion of Pamibacillus Polymyxa onto Hematite, Corundum and Quartz. *International Journal of Mineral Processing*, Bangalore - India, No. 62, 2001, p. 27-39.

DEYSARKAR, A. K., TURNER, G. A. Flow of Paste in a Vibrated Tube. *Journal of Rheology*, Ontario - Canada, Vol. 25, No. 1, , Jan 1981, p. 41-54.

GAMA, E. M., GOMES, A. M., GILBERT R. Utilização de Estéril Argiloso para a Fabricação de Meta caulim. In: II INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MAINTENANCE AND REHABILITATION OF PAVIMENTS AND TECHNOLOGICAL CONTROL, 2001, Alabama – EUA, *Anais do Symposium*, EUA, Jul-Ago 2001.

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

GAMA, E. M., Conversa pessoal, Belo Horizonte – Brasil, Março 2004.

GAMA, E. M., Conversa pessoal, Belo Horizonte – Brasil, Novembro 2004.

GOMES, A. M., COSTA, J. O., ALBERTINI, H., AGUIAR, J. E. Permeability of Concrete: A Study Intended for the "In Situ" Valuation Using Portable Instruments and Traditional Techniques: In: INTERNATINAL SYMPOSIUM OF NON-DESTRUCTIVE TESTING IN CIVIL ENGINEERING 2003 (NDT-CE 2003), 2003, Alemanha, *Apresentações digitais*. Alemanha, 2003.

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

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.

KLEIN, B. Rheology of Mineral Suspensions, Short Course, Vancouver – Canada, , Canada, April – 2002, p. 1 – 34.

LAUDRIAULT, 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.

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

RICE, S. Dewatering Tailings for Surface – Tailings Management, In: HIGH DENSITY & PASTE 2002 SEMINAR, Santiago - Chile, *Apresentações digitais*. Santiago, Apr-2002.

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.

SALVADOR, S., PONS, O. A Semi-mobile Flash Dryer/Calciner Unit to Manufacture Pozzolana from Raw Clay Soils – Application to Soil Stabilisation. *Construction and Building Materials*, Toulouse – França, Vol. 14, No. 2, p. 109-117, Mar - 2000.

SCHOWALTER, W. R., CHRISTENSEN, G. Toward a Rationalization of the Slump Test for Fresh Concrete Comparisons of Calculations and Experiments. *Journal of Rheology*, Urbana – USA, Vol. 42, No. 4, p. 865-870, July/August, 1998.

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.

TADROS, Th. F. *Solid/Liquid Dispersions*. Bracknell – England: Academic Press Inc., 1987. 329p. (ISBN: 0-12-682178-X).

THOMAS, E. G., NANTEL, J. H., NOTLEY, K. R. *Fill Technology in Underground Metalliferous Mines*. Ontario – Canada: International Academic Services Limited, 1979. 293p. (ISBN: 0-920912-00-1).

VAN DEVENTER, J.S.J., LUCKEY, G.C. Sustainability in the Minerals Industry: Threat or Opportunity? In: XXII INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS, 22, 2003, Cape Town – Africa do Sul, *Anais do Congresso*. Cape Town, 29 Setembro-03 Outubro2002, 29-30.

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, p. 261-270, Sep-2002.

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.

www.brookfieldengineering.com

www.instron.com

www.particletechlabs.com

www.vt1.tu-harburg.de

www.weirminerals.com

ANEXOS

ANEXO I: Espectros da FRX

ANEXO II: Espectros e fichas da base de dados da DRX (JPPCDS ICDD)

ANEXO III: Dados experimentais e calculados da microeletroforese

ANEXO IV: Dados dos testes de viscosidade das pastas minerais

ANEXO V: Dados dos testes ou ensaios mecânicos de compressão simples

ANEXO I: Espectros da Fluorescência de raios X

GRAFICO I: Espectros de FRX da amostra I

GRAFICO II: Espectros de FRX da amostra II

GRAFICO III: Espectros de FRX da amostra III

ALGUMAS FICHAS DA BASE DE DADOS PARA DRX

ANEXO II: Espectros e fichas da base de dados da Difração de raios X

GRAFICO I: Espectros de DRX da amostra I

GRAFICO II: Espectros de DRX da amostra II

GRAFICO III: Espectros de DRX da amostra III

TABELA I: ALGUMAS FICHAS DE ELEMENTOS DA BASE DE DADOS JPCDS
ICDD

ANEXO III: Dados experimentais e calculados da Microeletroforese

TABELA I: Tempos registrados nos testes de microeletroforese da amostra II

pH = 8,10 – Polaridade direta

#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T _i (s)	32,58	39,28	33,18	31,84	41,18	40,28	36,10	35,60	30,20	37,80

pH = 8,10 – Polaridade reversa

#	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
T _i (s)	34,90	35,40	40,00	35,90	37,70	32,10	40,70	32,80	34,75	40,41

EXEMPLO DE CÁLCULO, PARA pH = 8,10

$$\text{tempo médio: } T_M = \frac{\sum_{i=1}^{20} T_i}{n} = 725,70/20 = 36,29 \text{ (s)}$$

$$\text{Velocidade média: } V_M = 500/36,29 = 13,78 \text{ (}\mu\text{m/s)}$$

$$\text{Gradiente de campo elétrico aplicado: } C = V/L = 90/7,943 = 11,33 \text{ (Volts/cm)}$$

$$\text{Mobilidade eletroforética: } M = V_M/C = 13,78/11,33 = 1,216 \text{ (}\mu\text{m*cm/V/s)}$$

$$\text{Potencial Zeta (*): } PZ = 12,83*M = 12,83*1,216 = - 15,603 \text{ (mV)}$$

(*): Segundo a expressão de Smoluchowski,

Assim, a tabela com resultados de microeletroforese para a amostra II, seria a seguinte:

TABELA II: Mobilidade eletroforética e potencial zeta das suspensões da amostra II

pH	I (μA)	V (Volts)	T _M	V _M	C	M	PZ (mV)
2,5	70	80	45,56	10,97	10,07	1,090	+ 13,982
4,2	70	90	90,32	5,54	11,33	0,489	+ 6,269
6,1	60	90	205,18	2,44	11,33	0,215	+ 2,760
7,0	80	85	150,30	3,33	10,70	0,311	- 3,992
8,1	70	90	56,30	8,88	11,33	0,784	-10,057
10,0	75	90	32,15	15,55	11,33	1,373	- 17,611
11,2	80	85	21,91	22,82	10,70	2,132	-27,359

TABELA III: Mobilidade eletroforética e potencial zeta das suspensões da amostra III

pH	I (μ A)	V (Volts)	T_M	V_M	C	M	PZ (mV)
2,40	100	80	19,32	25,88	10,07	2,570	+ 32,967
3,10	90	83	57,81	8,65	10,45	0,828	+ 10,621
3,95	60	90	205,18	2,44	11,33	0,215	+ 5,018
5,00	60	80	110,33	4,53	10,07	0,450	- 5,771
6,50	40	80	62,19	8,04	10,07	0,798	- 10,244
8,00	30	90	23,15	21,60	11,33	1,906	- 24,450
10,20	30	90	19,51	25,63	11,33	2,262	- 29,021
11,20	70	90	11,78	42,44	11,33	3,746	- 48,064

ANEXO IV: Dados dos testes de Viscosidade das Pastas Minerais

Tabela I-a: Pastas da amostra I de 70 e 72,5% em sólidos, ciclo 1-100-1 rpm, Haste LV-4

Rotação (rpm)	Amostra de 72,5%		Amostra de 70 %		Rotação (rpm)	Amostra de 72,5%		Amostra de 70 %	
	Torque (%)	Viscosidade	Torque (%)	Viscosidade		Torque (%)	Viscosidade	Torque (%)	Viscosidade
		(mPa*s)		(mPa*s)					
2.0	33.2	99579	18.8	56388	98.0	54.0	3305	36.6	2248
4.0	90.9	136321	59.9	89831	96.0	53.9	3368	35.5	2218
6.0	102.1	185947	70.2	70185	94.0	54.0	3446	34.8	2221
8.0	57.4	43041	37.8	28344	92.0	53.5	3488	34.2	2230
10.0	50.0	29994	33.6	28156	90.0	52.7	3513	34.2	2280
12.0	45.7	22845	36.9	18446	88.0	50.7	3456	33.4	2277
14.0	46.0	19710	33.4	14311	86.0	49.4	3446	33.1	2309
16.0	47.9	17959	31.9	11960	84.0	49.2	3514	32.9	2349
18.0	45.9	15297	31.1	10364	82.0	48.7	3563	32.7	2392
20.0	46.1	13827	31.5	9448	80.0	48.4	3629	32.3	2422
22.0	45.2	12325	31.7	8644	78.0	47.3	3638	32.0	2461
24.0	44.3	11073	34.1	8523	76.0	46.9	3702	31.5	2486
26.0	44.8	10336	34.0	7844	74.0	45.9	3721	31.0	2513
28.0	45.7	9791	34.4	7370	72.0	45.2	3766	30.7	2558
30.0	45.9	9178	34.8	6959	70.0	44.4	3885	30.4	2605
32.0	46.7	8754	33.9	6355	68.0	43.2	3811	30.1	2655
34.0	46.8	8257	34.1	6016	66.0	41.8	3799	29.8	2789
36.0	47.6	7932	35.0	5832	64.0	40.8	3824	29.3	2746
38.0	48.3	7625	35.3	5572	62.0	39.9	3868	29.1	2816
40.0	48.5	7273	34.8	5219	60.0	40.2	4019	28.6	2859
42.0	48.5	6927	35.8	5113	58.0	39.8	4116	28.1	2906
44.0	49.5	6749	35.6	4854	56.0	39.3	4210	27.7	2967
46.0	49.9	6507	35.8	4669	54.0	38.9	4321	27.4	3044
48.0	50.1	6261	36.3	4537	52.0	38.3	4418	27.3	3149
50.0	50.2	6023	36.3	4355	50.0	37.9	4457	26.9	3227
52.0	50.2	5791	36.5	4211	48.0	37.3	4662	26.5	3312
54.0	49.9	5543	36.6	4066	46.0	36.7	4786	26.0	3391
56.0	50.8	5442	36.1	3867	44.0	37.0	5044	25.8	3517
58.0	51.0	5275	35.3	3651	42.0	36.8	5256	25.8	3685
60.0	51.2	5119	35.8	3579	40.0	36.0	5399	25.3	3794
62.0	51.6	4992	35.6	3444	38.0	35.5	5604	25.3	3994
64.0	51.4	4818	35.8	3356	36.0	35.1	5849	24.9	4149
66.0	50.8	4617	36.0	3272	34.0	33.9	5981	24.5	4323
68.0	50.7	4473	36.1	3185	32.0	33.8	6336	23.7	4443
70.0	50.9	4362	36.6	3136	30.0	32.7	6539	22.4	4479
72.0	51.2	4266	37.0	3083	28.0	32.5	6963	22.4	4799
74.0	51.5	4175	37.4	3032	26.0	32.2	7429	22.2	5122
76.0	51.9	4096	37.7	2976	24.0	32.0	7998	22.1	5524
78.0	52.0	3999	37.7	2899	22.0	31.2	8507	21.0	5726
80.0	52.6	3944	37.5	2812	20.0	30.8	9238	20.9	6269
82.0	53.1	3885	37.6	2751	18.0	30.7	10231	20.7	6899
84.0	53.1	3792	37.8	2699	16.0	29.8	11173	20.4	7648
86.0	53.0	3697	36.5	2546	14.0	29.0	12426	20.6	8827
88.0	53.6	3654	36.4	2481	12.0	30.3	15147	20.1	10048
90.0	53.8	3586	36.8	2453	10.0	29.3	17576	21.7	13017
92.0	53.7	3501	37.1	2419	8.0	30.9	23170	21.3	15972
94.0	54.1	3452	37.3	2380	6.0	31.5	31493	20.9	28896
96.0	54.1	3381	37.5	2343	4.0	34.0	50909	22.0	32993
98.0	54.2	3318	37.5	2295	2.0	30.8	92380	20.7	62887
100.0	54.1	3245	37.4	2244					

Tabela I-b: Pastas da amostra I de 70 e 71% em sólidos, ciclo 1-21-1 rpm, Haste LV-4

70% S

Rotação (rpm)	Torque (%)	Viscosidade
		(mPa*s)
1,0	25,0	29993,6
2,0	41,4	24834,7
3,0	70,2	28074,0
4,0	83,5	25044,7
5,0	39,3	9430,0
6,0	38,9	7778,3
7,0	41,5	7112,8
8,0	38,6	5788,8
9,0	38,3	5105,6
10,0	38,4	4607,0
11,0	38,3	4177,3
12,0	40,8	4079,1
13,0	41,1	3793,0
14,0	43,6	3736,3
15,0	46,3	3703,2
16,0	49,7	3726,7
17,0	55,6	3923,9
18,0	63,5	4232,4
19,0	71,2	4495,9
20,0	78,5	4709,0
21,0	83,9	4793,3
20,0	83,3	4996,9
19,0	78,8	4975,8
18,0	73,2	4879,0
17,0	66,9	4721,3
16,0	61,8	4634,0
15,0	59,2	4735,0
14,0	53,6	4593,3
13,0	51,0	4706,7
12,0	46,1	4609,0
11,0	44,2	4820,8
10,0	39,8	4775,0
9,0	38,8	5172,2
8,0	34,1	5113,9
7,0	31,9	5467,4
6,0	30,9	6178,7
5,0	27,7	6646,6
4,0	26,2	7858,3
3,0	25,9	10357,8
2,0	26,8	16076,6
1,0	27,9	33472,9

71% S

Rotação (rpm)	Torque (%)	Viscosidade
		(mPa*s)
1,0	25	29873,6
2,0	53	31673,2
3,0	72	28673,9
4,0	67	19945,7
5,0	27	6574,6
6,0	30	6018,7
7,0	28	4867,5
8,0	31	4664
9,0	30	3945,8
10,0	30	3539,2
11,0	30	3315,7
12,0	32	3179,3
13,0	35	3267
14,0	39	3299,3
15,0	43	3431,3
16,0	53	3951,7
17,0	61	4319,1
18,0	70	4665,7
19,0	78	4906,3
20,0	86	5170,9
21,0	89	5084,6
20,0	85	5116,9
19,0	79	4994,7
18,0	73	4839
17,0	68	4820,1
16,0	62	4664
15,0	57	4535
14,0	54	4661,9
13,0	48	4411,4
12,0	44	4439,1
11,0	39	4264,5
10,0	37	4475
9,0	33	4399,1
8,0	32	4799
7,0	30	5056,1
6,0	24	4819
5,0	24	5734,8
4,0	26	7678,4
3,0	25	10037,9
2,0	24	14336,9
1,0	24	28793,9

Tabela I-c: Pastas da amostra I de 72 e 73% em sólidos, ciclo 1-21-1 rpm, Haste LV-4

72% S

Rotação (rpm)	Torque (%)	Viscosidade
		(mPa*s)
1	17,9	21475,4
2	38,7	23215
3	62,9	25154,6
4	77,9	23365
5	32,5	7798,3
6	32,8	6558,6
7	31,6	5416
8	29,7	4454
9	29,5	3932,5
10	28,6	3431,3
11	30,8	3359,3
12	32,3	3229,3
13	34,4	3174,7
14	37,2	3187,9
15	39,7	3175,3
16	42,6	3194,3
17	45,9	3239,3
18	53,6	3572,6
19	62,2	3927,6
20	71,2	4271,1
21	82,6	4719
20	85,9	5152,9
19	82,5	5209,4
18	76,2	5078,9
17	69	4869,5
16	64	4799
15	60,5	4839
14	53,1	4550,5
13	48,6	4485,2
12	43,8	4379,1
11	40	4362,7
10	36,7	4403,1
9	36,2	4825,6
8	31,9	4784
7	30,5	5227,5
6	30,2	6038,7
5	26	6238,7
4	25,9	7768,3
3	25,5	10197,8
2	26,9	16136,6
1	27,6	33112,9

73% S

Rotação (rpm)	Torque (%)	Viscosidade
		(mPa*s)
1	20,9	25074,6
2	49,3	29573,7
3	70,4	28154
4	81,5	24444,8
5	38,5	9238
6	42,9	8578,2
7	43,7	7489,8
8	41,8	6268,7
9	41,8	5572,1
10	41,9	5026,9
11	38,2	4166,4
12	39,3	3929,2
13	38,9	3590
14	40,3	3453,5
15	45,1	3607,2
16	48,1	3606,7
17	56,8	4008,6
18	63,2	4212,4
19	67,7	4274,9
20	72,6	4355,1
21	77,2	4410,5
20	78,1	4685
19	76,9	4855,8
18	73,2	4879
17	69,3	4890,7
16	65,9	4941,4
15	62,8	5022,9
14	56,4	4833,3
13	53,1	4900,5
12	47,4	4739
11	46,3	5049,8
10	40,9	4907
9	42	5598,8
8	35,3	5293,9
7	32,9	5638,8
6	32,1	6418,6
5	29,5	7078,5
4	26,9	8068,3
3	25,9	10357,8
2	25,9	15536,7
1	27,1	32513,1

Tabela I-d: Pastas da amostra I de 74 e 75% em sólidos, ciclo 1-21-1 rpm, Haste LV-4

74% S

Rotação (rpm)	Torque (%)	Viscosidade
		(mPa*s)
1	31,9	38271,8
2	53,8	32273,1
3	61,7	24674,7
4	63,1	18926
5	38,3	9190
6	43,6	8718,1
7	41,8	7164,2
8	39,4	5908,7
9	38,1	5078,9
10	43,1	5170,9
11	40,6	4428,1
12	44,9	4489
13	44,1	4069,9
14	48,6	4164,8
15	49,2	3935,2
16	56,5	4236,6
17	66,3	4679
18	73,8	4919
19	80,4	5076,8
20	87,9	5272,9
21	92,8	5301,7
20	92,7	5560,8
19	89,8	5670,4
18	82,2	5478,8
17	74,1	5229,5
16	69,2	5188,9
15	62	4958,9
14	54,5	4670,4
13	52,3	4826,7
12	45	4499
11	43,3	4722,6
10	37,9	4547
9	37,7	5025,6
8	35,7	5353,9
7	31,8	5450,3
6	31,7	6338,6
5	32,2	7726,4
4	30,3	9088,1
3	26,6	10637,7
2	26,3	15776,6
1	27	32393,1

75% S

Rotação (rpm)	Torque (%)	Viscosidade
		(mPa*s)
1	16,4	19675,8
2	43,7	26214,4
3	69,7	27874,1
4	91,5	27444,1
5	35,8	8590,2
6	41,5	8298,2
7	34,6	5930,2
8	41,6	6238,7
9	39,1	5212,2
10	36,6	4391,1
11	39,7	4330
12	39,6	3959,2
13	47,7	4402,1
14	48,5	4156,3
15	55,5	4439,1
16	63,4	4754
17	67,2	4742,5
18	76,5	5098,9
19	84,6	5342
20	90,4	5422,8
21	96,4	5507,4
20	97,9	5872,7
19	95,9	6055,5
18	91,6	6105,4
17	83,1	5864,6
16	71,7	5376,4
15	65,2	5214,9
14	59,3	5081,8
13	51,1	4715,9
12	48,4	4839
11	40,1	4373,6
10	41,2	4942,9
9	35,3	4705,7
8	32,9	4933,9
7	32,7	5604,5
6	28,6	5718,8
5	26	6238,7
4	26,5	7948,3
3	28,4	11357,6
2	28,9	17336,3
1	29,3	35152,5

ANEXO V: Dados dos testes Ensaios Mecânicos de Compressão Simples

Tabela I - a: Dados dos ensaios realizados a um corpo de prova de cimento puro, para tempo de cura de 35 dias (I Parte)

Tempo(s)	Força(N)	Tensão (MPa)	Tempo(s)	Força(N)	Tensão (MPa)	Tempo(s)	Força(N)	Tensão (MPa)
0,02	1563,10	0,83	24,23	11062,00	5,86	48,82	23567,00	12,48
0,52	1563,10	0,83	24,73	11182,00	5,92	49,32	23808,00	12,60
1,02	1803,60	0,95	25,23	11423,00	6,05	49,82	23808,00	12,60
1,52	2164,30	1,15	25,67	11904,00	6,30	50,32	24048,00	12,73
2,02	2044,10	1,08	26,17	11904,00	6,30	50,82	24529,00	12,98
2,52	2284,60	1,21	26,67	12144,00	6,43	51,32	24649,00	13,05
3,02	2525,10	1,34	27,17	12505,00	6,62	51,82	24770,00	13,11
3,52	2525,10	1,34	27,67	12625,00	6,68	52,32	25130,00	13,30
4,02	2645,30	1,40	28,17	12866,00	6,81	52,82	25491,00	13,49
4,52	2885,80	1,53	28,67	13106,00	6,94	53,32	25732,00	13,62
5,02	3006,00	1,59	29,17	13467,00	7,13	53,82	25972,00	13,75
5,52	3366,70	1,78	29,67	13467,00	7,13	54,32	26333,00	13,94
6,02	3487,00	1,85	30,17	13828,00	7,32	54,82	26453,00	14,00
6,52	3727,50	1,97	30,67	13948,00	7,38	55,32	26693,00	14,13
7,02	3727,50	1,97	31,17	14188,00	7,51	55,82	26934,00	14,26
7,45	4208,40	2,23	31,67	14549,00	7,70	56,32	26814,00	14,19
7,95	4208,40	2,23	32,17	14429,00	7,64	56,73	27295,00	14,45
8,45	4208,40	2,23	32,67	14790,00	7,83	57,23	27535,00	14,58
8,95	4448,90	2,36	33,15	15271,00	8,08	57,73	27776,00	14,70
9,45	4689,40	2,48	33,65	15511,00	8,21	58,23	28016,00	14,83
9,95	4809,60	2,55	34,15	15631,00	8,27	58,73	28377,00	15,02
10,45	5050,10	2,67	34,65	15992,00	8,47	59,23	28257,00	14,96
10,95	5170,40	2,74	35,15	15992,00	8,47	59,73	28497,00	15,08
11,45	5410,80	2,86	35,53	16473,00	8,72	59,98	28978,00	15,34
11,95	5531,10	2,93	36,03	16834,00	8,91	60,48	28978,00	15,34
12,45	5771,60	3,06	36,53	16954,00	8,97	60,93	29459,00	15,59
12,95	5771,60	3,06	37,03	17194,00	9,10	61,43	29579,00	15,66
13,45	6012,00	3,18	37,53	17194,00	9,10	61,68	30060,00	15,91
13,95	6372,80	3,37	38,03	17555,00	9,29	61,90	30541,00	16,17
14,45	6613,30	3,50	38,53	17796,00	9,42	62,40	30541,00	16,17
14,95	6733,50	3,56	39,03	18036,00	9,55	62,90	30782,00	16,29
15,45	6974,00	3,69	39,53	18156,00	9,61	63,23	31503,00	16,68
15,95	6974,00	3,69	40,03	18397,00	9,74	63,73	31503,00	16,68
16,45	6974,00	3,69	40,53	18277,00	9,67	64,22	31984,00	16,93
16,95	7334,70	3,88	40,93	18758,00	9,93	64,72	32345,00	17,12
17,45	7575,20	4,01	41,43	18878,00	9,99	65,22	32345,00	17,12
17,95	7815,70	4,14	41,93	19239,00	10,18	65,72	32465,00	17,19
18,45	8176,40	4,33	42,43	19599,00	10,37	66,22	32585,00	17,25
18,95	8416,90	4,46	42,93	19720,00	10,44	66,72	33066,00	17,50
19,45	8416,90	4,46	43,38	20321,00	10,76	67,22	33307,00	17,63
19,95	8657,30	4,58	43,88	20561,00	10,88	67,72	33667,00	17,82
20,45	9018,10	4,77	44,38	20802,00	11,01	68,22	33667,00	17,82
20,95	9378,80	4,96	44,88	21042,00	11,14	68,32	34148,00	18,08
21,45	9619,30	5,09	45,38	21283,00	11,27	68,82	34389,00	18,20
21,95	9739,50	5,16	45,88	21643,00	11,46	69,30	34870,00	18,46
22,45	10100,00	5,35	46,38	22004,00	11,65	69,80	34870,00	18,46
22,95	10341,00	5,47	46,88	22245,00	11,78	70,17	35351,00	18,71
23,45	10461,00	5,54	47,38	22605,00	11,97	70,67	35471,00	18,78
23,73	10942,00	5,79	47,88	22726,00	12,03	71,17	35591,00	18,84
24,23	11062,00	5,86	48,38	23086,00	12,22	71,65	36072,00	19,09

Tabela I - b: Dados dos ensaios realizados a um corpo de prova de cimento puro, para tempo de cura de 35 dias (II Parte)

Tempo(s)	Força(N)	Tensão (MPa)	Tempo(s)	Força(N)	Tensão (MPa)	Tempo(s)	Força(N)	Tensão (MPa)
72,15	36313,00	19,22	95,72	48698,00	25,78	118,90	57836,00	30,62
72,42	36914,00	19,54	96,22	48577,00	25,71	119,40	57836,00	30,62
72,92	36914,00	19,54	96,68	49058,00	25,97	119,90	57956,00	30,68
73,42	37034,00	19,60	97,18	49299,00	26,10	120,40	58197,00	30,81
73,92	37275,00	19,73	97,68	49299,00	26,10	120,90	57956,00	30,68
74,42	37034,00	19,60	98,18	49659,00	26,29	121,40	58197,00	30,81
74,85	37515,00	19,86	98,43	50140,00	26,54	121,90	58076,00	30,74
75,35	37876,00	20,05	98,93	50020,00	26,48	122,40	58317,00	30,87
75,85	38116,00	20,18	99,43	50381,00	26,67	122,90	58557,00	31,00
76,35	38357,00	20,30	99,93	50742,00	26,86	123,40	58798,00	31,12
76,85	38477,00	20,37	100,43	50982,00	26,99	123,90	58918,00	31,19
77,30	38958,00	20,62	100,78	51463,00	27,24	124,40	58918,00	31,19
77,80	39199,00	20,75	101,28	51704,00	27,37	124,90	59038,00	31,25
78,30	39559,00	20,94	101,78	52064,00	27,56	125,40	58918,00	31,19
78,68	40040,00	21,20	102,28	52185,00	27,62	125,90	58798,00	31,12
79,18	40281,00	21,32	102,78	52545,00	27,81	126,27	59279,00	31,38
79,68	40521,00	21,45	103,28	52786,00	27,94	126,28	59760,00	31,63
80,18	40882,00	21,64	103,78	53146,00	28,13	126,78	59519,00	31,51
80,68	41002,00	21,70	104,28	53387,00	28,26	127,28	59639,00	31,57
81,18	41363,00	21,90	104,78	53146,00	28,13	127,78	59399,00	31,44
81,68	41964,00	22,21	105,28	53146,00	28,13	128,28	59639,00	31,57
82,18	42084,00	22,28	105,78	53507,00	28,32	128,78	59639,00	31,57
82,68	42325,00	22,40	106,28	53748,00	28,45	129,28	59639,00	31,57
83,18	42565,00	22,53	106,43	54349,00	28,77	129,78	59519,00	31,51
83,68	42806,00	22,66	106,93	54229,00	28,71	130,28	59399,00	31,44
84,18	42806,00	22,66	107,43	54469,00	28,83	130,78	59279,00	31,38
84,68	43046,00	22,79	107,93	54349,00	28,77	131,00	58798,00	31,12
85,18	43407,00	22,98	108,43	54108,00	28,64	131,45	59279,00	31,38
85,68	43647,00	23,10	108,60	54710,00	28,96	131,95	59038,00	31,25
86,18	44008,00	23,30	109,10	55070,00	29,15	132,45	58918,00	31,19
86,68	44249,00	23,42	109,60	55311,00	29,28	132,95	58678,00	31,06
87,18	44609,00	23,61	110,10	55551,00	29,41	133,45	58557,00	31,00
87,68	44369,00	23,49	110,60	55792,00	29,53	133,95	58197,00	30,81
88,18	44730,00	23,68	110,97	55311,00	29,28	134,45	57956,00	30,68
88,68	44850,00	23,74	111,47	55672,00	29,47	134,95	57475,00	30,42
89,18	45211,00	23,93	111,97	55912,00	29,60	135,45	57114,00	30,23
89,68	45451,00	24,06	112,47	56032,00	29,66	135,78	56633,00	29,98
90,15	45932,00	24,31	112,92	55070,00	29,15			
90,65	46052,00	24,38	113,28	55551,00	29,41			
91,15	46173,00	24,44	113,55	56032,00	29,66			
91,65	46413,00	24,57	113,90	56513,00	29,92			
91,87	45932,00	24,31	114,40	56393,00	29,85			
92,37	45812,00	24,25	114,90	56633,00	29,98			
92,65	46293,00	24,51	115,40	56994,00	30,17			
92,97	46774,00	24,76	115,90	57114,00	30,23			
93,47	47134,00	24,95	116,40	57355,00	30,36			
93,78	47615,00	25,20	116,90	57475,00	30,42			
94,28	47976,00	25,40	117,40	57475,00	30,42			
94,78	48096,00	25,46	117,90	57235,00	30,30			
95,22	48577,00	25,71	118,40	57355,00	30,36			

Tabela II - a: Dados dos ensaios realizados a um corpo de prova de pastefill da amostra I, cimentado com 8% de CP e para tempo de cura de 21 dias (I Parte)

Tempo(s)	Força(N)	Tensão (MPa)	Tempo(s)	Força(N)	Tensão (MPa)	Tempo(s)	Força(N)	Tensão (MPa)
0,02	3126,3	1,65	2,25	3366,7	1,78	5,70	3607,2	1,91
0,08	3126,3	1,65	2,32	3366,7	1,78	5,75	3607,2	1,91
0,33	3246,5	1,72	2,38	3366,7	1,78	5,80	3487,0	1,85
0,48	3126,3	1,65	2,43	3366,7	1,78	5,85	3487,0	1,85
0,52	3006,0	1,59	2,48	3366,7	1,78	5,97	3487,0	1,85
0,55	3006,0	1,59	2,53	3366,7	1,78	6,47	3607,2	1,91
0,58	3126,3	1,65	2,58	3366,7	1,78	6,53	3607,2	1,91
0,62	3126,3	1,65	2,63	3366,7	1,78	6,60	3607,2	1,91
0,63	3126,3	1,65	2,68	3487,0	1,85	6,67	3607,2	1,91
0,65	3006,0	1,59	2,73	3366,7	1,78	6,73	3607,2	1,91
0,67	3006,0	1,59	2,78	3487,0	1,85	6,78	3487,0	1,85
0,68	3126,3	1,65	2,83	3487,0	1,85	6,83	3607,2	1,91
0,70	3006,0	1,59	2,88	3487,0	1,85	6,88	3607,2	1,91
0,72	2885,8	1,53	2,93	3487,0	1,85	6,93	3607,2	1,91
0,73	3006,0	1,59	2,98	3487,0	1,85	7,00	3727,5	1,97
0,75	3006,0	1,59	3,03	3487,0	1,85	7,05	3727,5	1,97
0,77	2885,8	1,53	3,08	3366,7	1,78	7,10	3607,2	1,91
0,78	3006,0	1,59	3,13	3366,7	1,78	7,15	3727,5	1,97
0,80	3006,0	1,59	3,20	3366,7	1,78	7,20	3607,2	1,91
0,82	3006,0	1,59	3,33	3246,5	1,72	7,27	3607,2	1,91
0,83	3006,0	1,59	3,38	3246,5	1,72	7,35	3607,2	1,91
0,85	2885,8	1,53	3,42	3246,5	1,72	7,53	3607,2	1,91
0,87	2885,8	1,53	3,45	3246,5	1,72	7,68	3607,2	1,91
0,88	2885,8	1,53	3,48	3246,5	1,72	7,77	3727,5	1,97
0,90	3006,0	1,59	3,52	3246,5	1,72	7,85	3607,2	1,91
0,92	3006,0	1,59	3,58	3246,5	1,72	7,95	3607,2	1,91
0,93	2885,8	1,53	3,68	3366,7	1,78	8,03	3607,2	1,91
0,95	3006,0	1,59	3,83	3246,5	1,72	8,12	3727,5	1,97
0,97	2885,8	1,53	4,00	3366,7	1,78	8,53	3487,0	1,85
0,98	3006,0	1,59	4,50	3366,7	1,78	8,60	3487,0	1,85
1,00	3006,0	1,59	4,62	3246,5	1,72	8,72	3607,2	1,91
1,02	3006,0	1,59	4,67	3366,7	1,78	9,07	3727,5	1,97
1,03	3006,0	1,59	4,72	3366,7	1,78	9,15	3607,2	1,91
1,07	3006,0	1,59	4,77	3246,5	1,72	9,23	3727,5	1,97
1,10	3006,0	1,59	4,82	3126,3	1,65	9,33	3727,5	1,97
1,13	3006,0	1,59	4,85	3246,5	1,72	9,47	3727,5	1,97
1,17	3126,3	1,65	4,88	3246,5	1,72	9,75	3607,2	1,91
1,23	3006,0	1,59	4,92	3246,5	1,72	9,88	3727,5	1,97
1,32	3006,0	1,59	4,95	3246,5	1,72	9,97	3727,5	1,97
1,55	3126,3	1,65	4,98	3246,5	1,72	10,05	3727,5	1,97
1,62	3246,5	1,72	5,02	3366,7	1,78	10,17	3727,5	1,97
1,67	3246,5	1,72	5,08	3366,7	1,78	10,23	3727,5	1,97
1,72	3366,7	1,78	5,28	3487,0	1,85	10,30	3847,7	2,04
1,78	3246,5	1,72	5,33	3487,0	1,85	10,37	3847,7	2,04
1,85	3246,5	1,72	5,38	3487,0	1,85	10,43	3847,7	2,04
1,92	3246,5	1,72	5,43	3487,0	1,85	10,48	3847,7	2,04
1,98	3366,7	1,78	5,48	3487,0	1,85	10,53	3847,7	2,04
2,05	3246,5	1,72	5,55	3487,0	1,85	10,58	3968,0	2,10
2,12	3366,7	1,78	5,60	3487,0	1,85	10,63	3968,0	2,10
2,18	3246,5	1,72	5,65	3607,2	1,91	10,68	3847,7	2,04

Tabela II - b: Dados dos ensaios realizados a um corpo de prova de pastefill da amostra I, cimentado com 8% de CP e para tempo de cura de 21 dias (II Parte)

Tempo(s)	Força(N)	Tensão (MPa)	Tempo(s)	Força(N)	Tensão (MPa)	Tempo(s)	Força(N)	Tensão (MPa)
10,73	3847,7	2,04	15,75	4328,7	2,29	21,38	4569,2	2,42
10,80	3847,7	2,04	15,82	4328,7	2,29	21,50	4689,4	2,48
10,87	3847,7	2,04	15,88	4328,7	2,29	21,68	4448,9	2,36
10,93	3847,7	2,04	15,95	4208,4	2,23	21,95	4328,7	2,29
11,03	3847,7	2,04	16,02	4328,7	2,29	22,02	4328,7	2,29
11,20	3727,5	1,97	16,08	4328,7	2,29	22,08	4448,9	2,36
11,30	3847,7	2,04	16,15	4328,7	2,29	22,15	4448,9	2,36
11,37	3847,7	2,04	16,23	4208,4	2,23	22,23	4328,7	2,29
11,43	3847,7	2,04	16,38	4208,4	2,23	22,30	4448,9	2,36
11,50	4088,2	2,16	16,48	4208,4	2,23	22,40	4448,9	2,36
11,55	3968,0	2,10	16,58	4208,4	2,23	22,57	4569,2	2,42
11,62	3968,0	2,10	16,70	4328,7	2,29	23,07	4328,7	2,29
11,68	3968,0	2,10	16,78	4208,4	2,23	23,18	4448,9	2,36
11,75	3968,0	2,10	16,87	4328,7	2,29	23,30	4448,9	2,36
11,82	3847,7	2,04	16,95	4328,7	2,29	23,38	4328,7	2,29
11,90	3968,0	2,10	17,03	4328,7	2,29	23,47	4448,9	2,36
11,97	3968,0	2,10	17,13	4328,7	2,29	23,62	4569,2	2,42
12,03	3847,7	2,04	17,23	4328,7	2,29	23,73	4328,7	2,29
12,13	3968,0	2,10	17,32	4328,7	2,29	23,83	4448,9	2,36
12,22	4088,2	2,16	17,40	4328,7	2,29	23,97	4448,9	2,36
12,28	3968,0	2,10	17,52	4328,7	2,29	24,12	4448,9	2,36
12,35	3968,0	2,10	17,65	4328,7	2,29	24,23	4328,7	2,29
12,42	3968,0	2,10	17,75	4328,7	2,29	24,30	4448,9	2,36
12,48	3968,0	2,10	17,92	4448,9	2,36	24,43	4448,9	2,36
12,55	4088,2	2,16	18,03	4208,4	2,23	24,57	4448,9	2,36
12,62	4088,2	2,16	18,23	4328,7	2,29	24,73	4448,9	2,36
12,68	3968,0	2,10	18,45	4328,7	2,29	24,82	4448,9	2,36
12,77	3968,0	2,10	18,58	4448,9	2,36	24,92	4448,9	2,36
12,85	3968,0	2,10	18,68	4448,9	2,36	25,08	4328,7	2,29
12,95	3968,0	2,10	18,77	4448,9	2,36	25,17	4448,9	2,36
13,05	3968,0	2,10	18,85	4569,2	2,42	25,35	4448,9	2,36
13,15	4088,2	2,16	18,95	4448,9	2,36	25,80	4448,9	2,36
13,22	4088,2	2,16	19,05	4328,7	2,29	26,30	4569,2	2,42
13,28	4088,2	2,16	19,20	4569,2	2,42	26,80	4448,9	2,36
13,37	3968,0	2,10	19,32	4448,9	2,36	26,90	4448,9	2,36
13,48	4088,2	2,16	19,43	4569,2	2,42	27,00	4448,9	2,36
13,65	3968,0	2,10	19,55	4448,9	2,36	27,12	4448,9	2,36
14,15	4088,2	2,16	19,65	4569,2	2,42	27,22	4448,9	2,36
14,28	4088,2	2,16	19,75	4448,9	2,36	27,32	4569,2	2,42
14,38	4088,2	2,16	19,85	4448,9	2,36	27,55	4448,9	2,36
14,48	3968,0	2,10	19,95	4448,9	2,36	27,93	4448,9	2,36
14,60	4088,2	2,16	20,07	4448,9	2,36	28,03	4448,9	2,36
14,95	4088,2	2,16	20,20	4569,2	2,42	28,10	4448,9	2,36
15,08	4088,2	2,16	20,33	4569,2	2,42	28,20	4448,9	2,36
15,18	4088,2	2,16	20,47	4569,2	2,42	28,32	4328,7	2,29
15,35	4088,2	2,16	20,62	4448,9	2,36	28,37	4448,9	2,36
15,48	4328,7	2,29	20,77	4448,9	2,36	28,42	4328,7	2,29
15,55	4208,4	2,23	20,97	4569,2	2,42	28,47	4448,9	2,36
15,62	4328,7	2,29	21,12	4448,9	2,36	28,53	4448,9	2,36
15,68	4328,7	2,29	21,25	4569,2	2,42	28,67	4448,9	2,36

Tabela II - c: Dados dos ensaios realizados a um corpo de prova de pastefill da amostra I, cimentado com 8% de CP e para tempo de cura de 21 dias (III Parte)

Tempo(s)	Força(N)	Tensão (MPa)		Tempo(s)	Força(N)	Tensão (MPa)
208,25	4328,7	2,29		217,88	4088,2	2,16
208,37	4208,4	2,23		218,38	4088,2	2,16
208,48	4208,4	2,23		218,62	4088,2	2,16
208,60	4328,7	2,29		218,72	4088,2	2,16
208,73	4208,4	2,23		218,85	4208,4	2,23
208,93	4088,2	2,16		219,25	4208,4	2,23
209,20	4208,4	2,23		219,45	4208,4	2,23
209,37	4208,4	2,23		219,82	4088,2	2,16
209,50	4208,4	2,23		220,32	4088,2	2,16
209,63	4208,4	2,23		220,68	4208,4	2,23
210,13	4088,2	2,16		221,18	4208,4	2,23
210,42	4208,4	2,23		221,68	4088,2	2,16
210,62	4208,4	2,23		221,80	3968,0	2,10
210,80	4208,4	2,23		221,87	4088,2	2,16
210,97	4328,7	2,29		221,97	3968,0	2,10
211,15	4208,4	2,23		222,07	4088,2	2,16
211,30	4328,7	2,29		222,52	4208,4	2,23
211,43	4208,4	2,23		222,77	4689,4	2,48
211,55	4328,7	2,29		222,85	4448,9	2,36
211,68	4328,7	2,29		222,95	3727,5	1,97
211,82	4328,7	2,29		223,02	3727,5	1,97
211,97	4208,4	2,23		223,03	3847,7	2,04
212,47	4208,4	2,23		223,05	3847,7	2,04
212,75	4208,4	2,23		223,08	3968,0	2,10
212,95	4328,7	2,29		223,12	3968,0	2,10
213,45	4208,4	2,23		223,17	4088,2	2,16
213,77	4208,4	2,23		223,23	4088,2	2,16
213,78	4208,4	2,23		223,35	4088,2	2,16
214,28	4088,2	2,16		223,85	4088,2	2,16
214,78	4328,7	2,29		223,95	3968,0	2,10
215,28	4328,7	2,29		224,05	3968,0	2,10
215,78	4328,7	2,29		224,13	3847,7	2,04
216,28	4088,2	2,16		224,18	3968,0	2,10
216,78	4208,4	2,23		224,23	3968,0	2,10
217,13	3968,0	2,10		224,30	3968,0	2,10
217,18	4088,2	2,16		224,38	3968,0	2,10
217,23	4088,2	2,16		224,50	3968,0	2,10
217,28	3968,0	2,10		224,97	3968,0	2,10
217,33	4088,2	2,16		225,07	3847,7	2,04
217,38	4088,2	2,16		225,13	3968,0	2,10
217,43	4088,2	2,16		225,23	3968,0	2,10
217,48	4088,2	2,16		225,33	3968,0	2,10
217,53	3968,0	2,10		225,83	3968,0	2,10
217,57	3847,7	2,04		226,33	3968,0	2,10
217,60	3847,7	2,04		226,83	4088,2	2,16
217,63	3847,7	2,04		227,18	3968,0	2,10
217,65	3968,0	2,10		227,68	4088,2	2,16
217,68	3968,0	2,10		228,17	3847,7	2,04
217,72	4088,2	2,16				
217,77	4088,2	2,16				