UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

CURSOS DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA

METALÚRGICA E DE MINAS

Tese de Mestrado

DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO PRODUTOR DE PASTA MINERAL

Autor: Rubén Heriberto Olcay Barreda

Orientador: Professor Dr. George Eduardo Sales Valadão

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Rubén Heriberto Olcay Barreda

DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO PRODUTOR DE PASTA MINERAL

Tese 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

A Deus pela dádiva da vida e aqueles que me acompanharam,
torcendo pela minha vitória, dando a todo momento
apoio, incentivo e amor,meus pais, minha esposa
Kridy Valera e meus filhos Darlyne e Ayrton.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece a todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram na preparação deste trabalho e, em particular:

- Ao orientador George Eduardo Sales Valadão pela dedicação e pelo imenso apoio prestado;
- Aos membros da banca pelos conselhos e apoio prestado;
- Ao professor Christian Hernandez pelo incentivo e pelo apoio prestado;
- Aos colegas Christiano e Luiz, pelo apoio e ajuda nos testes realizados;
- Ao colega Alberto pelo apoio prestado durante a confecção da montagem;
- As Minerações VALE (RDM) pelo fornecimento da amostra;
- Ao órgão financiador pela bolsa concedida, CNPq.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO..... 01
2. OBJETIVOS..... 04
2.1. Objetivo Geral..... 04
2.1. Objetivos Específicos..... 04
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... 05
3.1. Tecnologia de Preparação das Pastas de Rejeitos..... 05
3.1.1 Vantagens de Produção de Pasta para Disposição Convencional..... 07
3.1.2 Aspectos Ambientais da Disposição de Rejeitos..... 11
3.2. Fatores Relevantes para Preparação de uma Pasta..... 13
3.2.1. Conceito de Sedimentação Contínua..... 13
3.2.2. Descrição de uma Suspensão em Sedimentação Descontínua..... 16
3.2.3. Conceito da Floculação e Coagulação..... 18
3.2.4. Reator Gerador de Flocos..... 20
3.2.5. Tipos de Floculantes..... 22
3.2.6. Mecanismos de Floculação..... 23
3.2.7. Distribuição Granulométrica do Sólido..... 25
3.3. Aplicações Industriais do Preenchimento com Pasta..... 26
3.4. Testes Aplicados às Pastas Minerais..... 32
3.4.1. Teste de Abatimento ("Slump")..... 32
3.4.2. Teste de Calha (“Flume”)..... 35
3.4.3. Carateristicas Reológicas de Suspensões Minerais..... 41
3.4.4. Medições de Viscosidade e Tensão de Escoamento..... 45
3.5. Aspectos Econômicos 49
3.6. Aspectos do Minério de Manganês..... 50
3.6.1. Descrição do Manganês..... 50
3.7. Mineralogia e Geologia..... 51
3.7.1. Mineralogia..... 51
3.7.2. Geologia..... 54
3.8. Lavra e Processamento..... 55
3.8.1. Lavra..... 55

3.8.2. Processamento..... 55
3.9. Processamento de Minério de Manganês no Brasil..... 56
3.10. Usos, Funções e Especificações..... 58
3.10.1. Produto Tipo Metalúrgico..... 58
3.10.2. Grau Bateria..... 59
3.10.3. Grau Químico..... 60
4. METODOLOGIA..... 61
4.1. Amostra Mineral..... 61
4.2. Caracterização do Sólido..... 61
4.2.1. Composição Química e Mineralógica do Sólido..... 63
4.2.2. Distribuição Granulométrica do Sólido..... 63
4.2.3. Massa Específica, Porosidade e Área Superficial Específica..... 65
4.3. Testes de Sedimentação Descontínua..... 67
4.4. Equipamento Produtor de Pasta Mineral..... 68
4.5. Caracterização das Pastas Minerais..... 72
4.5.1. Medição da Viscosidade..... 73
4.5.2. Teste de Calha (“Flume”)..... 74
4.5.3 Teste de Abatimento (“Slump”)..... 75
4.5.4 Medição de Tensão de Escoamento..... 75
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... 77
5.1. Análise Química das Amostras Sólidas..... 77
5.1.1. Fluorescência de Raios X (FRX)..... 77
5.1.2. Microscopio Eletrônico de Varredura e EDS..... 77
5.2. Análise Mineralógica das Amostras Sólidas..... 81
5.2.1. Espectrometria de Infravermelho (EIV)..... 81
5.2.2. Difração de Raios X (DRX)..... 81
5.3. Análise Granulométrica do Sólido..... 82
5.3.1. Análise Granulômetro Sympatec..... 86
5.4. Massa Específica do Sólido..... 89
5.5. Área Superficial Específica..... 90
5.5.1. Método de Blaine..... 90
5.5.2. Método BET..... 91

5.6. Testes de Sedimentação Descontínua..... 92
5.6.1. Testes de Sedimentação Descontínua..... 92
5.6.2. Testes de Floculantes Catiônicos, Aniônicos e Não Iônicos..... 95
5.7. Testes de Sedimentação Descontínua, Semicontínua e Contínua no Equipamento Produtor de Pasta Mineral..... 102
5.7.1. Testes de Sedimentação Descontínua com um Módulo sem Adição de Floculante SN300..... 102
5.7.2. Testes de Sedimentação Descontínua com um Módulo com Adição de Floculante SN300..... 105
5.7.3. Testes de Sedimentação Semicontínua com um Módulo sem Adição de Floculante SN300..... 106
5.7.4. Testes de Sedimentação Semicontínua com um Módulo com Adição de Floculante SN300..... 110
5.7.5. Testes de Sedimentação Descontínua com dois Módulos Acoplados sem e com Adição de Floculante SN300..... 111
5.7.6. Testes de Sedimentação Semicontínua com dois Módulos Acoplados sem Adição de Floculante SN300..... 114
5.7.7. Testes de Sedimentação Semicontínua com dois Módulos Acoplados com Adição de Floculante SN300..... 117
5.7.8. Testes de Sedimentação Contínua com dois Módulos Acoplados com Adição de Floculante SN300 e sem Floculador de Espiral..... 119
5.7.9. Perfil de Concentração de Sólidos no Equipamento Produtor de Pasta,com Adição de Floculante SN300 e sem Floculador de Espiral..... 122
5.7.10. Testes de Sedimentação Contínua com dois Módulos Acoplados com Adição de Floculante SN300 e com Floculador de Espiral..... 124
5.7.11. Perfil de Concentração de Sólidos no Equipamento Produtor de Pasta,com Adição de Floculante SN300 e com Floculador de Espiral..... 127
5.7.12. Testes de Sedimentação Contínua com dois Módulos Acoplados, Adição de Floculante SN300, Floculador em Espiral e Recirculação da Polpa..... 129
5.8. Caraterização das Pastas Minerais Produzidas pelo Equipamento..... 130
5.8.1. Testes de Abatimento (“Slump”)..... 130

5.8.2. Testes de Calha (“Flume”)..... 132
5.8.3. Viscosidade das Pastas Minerais..... 133
5.8.4. Tensão de Escoamento das Pastas Minerais (“Yield Strees”)..... 135
6. CONCLUSÕES..... 137
7. CONTRIBUÇÕES ORIGINAIS AO CONHECIMENTO..... 141
8. RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS..... 142
9. SUGESTOES PARA TRABALHOS FUTUROS..... 143
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 144
11. ANEXOS..... 170

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Tipos de misturas sólido-líquido: polpa, polpa de alta densidade, pasta e torta, com os respectivos equipamentos utilizados para sua obtenção..... 02
Figura 3.1: Espessadores de alta densidade de cone profundo..... 05
Figura 3.2: Sistema de tubulações e bombas de deslocamento positivo utilizados para o transporte de pasta de rejeitos..... 06
Figura 3.3: Tecnologias de espessadores……... 07
Figura 3.4: Fluxograma de espessador de pasta para "stacking"..... 07
Figura 3.5: Disposição de pasta de rejeitos em uma e três camadas na indústria mineira da Tanzania..... 08
Figura 3.6: Disposição da primeira camada por "stacking" da empresa Alcoa..... 09
Figura 3.7: Disposição da segunda camada por "stacking" da empresa Alcoa..... 09
Figura 3.8: Esquema das zonas de sedimentação presentes em um espessador industrial, segundo Coe e Clevenger (1916)..... 14
Figura 3.9: Suspensão em sedimentação para distintos intervalos de tempo..... 16
Figura 3.10: Gráfico de posição das interfaces em função do tempo para o processo de sedimentação apresentado na Figura 3.9..... 18
Figura 3.11: Reator gerador de flocos (RGF)…… 21
Figura 3.12: Adsorção de polímero e formação de laços dispostos mediante ponte. 24
Figura 3.13: a) Polímero ponte entre partículas, b) Restabilização de partículas coloidais..... 24
Figura 3.14: a) Partículas carregadas negativamente. b) Floculante catiônico. c) Neutralização de cargas mediante mecanismo "patch"..... 25
Figura 3.15: Distribuição granulométrica de rejeito, cimento e mistura..... 26
Figura 3.16: Ângulos de disposição para polpas de alta densidade e para pasta, em vários tipos de terreno..... 27
Figura 3.17: Representação esquemática do teste de cone "slump"..... 32
Figura 3.18: Gráfico altura de "slump" em função do conteúdo de água ou umidade da pasta..... 34
Figura 3.19: Teste de Flume para uma pasta com "slump" de 71,12mm..... 35
Figura 3.20: Plano inclinado e diagrama esquemático do fluido estacionário na calha..... 36
Figura 3.21: Consistência da mistura para disposição, seus correspondentes equipamentos de desaguamento e bombeamento, ângulos de repouso e incremento de volume depositado..... 37
Figura 3.22: Disposições típicas para o sistema "pastefill"..... 39
Figura 3.23: Ângulo de repouso (% de "slope") em função da % de sólidos em massa de uma pasta de rejeito de ouro na Venezuela..... 39
Figura 3.24: Ângulo de repouso (% de "slope") em função da % de sólidos em massa obtidos no laboratório, observa-se também a estratificação do material..... 40
Figura 3.25: Gráfico de Ângulo de repouso em função da % de sólidos em massa, para diferentes adições de cal..... 41
Figura 3.26: Aplicação da força F ao plano de área A e distância x ao plano paralelo que provoca seu deslocamento a velocidade v..... 42
Figura 3.27: 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..... 43

Figura 3.28: Comportamento da viscosidade independente do tempo..... 44
Figura 3.29: Comportamento tixotrópico da viscosidade..... 44
Figura 3.30: Diagrama de vane de quatro paletas em operação..... 45
Figura 3.31: Comparação de medições de tensão de escoamento mediante método de vane e reologicos..... 46
Figura 3.32: Curvas típicas de testes de vane para diferentes concentrações..... 46
Figura 3.33: Gráfico da tensão de escoamento em função da concentração de sólidos para uma ampla variedade de rejeitos minerais..... 47
Figura 3.34: Gráfico da viscosidade de equilíbrio em função da taxa de cisalhamento para várias pastas de rejeitos de bauxita..... 48
Figura 3.35: Gráfico da tensão de escoamento em função do adensamento da pasta 49
Figura 3.36: Fluxograma de beneficiamento de minério de manganês da mina do Azul em Carajás da Companhia Vale, Brasil..... 58
Figura 4.1: Fluxograma de caracterização da amostra..... 62
Figura 4.2: Peneiras série Tyler e dispositivo vibratório..... 64
Figura 4.3: Cyclosizer Warman e granulômetro Sympatec de Laboratório..... 64
Figura 4.4: Picnômetros de Laboratorio……. 65
Figura 4.5: Aparelho de Blaine para determinação da ASE..... 66
Figura 4.6: Unidade Tristar Nitrogen Adsorption…….. 67
Figura 4.7: Provas de sedimentação descontínua em provetas de 2000ml..... 67
Figura 4.8: Equipamento produtor de pasta mineral com dois módulos..... 69
Figura 4.9: Equipamento produtor de pasta mineral e sistema de agitação..... 70
Figura 4.10: Sistema de amostragem da coluna de sedimentação no equipamento constituído por bicos…….. 71
Figura 4.11: Visão geral da operação do equipamento produtor de pasta mineral… 72
Figura 4.12: Viscosímetro Brookfield, modelo DV-III…….. 73
Figura 4.13: Dimensões da calha construída em acrílico……... 74
Figura 4.14: Fotografias da calha construída em acrílico…….. 74
Figura 4.15: Testes preliminares de cilindro "slump" com pasta de 72,5% de sólidos……. 75
Figura 4.16: Reometro Brookfield, módelo YR-1……. 76
Figura 5.1: Micrografias MEV mostrando: A) Vista geral da amostra de manganês (150X); B) Partícula mista região clara (750X); C) Partícula mista região oscura (2000X); D) Partícula mista com 2000X…… 78
Figura 5.2: Micrografias MEV mostrando: A) Partícula mista região clara de manganês (1500X); B) Partícula escura de amostra (2000X); C) Partícula escura fibrosa da amostra (2000X)..... 79
Figura 5.3: Difractograma da amostra.do rejeito de manganês…….. 82
Figura 5.4: Porcentagem acumulada passante em função do tamanho…….. 84
Figura 5.5: Porcentagem acumulada passante em função do tamanho…….. 84
Figura 5.6: Distribuição granulométrica da amostra sólida, para fração<37µm …… 85
Figura 5.7: Distribuição granulométrica da amostra original……. 88
Figura 5.8: Distribuição granulométrica da amostra < 37µm …… 88
Figura 5.9: Distribuição granulométrica da amostra por Cyclosizer e Sympatec..... 89
Figura 5.10: Isoterma (Adsorption/Desorption) BET…… 92
Figura 5.11: Variação da altura de interface em função do tempo em escala normal do minério de manganês para 10%, 15% e 20% de sólidos em proveta de 2000ml... 93

Figura 5.12: Variação da altura de interface em função do tempo em escala log-log do minério de manganês para 10%, 15% e 20% de sólidos em proveta de 2000ml..... 93
Figura 5.13: Variação da velocidade de sedimentação em função do porcentagem de sólidos da polpa…….. 94
Figura 5.14: Variação da altura de interface em função do tempo para os floculantes catiônicos testados…… 95
Figura 5.15: Velocidade de sedimentação para floculantes catiônicos……... 96
Figura 5.16: Velocidade de sedimentação em função da dosagem do floculante catiônico BC630…….. 97
Figura 5.17: Variação da altura de interface em função do tempo para os floculantes aniônicos……... 98
Figura 5.18: Velocidade de sedimentação para floculantes aniônicos……... 99
Figura 5.19: Velocidade de sedimentação em função da dosagem do floculante aniônico SA130……... 99
Figura 5.20: Variação da altura de interface em função do tempo para os floculantes não iônicos…… 100
Figura 5.21: Velocidade de sedimentação para floculantes não iônicos……. 101
Figura 5.22: Velocidade de sedimentação em função da dosagem do floculante não iônico……... 102
Figura 5.23: Variação de porcentagem de sólidos na descarga em função do volume de polpa para diferentes tempos de residência: 5, 10 e 15min……... 104
Figura 5.24: Variação de porcentagem de sólidos na descarga em função do tempo para diferentes dosagens de floculante SN300: 25, 50 e 75g/t com volume da polpa igual a 4000ml e tempos de residência de 5, 10 e 15min……... 106
Figura 5.25: Variação de porcentagem de sólidos em função das combinações dos bicos com tempo de residência de 10min e volume de polpa igual a 4000ml…… 108
Figura 5.26: Variação de porcentagem de sólidos em função das combinações dos bicos com tempo de residência de 10min e volume de polpa igual a 4000ml…… 109
Figura 5.27: Variação de porcentagem de sólidos em função das combinações dos bicos com 50g/t de floculante SN300, tempo de residência de 10min, e volume de polpa igual a 4000ml..... 111
Figura 5.28: Variação de porcentagem de sólidos em função do volume de polpa para os modulos 1 e 2 acopladas, sem adição de floculante e 10min de residência... 112
Figura 5.29: Variação da porcentagem de sólidos em função do volume de polpa para os modulos 1 e 2 acopladas, sem e com adição de floculante e 10min de residência……. 113
Figura 5.30: Variação de porcentagem de sólidos em função das combinações dos bicos com tempo de residência de 10min e volume de polpa igual a 7000ml..... 115
Figura 5.31: Variação de porcentagem de sólidos em função das combinações dos bicos com tempo de residência de 10min e volume de polpa igual a 7000ml…… 117
Figura 5.32: Variação de porcentagem de sólidos em função das combinações dos bicos com tempo de residência de 10min e volume de polpa igual a 7000ml…… 119
Figura 5.33: Variação de porcentagem de sólidos em função do tempo de residência para diferentes alturas de alimentação..... 120
Figura 5.34: Variação das procentagens de sólidos da descarga em função do tempo de operação para diferentes dosagens de floculantes SN300, sem uso do espiral..... 122

Figura 5.35: Perfil de concentração da camada de mineral no equipamento, para dosagens de 25, 50 e 75g/t de floculante SN300..... 124
Figura 5.36: Variação de porcentagem de sólidos em função do tempo de residência para diferentes alturas de alimentação..... 125
Figura 5.37: Variação do procentagem de sólidos da descarga em função do tempo de operação para diferentes dosagens de floculantes SN300, com uso do espiral..... 127
Figura 5.38: Perfil de concentração da camada de mineral no equipamento, para dosagens de 25, 50 e 75g/t de floculante SN300..... 129
Figura 5.39: Variação do porcentagem de sólidos da descarga em função do tempo de operação para as melhores condições..... 130
Figura 5.40: Porcentagens de abatimento obtidas para as pastas minerais..... 131
Figura 5.41: Ângulos de repouso obtidos nas pastas minerais de manganês..... 133
Figura 5.42: Ciclos reológicos das pastas de rejeito de manganês: 1 – 20 – 1 rpm.... 134
Figura 5.43: Ciclos reológicos das pastas de rejeito de manganês: 1 – 100 – 1 rpm.. 134
Figura 5.44: Ciclos reológicos das pastas de rejeito de manganês: 1 – 180 – 1 rpm.. 135
Figura 5.45: “Yield stress” para diferentes concentrações das pastas minerais..... 136

LISTA DE TABELAS

Tabela III.1: Algumas razões para a utilização de rejeitos espessados na forma de pasta mineral…….. 10
Tabela III.2: Incidentes e impactos ambientais relacionados com mineração no ano 2000……..... 12
Tabela III.3: Caracterização de floculantes orgânicos..... 23
Tabela III.4: Aplicações industriais do preenchimento com "pastefill"..... 31
Tabela III.5: Dimensões e material de construção de cinco cilindros para teste de "slump" de laboratório, utilizados nos experimentos de Clayton, Grice e Boger (2003)..... 33
Tabela III.6: Propriedades físicas das amostras da Mutuca – MBR..... 35
Tabela III.7: Valores de altura de "slump" e ângulo de repouso para pastas com diferentes conteúdos de sólidos..... 38
Tabela III.8: Porcentagens típicas dos custos operacionais do sistema "backfill"..... 50
Tabela III.9: Principais minerais de manganês, suas fórmulas e composições químicas..... 52
Tabela III.10: Composição mineralógica qualitativa e composição química do minério de manganês da mina do Azul em Carajás, Brasil..... 57
Tabela III.11: Especificações para um típico minério de manganês grau metalúrgico..... 59
Tabela III.12: : Especificações para os produtos de manganês usados na fabricação de baterias..... 59
Tabela IV.1: Técnicas e equipamentos requeridos para determinação de características e propriedades do componente sólido..... 62
Tabela IV.2: Floculantes catiônicos, aniônicos e não iônicos a testados..... 68
Tabela IV.3: Técnicas e equipamentos requeridos para determinação de características e propriedades das pastas de rejeitos..... 73
Tabela V.1: Análises química quantitativas correspondentes à amostra de manganês..... 80
Tabela V.2: Planilha de resultados de análise granulométrica por peneiramento..... 83
Tabela V.3: Planilha de dados calculados e corrigidos do ensaio de Cyclosizer..... 85
Tabela V.4: Dados da amostra original..... 86
Tabela V.5: Dados de amostra < 37µm (400#Tyler)..... 87
Tabela V.6: Parâmetros caraterísticos da análise granulométrico por Sympatec..... 88
Tabela V.7: Valores experimentais obtidos pela picnometria simples..... 89
Tabela V.8: Valores experimentais obtidos pela picnometria a gás..... 90
Tabela V.9: Valor de Índice de Blaine da amostra de manganês..... 91
Tabela V.10: Velocidades de sedimentação do minério de manganês para 10%, 15% e 20% de sólidos sem floculante..... 94
Tabela V.11: Velocidade de sedimentação para floculantes catiônicos..... 96
Tabela V.12: Velocidade de sedimentação para floculantes aniônicos..... 98
Tabela V.13: Velocidade de sedimentação para floculantes não iônicos..... 101
Tabela V.14: Porcentagem de sólidos na descarga para 1000ml de polpa e tempos de residência de 5, 10 e 15min..... 101
Tabela V.15: Porcentagem de sólidos na descarga para 2000ml de polpa e tempos de residência de 5, 10 e 15min..... 103

Tabela V.16: Porcentagem de sólidos na descarga para 3000ml de polpa e tempos de residência de 5, 10 e 15min..... 103
Tabela V.17: Porcentagem de sólidos na descarga para 4000ml de polpa e tempos de residência de 5, 10 e 15min..... 103
Tabela V.18: Porcentagem de sólidos na descarga para 4000ml de volume total, polpa de alimentaçao com 15% sólidos, dosagem de 25, 50 e 75g/t e tempos de residência de 5, 10 e 15min..... 104
Tabela V.19: Combinações de saída/entrada e saida da polpa no equipamento para a obtenção da descarga da pasta mineral num volume total 4000ml de polpa..... 107
Tabela V.20: Porcentagem de sólidos na descarga a partir de recirculação da polpa de 4000ml e tempo de residência igual a 10min..... 107
Tabela V.21: Combinações de saída/entrada da polpa no equipamento para a obtenção da descarga da pasta mineral num volume total 4000ml de polpa..... 108
Tabela V.22: Porcentagem de sólidos na descarga a partir de recirculação da polpa de 4000ml e tempo de residência igual a 10min..... 109
Tabela V.23: Combinações de saída/entrada da polpa com floculante SN300 no equipamento para a obtenção da descarga da pasta mineral num volume total 4000ml de polpa..... 110
Tabela V.24: Porcentagens de sólidos na descarga a partir de recirculação da polpa com floculante SN300 e tempo de residência igual a 10min..... 110
Tabela V.25: Porcentagem de sólidos na descarga para 5000, 6000 e 7000ml de polpa e tempo de residência de 10min..... 112
Tabela V.26: Porcentagem de sólidos na descarga para 5000, 6000 e 7000ml de polpa com adição de floculante SN300 e tempo de residência de 10min..... 113
Tabela V.27: Combinações de entrada e saida da polpa sem floculante SN300 no equipamento para a obtenção da descarga num volume total 7000ml de polpa..... 114
Tabela V.28: Porcentagem de sólidos na descarga a partir da recirculação da polpa nos módulos de uma polpa de 7000ml. e tempo de residência igual a 10min..... 114
Tabela V.29: Combinações de saída/entrada da polpa, sem floculante SN300, no equipamento para a obtenção da descarga num volume total 7000ml de polpa..... 116
Tabela V.30: Porcentagem de sólidos na descarga a partir da recirculação da polpa nos módulos de uma polpa de 7000ml e tempo de residência igual a 10min..... 116
Tabela V.31: Combinações de saída/entrada da polpa, com floculante SN300, no equipamento para a obtenção da descarga num volume total 7000ml de polpa..... 118
Tabela V.32: Porcentagem de sólidos na descarga a partir da recirculação da polpa com floculante SN300 e tempo de residência igual a 10min..... 118
Tabela V.33: Porcentagem de sólidos na descarga mediante alimentação da polpa pelo bico 3 e tempos de residência de 10, 20, 30 e 60min..... 120
Tabela V.34: Porcentagem de sólidos na descarga mediante alimentação da polpa pelo bico 6 e tempos de residência de 10, 20, 30 e 60min..... 120
Tabela V.35: Porcentagem de sólidos na descarga para 7000ml de polpa e tempos de residência de 30, 60, 90, 120, 150 e 180min e 25g/t de SN300..... 121
Tabela V.36: Porcentagem de sólidos na descarga para 7000ml de polpa e tempos de residência de 30, 60, 90, 120, 150 e 180min e 50g/t de SN300..... 121
Tabela V.37: Porcentagem de sólidos na descarga para 7000ml de polpa e tempos de residência de 30, 60, 90, 120, 150 e 180min e 75g/t de SN300..... 121
Tabela V.38: Porcentagem de sólidos na coluna de sedimentação depois de alcançar uma velocidade de sedimentação quase estacionária, para 25g/t SN300..... 123

Tabela V.39: Porcentagem de sólidos na coluna de sedimentação depois de alcançar uma velocidade de sedimentação quase estacionária, para 50g/t SN300..... 123
Tabela V.40: Porcentagem de sólidos na coluna de sedimentação depois de alcançar uma velocidade de sedimentação quase estacionária, para 75g/t SN300..... 123
Tabela V.41: Porcentagem de sólidos na descarga com alimentação da polpa pelo bico 3 e tempos de residência de 10, 20, 30 e 60min..... 125
Tabela V.42: Porcentagem de sólidos na descarga com alimentação da polpa pelo bico 6 e tempos de residência de 10, 20, 30 e 60min..... 125
Tabela V.43: Porcentagem de sólidos na descarga para 7000ml de polpa e tempos de residência de 30, 60, 90, 120, 150 e 180min, e 25g/t de SN300..... 126
Tabela V.44: Porcentagem de sólidos na descarga para 7000ml de polpa e tempos de residência de 30, 60, 90, 120, 150 e 180min, e 50g/t de SN300..... 126
Tabela V.45: Porcentagem de sólidos na descarga para 7000ml de polpa e tempos de residência de 30, 60, 90, 120, 150 e 180min, e 75g/t de SN300..... 126
Tabela V.46: Porcentagem de sólidos na coluna de sedimentação depois de alcançar uma velocidade de sedimentação quase estacionária, para 25g/t SN300..... 128
Tabela V.47: Porcentagem de sólidos na coluna de sedimentação depois de alcançar uma velocidade de sedimentação quase estacionária, para 50g/t SN300..... 128
Tabela V.48: Porcentagem de sólidos na coluna de sedimentação depois de alcançar uma velocidade de sedimentação quase estacionária, para 75g/t SN300..... 128
Tabela V.49: Porcentagem de sólidos na descarga para 7000ml de polpa com tempos de residência de 30, 60, 90, 120, 150 e 180min, 50g/tm de SN300 e recirculação da polpa..... 130
Tabela V.50: Resultados de altura de abatimento de cone (H_S) das pastas minerais..... 131
Tabela V.51: Resultados de teste de calha das pastas minerais produzidas..... 132
Tabela V.52: Resultados de teste de tensão de escoamento ("yield stress") das pastas minerais produzidas..... 136

Resumo

A disposição de rejeitos na forma de pasta mineral, tem muitas vantagens em comparação às barragens de rejeitos, por exemplo; precisa-se de uma área muito menor para disposição, apresenta melhor recuperação de água, menor o risco de contaminação pela ruptura de barragens, reduz a contaminação de água de processo; facilita a recuperação final do local, entre outras. A tecnologia de pastas tem se desenvolvido rapidamente, no mundo e no Brasil. No entanto, deve-se ressaltar que esta tecnologia, principalmente no que se refere aos espessadores de pasta, não está disponível, ficando as informações com os fabricantes. Este fato mostra a necessidade do desenvolvimento de estudos, para a melhor compreensão dos mecanismos envolvidos no espessamento de materiais com o objetivo de alcançar as características de pasta mineral. Os objetivos gerais deste estudo são: caracterização da amostra sólida proveniente de rejeitos de manganês da usina Azul da Companhia Vale do Rio Doce, avaliação de floculantes catiônicos, aniônicos e não iônicos, construção e implementação de um equipamento modular em escala de laboratório para produção de pasta mineral e avaliação deste produto mediante caracterização reologica das pastas. Na caracterização da amostra sólida foram determinadas as seguintes propriedades físicas e químicas: densidade (picnômetria simples, gás); granulometria (peneiramento, classificação centrífuga e análise sympatec); composição química (FRX, EDS); composição mineralógica (MEV, DRX e EIV); área superficial específica (Blaine e BET). O equipamento desenvolvido foi construído usando material acrílico em sistema modular para permitir a operação em diferentes condições. Possui dois módulos atingindo uma altura máxima de 1.20m com 10cm de diâmetro interno. Dispõe ainda de um sistema de tomadas de amostras com furos de 1cm de diâmetro interno e distanciados 9cm. O cone de descarga da pasta possui um ângulo de inclinação de 45° para facilitar a descarga da pasta mineral. Três mecanismos de agitação para processos “batch”, semi-contínuo e contínuo. Também tem um sistema em espiral para alimentação e geração de floculos mais compactos. As pastas minerais produzidas foram caracterizadas em suas propriedades reologicas, através da determinação de: viscosidade (viscosimetria); consistência (teste de abatimento); fluidez (teste de calha) e tensão de escoamento (“yield stress”). Dos resultados obtidos, pode-se concluir que: a densidade do material sólido é baixa

(3.142g/cm^3); a distribuição granulométrica representa material fino (d50=6.23µm); alto valor de área superficial específica elevada (0.893m^2/g). Na caracterização química: as espécies predominantes são Mn, Fé, Si e Al com pequenas quantidades de potássio, sódio, magnésio. Na avaliação de floculantes, o não iônico SN300 foi o melhor. Considerando-se dosagens não muito elevadas (50g/t) ocorre um aumento na velocidade de sedimentação de 23.63 vezes. Nos testes descontínuos do equipamento com um modulo o porcentagem de sólidos na descarga aumenta com o volume de polpa para diferentes tempos de residência, onde, a melhor tempo de operação foi para 10min com um volume de 4000ml alcançando um 52.9% de sólidos. A melhor condição de operação sem adição de floculante nos testes de recirculação da polpa de 4000ml e tempo de residência igual a 10min foi a recirculação desde o bico 3 para o bico 1 com um valor de 55.6% de sólidos. Considerando-se a adição de floculante, foi desde o bico 4 para o bico 1 com um valor de 53,0% de sólidos. A melhor condição de operação com dois módulos sem adição de floculante nos testes de recirculação da polpa com 7000ml e tempo de residência igual a 10min foi a recirculação desde o bico 7 para o bico 1 com um valor de 56.7% de sólidos. Por outro lado com adição de floculante foi desde o bico 4 para o bico 1 com um valor de 53.7% de sólidos. Para testes contínuos com dois módulos o maior valor de porcentagem de sólidos foi obtido com alimentação pelo bico 6 com 37.4% de sólidos, sem utilizar a espiral, a melhor condição foi para uma dosagem de 50g/t com 52.7% de sólidos. Usando-se o gerador de floculos alcançou-se um valor de 55.5% de sólidos para a mesma dosagem. O perfil de concentração com maior porcentagem de sólidos sem e com a utilização do gerador de floculos foi para uma dosagem de 50g/t. No perfil de concentração existe uma etapa de transição de polpa para pasta na faixa entre 40% e 45% de sólidos. No teste contínuo com as melhores condições de operação obteve-se 56.1% de sólidos. Nos testes de calha valores superiores a 8 graus foram alcançados para o caso da pasta preparada com 54.4% de sólidos, com uma consistência de pasta equivalente a um 33.6% de abatimento. O comportamento reológico de todas as pastas estudadas apresenta uma característica dupla: tixotrópica e reotrópica.

Abstract

The disposal of tailings in the form of mineral paste, has many advantages in comparison to the dam of tailings, for example; it is needed a very larger area for disposal, presents better water recovery, minor the risk of contamination for the rupture of dam, it reduces the process water contamination; it facilitates the final recovery of the place. Among others the technology of paste has developed quickly, in the world and more in Brazil. However, it must be standed out that this technology, mainly as for the thickener of paste, is not available, being the information with the manufacturers. This fact shows the necessity of the development of studies, for the best understanding of the involved mechanisms in the thickening of materials with the objective to reach the characteristics of mineral paste. The general objectives of this study are characterization of the solid sample proceeding from tailings of manganese of the Companhia Vale do Rio Doce, assessement of cationics, anionics and no ionic floculants, construction and implementation of a modular equipment in scale of laboratory for production of mineral paste and evaluation of this product by means of reological characterization of the pastes. In the characterization of the solid sample the following physical and chemical properties were determined: density (simple picnometric, gas); size distribution (sieving, centrifugal classification and sympatec analysis); chemical composition (FRX, EDS); mineralogy composition (MEV, DRX and EIV); specific surface area (Blaine and BET). The developed equipment was constructed using acrylic material in modular system that allows the operation in different conditions. It has two modules reaching a maximum height of 1.20m with 10cm of internal diameter. It still makes use of a system for taking samples with holes of 1cm of internal diameter and separated 9cm. The cone of discharge of the paste has an angle of slope of 45° to facilitate the discharge of the mineral paste. Three mechanisms of agitation for processes batch, semicontinuous and continuous. It has also a spiral system for feeding and for generation of more compact flocs. The produced mineral pastes were characterized in its reological properties, by means the determination of: viscosity (viscosimetry); consistency (slumps test); fluidity (flume test) and yield stress. From de obtamed results, it can be concluded that: the density of the solid material is low (3.142g/cm^3); the size distribution represents a fine material (d50=6.23µm); high value specific superficial area (0.893m^2/g). In the

chemical characterization: the predominant species are Mn, Fe, Si and Al with small amounts of potassium, sodium, magnesium. In the evaluation of floculants, the no ionic SN300 was the best considering the not very high dosages (50g/t), ocours an increase in the settling velocity of 23.63 times. In the equipment discontinous tests with one module the solid percent in the discharge increases with the volume of pulp for different times of residence, where, the best running time was 10min with a volume of 4000ml reaching 52.9% of solids. The best condition with no addition of floculante in the tests with recirculation of the pulp of 4000ml and residence time equal to 10min was the recirculation from hole 3 to hole 1 with a value of 55.6% of solids. Considering the floculant addition, it was from hole 4 to hole 1 with a value of 53.0% of solids. The best condition with two modules without addition of floculante in the tests of recirculation of the pulp with 7000ml and time of equal residence 10min was the recirculation since outlet 7 for outlet 1 with a value of 56.7% of solids. While that with floculante addition it was since outlet 4 for outlet 1 with a value of 53.7% of solids. For continuous tests with two modules the biggest value of solid percent was obtained with the feed in the hole 6 with 37.4% of solids, not using spiral, the best condition was for a dosage of 50g/t with 52.7% of solids. Using of the floc generator it was reached a value of 55.5% of solids for the same dosage. The profile of concentration with bigger solid percents without and with the use of the generator of floculos was for a dosage of 50g/t. In the concentration profile exists a stage of transistion from pulp to paste in the band between 40% and 45%. In the continuous under the best operation condition it was obtained 56.1% of solids. In the flume tests higher values than 8 degrees were reached for the case of the paste prepared with 54.4% of solids, with a paste consistency equivalent to 33.6% of slump. The reological behavior for all the studied pastes presents a double characteristic, thixotropic and reotropic.

1. INTRODUÇÃO

Uma definição simples e prática de pasta mineral segundo Theriault e colaboradores (2001), diz que são rejeitos que devem ser suficientemente desaguados. Apresentam uma velocidade de fluxo critica quando são bombeados, não sofrem segregação quando são depositados e produz um mínimo de água quando são descarregados a partir de tubulações. Segundo os trabalhos de Jewell (2002) e de Araujo e colaboradores (2003), uma pasta mineral pode ser conceituada como um sistema de partículas finas que se apresenta como um fluído 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.

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 mineral para a disposição dos rejeitos adensados, destacam-se: tensão de escoamento da pasta; altura de abatimento (slump), que é determinada através do teste de slump; ângulo de repouso, que pode ser avaliado através do teste de calha (flume); viscosidade, entre outros.

Na atualidade, a produção de pasta mineral tanto para o preenchimento de cavidade subterrâneas ou disposição em superfície pode ser obtida a partir de espessadores de características especiais conhecidos como espessadores de pasta ou por meio de filtros. A utilização de espessadores de pasta mineral tem um elevado atrativo como uma alternativa ao processo de filtragem (Stephen, 2004) permitindo uma maior recuperação de águas que nos processos convencionais.

A utilização de espessadores para a produção de pasta mineral com relogia não newtoniana, já está sendo praticada na Austrália para disposição de “red mud” (Slottee, 2005). A aplicação desta tecnologia em outros materiais é relativamente nova, mas está crescendo rapidamente. A menor disponibilidade de água e as pressões ambientais

levam ao espessamento de rejeitos em concentrações de sólidos cada vez maiores. O espessador de pasta DeBeers da planta CTP em Kimberley (África do Sul), é um exemplo de disposição de pasta de rejeitos na superfície, também conhecido como empilhamento ou "stacking" (Houman, 2003).

Laudriault (2002), na Figura 1.1 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.

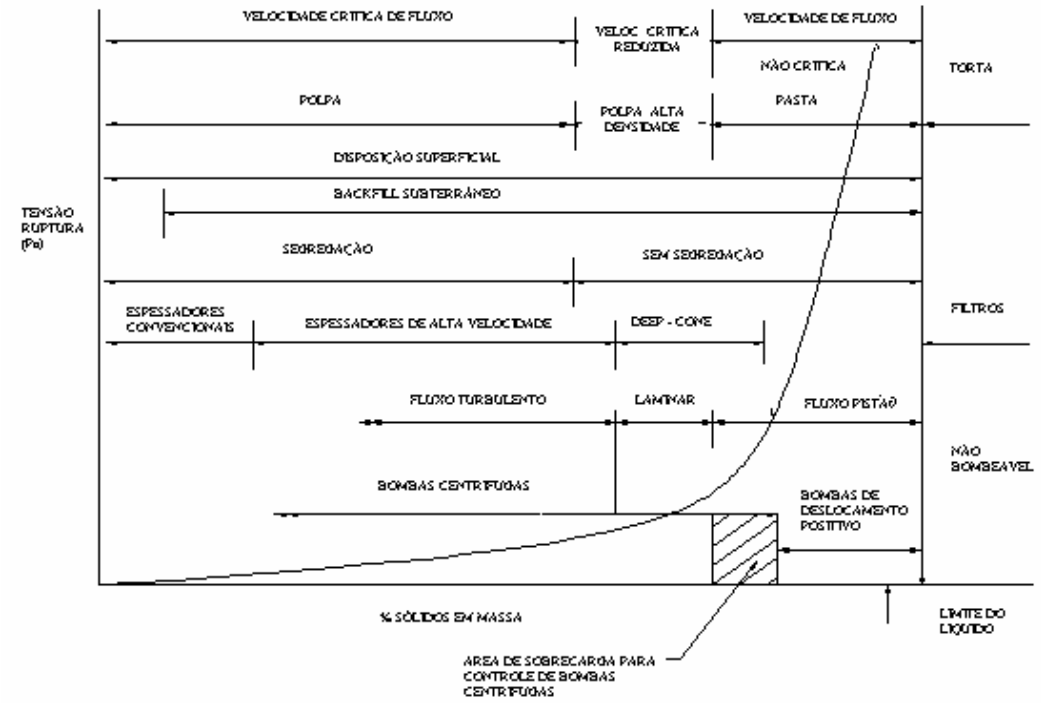


Figura 1.1: Tipos de misturas sólido-líquido: polpa, polpa de alta densidade, pasta e torta, com os respectivos equipamentos utilizados para sua obtenção. (Laudriault, 2002).

A disposição de rejeitos na forma de pasta mineral tem muitas vantagens em comparação às barragens de rejeitos, por exemplo: precisa-se de uma área muito menor para disposição, apresenta melhor recuperação de água, tem menor o risco de contaminação pela ruptura de barragens, há redução na contaminação da água de processo, facilita a recuperação final do local.

A tecnologia de pastas tem se desenvolvido rapidamente, no mundo e mais recentemente no Brasil. A literatura técnica mostra um grande número de trabalhos dedicados a este tema. Deve-se ressaltar que esta tecnologia, principalmente no que se refere aos espessadores, não está disponível, ficando as informações com os fabricantes. Este fato mostra a necessidade do desenvolvimento de estudos, em laboratório, para a melhor compreensão dos mecanismos envolvidos no espessamento de materiais com o objetivo de alcançar as características de pasta mineral.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

- Construção e implementação de um equipamento modular em escala de laboratório para produção de pasta mineral a partir de rejeitos do processamento de minérios de manganês, provenientes da usina Azul da Companhia Vale do Rio Doce (CVRD-RDM).

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Fazer um estudo do estado da arte relativo a utilização de pastas minerais para a disposição de rejeitos da mineração e de outras aplicações.
- Caracterizar a parte sólida da pasta, ou seja, os rejeitos do processamento de minério de manganês, determinando algumas características físicas e químicas tais como: massa específica, distribuição granulométrica, composição química e mineralógica, área superficial, dentre outras.
- Analisar o efeito da dosagem de floculante na velocidade de sedimentação, para floculantes catiônicos, aniônicos e não iônicos no mineral de manganês.
- Realizar o projeto, construção e implementação de equipamento modular produtor de pasta mineral em escala de laboratório.
- Avaliar o desempenho do equipamento produtor de pasta para diferentes condições de operação.
- Determinar e estudar; o comportamento da viscosidade em função do adensamento e porcentagem de sólidos; o comportamento da fluidez e consistência da pasta (teste de calha, teste de abatimento).
- Correlacionar as propriedades das pastas minerais com as condições de operação do equipamento.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

3.1. TECNOLOGIA DA PREPARAÇÃO DAS PASTAS DE REJEITOS

Segundo os trabalhos de Slotte e colaboradores (2005), o conceito de espessamento por meio da utilização de cones profundos foi desenvolvido nos anos 1960 e 1970 na indústria de carvão Britânica. Com o passar dos anos, a idéia deste espessador foi combinada com as técnicas de floculação, desenvolvimento de novos sistemas de alimentação, mudanças na forma do tanque, pás e sistema de descarga do "underflow" de forma de permitir a preparação de pasta mineral. Este espessador se caracteriza pela grande altura que pode atingir vários metros, gerando mais altas forças de compressão que causam o aumento da concentração de sólidos na descarga.

Na preparação da pasta mineral, existem muitos métodos desenvolvidos e que atualmente são utilizados. No método convencional, a primeira etapa de desaguamento é realizada pelo espessador. Assim, sua descarga é ainda uma polpa, que pode ser bombeada facilmente. Utiliza-se usualmente um filtro a vácuo, seja de disco ou de tambor, para formar a pasta. No outro método o espessador de alta densidade tem sido utilizado para produzir pasta mineral, a partir de polpas diluídas de rejeito. O adensamento é conseguido através de projetos especiais, fugindo das regras convencionais de dimensionamento de espessadores e resultando em equipamentos com alturas superiores a seus diâmetros. Tanto o elevado torque requerido para o mecanismo quanto o sistema interno das pás ("rake") são avaliados através de testes piloto de desaguamento, sem os quais torna-se praticamente impossível predizer o comportamento dos equipamentos industriais. A Figura 3.1, apresenta diferentes espessadores industriais de alta densidade de cone profundo ("deep cone").

Figura 3.1: Espessadores de alta densidade de cone profundo (Jewell, 2002).

O adensamento em sólidos das polpas resulta em uma elevada tensão necessária para o escoamento, que cresce exponencialmente a partir de uma determinada percentagem de sólidos e, usualmente, em valores de tensão de escoamento acima de 80Pa (Araujo, 2003). Esta característica indica um ponto de equilíbrio entre a energia necessária para o bombeamento e o máximo adensamento possível no espessamento. O incremento da viscosidade das pastas de rejeitos associado com o desaguamento requer normalmente a utilização de bombas de deslocamento positivo para o transporte em tubulações. Assim, o transporte das pastas minerais pode ser feita com menor custo. Na Figura 3.2 são apresentados um sistema de tubulações e bomba de deslocamento positivo utilizados para o transporte de pasta de rejeitos.

Figura 3.2.: Sistema de tubulações e bombas de deslocamento positivo utilizados para o transporte de pasta de rejeitos (Theriault, 2001).

Na maioria das vezes, a tensão de escoamento decresce com o manuseio e/ou bombeamento da polpa ou pasta. Assim, deve-se prever este comportamento no modelo do bombeamento, sendo altamente recomendável a utilização de testes de bombeamento em circuito fechado ("loop test"), para situações mais críticas de projeto.

Nos equipamentos de separação sólido-líquido, tem-se observado uma notável sinergia entre floculantes de alto peso molecular e a elevada velocidade de espessamento. Nos últimos anos existe um notável desenvolvimento no incremento da altura dos espessadores, fazendo uso da compressibilidade natural de polpas altamente floculadas para assim produzir um "underflow" espesso, em muitos casos conveniente para

disposição direta. O “deep cone”, “deep thickener” e “paste thickener” fazem uso desta tecnologia, mostrada na seguinte Figura 3.3.

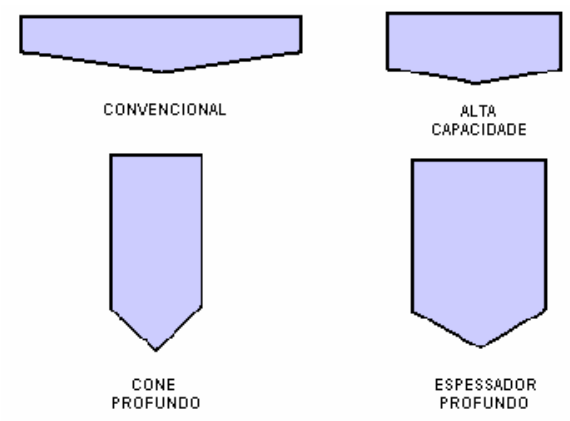


Figura 3.3: Tecnologias de espessadores. (M.J. Pearse, 2003).

3.1.1. VANTAGENS DE PRODUÇÃO DE PASTA MINERAL COMO UMA ALTERNATIVA PARA DISPOSIÇÃO CONVENCIONAL

O empilhamento superficial de pastas também conhecido como “stacking” é a disposição de rejeitos como uma pasta mineral na superfície do terreno, na qual já não ocorre sedimentação e segregação do mineral com um mínimo de liberação de água. Existem muitos métodos para realizar o “stacking”, dependendo principalmente da topografia do lugar da disposição e da reologia da pasta. Para inclinações acima de 5% os espessadores de pasta podem ser utilizados (Slottee, 2005). A Figura 3.4 apresenta como um espessador de pasta é utilizado para produzir a disposição em “stacking”.

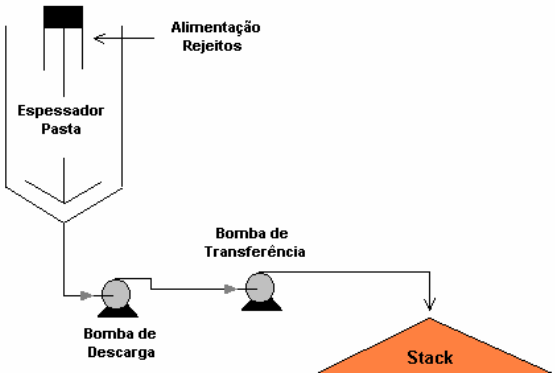


Figura 3.4: Fluxograma de espessador de pasta para “stacking” (Slottee, 2005).

A concentração do “underflow” deve estar de acordo com os requerimentos do local de disposição e também permitir que a pasta possa ser bombeada a partir de sua obtenção no espessador. Dependendo da distância do espessador até o lugar de disposição, são utilizadas bombas centrífugas ou mais comumente de deslocamento positivo para o transporte da pasta mineral. Geralmente, as pastas de rejeitos apresentam fluxos de inclinação na ordem de 3 até 10 graus, proporcionando uma boa estabilização do material. A Figura 3.5 apresenta diferentes metodologias de disposição de pasta de rejeitos em uma e três camadas.

Figura 3.5: Disposição de pasta de rejeitos em uma e três camadas na indústria mineira da Tanzania. (Theriault, 2001).

As Figuras 3.6 e 3.7 apresentam o processo da disposição de rejeitos utilizando “stacking” empregado pela indústria Alcoa World Alumina em Australia.

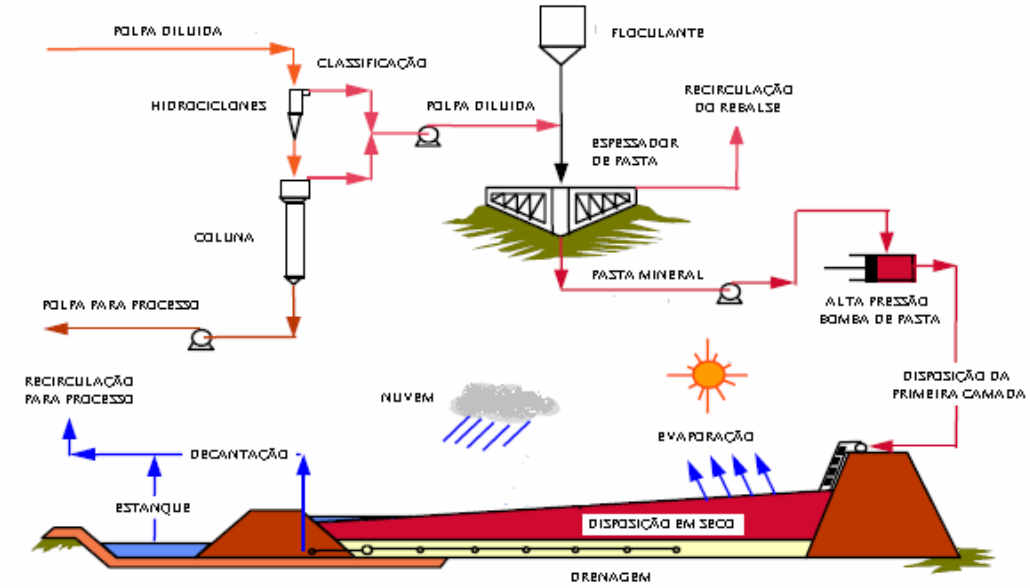


Figura 3.6: Disposição da primeira camada por "stacking" da empresa Alcoa (Cooling, 2003).

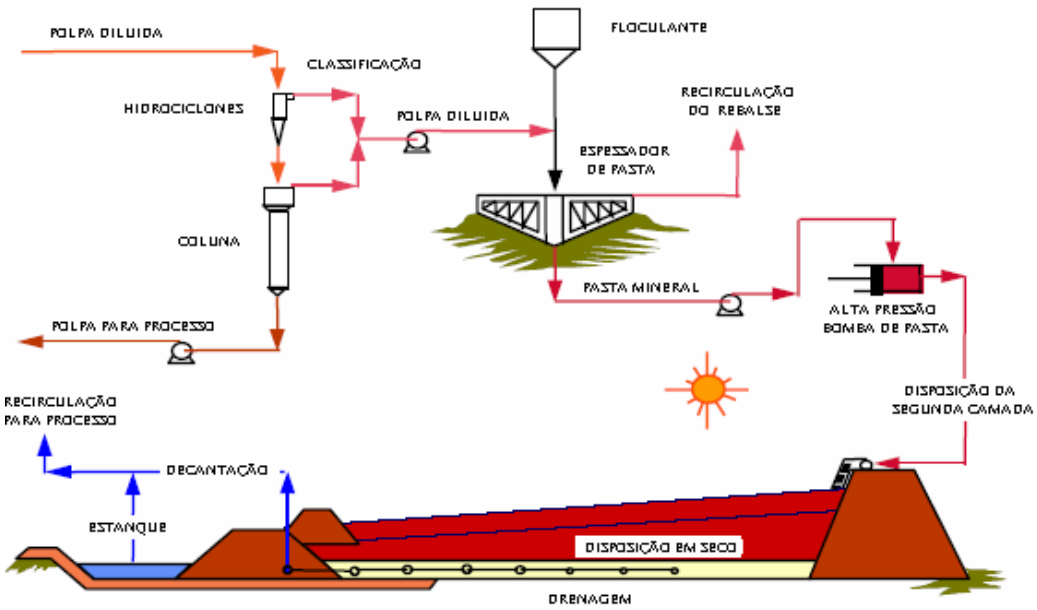


Figura 3.7: Disposição da segunda camada por "stacking" da empresa Alcoa (Cooling, 2003).

O "stacking" como um método de disposição de rejeitos em forma de pasta, tem muitas vantagens em comparação às barragens de rejeitos: a área muito menor para disposição, apresenta melhor recuperação de água, menor o risco de contaminação pela ruptura de barragens, reduz a contaminação de água de processo, facilita a recuperação final do

local. A Tabela III.1 mostra algumas vantagens para a utilização de rejeitos espessados na forma de pasta mineral.

Tabela III.1: Algumas razões para a utilização de rejeitos espessados na forma de pasta mineral. (Jewell, 2003).

Características	Benefícios Econômicos/Engenharia	Benefícios Ambientais/Sociais
Reduzido custo de operação em comparação com disposição a úmido.	Benefícios econômicos operacionais.	Menores recursos aplicados para tubulações e ações corretivas.
Incremento da resistência do material depositado.	Redução do risco de ruptura.	Redução do impacto ambiental.
O empilhamento de rejeito a seco requer uma menor área, já que o empilhamento em altura pode ser significativamente aumentado.	Redução do custo de compra de terra.	Redução da contaminação e melhora a produtividade da terra.
Diminuição da demanda de materiais de construção.	Menor transporte e construção.	Redução da contaminação, melhora a produtividade da terra e emissões de gases do efeito estufa.
Redução do risco de escoamento.	Melhor recuperação de reagentes.	Redução do risco de contaminação da terra e de água superficial.
Melhor superfície para lixiviação e drenagem.	Lixiviação de reagentes na superfície.	Mais rápido estabelecimento da vegetação, diminuição da geração de poeira.
Grande potencial na redução da utilização de água.	Facilidade para a coleta de água, bombeamento e economia de energia.	Reduz o requerimento de água.
Redução do potencial para liquefação em algumas condições.	Depósitos de alta resistência que não fluem.	Redução do impacto ambiental.
Redução de perdas de calor, baixa demanda de água.	Redução da utilização de energia e de custos.	Diminuição da geração de emissões de gases do efeito estufa.
Redução dos requerimentos de reagentes.	Redução de custos.	Redução de riscos de poluição.

3.1.2. 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, à lixiviação de metais pesados e outros poluentes, além da geração de ácido sulfúrico causada pela oxidação de sulfetos presentes nos rejeitos.

Desta 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 tem sido colocados 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 racionalização do uso da água para reduzir assim os custos operacionais, melhorando a eficiência da usina. Uma alternativa que apresenta vantagens significativas, quanto à segurança e outros fatores, seria a utilização de técnicas de disposição a seco, a partir de rejeitos desaguados antes de sua disposição. Dentre as aplicações destes métodos a seco está a preparação de "pastefill", que corresponde a uma pasta utilizada para o preenchimento de cavidades. 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 et. al. (2003) são apresentados alguns acidentes na mineração mundial ocorridos no ano 2000 (ver Tabela III.2). Além disso, é mostrado que desde 1975 até hoje os incidentes ambientais 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.

No caso do Brasil, algumas empresas estão utilizando "pastefill" preparado com adição de meta caulim e/ou cimento Portland. (Gama e colaboradores; 2001).

Tabela III.2: Incidentes e impactos ambientais relacionados com mineração no ano 2000. (Van Deventer et al., 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 de bombeamento.	Chumbo e Zinco.	Não.
09-Setembro-2000.	Galivare, Suécia.	Falha da barragem pela 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 toneladas 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 atingidas.	Cobre.	29 mortos, 100 desapareci-dos.

3.2. FATORES RELEVANTES PARA PREPARAÇÃO DE UMA PASTA

3.2.1. CONCEITO DE SEDIMENTAÇÃO CONTÍNUA.

A separação sólido-líquido representa uma área em que técnicas são utilizadas visando a separação de fases sólidas, de fases líquidas. Este tipo de separação envolve um grande número de processos industriais como: a eliminação de água a partir de suspensões obtidas na indústria, a recuperação de água no processamento mineral, a purificação de águas domiciliares, entre muitos outros processos.

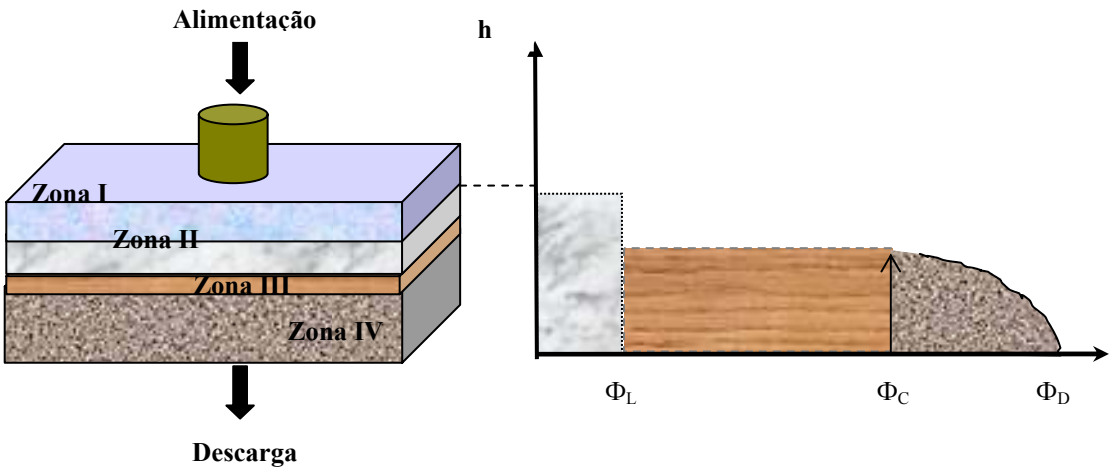
Nos processos de separação sólido-líquido, o componente líquido sempre se encontra em fase continua enquanto que o componente sólido pode estar em forma dispersa ou contínua. Em uma suspensão que alimenta um espessador, o sólido está em forma dispersa na etapa de sedimentação, mas se comporta como fase contínua na etapa de consolidação.

Denomina-se sedimentação ao processo pelo qual sustâncias minerais ou rochosas, ou sustâncias de origem orgânica se depositam em ambiente acuoso ou aireo por decantação.

Espessamento é a operação de separação de uma suspensão de sólidos para obter uma fase sólida mais densa e uma fase liquida clarificada. O objetivo principal do processo pode ser a obtenção de uma polpa de descarga mais densa ou na forma de pasta, ou recuperar o líquido da suspensão. Desta forma, a primeira situação se refere ao espessamento e a segunda à clarificação.

O mecanismo clássico do espessamento é a sedimentação influenciada pela força de gravidade, em tanques cilíndricos que normalmente são construídos de diferentes materiais, tais como: madeira, aço ou cimento. Nos espessadores convencionais a suspensão é alimentada pela parte superior e no centro do tanque, permitindo sua saida através de duas aberturas, uma no centro do fundo e outra na periferia da parte superior do tanque. Pela abertura do fundo há descarga da polpa e pelo vertedouro se obtém o líquido clarificado. Um conjunto de pás acionado pelo eixo ligado ao centro do tanque, leva o material sedimentado até a abertura de descarga. Os espessadores pequenos podem apresentar fundo plano, mas comumente este fundo tem uma pequena inclinação em direção ao centro facilitando a descarga do produto.

No processamento mineral as aplicações normalmente precedem à ciência. Isto, por certo, é verdadeiro no caso do espessamento, já que o espessador contínuo foi desenvolvido em 1905, enquanto que a primeira referência às variáveis que afetam a sedimentação foi feita em 1908. Vários autores como Nichols (1908), Ashley (1909), Mishler (1917), Free (1916) e Coe e Clevenger (1916), estudaram o efeito da concentração de sólidos, o grau de floculação e a temperatura no processo de sedimentação. Segundo Coe e Clevenger (1916), podem-se distinguir quatro zonas em um espessador convencional contínuo com seu respectivo perfil de concentração (Figura 3.8).



a) Zonas de um espessador b) Perfil de concentração

Figura 3.8: Esquema das zonas de sedimentação presentes em um espessador industrial, segundo Coe e Clevenger (1916), Φ_L: concentração da zona de sedimentação livre e perturbada , Φ_C: concentração crítica , Φ_D: concentração da descarga .

Na Figura 3.8 verifica-se que a zona I é a que contém líquido clarificado. Este líquido, separado da suspensão, é recuperado no overflow. Quando o material de alimentação contém muitas partículas finas, a zona I pode-se mostrar turva, a menos que se busque a agregação destas partículas finas. A espessura da zona I depende da quantidade de agregante adicionado ao processo. É precisamente desta forma que a profundidade do líquido clarificado é controlada em um espessador industrial, a qual se mantém em um mínimo de 0,5 a 1m para uma operação segura.

A zona II abaixo do líquido clarificado é denominada zona de sedimentação perturbada. Ela consiste em polpa de concentração uniforme que sedimenta à velocidade constante. Segundo Coe e Clevenger (1916), a concentração desta zona é a mesma que a de alimentação. Coming et al. (1954) reconheceram que isso não ocorre sempre, e que na maioria dos casos, a alimentação se dilui ao entrar no espessador. Mostram que numa operação normal, a concentração da zona II depende mais do fluxo de sólidos na alimentação que da sua concentração. A concentração nesta zona é pequena se o fluxo de sólidos de alimentação é pequeno e aumenta quando este aumenta, chegando a um máximo quando o sólido sedimenta na máxima velocidade possível nesta zona. Se o sólido é alimentado em excesso com relação a este fluxo máximo, a concentração da zona II continuará sendo a mesma que corresponde ao fluxo máximo e o excesso de sólido passará à zona I e será eliminado junto ao overflow.

Abaixo da zona II se encontra uma região que contém um gradiente de concentração designada como zona III e conhecida como zona de transição pois leva a concentração do valor constante da zona II ao valor que tem a concentração no sedimento da zona IV. Não está claro se esta zona realmente existe em todos os casos. Alguns pesquisadores como Coming et al. (1954), Fitch e Stevenson (1977) e Eklund e Jernqvist (1975) simplesmente ignoram a existência desta zona, mostrando uma mudança abrupta de concentração entre a zona II e o sedimento (zona IV).

Finalmente, na parte inferior do espessador, está a zona IV de sedimento, também conhecida como zona de compressão. Ela consiste numa polpa espessa em que partículas ou flóculos estão em uma estrutura tal que há um gradiente de pressão. Este gradiente de pressão origina, por sua vez, um gradiente de concentração. Coming et al. (1954) divide a zona IV em uma zona superior de compressão com as características mencionadas e uma zona de ação das pás, em que o movimento delas permite um incremento da concentração alcançando assim um segundo gradiente de concentração.

A concentração da descarga é a concentração da parte inferior da zona de compressão, a qual depende da altura desta zona porque uma maior altura implica maior massa de sólidos suportados pela estrutura de partículas ou flóculos produzindo um maior gradiente de pressão e de concentração. O tempo de retenção da polpa no espessador também tem sido mencionado como causa de diferentes concentrações da descarga da polpa, para uma mesma altura do sedimento.

3.2.2. DESCRIÇÃO DE UMA SUSPENSÃO EM SEDIMENTAÇÃO DESCONTÍNUA.

A finalidade de um estudo básico de espessamento é obter um método para projetar e/ou operar um espessador contínuo a partir da informação obtida de sedimentações descontinuas em nível de laboratório. Por esta razão é importante a compreensão do comportamento de uma suspensão de sólidos em sedimentação.

Quando uma suspensão de partículas sedimenta em uma coluna com fundo fechado, pode-se distinguir várias etapas no processo, de acordo com o mostrado na Figura 3.9.

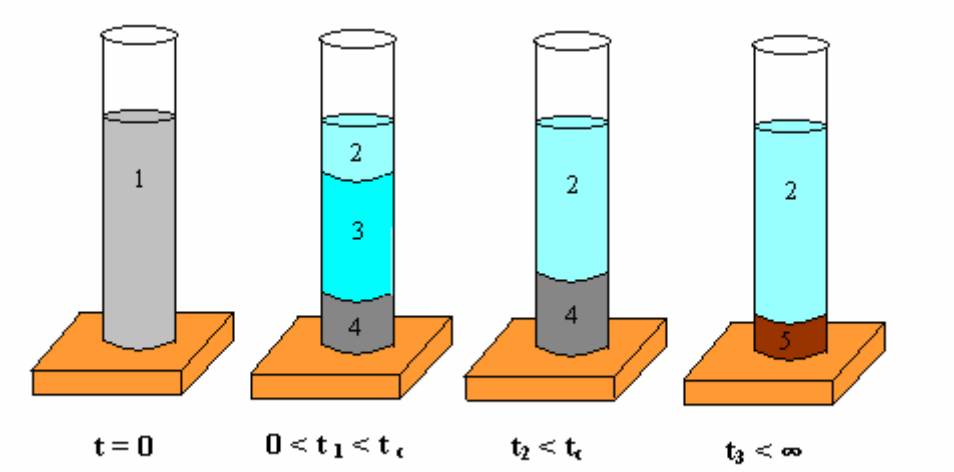


Figura 3.9: Suspensão em sedimentação para distintos intervalos de tempo ($t = 0$; t_1; t_2; t_3) contendo cinco fases diferentes: 1) suspensão de concentração constante; 2) líquido clarificado; 3) suspensão em sedimentação; 4) sedimento em consolidação; e 5) sedimento em equilíbrio final.

As etapas de processo de sedimentação descontínua se realizam segundo as etapas:

a.- antes de iniciar a sedimentação, a concentração da suspensão é constante em todo o volume da coluna;

b.- uma interface líquido-suspensão na parte superior da coluna é usualmente formada devido à sedimentação das partículas. A velocidade com que desce esta interface no início do processo é o que se denomina velocidade inicial de sedimentação;

c.- as partículas que sedimentam se acumulam no fundo da coluna alcançam uma concentração maior que aquela da suspensão original. Uma interface suspensão-

sedimento se forma e sobe pela coluna à medida que se acumula maior quantidade de material;

d.- para o material em sedimentação, qualquer nível de coordenada em direção ao sedimento aumentará sua concentração com o tempo, o que significa que em um lugar de concentração determinada que ao início encontrava-se perto do fundo da coluna, se propagara nas regiões superiores desta. Pode-se dizer que cada concentração se propaga na coluna, como uma onda de concentração constante a uma velocidade determinada;

e.- em um instante determinado a interface água-suspensão se encontrará com a interface suspensão-sedimento, constituindo o que se denomina instante crítico. As coordenadas da interface neste instante recebem o nome de coordenadas críticas, e elas definem o ponto crítico da sedimentação;

f.- se o material é incompressível, isto é, se depois do instante crítico não há mudança da concentração no sedimento, a sedimentação cessa. Esta condição raramente ocorre no espessamento de suspensões industriais, mas pode ser observada na sedimentação de pequenas esferas de vidros (Shannon e Tory, 1966);

g.- as suspensões de partículas minerais tem um comportamento semelhante ao descrito no item anterior, quando cada partícula está bem dispersa na fase contínua. Estas partículas são tão finas que sua velocidade de sedimentação é muito pequena. Para acelerar o processo de sedimentação as partículas são floculadas. Cada flóculo pode agora ser considerado uma pseudopartícula com maior tamanho e maior velocidade de sedimentação. Estas novas partículas mostram uma certa quantidade de água ao formar o sedimento, que só pode ser retirada dele com uma maior compressão ou outro mecanismo como a agitação. Este fenômeno se produz pela pressão exercida sobre os flóculos pelo material que se encontra em nível superior. Neste caso, a sedimentação continua depois do instante crítico a uma velocidade reduzida que recebe o nome de consolidação. É óbvio que as camadas inferiores que suportam todo o peso do sedimento serão mais concentradas que as camadas superiores deste. No sedimento se estabelecerá desta forma, um gradiente de concentração que tomará um valor constante no equilíbrio final.

Na Figura 3.10 apresenta-se um gráfico da posição das interfaces (z) em função do tempo (t), onde, tc é o tempo critico de um instante determinado onde a interface água-

suspensão se encontrará com a interface suspensão-sedimento. Como foi mencionado as coordenadas da interface neste instante recebem o nome de coordenadas críticas.

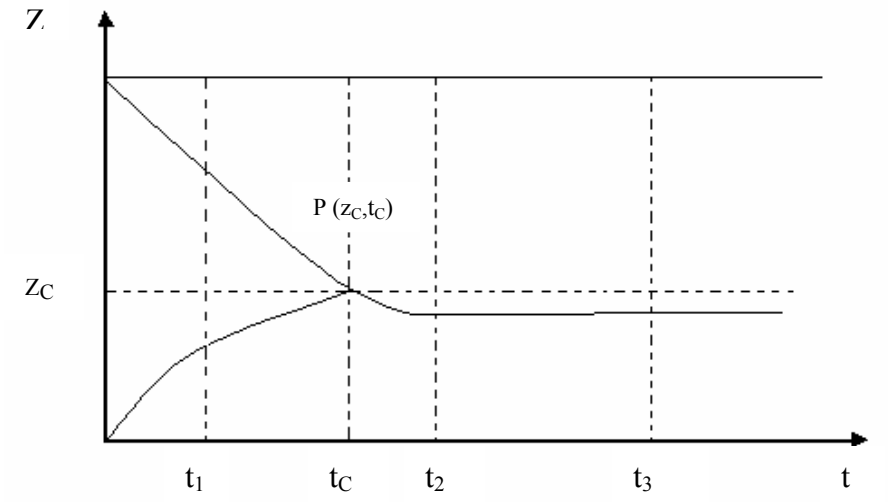


Figura 3.10: Gráfico de posição das interfaces (z) em função do tempo (t) para o processo de sedimentação apresentado na Figura 3.9.

3.2.3. CONCEITO DA FLOCULAÇÃO E COAGULAÇÃO.

O processo de agregação de partículas utilizado para melhorar o desempenho das operações de separação sólido-líquido na indústria mineral é realizado normalmente por meio de dois mecanismos a floculação e a coagulação.

Possivelmente a principal ajuda à pratica da sedimentação é a floculação em conjunto aos artifícios mecânicos desenvolvidos para promover e acelerar este fenômeno físico-químico. A floculação é praticamente um pré-requisito para um eficiente processo de clarificação; um exemplo muito típico deste é o tratamento da água potável.

A arte da floculação é antiga, mas a ciência é comparativamente nova, como também são os mecanismos projetados para acelerar e melhorar seus efeitos. Certas suspensões muito diluídas não se podem espessar ou clarificar sem o aporte de um agente floculante que junta as partículas. Em muitos casos onde a suspensão exibe uma boa qualidade para sedimentar, o uso de um agente floculante com floculação mecânica pode aumentar a velocidade de sedimentação e melhorar a clarificação marcadamente. (Concha et al, 1985).

Segundo os trabalhos de Sharma et al. (2006), a floculação é um processo que tem como finalidade formar agregados de partículas finamente divididas através da formação de flóculos que melhoram a sedimentação e causam a clarificação do sistema. A floculação gera uma suspensão não-homogênea em uma escala macroscópica.
Os floculantes são empregados em processos de separação sólido-líquido, eles atuam em nível molecular nas superfícies das partículas para reduzir as forças repulsivas e incrementar as forças atrativas. A finalidade da adição de floculantes é formar agregados a partir de partículas finamente divididas em forma de flóculos que ao aumentar o tamanho fazem aumentar a velocidade de sedimentação permitindo a clarificação dos líquidos.

A coagulação tem por objetivo agregar as partículas que se encontram em suspensões finais (ou em estado coloidal) e algumas que se encontram dissolvidas, em partículas maiores que possam ser removidas por decantação ou filtragem. Este processo de agregação ocorre devido à duas ações distintas:

i) desestabilização: por adição de produtos químicos, são reduzidas ou neutralizadas as forças elétricas repulsivas presentes nas superfícies das partículas.
ii) agregação das partículas formando agregados (coágulos) que sedimentam a uma velocidade maior. Esta agregação é facilitada pela agitação.

Os reagentes utilizados no processo de coagulação são agrupados em três categorias:

i) coagulantes: compostos, geralmente de ferro ou alumínio. Capazes de produzir hidróxidos gelatinosos insolúveis e englobar as partículas ou impurezas.
ii) alcalinizantes: capazes de conferir a alcalinidade necessária à coagulação (calviva – óxido de cálcio; hidróxido de cálcio; hidróxido de sódio – soda caustica; carbonato de sódio – barrilha).
iii) coadjuvantes: capazes de formar partículas mais densas e tornar os agregados mais pesados (argila, sílica ativa, polieletrólitos, etc.). (Gregory et al, 1988).

Algumas propriedades dos coagulantes são:

i) reagem com álcalis produzindo hidróxidos gelatinosos que envolvem e adsorvem impurezas (redução de turbidez).

ii) produzem íons trivalentes de cargas elétricas positivas, que atraem e neutralizam as cargas elétricas dos colóides que, em geral são negativas (remoção de cor).

O sulfato de aluminio e o sulfato ferroso são os coagulantes mais empregados. Os fatores principais que influenciam o processo de coagulação são a espécie de coagulante, características químicas da água, temperatura, agitação entre outros. Com a crescente ênfase na qualidade da água em toda a indústria mineira, os sistemas para o tratamento das águas são cada vez mais comuns usando as combinações de floculantes e coagulantes.

3.2.4. REATOR GERADOR DE FLOCOS (RGF).

Existem três tipos de unidades para agregaçao (coagulação-floculação) que são empregados no tratamento de águas e efluentes: hidráulica, mecânica e pneumáticos (Sincero et al, 2003). As unidades hidráulicas aproveitam a energía cinética que o fluxo adquire ao escoar por um conduto, para agitação da massa líquida. Ainda, conforme o sentido da corrente hídrica, no interior das câmaras, os reatores hidráulicos subdividem-se em: fluxo horizontal, fluxo vertical e fluxo helicoidal. Os reatores mecânicos necessitam agitadores para promover a mistura. Os reatores pneumáticos empregam ar para promover a agitação.

Configurações curvas de tubos circulares são muito empregadas em trocadores de calor, reatores químicos, unidades de osmose reversa. Essas unidades helicoidais de mistura apresentam vantagens em relação aos sistemas retilíneos ou misturadores mecânicos, principalmente pelas características hidrodinâmicas e pela existência de um fluxo secundário. Esse fluxo apresenta uma ação de forças centrípetas, com um movimento ao longo das paredes e próximo ao centro do tubo, aumentando a resistência ao escoamento (Streeter, 1961; Berger et al., 1983; Agrawal e Nigam, 2001; Gregory, 1988; Elmaleh e Jabbouri, 1991; Oddegard et al, 1992; Buchanan et al., 1998).

O reator gerador de flocos RGF consiste num reator de mistura helicoidal em linha para a agregação e separação sólido-líquido de partículas em suspensão (Rubio e Carissimi, 2007). A agitação necessária para dispersão do agente de desestabilização e geração dos agregados é realizada com o aproveitamento da energia cinética do fluxo hidráulico ao longo do reator tubular helicoidal.

Uma unidade semi-piloto do RGF é mostrada na Figura 3.11: É constituída por um tubo de poliuretano transparente com diametro interno de 0,0125 m envolto na parte externa de uma coluna fixa de polivinil cloreto (PVC), com um raio interno de 0,05 m, composto por 32 anéis, comprimento de 12 m e volume de 1,2 L. Este modelo possui a alternativa de injeção de microbolhas de ar, tornando o reator como um flotador de flocos aereados, ou seja, possui uma dupla função, de servir ao mesmo tempo como reator de agregação e contator de bolhas/agregados.

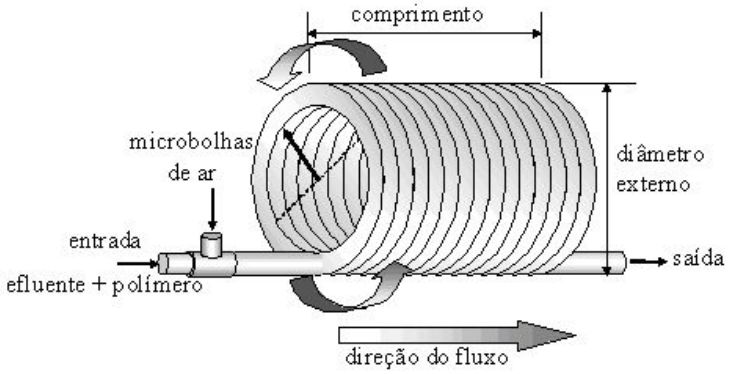


Figura 3.11: Reator Gerador de Flocos (RGF). (Rubio et al., 2007)

O emprego de agregação em linha (canaletas, dutos, tubos) não é uma prática comum, porém, já existente em algumas plantas industriais, seja pela necessidade prática dos operadores, otimização de espaço ou pela comercialização por empresas especializadas no tratamento de águas e efluentes.

3.2.5. TIPOS DE FLOCULANTES.

A floculação pode ser conceituada como a ação de formar massas agregadas ou massas compostas de partículas.

Os floculantes podem ser classificados de acordo com a composição química:

a) floculantes inorgânicos.
b) floculantes orgânicos.

a) Floculantes inorgânicos.

Estos floculantes estão sendo utilizados há muito tempo. Segumdo Sharma et al. (2006) nesta classe aparecem sais de metais multivalentes comumente com afinidade com alumínio e ferro. Mas a utilização dos floculantes inorgânicos tem algumas desvantagens como:

i) grandes quantidades de floculantes são, em geral, requeridas.
ii) elevada sensibilidade ao pH.
iii) aplicáveis somente para sistemas de baixa dispersão.
iv) não floculam partículas muito finas.

b) Floculantes orgânicos.

Nos recentes anos houve o desenvolvimento de polímeros orgânicos com características adequadas à floculação de sais mesmo quando seja adicionado em pequenas quantidades (ppm). Estes floculantes orgânicos vem sendo muito utilizados há três décadas. Dependendo das fontes eles são basicamente de dois tipos, como é mostrado na Tabela III.3:

i) floculantes orgânicos sintéticos: estes são baseados em vários monômeros como: acrilamida, acido acrílico, dialidimetil amônio cloreto (DADMAC), ácido sulfônico (Sharma et al., 2006).

ii) floculantes orgânicos naturais: estes são baseados em polímeros naturais, como amido, celulose, gomas naturais e seus derivados (Sharma et al., 2006).

Tabela III.3: Caracterização de floculantes orgânicos (Sharma et al., 2006).

Floculantes orgânicos sintéticos	Floculantes orgânicos naturais
- Mais efetivo devido á facilidade de emprego dos polímeros. O peso molecular, distribuição do peso molecular, natureza e porcentagem de carga iônica e a adequada estrutura dos polímeros.	- Tem um elevado peso molecular com uma constituição molecular fixa e de longas cadeias.
- Não-biodegradáveis, podem ser tóxicos para o meio ambiente.	-Têm um peso molecular fixo e uma cadeia longa definida, os grupos funcionais podem ser derivados de floculantes efetivos.
- Baseado em recursos não-renováveis, tais como petroquímicos, e por tanto, de elevado custo.	-Baseados em biomassas orgânicas renováveis, biodegradáveis, não-tóxicas e de baixo custo.

3.2.6. MECANISMOS DE FLOCULAÇÃO

A floculação corresponde a uma agregação de partículas em suspensão com polyeletrólitos (catiônicos, aniônicos, ou não iônicos) principalmente junto a pontes ou mecanismos auxiliares por área localizada (“patche”).

LaMer et al. (1963), desenvolveram a teoria das pontes, que mostra uma descrição útil da habilidade dos polímeros com elevado peso molecular para desestabilizar dispersões coloidais. Uma revista da floculação foi escrita por Gregory (1978). A desestabilização por pontes ocorre quando segmentos de cadeias de polímeros adsorvem em mais de uma partícula, unindo-as. Quando uma molécula do polímero entra em contato com uma partícula coloidal, alguns dos grupos reativos nos polímeros são adsorvidos na superfície da partícula, deixando outras porções da molécula extendidas dentro da solução (“tail”) como se apresenta na Figura 3.12. Os polímeros serão adsorvidos na superfície em uma série de laços (segmentos extendendo-se na solução) e “trains” (segmentos adsorvidos na superfície). Se uma segunda partícula tem sítios de adsorção que podem gerar a extensão dos laços e trains, como se apresenta na Figura 3.13.(a), o agregado partícula-polímero-partícula é formado na condição que o polímero serve

como uma ponte. Os polímeros adsorvidos devem se estender bastante longe da superfície da partícula para unir-se a outra partícula de forma a efetivar a agregação. Se o polímero for adicionado em excesso, sendo adsorvido, pode restabilizar a dispersão coloidal por saturação superficial segundo mostrado na Figura 3.13.(b).

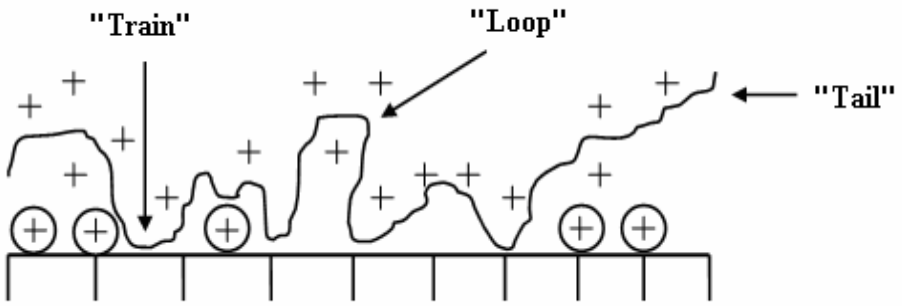


Figura 3.12: Adsorção de polímero e formação de laços dispostos mediante ponte (Sharma et al., 2006).

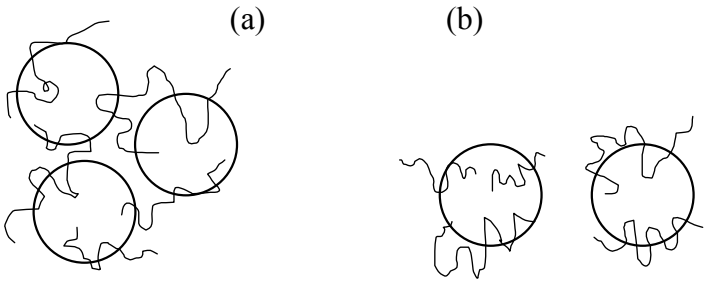


Figura 3.13: a) Polímero como ponte entre partículas; b) Restabilização da suspensões coloidaes. (Sharma et al., 2006).

O tamanho da cadeia do polímero e sua ramificação são aspectos importantes na agregação. Verifica-se na prática que polímeros de mais alto peso molecular e com cadeias lineares (não ramificadas) têm melhor desempenho na agregação.

Um segundo tipo de floculação polimérica, é descrito como o modelo “patch” (por área localizada) ou mecanismo eletrostático. Este mecanismo envolve uma distribuição desigual de cargas resultado da adsorção de “patches” discretos de polímeros na superfície das partículas. Um polímero altamente catiônico é adsorvido na superfície de uma partícula carregada negativamente como se apresenta na Figura 3.14 , A floculação é obtida reduzindo a carga negativa da superfície e a repulsão entre partículas, este

efeito é conhecido como neutralização da carga. O mecanismo de floculação pelo modelo "patch" é mais adequado para aplicações de polímeros com baixo peso molecular.

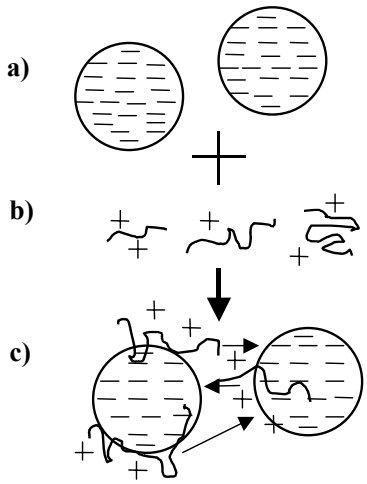


Figura 3.14: a) Partículas carregadas negativamente. b) Floculante catiônico. c) Neutralização de cargas mediante mecanismo "patch" (Sharma et al., 2006).

Além dos modelos de ponte e "patch" (por área localizada), outros dois mecanismos tem sido propostos: a compressão da dupla camada elétrica e a floculação conjunta. A compressão da dupla camada elétrica é citada com freqüência para floculantes orgânicos como sais de alumínio e ferro. Na floculação conjunta, a adição de sais inorgânicos gera a precipitação do hidróxido do metal, na qual participam partículas finas de outros sólidos suspensos. Este mecanismo é muito utilizado em tratamento de águas, ou seja, em sistemas de muito baixa porcentagem de sólidos como a clarificação de águas cruas (sem tratamento). A variação de cada mecanismo empregado vai depender da resposta do floculante polimérico na sedimentação.

3.2.7. DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO SÓLIDO.

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. Isto é atribuído à presença de partículas muito finas que reduzem a perda por separação

do componente água da pasta. Estas 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 3.15 mostra as curvas de distribuição granulométrica para os rejeitos da mina, cimento e a mistura rejeito com 8% em massa de cimento.

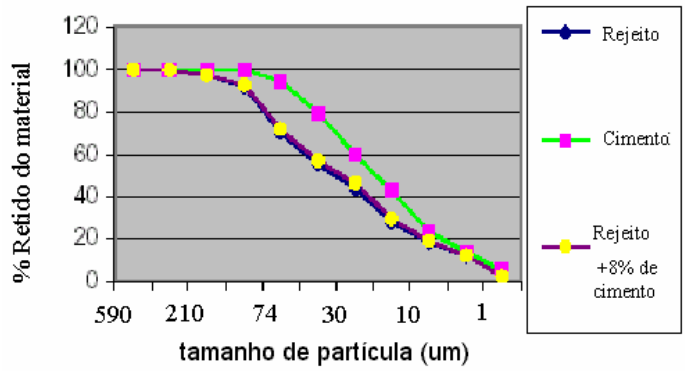


Figura 3.15: Distribuição granulométrica de rejeito, cimento e mistura. (Jung et al., 2002).

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 < 20µm) seja necessária para bombear a pasta através da tubulação sem perdas da resistência requerida para preenchimento.

3.3. APLICAÇÕES INDUSTRIAIS DO PREENCHIMENTO COM PASTA

Wang e colaboladores (2002), estabelecem a existência de diferentes tipos de material utilizados para backfill cimentado (preenchimento subterrâneo), dentre estes: preenchimento com agregado cimentado (CAF), preenchimento hidráulico cimentado (CHF) e preenchimento com pasta cimentada ou pastefill (CPF). Enquanto que segundo os autores Amarutanga e Yaschyshyn (1997), existem três tipos principais de backfill: "hydraulic fill", "rock fill" e "paste fill". Cada um tem vantagens e desvantagens e sua utilização depende das condições de mineração presentes. O tipo "hydraulic fill" são polpas de preenchimento onde o sólido consiste de rejeitos e terras aluviais mais a

adição de um ligante. Esta polpa pode ser transportada por gravidade ou por bombas. No "rock fill" não são consideradas polpas, pois esta mistura corresponde a um agregado entre partícula – partícula com a adição de um cimento. Este tipo é usado em áreas de elevada tensão. O "pastefill" apresenta normalmente um elevado conteúdo de sólidos finos correspondentes aos rejeitos gerados pelo beneficiamento e podem alcançar uma boa qualidade com pequenas dosagens de ligantes. 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. Estes rejeitos devem ser primeiramente espessados para formar a pasta, e normalmente, são misturados com pequenas quantidades de cimento (3 a 5% em massa) 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 3.16 apresenta os ângulos possíveis para a disposição de uma polpa de alta densidade e para uma pasta mineral, em uma visão de caráter qualitativo.

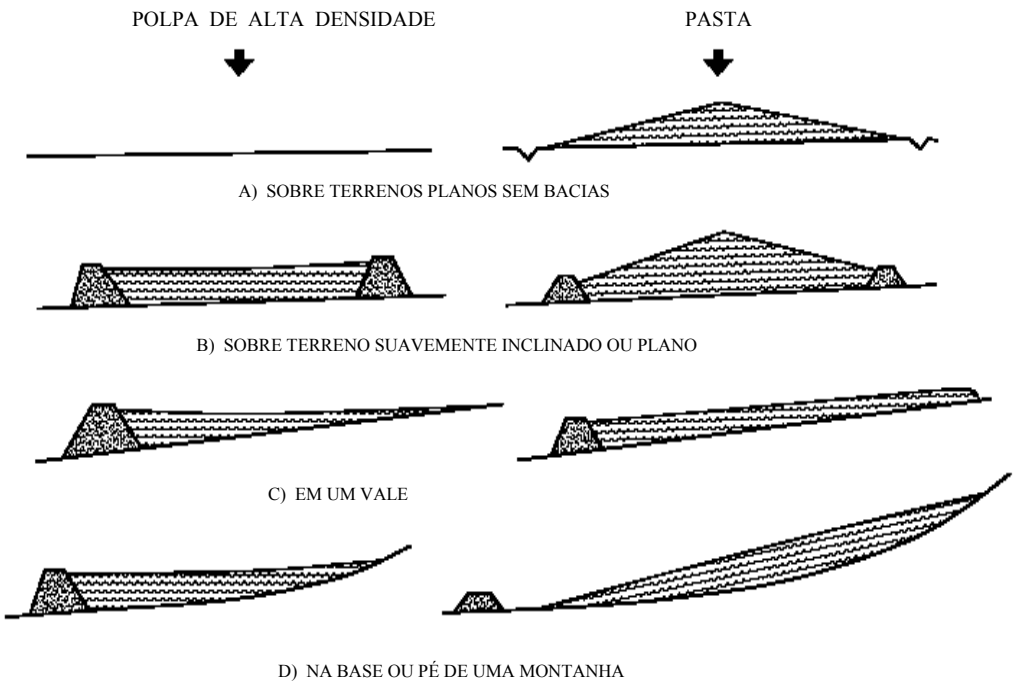


Figura 3.16: Ângulos de disposição para polpas de alta densidade e para pasta, em vários tipos de terreno. (Laudriault, 2002) .

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. Este sistema utiliza rejeitos já moídos com aproximadamente 60% em massa de sólidos e um P_{80} 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 "ïn-situ" o estéril já disposto. A mistura de sólido para preenchimento é a seguinte: rocha (66%), areia (25%) e lama (9%). Neste caso, são adicionados na mistura: cimento, dispersante e aditivos para o controle de hidratação. O dispersante atua aumentando a fluidez enquanto o aditivo sobre o manuseio da pasta.
- Na mina Jiaojia da 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 este 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, 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 P_{80} 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.

- Na Kinross Gold Corporation, os rejeitos já moídos são diluídos até 10 - 15% de sólidos e misturados com floculante. 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 a etapa de espessamento. A pasta é misturada com areia e ligante antes de ser utilizada no preenchimento.
- A mina Enterprise na Austrália substituiu seu sistema de preenchimento hidráulico pelo sistema de "pastefill". Nesta 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, esta planta produz uma pasta de 76% de sólidos.
- A mina Henty Gold da 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%.
- Em 1996, a mina Brunswick de Noranda Inc. do Canadá, modificou seu sistema 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, e é 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 processo minério contendo Pb – Zn – Ag, o processo de preparação do “pastefill” foi realizado em alta temperatura. Neste caso, o cimento foi utilizado para melhorar a resistência da pasta, com adições que variam entre 3 e 7% na mistura.

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, nos rejeitos de ouro que tenham uma porosidade de 47% apresentavam 75% de sólidos na pasta. Quando estes 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 estanque e indo depois para um filtro de disco até alcançar 15% de umidade antes da adição do ligante.

A Tabela III.4 apresenta algumas aplicações industriais que utilizam o sistema de preenchimento com "pastefill".

Tabela III.4: Aplicações industriais do preenchimento com "pastefill".

Nome da usina	**Localidade/Pais**	**Produção**	**Características do sistema "pastefill"**
Cannington.	Austrália.	Pb-Ag-Zn.	Uso de PC[1].
Jiaojia.	China.		7% outro ligante.
Neves Corvo.	Portugal.	Cu e Cu/Sn.	1-7% PC[1].
Enterprice.	Austrália.	Cu.	Uso de outros ligantes.
Brunswick.	Canadá.		2-7% PC[1].
Hard Rock.	Toyoha/Japão.	Pb-Zn-Ag.	3-7% PC[1].
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[2].
Cluff Lake.	Canadá.	U.	Sistema TTD[2].
Ekati.	Nor-oeste, Canadá.	Diamante.	Sistema TTD[2].
Vandreuil.	Québec – Canadá.		Produz pasta desde 1.987.

1- Cimento Portland.

2- Sistemas de Disposição de Rejeitos Adensados.

3.4. TESTES APLICADOS ÀS PASTAS MINERAIS

3.4.1. TESTE DE ABATIMENTO ("SLUMP")

Verifica-se do trabalho de Clayton, Grice e Boger (2003), que o teste de abatimento ("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 3.17 mostra uma representação esquemática do teste de "slump". Neste teste, o cone é preenchido com concreto até completar todo seu volume, sendo retirado verticalmente, e verificando-se a diferença entre a altura original e a final, que é chamada de altura de "slump" ou altura de abatimento.

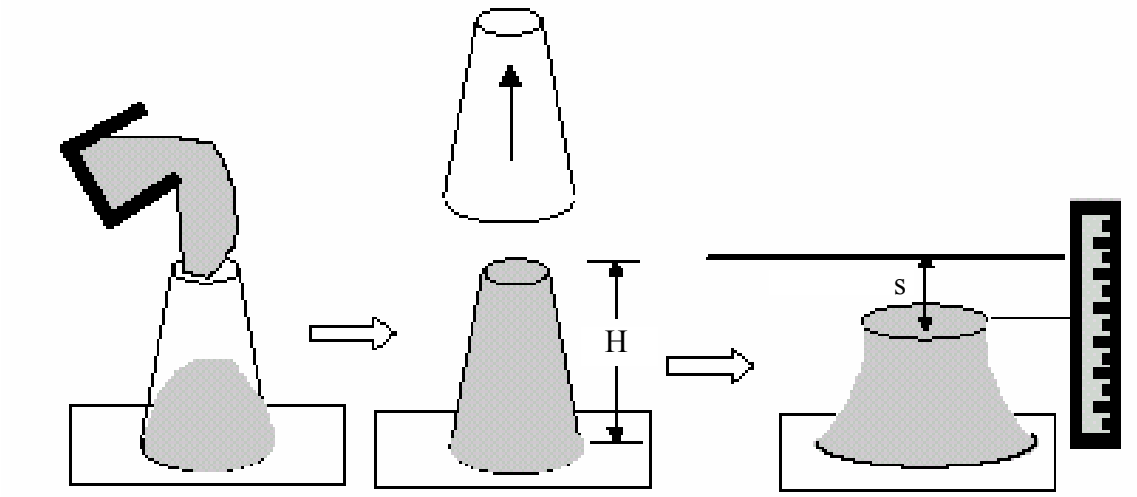


Figura 3.17: Representação esquemática do teste de cone "slump". (Clayton et al., 2003).

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

A altura de "slump" é utilizada como parâmetro de controle, para avaliação da consistência de uma pasta. Esta altura é dependente tanto da tensão de escoamento quanto da densidade do material. No contexto mineiro, estes fatores poderiam variar com as mudanças na 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 pode não ser suficiente.

Uma superfície cilíndrica pode ser utilizada de forma alternativa ao cone. A Tabela III.5 mostra alguns tamanhos de cilindro utilizado por Clayton et al. (2003) e Hernandez (2005).

Tabela III.5: Dimensões e material de construção de cinco cilindros para teste de "slump" de laboratório, utilizados nos experimentos de Clayton et al. (2003) e Hernandez et al. (2005).

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
5	100	100	PVC

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

- determinação mais precisa da tensão de escoamento, com respeito à simetria do cone;
- o modelo cilíndrico, é matematicamente mais fácil para o desenvolvimento de modelos;
- 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 podem ser completadas usando uma seção do tubo, enquanto 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. Nestas 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. Isto 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 13,34cm (5,25") – 14,61cm (5,75") mostraram que o conteúdo de água em massa estava na faixa de 21 a 22%. A Figura 3.18 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.

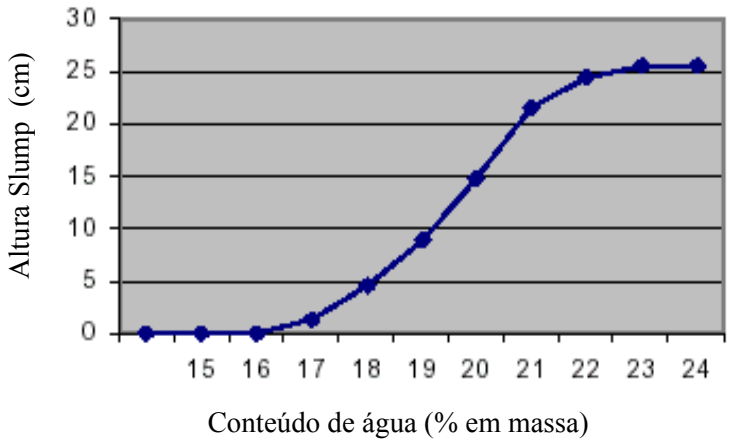


Figura 3.18: Gráfico altura de "slump" em função do conteúdo de água ou umidade da pasta. (Jung et al., 2002)

No trabalho dos pesquisadores Araújo et al. (2003), são apresentados resultados de testes reológicos feitos com rejeitos e lamas da usina Mutuca da empresa Minerações Brasileiras Reunidas - MBR, que mostraram-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.6 são apresentadas algumas características físicas das amostras estudadas.

Tabela III.6: 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

3.4.2. TESTE DE CALHA ("FLUME")

O ângulo de repouso é outra importante propriedade das pastas que pode ser estimada através do teste de calha ("flume"). Este teste consiste em determinar o ângulo máximo possível no qual a pasta ainda mantém-se no repouso. Chambers et al. (2002), mostraram 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 3.19).

Figura 3.19: 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 3.20. Segundo a Figura 3.20, o ângulo de repouso, θ_R, fica definido pela seguinte equação:

$$\theta_R = \arctan \{(H_1 - H_2) / L\} \tag{3.1}$$

Laudriault (2002), apresenta uma comparação (Figura 3.21) 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.

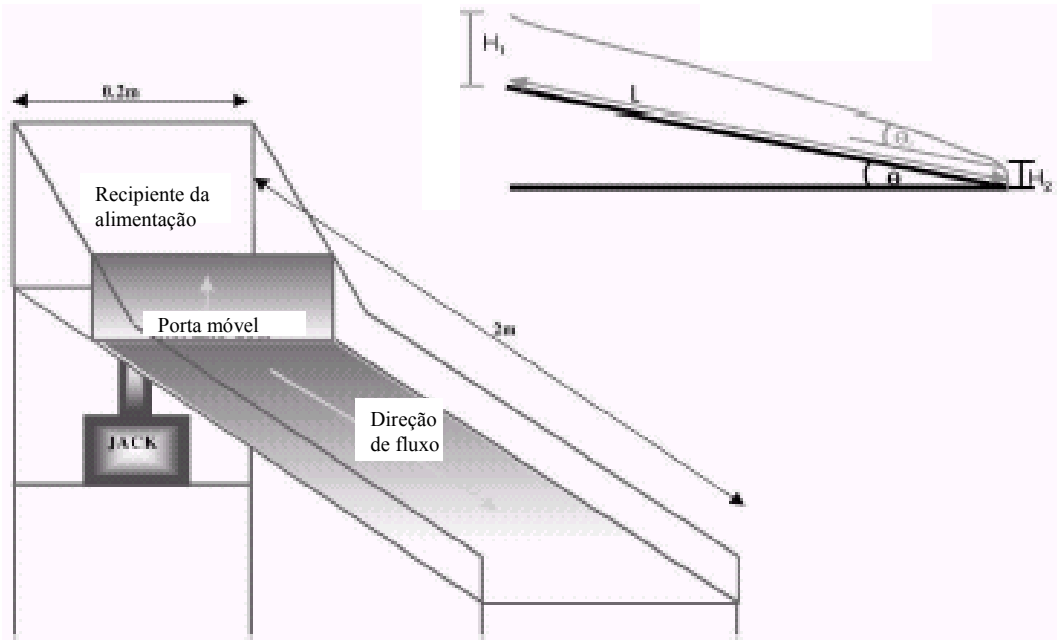


Figura 3.20: Plano inclinado e diagrama esquématico do fluido estacionário na calha, (Sofrá et al, 2002).

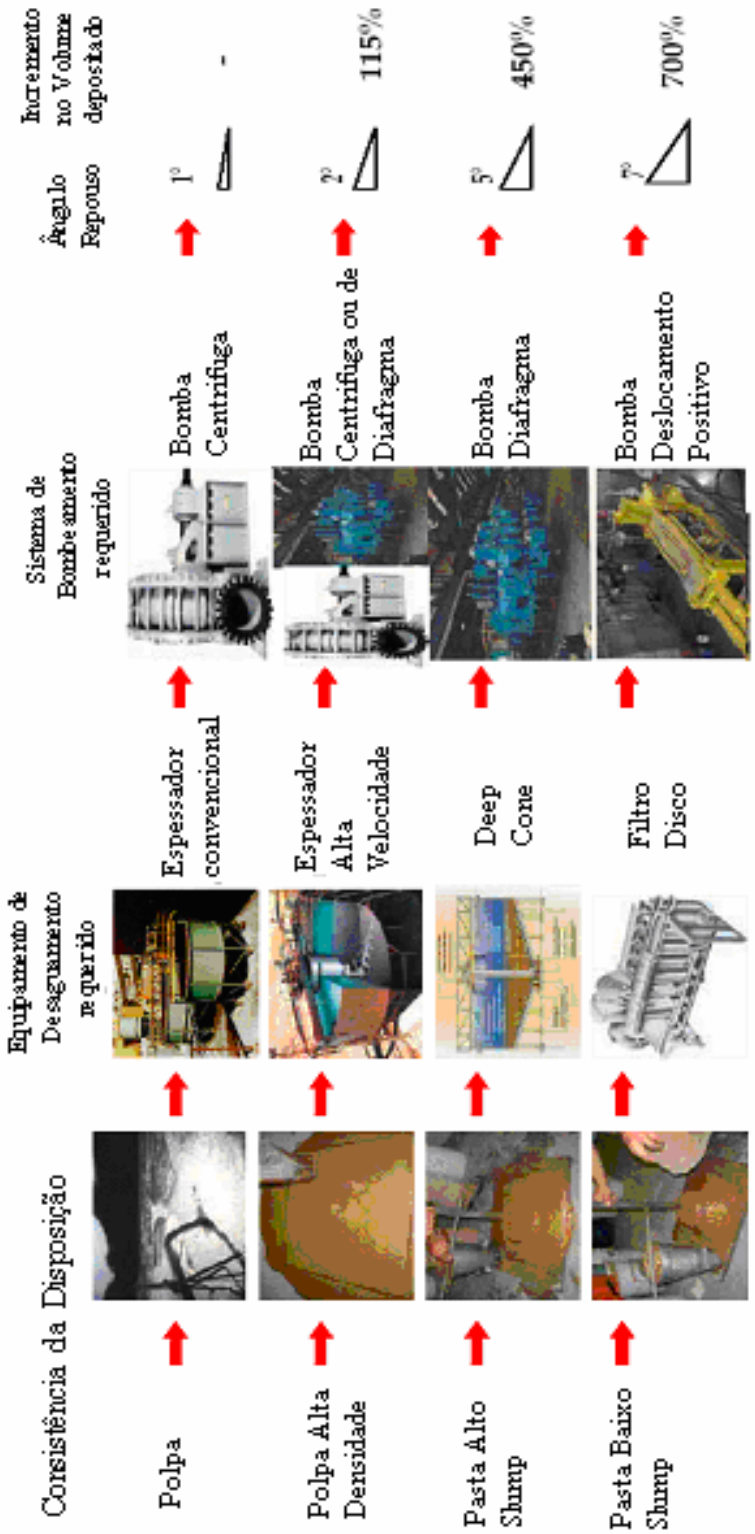


Figura 3.21: Consistência da mistura para disposição, seus correspondentes equipamentos de desaguamento e bombeamento, ângulos de repouso e incremento de volume depositado. (adaptado de Laudriault, 2002)

Da Figura 3.21 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. 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. Estes valores estão de acordo com aqueles mostrados no trabalho de Laudriault (2002) e indicados na Figura 3.21.

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

A Tabela III.7 indica 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) precisa normalmente de mais dados que o sistema convencional de disposição de rejeitos. No caso convencional, a abordagem considera que as propriedades dos rejeitos são fixadas pela planta de processos, enquanto que 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, por outro lado no sistema TTD obtêm-se uma superfície inclinada permitindo obter um depósito com suporte mais seguro com lados inclinados, conforme mostrado na Figura 3.22.

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 3.22: Disposições típicas para o sistema "pastefill". (Robinsky, 2002)

Na Figura 3.23 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.

A Figura 3.24 apresenta o resultado de um teste realizado com rejeitos grossos e finos, mostrando a classificação dos materiais utilizados, quando eles foram espessados, em concordância com a lei de Stokes.

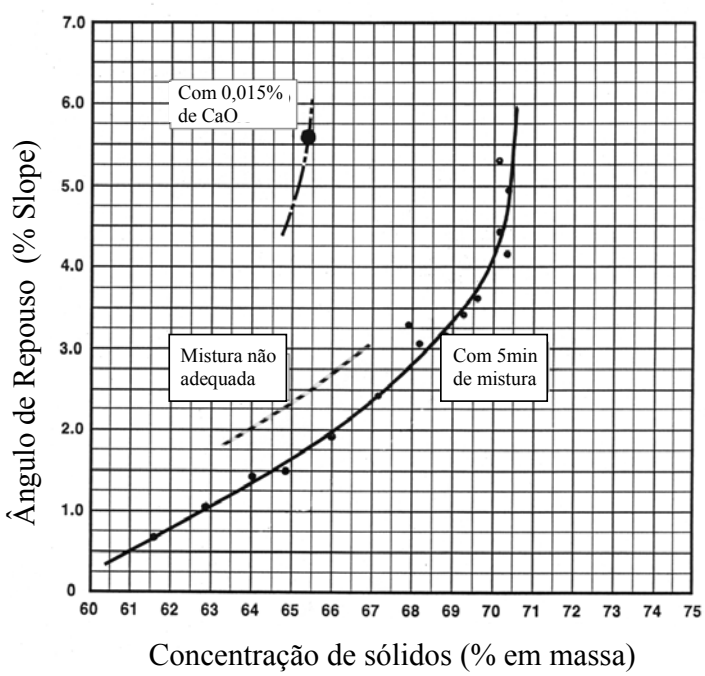


Figura 3.23: Ângulo de repouso (% de "slope") em função da % de sólidos em massa de uma pasta de rejeito de ouro na Venezuela. (Robinsky, 2002)

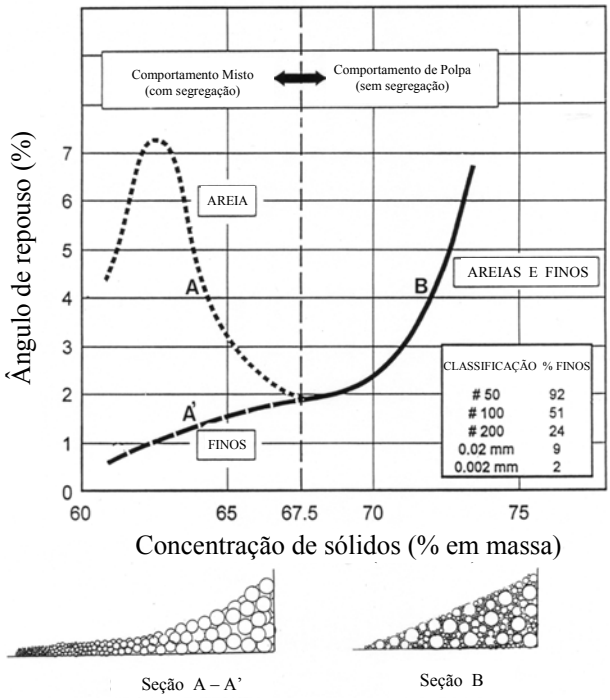


Figura 3.24: Ângulo de repouso (% de "slope") em função da % de sólidos em massa obtidos no laboratório, observa-se também a estratificação do material.(Robinsky, 2002)

Na Figura 3.24 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 granulometria fina, tais como alumina, não mostram, ao menos visualmente, este 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, 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 3.25. Em alguns casos este fato pode ser utilizado para reduzir a dosagem de floculante, tamanho e/ou número de espessadores.

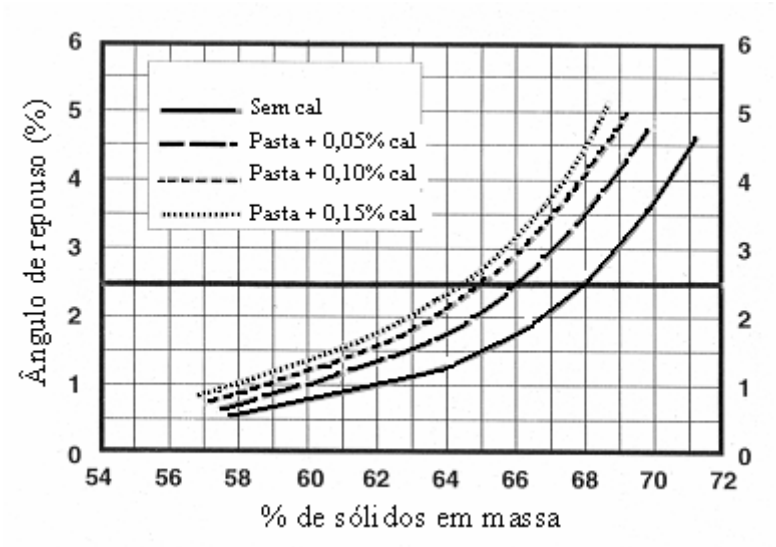


Figura 3.25: Gráfico de Ângulo de repouso em função da % de sólidos em massa, para diferentes adições de cal (Robinsky, 2002).

3.4.3 CARATERISTICAS REOLÓGICAS DE SUSPENSÕES MINERAIS.

Nos trabalhos de Dealy (1995) e de Klein (2002), são apresentadas 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 uma ciência da mecânica de fluidos que estuda as propriedades físicas que influenciam o transporte de quantidade de movimento num fluido. 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 3.2, a seguir:

$$\tau = F / A \tag{3.2}$$

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 3.3 e observado na Figura 3.26:

$$\gamma = \Delta v / \Delta x \tag{3.3}$$

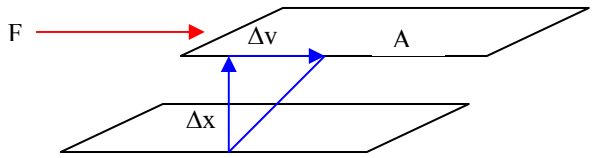
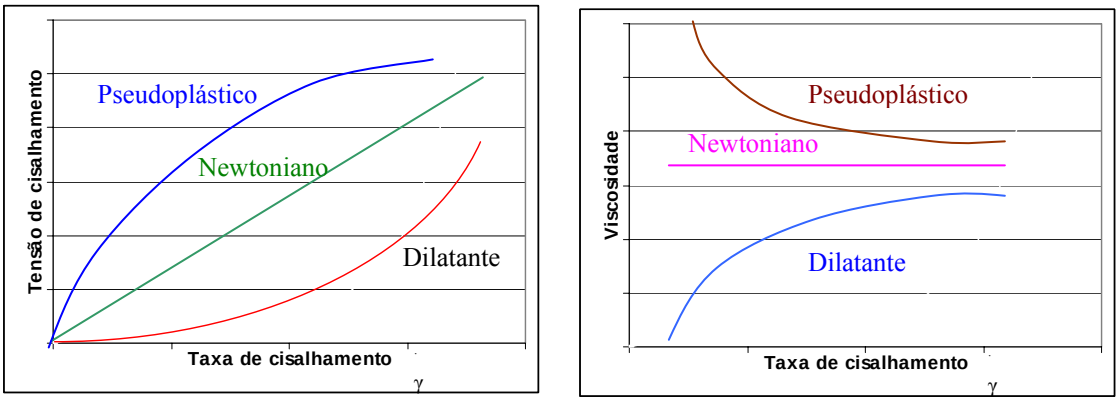


Figura 3.26: Aplicação da força F ao plano de área A e distância x ao plano paralelo que provoca seu deslocamento a velocidade v. (Klein, 2002).

Os 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 à taxa de cisalhamento. A constante de proporcionalidade, neste caso, corresponde à viscosidade newtoniana, η_N, que é característica deste tipo de fluido. As suspensões com baixo conteúdo de sólidos normalmente apresentam este 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. Desta forma, estas suspensões não têm uma viscosidade simples e sim uma viscosidade aparente, que é variável com a taxa de cisalhamento. Esta 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 de sólidos, podem ser representados pelas Figuras 3.27 a) e b). A Figura 3.27 a) apresenta o gráfico de tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento, enquanto que a Figura 3.27 b) mostra o gráfico de viscosidade em função da taxa de cisalhamento.



a) b)

Figura 3.27: 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, 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. As características de fluxo, que definem o comportamento reológico da suspensão são normalmente determinadas pela fração volumétrica da fase dispersa, pela magnitude das forças de interação entre as partículas e pela 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 3.28. 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. Neste caso, um dos comportamentos possíveis é o tixotrópico no qual a viscosidade decresce com o tempo (Figura 3.29). 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.

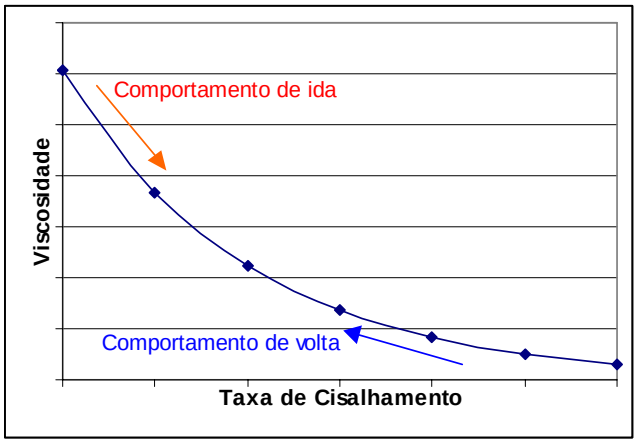


Figura 3.28: Comportamento da viscosidade independente do tempo. (Boger, 2003).

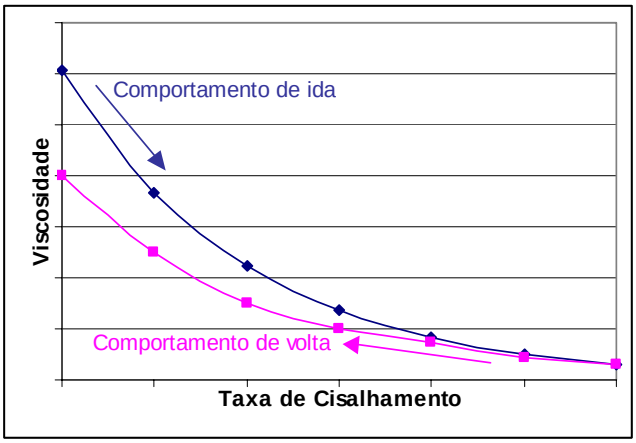


Figura 3.29: Comportamento tixotrópico da viscosidade (dependente do tempo). (Boger, 2003).

Outro parâmetro reológico importante é a chamada tensão de ruptura ou de escoamento, que fornece as características para o projeto e desempenho do processo. Ela é definida como aquela quantidade da tensão que deve ser alcançada para iniciar o fluxo de material. Este parâmetro é uma propriedade do material que denota a transição entre um comportamento de 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 estrutura tridimensional. Existem métodos diretos e indiretos para sua determinação experimental, sendo estes últimos os mais utilizados. (Klein, 2002)

3.4.4. MEDIÇÕES DE VISCOSIDADE E TENSÃO DE ESCOAMENTO.

A tensão de escoamento de suspensoes concentradas pode ser determinada através de varias técnicas. Infelizmente, vários métodos existentes são tediosos para a execução ou limitados na sua aplicabilidade, com resultados dependendo das condiçoes experimentais empregadas.

A avaliação da tensão de escoamento mediante o metodo do "vane" (pás), mostrou ser adequada quando comparada com métodos reológicos mais convencionais (Nguyen e Borger, 1985). A aplicabilidade do método de vane está sendo estendido para outros sistemas de suspensões como dióxido de titanium, óxidos de urânio entre outros. O princípio do método de vane consiste basicamente de quatro pás como se apresenta na Figura 3.30.

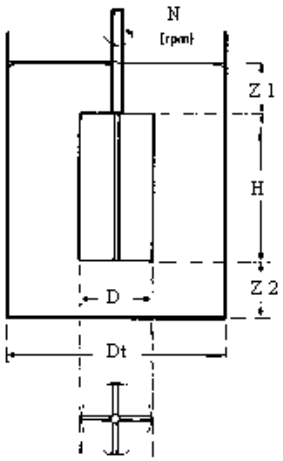


Figura 3.30: Diagrama de vane de quatro paletas em operação. (Nguyen et al,. 1985)

Estas pás são imersas na amostra e iniciando-se a sua rotação lentamente até uma rotação constante em que se procura de detetar o momento de rendimento em que o esforço de torsão exercido pelas pás alcança um valor máximo.

No trabalho de Nguyen e Borger (1985), se tem um estudo de determinação indireta de tensão de escoamento em função da concentração utilizando diferentes métodos reológicos, como extrapolação direta, modelos Bingham, Herschel, Bulkley e Casson. A Figura 3.31 mostra o comportamento da tensão de escoamento em função da percentagem de sólidos de "red mud" para dois diferentes métodos.

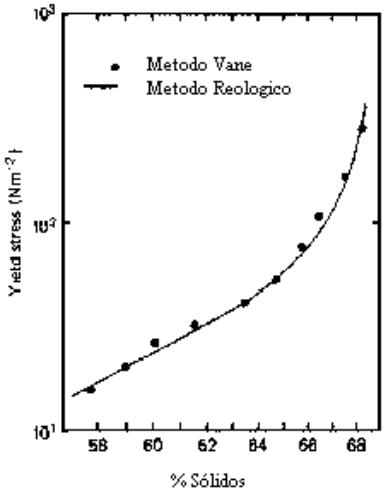


Figura 3.31. Comparação de medições de tensão de escoamento mediante método de vane e reologicos. (Nguyen et al,. 1985).

A figura 3.32 mostra curvas típicas dos testes para duas amostras de "red mud" com 67,6% e 68,2% de sólidos, onde as curvas são apresentadas em termos de torque em função do ângulo de rotação.

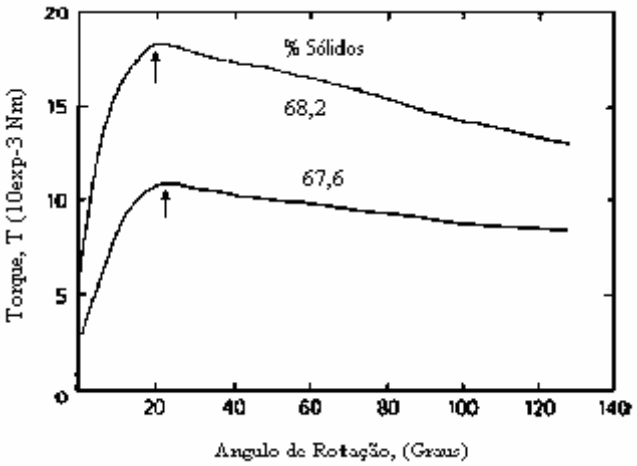


Figura 3.32: Curvas típicas de testes de vane para diferentes concentrações (Nguyen et al, 1985).

Segundo Nguyen e Borger o metodo de vane é capaz de fazer medições precisas e diretas da tensão de escoamento para suspensões concentradas.

O trabalho de Sofrá e Boger (2002) apresenta um estudo do comportamento reológico de algumas espécies minerais presentes na mineração da Austrália, como: bauxita, manganês, ouro, níquel e carvão. A Figura 3.33 apresenta um gráfico da tensão de escoamento em função da concentração de sólidos para uma ampla variedade de pastas de rejeitos minerais. A Figura 3.34 mostra o comportamento da viscosidade em função da taxa de cisalhamento para diferentes concentrações de sólido de uma pasta de uma lama de bauxita.

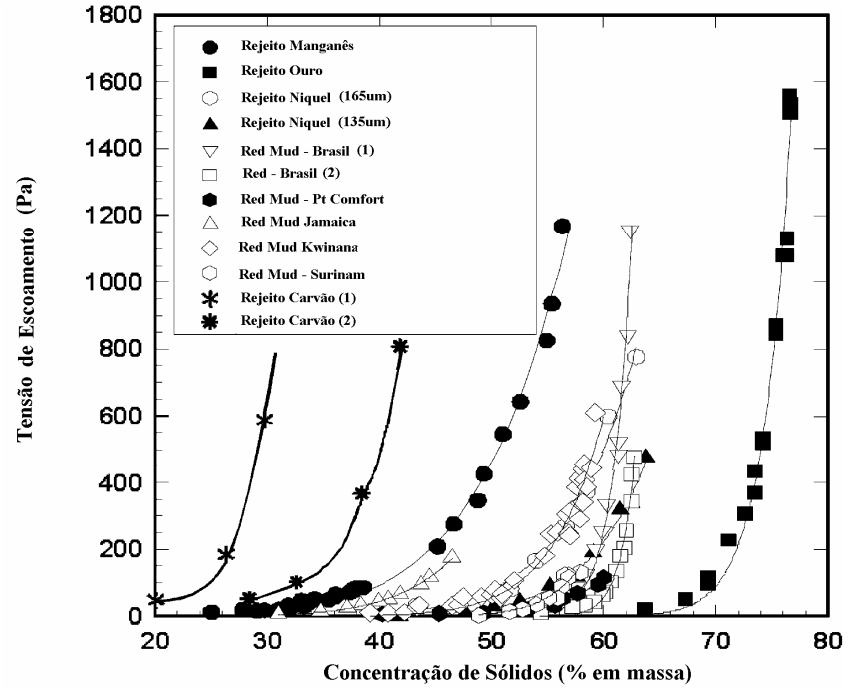


Figura 3.33: Gráfico da tensão de escoamento em função da concentração de sólidos para uma ampla variedade de rejeitos minerais. (Sofrá et al., 2002)

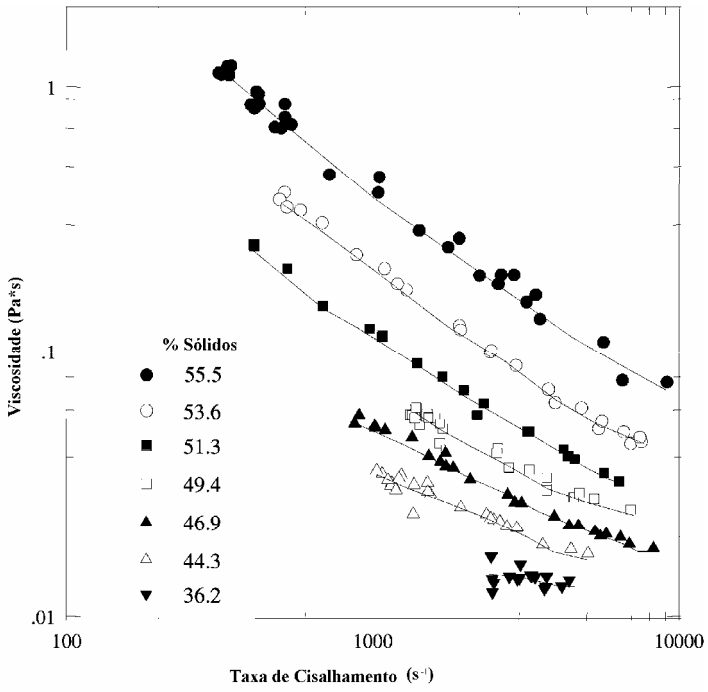


Figura 3.34: Gráfico da viscosidade de equilíbrio em função da taxa de cisalhamento para várias pastas de rejeitos de bauxita. (Sofrá et al., 2002)

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.
Esta discrepância é apresentada na Figura 3.33, que mostra diferentes tipos de materiais com distintos níveis de densidade crítica de sólidos indicando variações desde 30 até 80% de sólidos em massa. 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 3.35.

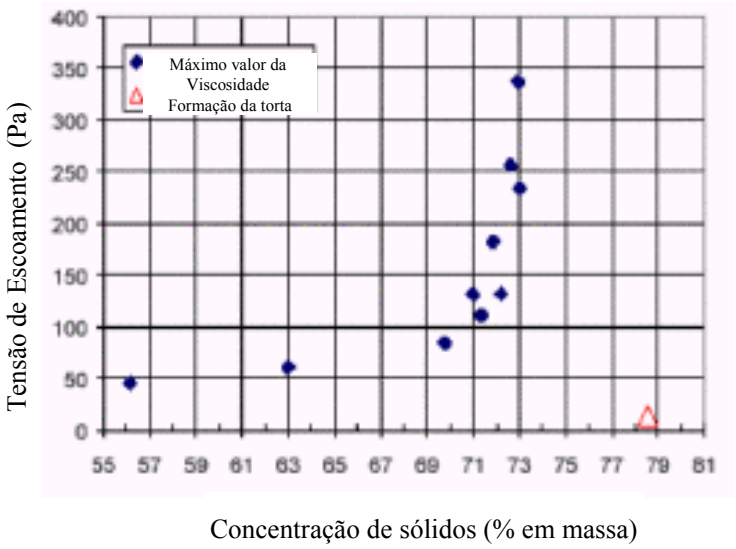


Figura 3.35: Gráfico da tensão de escoamento em função do adensamento da pasta (% de sólidos em massa). (Araujo et al., 2003)

A Figura 3.35 mostra 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. 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, neste caso, é relacionado com o bombeamento e reagente para obtenção da mistura. O maior custo de operação é usualmente o cimento como mostra a Tabela III.8. 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.8: 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%	0,4%
Cimento	73,4%	72,9%	72,8%
TOTAL	**100%**	**100%**	**100%**

3.6 ASPECTOS DO MINÉRIO DE MANGANÊS (Sampaio et al. 2001)

3.6.1 Descrição do manganês.

O manganês encontra-se na natureza combinado com outros elementos, formando minerais, na sua maioria óxidos. Embora esteja amplamente disperso nas rochas, não há conhecimento de sua ocorrência na forma metálica. São conhecidos mais de cem minerais de manganês; entretanto, pouco mais de uma dezena, constituem minerais de minério. De modo geral, eles ocorrem na natureza nas formas de óxidos, hidróxidos, silicatos e carbonatos. O dióxido de manganês foi considerado um composto de ferro até 1774 quando Schule.C.W. o reconheceu pela primeira vez como elemento químico. No mesmo ano, o engenheiro de minas sueco, Gahn.J.G, tornou-se o primeiro pesquisador a isolar este elemento químico. No início de segunda metade do século XIX, o metal ganhou importância econômica para a indústria metalúrgica, entretanto, apenas no final do mesmo século surgiram as chamadas ligas de alto manganês.

Vale notar que quase a totalidade dos depósitos mais importantes de manganês podem ser classificados em dois tipos: depósitos de sedimentação marinha e depósitos secundários de enriquecimento residual.

Os habitantes do Egito antigo já usavam compostos desse elemento químico na produção de vidro. Atualmente, muitas aplicações são reservadas ao manganês nos setores metálico e não-metálico. Dentre uma variedade de usos, o manganês é um componente chave nas ligas com outros metais, especialmente, com o ferro na produção de aço. Ainda nesse mesmo setor, o manganês é usado em combinação com outros metais na produção de ligas de: cobre, zinco, alumínio, estanho e chumbo. Sabe-se que a indústria de aço consome cerca de 92% (25 milhões de toneladas por ano) da produção total do minério de manganês em todo o mundo. O percentual remanescente, 8% (2 milhões de toneladas por ano) é consumido por uma gama de indústrias. No Brasil, o uso é também liderado pela metalurgia, seguindo-se a fabricação de pilha (10%) e a indústria química (5%).

O manganês chega ao mercado em duas formas no estado natural e tratado. Este último é beneficiado com o objetivo de ser empregado em diversos produtos, tais como: baterias, agricultura (fertilizantes, fungicidas, rações), agente de secagem de pintura, agentes oxidantes para corantes, aromatizantes e agentes de vedação, bem como aplicações no meio ambiente (tratamento de água, controle da poluição do ar, aditivos de combustão) e na hidrometalurgia (urânio e zinco), entre outros.

O uso não metalúrgico do manganês compreende uma variedade de aplicações. Assim, o metal é usado como agente corante em vidros, produtos da cerâmica vermelha, e, no caso dos óxidos de manganês, são utilizados como oxidantes na manufatura de cloro, cromo e oxigênio; desinfetante, como em algumas aplicações do permanganato de potássio; agente de secagem de tintas; corante ou descorante (agente de branqueamento) do vidro, componentes de pilhas e baterias.

3.7. MINERALOGIA E GEOLOGIA (Sampaio et al. 2001).

3.7.1. Mineralogia

O manganês é o elemento químico do grupo dos elementos de transição. Também é encontrado em mais de uma centena de minerais, desde aqueles em cujas composições é predominante, àqueles onde o metal participa em pequenas quantidades. O metal está distribuído em diversos ambientes geológicos e disperso em uma variedade de rochas sob a forma de óxidos, dentre os quais destacam-se: dióxidos, hidróxidos, silicatos e

carbonatos. Os dióxidos constituem as mais importantes fontes comerciais do metal, destacando-se a pirolusita (MnO_2), a psilomelana e a magnatita ($Mn_2O_3.H_2O$). Na Tabela III.9 estão relacionados os principais minerais de manganês. Em seguida, algumas informações sobre os mesmos.

Tabela III.9: Principais minerais de manganês, suas fórmulas e composições químicas.

Minerais	**Fórmula química**	**Composição Química (%)**				
		Mn	**MnO**	**MnO_2**	**CO_2**	**H_2O**
Braunita	$2Mn_2O_3.MnSiO_3$	66,6	44,8	55,2	-	-
Criptomelana	KMn_8O_{16}	59,8	-	-	-	-
Hausmannita	Mn_3O_4	72	62	32	-	-
Jacobsita	$MnFe_2O_4$	24	-	-	-	-
Manganita	$Mn_2O_3.H_2O$	62,5	40,4	49,4	-	10,2
Nsutita	MnO_2-γ	-	-	-	-	-
Psilomelana	$mMnO.MnO_2.nH_2O$	45-60	-	-	-	-
Pirolusita	MnO_2-β	62-63	-	-	-	-
Rodocrosita	$MnCO_3$	47,8	61,7	-	38,3	-
Rodonita	$(Mn,Ca,Fe,Zn)SiO_3$	47,8	-	-	-	-
Todokorita	$(Na,Ca,KMn^{2+})(Mn^{4+},Mn^{2+},Mg).3H_2O$	-	-	-	-	-

Esperssartita: associado a granitos pegmatíticos, certos skarnitos ricos em manganês. Associado também a rochas metamórficas derivadas de grauvacas.

Pirolusita: usualmente formado pela oxidação de outros minerais também de manganês, é o de maior importância comercial.

Psilomelana: o segundo mais importante sob o aspecto comercial, é um óxido hidratado contendo de 45 a 60% de Mn, porém com quantidades variáveis de bário e potássio. É muito comum sua presença em depósitos secundários,apresentando-se como uma forma coloidal de MnO_2 que supostamente absorveu impurezas, incluindo água, além de sódio, potássio e bário.

Rodocrosita: é um carbonato ($CaCO_3$) de manganês com quantidades variáveis de ferro, cálcio e carbonatos de manganês. É muito encontrado como uma substituição matasomática de calcário nos veios, em filões de prata.

Rodonita: é um silicato de manganês, em cuja estrutura cristalina ocorrem cálcio, na forma de $CaSiO_3$ no máximo 20% em peso; Fe^{2+} substituindo o Mn em até 14% em peso; zinco, em substituição à formação de um tipo de rodonita, também chamada de fowlerita, $Ca(Zn,Mn)_4(Si_2O_{15})$. A rodonita ocorre em depósitos de manganês, como resultado de atividades metamórficas. O mineral, ausente de impurezas, pode ser formado com base em rodocrosita que ao reagir com sílica produz rodonita e dióxido de carbono, segundo a reação 3.4 a seguir:

$$\mathbf{MnCO_3 + SiO_2 \leftrightarrow MnSiO_3 + CO_2} \qquad (3.4)$$

Manganita: formado pela redução de pirolusita, o mineral ocorre em veios e está, invariavelmente, associado a outros minerais de manganês.

Braunita e manganita: ocorrem, em menores quantidades, em muitos depósitos de manganês. A braunita contém até 10% de SiO_2, que a transforma em um oxisilicato, o único com alguma importância comercial.

Litiofilita: ($LiMnPO_4$) é um óxido de manganês com quantidades variáveis de outros metais como cobalto, níquel e cobre.

Nsutita: (MnO_2-γ) é um composto não estequiométrico e poroso, comumente empregado na fabricação de baterias, conferindo-lhes melhor rendimento. O nome provém da região de Nsuta, no Gana.

Todorokita: nome com origem em Todoroki, mina de manganês no Japão onde o mineral foi encontrado em nódulos de manganês.

Vários outros minerais de manganês são encontrados em quantidades relativamente pequenas em muitos depósitos. Em particular, hausmannita, que é um mineral primário de manganês contido em veios associados às rochas ígneas.

3.7.2. Geologia

Os depósitos sedimentares são os mais importantes em termos de minérios de manganês e são os mais encontrados em todo o mundo.

Os chamados depósitos residuais foram formados de diferentes maneiras. Assim, têm-se os depósitos de manganês resultantes de alterações de outros pré-existentes ou da concentração de minerais de manganês, quando outros minerais foram removidos por algum tipo de intemperismo e/ou processo químicos. Exemplo desses depósitos são: Nsuta em Gana; Moanda no Gabão e nódulos em argilas residuais nos Estados Unidos. No caso de Gana, isso é verdadeiro apenas para a parte superficial do depósito. Em profundidade, encontra-se o minério carbonatado, provavelmente, de origem marinha.

Os depósito sedimentares, usualmente estratiformes ou lenticulares, são encontrados em todo mundo e foram formados em vários ambientes geológicos. Entretanto, em um número limitado deles, existem minérios com teores elevados de manganês em quantidades suficientes para serem aproveitados, economicamente, em escala industrial. Nesses depósitos, encontrados na Rússia, África do Sul e Austrália, os minerais de manganês, em geral na forma de óxidos, foram formados por meio de processos de dissolução das rochas pré-existentes. Os chamados depósitos residuais foram formados por alteração de depósitos existentes ou pela concentração de minerais de manganês, quando outros minerais foram removidos da rocha por meio de algum processo.

Alguns depósitos sedimentares e residuais sofreram metamorfismo, resultando em corpos mineralizados de elevado teor, os quais são encontrados, com mais freqüência, em mármores, quartzitos, xistos e gnaisses. Devido à complexidade no processo de formação dos depósitos de manganês, especialmente as condições químicas, uma variedade de impurezas está sempre associada aos minérios desses depósitos. Isso resultou no desenvolvimento de processos especiais de concentração que promovem a obtenção de concentrados de minerais de manganês com elevado teor e baixo conteúdo de impurezas, atendendo as especificações do mercado. No Brasil, as reservas de manganês, incluindo as medidas indicadas e inferidas, concentram-se nos Estados do Mato Grosso (33%) e Pará (15%). As reservas remanescentes encontram-se distribuídas nos estados de Minas Gerais, Espírito Santo, Bahia, Goiás, Amapá e São Paulo.

LAVRA E PROCESSAMENTO

3.8.1. Lavra

A maioria dos minérios de manganês lavrados é de origem sedimentar. Como esses minérios são intemperisados, especialmente, em zonas lateríticas, as frações resistentes dos minérios ocorrem com freqüência em nódulos e cascalho de superfície intercalados com argila. Virtualmente todos os depósitos de minério de manganês são constituídos de pequenos leitos ou lentes e a zona mineralizada se estende por áreas relativamente grandes. Os depósitos podem ser lavrados a céu aberto, com auxílio de escavadeira mecânica, rippers, draglines ou outros equipamentos, freqüentemente sem a utilização de explosivos. Caminhões fora de estrada são os mais utilizados no transporte de minério, desde a mina até a usina de beneficiamento.

3.8.2. Processamento

Há uma série de fatores que devem ser considerados para viabilizar o aproveitamento econômico de um depósito de manganês. Dentre eles, sobressaem-se: a dimensão do depósito, teor de manganês, impurezas associadas à mineralização do manganês, e receptividade do minério aos processos de concentração. Devido à diversidade e complexidade inerentes à formação dos minérios de manganês, as impurezas associadas ao minério podem ser classificadas em:

- metálicas - ferro, chumbo, zinco, níquel, cobre, cobalto, arsênio e minerais de prata;
- não metálicas - enxofre, fósforo, álcalis e minerais alcalinos terrosos;
- gangas - sílica e alumina;
- voláteis - água, dióxido de carbono e material orgânico.

Vale lembrar que antes da Segunda Guerra Mundial, em poucas instalações de beneficiamento de minérios de manganês constavam operações, além de lavagem, de classificação e concentração por processos gravíticos. Muito raro, encontrava-se o processamento do minério por flotação e separação magnética. Hoje, as aplicações dos

produtos de manganês exigem um teor mais elevado do metal e uma quantidade cada vez menor de impurezas. Tais exigências, resultaram na prática de beneficiamento dos minérios, com circuitos de concentração mais complexos. Além disso, os depósitos de manganês são distintos em vários aspectos, demandando processo especial de beneficiamento. Não há, para os minérios de manganês, um processo singular de concentração aplicável, pelo menos para a maioria deles, como acontece como os minérios de cobre, processados por flotação.

Em geral, o fluxograma das unidades de concentração para minérios de manganês consiste em uma grelha para a remoção de material orgânico (pedaços de madeira) e outros materiais de mesma dimensão. Logo depois, o minério segue para uma estação de britagem, em britador de mandíbulas ou de rolos para uma redução granulométrica até 80mm. O minério britado segue para o estágio de atrição em troméis cegos ou em lavadores de cascalho, para desagregar a fração argilosa do minério. A fração constituída de nódulos de manganês, resistente ao processo de lavagem, é removida por separação granulométrica realizada em peneiras rotativas ou vibratórias. A fração grossa, acima de 6mm, constituí o concentrado granulado, preferido para fins metalúrgicos. Em geral, com faixa granulométrica entre 18 e 6mm, contém silicatos ou bauxita.

O material abaixo de 6mm é, geralmente, descartado ou, alternativamente, são usados classificadores de arraste, ou tipo Akins, para aproveitar a fração entre 6 e 1mm como concentrado. A fração abaixo de 1mm é depositada em bacias de rejeito. Em alguns casos, a separação gravítica e a flotação são utilizdas para recuperar o manganês presente nessa fração abaixo de 1.0mm. Dentre os equipamentos gravíticos usados para concentrar o minério destacam-se: jigues, mesas vibratórias, espirais de Humphrey, Dyna-Whirpool, entre outros.

3.9. PROCESSAMENTO DE MINÉRIO DE MANGANÊS NO BRASIL

O beneficiamento de minério de manganês no Brasil resume-se, praticamente, à mina Azul, em Carajás, de propriedade da Companhia Vale do Rio Doce – CVRD. A composição mineralógica quantitativa está ilustrada na Tabela III.10. O processo segue

a regra geral de beneficiamento de minério de manganês, isto é, britagem, e classificação, conforme consta no fluxograma da Figura 3.25.

Tabela III.10: Composição mineralógica qualitativa e composição química do minério de manganês da mina do Azul em Carajás, Brasil.

1. Composição Mineralógica Qualitativa	
Minerais	Fórmula Química
Litioforita	$(Li,Al)Mn_2(HO)_2$
Todorokita	$(Mn,Ca)Mn_5O_{11}.4H_2O$
Criptomelana	KMn_8O_{16}
Nautita	MnO_2-γ;$Mn(O.OH)_2$
Gibbsita	$Al(OH)_3$
Caulinita	$Al_2(Si_4O_{10})(OH)_8$
Hematita	Fe_2O_3
Quartzo	SiO_2
Anatásio	TiO_2

2. Composição Química do Minério			
Compostos	(%)	Compostos	(%)
Mn (T)	52,0-53,0	ZnO	0,08-0,10
MnO_2	78,8-80,0	NiO	0,08-0,10
Fe_2O_3	2,5-4,2	Na_2O	0,05-0,60
SiO_2	1,4-2,0	V_2O_5	0,05-0,06
Al_2O_3	4,3-5,0	BaO	0,04-0,06
K_2O	0,8-1,2	CuO	0,04-0,06
P_2O_5	0,20-0,22	CoO	0,03-0,04
Cão	0,20-0,30	PbO	0,02-0,03
MgO	0,15-0,20	As	0,003-0,004

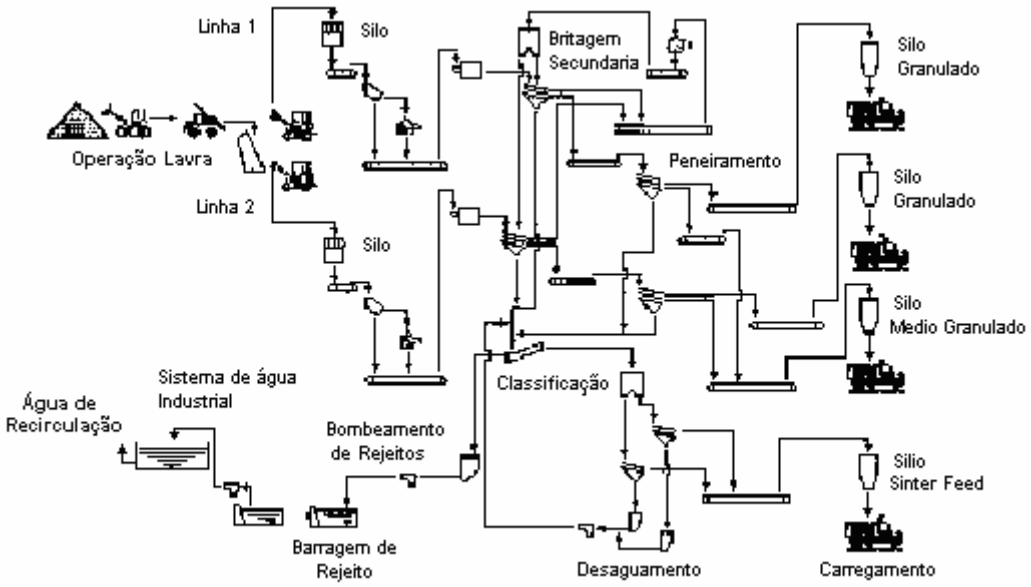


Figura 3.36: Fluxograma de beneficiamento de minério de manganês da mina do Azul em Carajás da Vale, Brasil (Sampaio e Penna, 2001).

3.10. Usos, Funções e Especificações.

Os produtos de manganês são classificados de acordo com a utilização comercial dos mesmos. Assim, são conhecidos três tipos principais de produtos: grau metalúrgico, grau bateria e grau químico, cujo uso depende, em geral, do teor de manganês no produto.

3.10.1. Produto Tipo Metalúrgico

Esse produto contém entre 38 e 55% de Mn. Aqueles com 48% de Mn são considerados como padrão pela indústria, e em relação a eles são baseados os preços dos demais. Outros aspectos importantes relativos à qualidade dos produtos, incluem: a razão Mn/Fe, preferencialmente em torno de 7,5/1, conduzindo a um metal padrão ferro-manganês, com teor de 78% de Mn. Outro aspecto é teor de impurezas tais como: alumina, sílica e óxido de cálcio. A Tabela III.11 ilustra as especificações para o tipo metalúrgico.

Tabela III.11: Especificações para um típico minério de manganês grau metalúrgico.

Elemento/Composto	Teor (%)
Mn	48 (mín.)
Fe	6 (máx.)
Al_2O_3	7 (máx.)
$Al_2O_3 + SiO_2$	11 (máx.)
As	0,18 (máx.)
P	0,19 (máx.)
Cu = Pb + Zn	0,30 (máx.)

3.10.2. Grau Bateria

As especificações de concentrados de manganês para uso químico e na confecção de baterias são similares àquelas aplicadas ao tipo metalúrgico. Todavia, reportam-se, com maior freqüência, aos teores de MnO_2, correspondente a 63% de Mn. Um concentrado típico contém entre 70% e 85% de MnO_2, isto é, entre 44 e 55% de Mn, conforme especificados na Tabela III.12.

Tabela III.12: Especificações para os produtos de manganês usados na fabricação de baterias.

Produtos de manganês usados na fabricação de baterias	
Elemento/Composto	Teor (%)
MnO_2	75-85
Mn	48-58
H_2O	3-5
Fe	0,2-0,3
SiO_2	0,5-5,0
Impurezas metálicas	0,1-0,2

3.10.3. Grau Químico

Os concentrados de manganês do tipo químico possuem o menor teor (35%) de Mn. Mesmo assim, há uma variedade de produtos químicos obtidos com base em minérios com esse teor. Esses produtos estão distribuídos em mercados pequenos, tais como: aditivos para combustível, inibidores de fumaça, tratamento de solda e metal, entre outros.

Os mais importantes produtos obtidos com base no minério grau químico incluem permanganato de potássio e sulfato de manganês. O permanganato de potássio, $KMnO_4$, devido às suas propriedades oxidantes, é utilizado nos processos químicos de purificação. Assim, o produto é utilizado no controle da poluição e tratamento de água, com a finalidade de eliminar gosto, odor, ferro, entre outros. No controle de odores, destaca-se o emprego do produto nas estações de tratamento de esgotos. Na mineração e na metalurgia, o MnO_2 (pirolusita) é utilizado como auxiliar na separação de molibdênio/cobre e para remover impurezas no processo hidrometalúrgico, para obtenção de zinco e cádmio pela oxidação do íon ferroso.

Na indústria de vidro, o dióxido de manganês tem a função de modificar a cor do vidro. Ele atua com descorante conferindo a cor rósea ao vidro complementar à cor verde atribuída ao ferro bivalente. Quando se adiciona o dióxido de manganês em maior quantidade, a cor do vidro varia de roxo a negro.

4. METODOLOGIA

4.1. AMOSTRA MINERAL

Para alcançar os objetivos planejados, foi estudada e caracterizada a amostra dos rejeitos provenientes do processamento de minérios de manganês da usina Azul da Vale.

Foram caracterizados tanto os componentes sólidos quanto as pastas produzidas com o equipamento desenvolvido.

4.2. CARACTERIZAÇÃO DO SÓLIDO.

Foram recebidas as amostras na forma de polpa, provenientes da usina de Azul da empresa Rio Doce Manganês da mineradora Vale, o componente líquido do sólido foi separado através de filtragem e secagem no Laboratório de Tratamento de Minérios da Escola de Engenharia da UMFG. Isto, com a finalidade de caracterizar o componente sólido das pastas minerais.

Forem obtidas amostras representativas para determinação das diferentes propriedades estudadas.

No caso de analise química, as amostras forem pulverizadas 100% < 74μm (200# Tyler).

Para o caso da caracterização do componente sólido da amostra estudada, forem utilizadas técnicas e equipamentos que são apresentados na seguinte Figura 4.1 e Tabela IV.1 respectivamente.

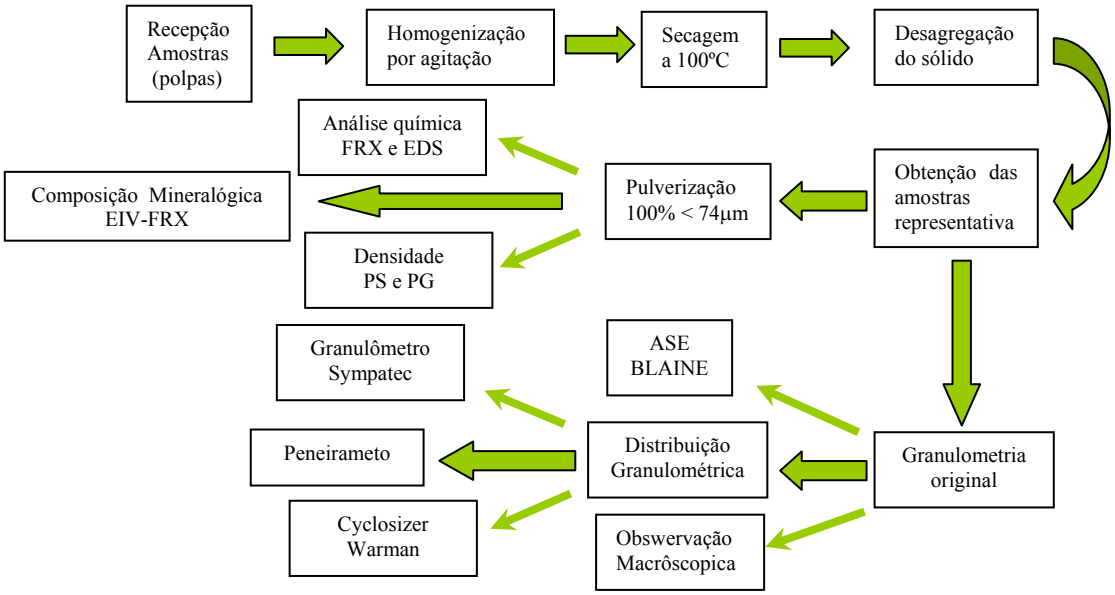


Figura 4.1: Fluxograma de caracterização da amostra.

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

Propriedade	**Técnica utilizada**	**Equipamento(s) requerido(s)**
Densidade.	Picnometria.	- Picnômetro simples. - Picnômetro a Hélio.
Granulometria.	Peneiramento, classificação centrífuga e difração de laser.	- Peneiras de laboratório. - Cyclosizer. - Granulômetro Cilàs.
Composição química.	- Fluorescência de raios X (FRX). - Microscopia eletrônica (EDS).	- Espectrômetro de raios X dispersivo (EDS). - Microsonda eletrônica.
Composição mineralógica.	- Difração de raios X (DRX). - Espectrometria de Infra Vermelha (EIV). - Microscopia eletrônica de varredura (MEV).	- Espectrômetro de raios X. - Espectrômetro de luz infra-vermelha. - Microsonda eletrônica (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.

4.2.1. COMPOSIÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA DO SÓLIDO

Para a determinação da composição química dos componentes das amostras do sólido em estudo, forem utilizadas as seguintes técnicas e equipamentos disponíveis no Departamento de Engenharia de Minas - UFMG:

- Microscopia eletrônica - EDS (quantitativa)
- 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 estudadas, forem utilizadas as seguintes técnicas disponíveis no Departamento de Engenharia de Minas - UFMG:

- Microcópio Electrônico de Varredura (MEV), 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.

O estudo da distribuição granulométrica foi feito considerando peneiras Tyler, e para as frações mais finas, Cyclosizer Warman e o granulômetro de difração laser (Sympatec).

A análise por sedimentação é demorada e exige um certo tempo para a obtenção dos resultados. Os equipamentos com sensor de difração laser são aplicadas para medição de partículas de 0,1μm, à 8750μm, com rapidez e alta precisão, possibilitando uma análise de alta qualidade .

A ótica de alta precisão é utilizada para a projeção dos padrões de difração na superfície de um detector composto - *Helos*, que é controlado por um sistema único auto- focal. Existem 7 intervalos de medição que podem ser utilizados isoladamente ou adicionados, dependendo do tamanho das partículas a serem analisadas.

O *Helos*, combinado com o sistema de dispersão *Rodos* que se aplica a amostras secas, possibilita a análise de amostra desde poucos mg até 100g, em poucos segundos.

Existem programas analíticos disponíveis para comparação deste método e dos tradicionais; entre outros, o *Remo and Para* pode ser utilizado quando a difração a laser tem que ser convertida para outros métodos (peneiramento, sedimentação) etc. e para outros padrões (DIN, ISO, ASTM, BCR, FEPA.).

A Figura 4.2 mostra uma vista de um conjunto de peneiras, e um dispositivo vibratório. Na Figura 4.3 são mostrados o Cyclosizer Warman e o granulômetro Sympatec utilizados.

Figura 4.2: Peneiras série Tyler e dispositivo vibratório. (www.alein.com.ar)

Figura 4.3: Cyclosizer Warman (à esquerda) e granulômetro Sympatec de Laboratório (à direita). (www.weirminerals.com) (www.extronex.com).

4.2.3. MASSA ESPECÍFICA, POROSIDADE E ÁREA SUPERFICIAL ESPECÍFICA.

No caso da determinação da massa específica da amostra, foi utilizado picnômetro simples, (Figura 4.4).

Figura 4.4: Picnômetros de Laboratório. (www.particletechlabs.com)

No caso da determinação da área superficial específica (ASE) da amostra do sólido estudado, foram consideradas tanto o método Blaine, que baseia-se na resistência a passagem de fluxo de ar através de um leito de partículas, quanto o método da isoterma BET, que utiliza adsorção de nitrogênio na superfície sólida.

No método de Blaine, precisa-se em primeiro lugar do cálculo da massa de sólido a utilizar, a qual é definida pela equação 4.1 a seguir:

$$M = 0,5 * \rho * V \qquad (4.1)$$

Onde: M é a massa de sólido a utilizar-se no teste

ρ é a massa específica do sólido

V é o volume fixo de calibração de 2,06cm^3

0,5 é o fator definido pela porosidade de 50%

A determinação da área superficial específica, ASE, pode ser realizada através da equação 4.2, a seguir:

$$ASE = K / \rho * \varepsilon^{3/2} / (1 - \varepsilon) * t^{1/2} / (0{,}1\ \eta_a)^{1/2} \qquad (4.2)$$

Onde: K é uma constante, neste aparelho igual a 26,9

ρ é a massa específica do sólido

ε é a porosidade do leito (suposto de ε = 50%)

t é o tempo (medido em três ensaios) que o líquido tarda em passar pelas marcas já estabelecidas no aparelho (marcas 2 e 4 da Figura 4.5).

η_a é a viscosidade do ar à temperatura do ensaio (em Pa * s)

No método BET, utiliza-se adsorção com gás nitrogênio, dada sua baixa reatividade com a grande maioria dos sólidos, e supõe-se a formação de uma monocamada sobre cada partícula de sólido (condição ideal). A Figura 4.6, mostra uma unidade de adsorção de nitrogênio BET, como a utilizada neste estudo (Laboratório de Hidrometalurgia do Departamento de Metalurgia, EE-UFMG).

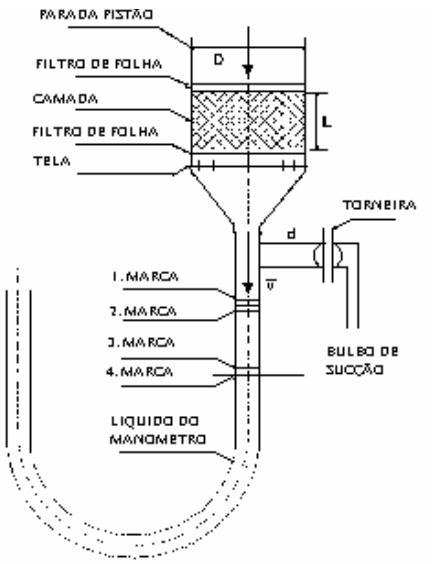


Figura 4.5: Aparelho de Blaine para determinação da ASE . (www.vt1.tu-harburg.de)

Figura 4.6: Unidade Tristar Nitrogen Adsorption. (www.particletechlabs.com)

4.3. TESTES DE SEDIMENTAÇÃO DESCONTÍNUA.

Foram realizados testes de sedimentação descontínua com diferentes porcentagens de sólidos para a avaliação do tempo de residência necessária à formação de polpas com maior densidade. Os testes foram realizados em provetas de 2000ml como se apresenta na Figura 4.7. com as seguintes porcentagens de sólidos: 10%, 15% e 20%.

Figura 4.7: Provas de sedimentação descontínua em provetas de 2000ml.

Tambem foram realizados testes preliminares de sedimentação descontínua em provetas de 250ml com floculantes de tipo catiônico, aniônico e não iônico com concentrações de: 0; 2,5; 5; 7,5; 10; 12,5 e 15g/t para a escolha do floculante mais adequado. Os floculantes testados estão indicados na Tabela IV.2.

Tabela IV.2: Floculantes catiônicos, aniônicos e não iônicos testados.

Catiônicos	Aniônicos	Não Iônicos
SC-492	SA-130	SN-100
SC-496	SA-110	SN-300
SC-494	BA61BT	M351
BC630	M338	-
-	M10	-

4.4. EQUIPAMENTO PRODUTOR DE PASTA MINERAL.

O equipamento foi construído de material de acrílico em sistema modular para permitir a operação em diferentes condições. Consiste de dois módulos tendo cada um deles comprimento de 60cm com 10cm de diâmetro interno podendo alcançar uma altura máxima de 1,20m (2 módulos). O equipamento conta com um sistema de tomadas de amostras constituídos por furos de 1cm de diâmetro interno separados entre si de 9cm. Além disso, existe um cone de descarga da pasta com 2,0cm de diâmetro interno e com ângulo de inclinação de 45° para facilitar a saída da pasta mineral Foram feitos três mecanismos de agitação: um para a utilização do equipamento de maneira descontínua, outro para semi-contínua e outro para contínua. Para a agitação descontínua foi feita uma barra de acrílico de 9cm de diâmetro na base e um comprimento de 1,40m. Para a agitação semi-contínua e contínua do processo foram utilizadas bombas peristálticas.

Nas Figuras 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11 se observa respectivamente o equipamento produtor de pasta mineral com um e dois módulos, o equipamento em processo semi-contínuo e contínuo, sistema de amostragem e o desenho de uma visão geral da operação do equipamento produtor de pasta mineral.

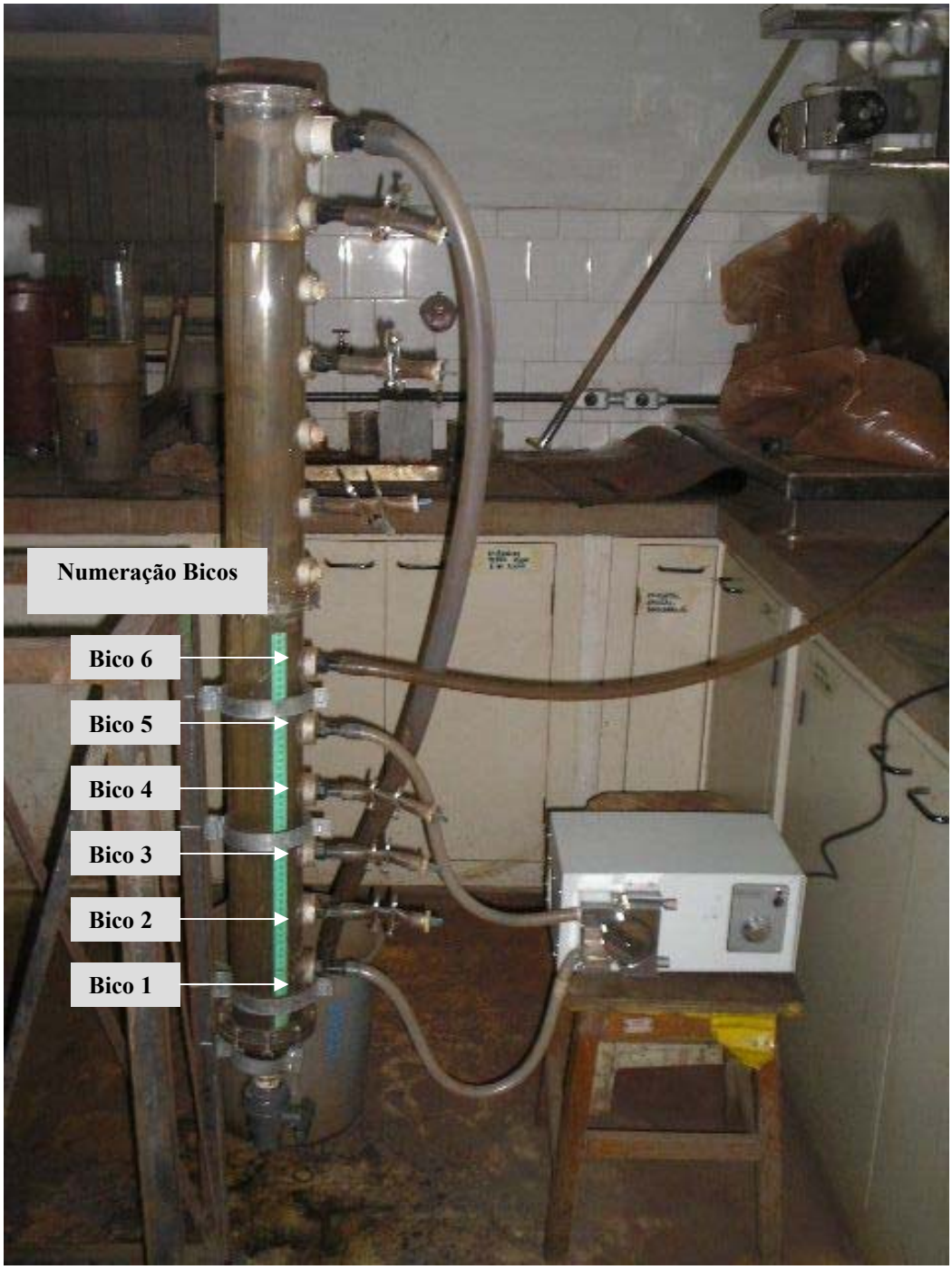


Figura 4.8: Equipamento produtor de pasta mineral com dois módulos.

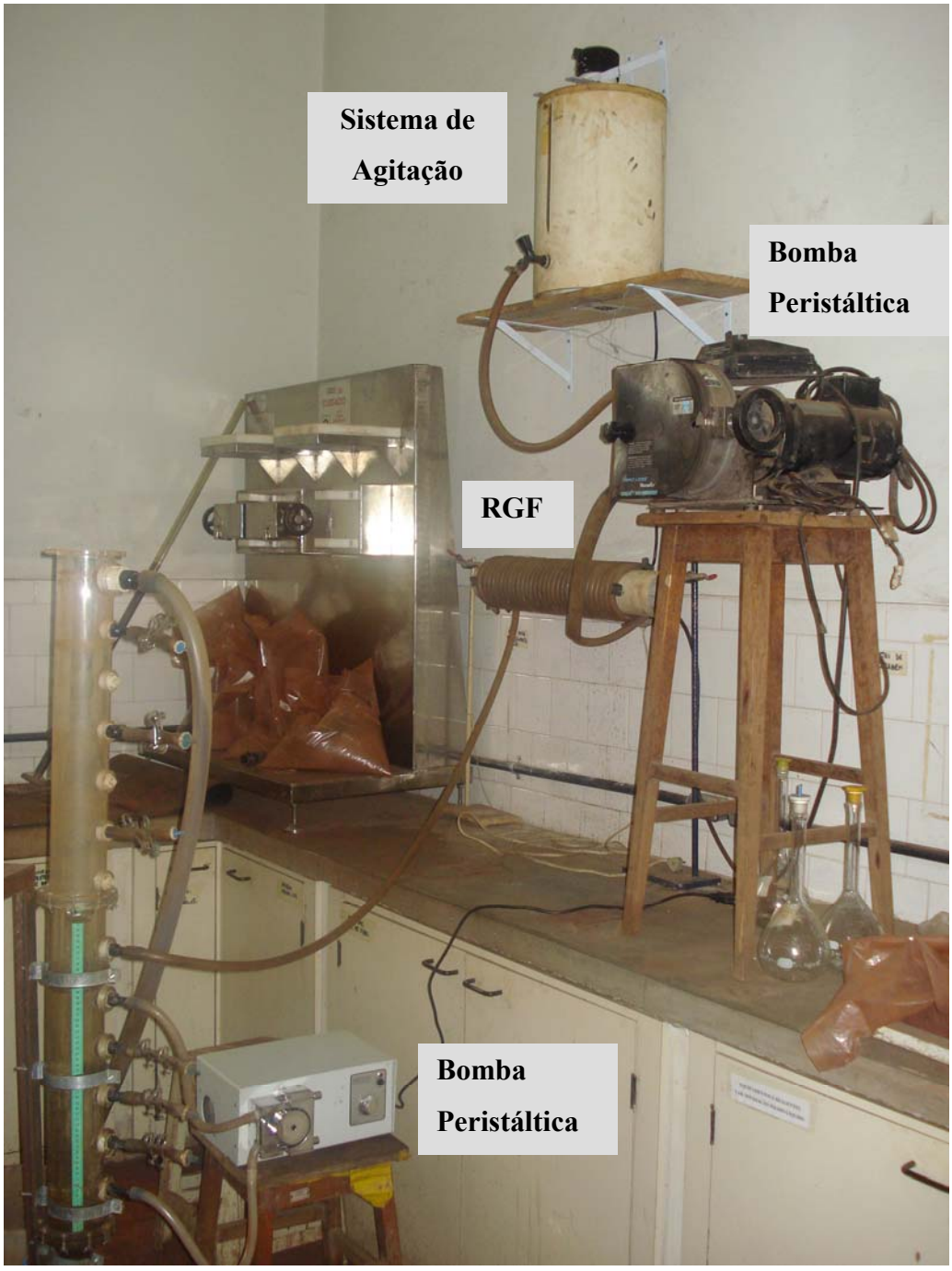


Figura 4.9: Equipamento produtor de pasta mineral e sistema de agitação.

Figura 4.10: Sistema de amostragem da coluna de sedimentação no equipamento constituído por bicos.

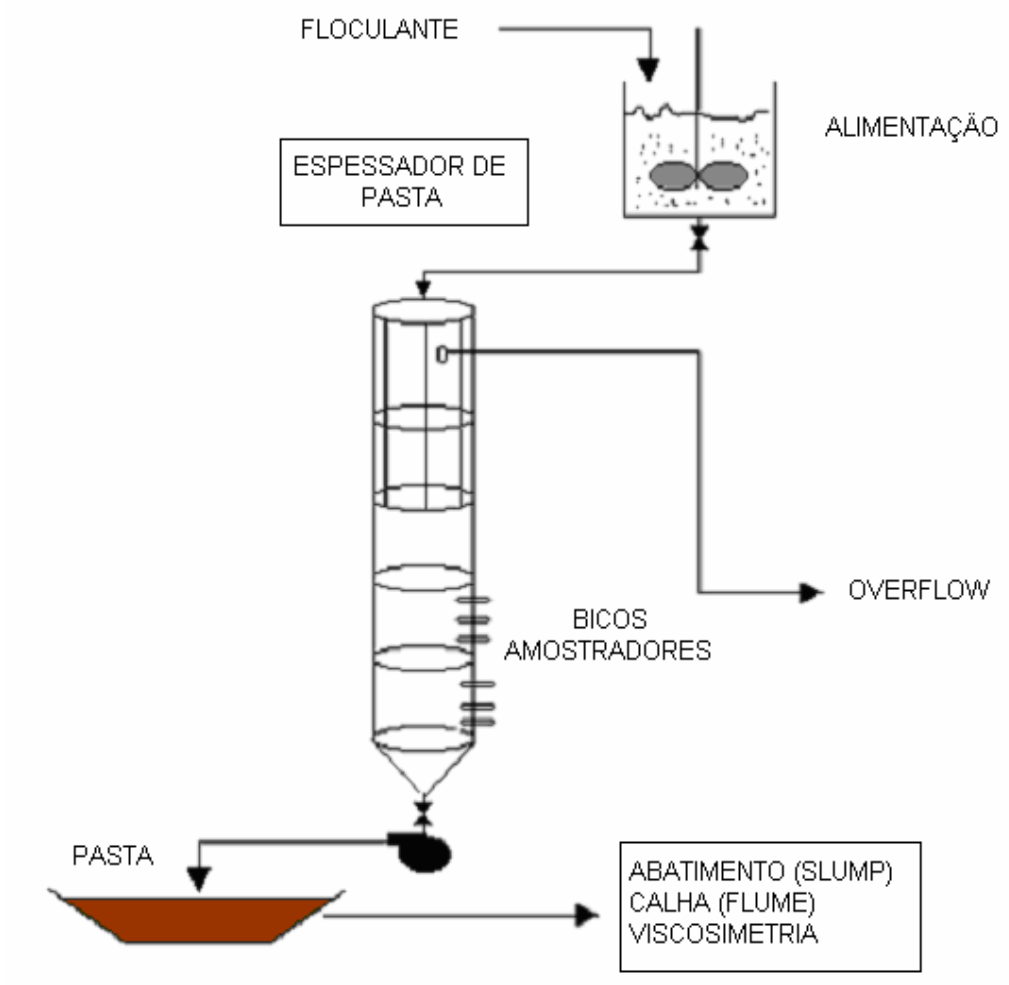


Figura 4.11: Visão geral da operação contínua do equipamento produtor de pasta mineral.

4.5. CARACTERIZAÇÃO DAS PASTAS MINERAIS

Na Tabela IV.3 são apresentados os métodos e equipamentos utilizados para a caracterização de pastas minerais.

Tabela IV.3: Técnicas e equipamentos utilizados para determinação de características e propriedades das pastas de rejeitos.

Propriedade	Técnica utilizada	Equipamento(s) requerido(s)
Viscosidade.	Viscosimetria.	- Viscosímetro Brookfield com interface ao computador.
Fluidez da pasta.	Teste de calha (flume).	- Calha de acrílico (ângulo de repouso).
Consistência da pasta.	Teste de Abatimento (slump).	- Cilindro slump de laboratório.
Tensao de Escoamento.	Vane.	- Reometro Brookfield com interface ao computador.

4.5.1. MEDIÇÃO DA VISCOSIDADE

A Figura 4.11 mostra o viscosímetro digital Brookfield, modelo DV-III que dispõe de interface para computador e que foi utilizado para as medições de viscosidade da pasta mineral. Este equipamento é do Laboratório de Fenômenos de Interface do Departamento de Engenharia de Minas da UFMG, e utiliza o software Rheocalc para a determinação dos dados reológicos.

Figura 4.12: Viscosímetro Brookfield, modelo DV-III. (www.brokfieldengineering.com).

A utilização do Viscosímetro Brookfield modelo DV-III, permitiu estudar o comportamento reológico numa faixa para a pasta mineral de maior adensamento realizando testes com crescentes velocidades de rotação da haste ou "spindle" até

alcançar um valor máximo e logo retornar ao ponto inicial. Foram utilizadas hastes ("spindles") LV-3 e LV-4, que permitem registrar maiores valores da viscosidade.

4.5.2. TESTE DE CALHA ("FLUME")

Uma calha foi utilizada para a realização dos testes de Flume, constituída de material em acrílico com 100cm de comprimento, 20cm de largura e 20cm de altura. As Figuras 4.13 e 4.14 mostram respectivamente as dimensões da calha feita e uma fotografia do aparelho especialmente construído para esta finalidade.

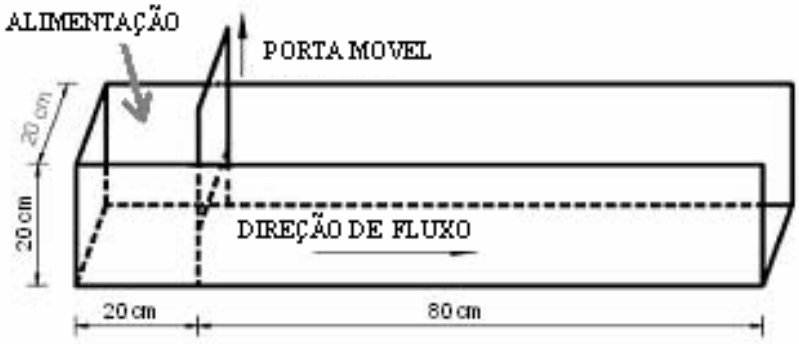


Figura 4.13: Dimensões da calha construída em acrílico (adaptação de Kwak et al., 2005).

a b

Figura 4.14: Fotografias da calha construída em acrílico. Vista: a) isométrica; b) superior.

4.5.3. TESTE DE ABATIMENTO (“SLUMP”)

Os testes de slump foram realizados considerando-se a norma NBR NM67, utilizando-se cilindro de PVC de 10cm de diâmetro e 10cm de altura. Foram estudadas as pastas minerais de maiores adensamento produzida pelo equipamento desenvolvido.

Na Figura 4.15 são mostradas fotografias dos testes de cilindro slump feitos para uma pasta mineral.

Figura 4.15: Testes de cilindro "slump" feitos para uma pasta mineral.

4.5.4. MEDIÇÃO DA TENSÃO DE ESCOAMENTO.

A Figura 4.16 mostra reômetro digital Brookfield, modelo YR-1 que dispõe de interface para computador, este foi utilizado para as mediçoes de “yield stress” da pasta mineral. Este equipamento pertence ao Laboratório de Fenômenos de Interface do Departamento de Engenharia de Minas da UFMG, e utiliza o software Rheocalc para a determinação dos parâmetros reológicos.

Figura 4.16: Reômetro Brookfield, modelo YR-1 (www.brokfieldengineering.com).

A utilização do reômetro Brookfield modelo YR-1, permitiu estudar o comportamento reológico numa faixa para a pasta mineral de maior adensamento foi utilizada a haste 73 que permite registrar maiores valores do "yield stress", em pastas muito adensadas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentados os resultados obtidos segundo os testes indicados na metodologia. Também indica-se a análise e/ou discussão correspondente a cada situação.

5.1 Análise Química das Amostras Sólidas

5.1.1 Fluorescência de Raios X (FRX)

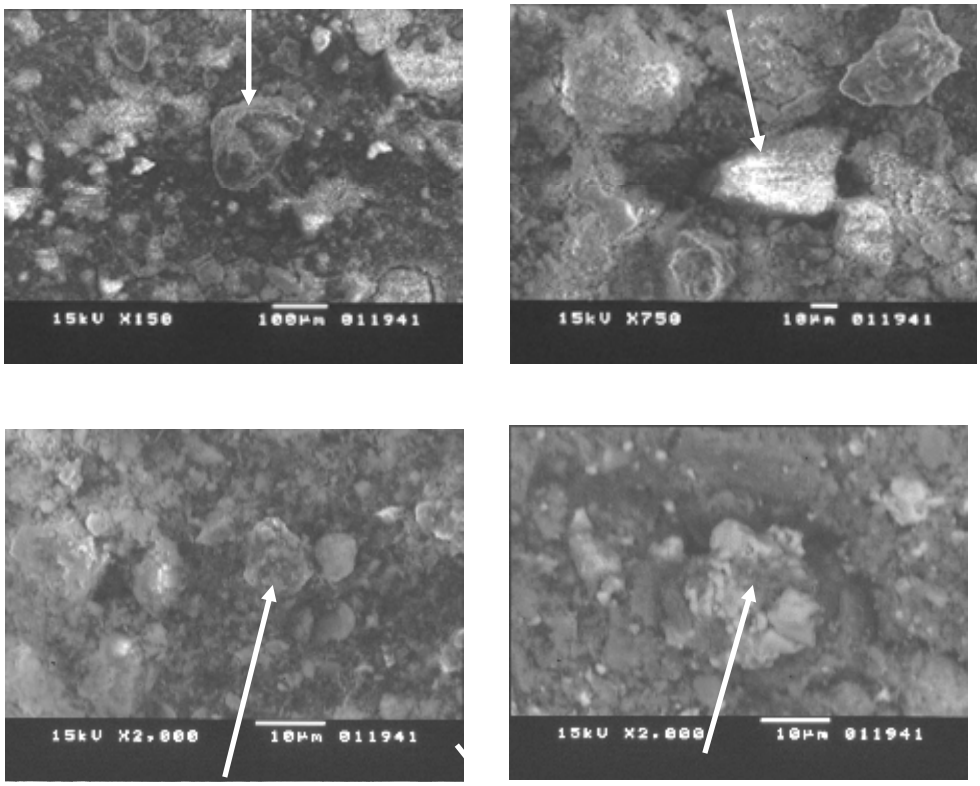
São apresentados e analisados no anexo 1, 8 espectros de FRX, os que foram obtidos ao utilizar diferentes cristais analisadores, tais como LiF200, Ge, InSb, PE, PX-1 e PX-3. Os resultados indicaram a presença de manganês, ferro, oxigênio e pequenas quantidades de enxofre, cloro, alumínio, silício, sódio e fósforo entre outros.

5.1.2. Microscopia Eletrônica de Varredura e EDS.

A análise realizada por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) mostrou alguns aspectos microestructurais das amostras. Análise química semi-quantitativa por EDS foi também realizada.

A Figura 5.1 apresenta quatro micrografias de MEV correspondentes a uma vista geral e de 3 partículas diferentes selecionadas da amostra.

A1 B1



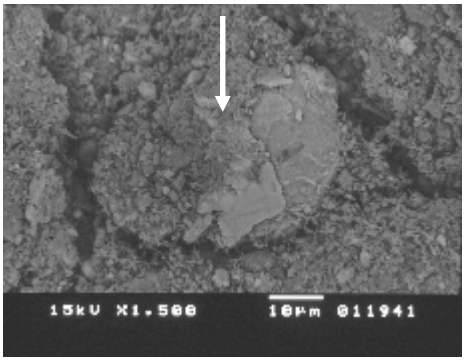
C1 D1

Figura 5.1: Micrografias MEV mostrando: A1) Vista geral da amostra (150X); B1) Partícula mista região clara (750X); C1) Partícula mista região oscura (2000X); D1) Partícula mista com 2000X. (Imagem de elétrons retroespalhados).

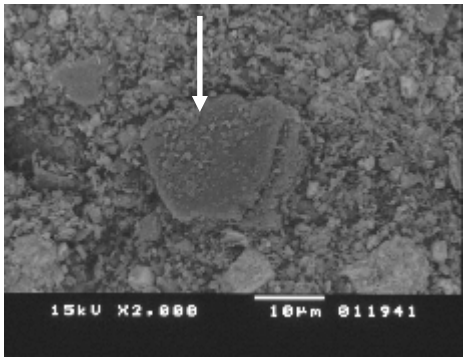
A Figura 5.2 apresenta outras quatro micrografias da microscopia eletrônica de varredura (MEV) correspondentes a outras 4 partículas diferentes selecionadas da amostra. As análises químicas correspondentes as diferentes zonas da amostra (identificadas como partículas) mostradas pelas Figuras 5.1 e 5.2, podem ser vistas na Tabela V.1.

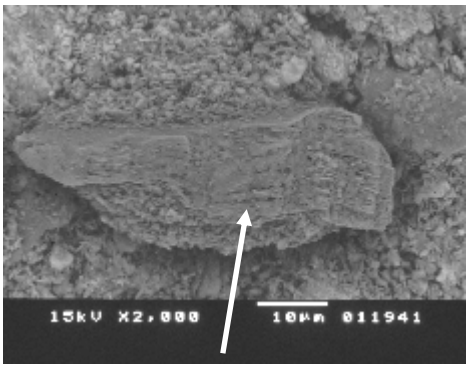
A Tabela V.1 apresenta, numa visão mais geral, os elementos predominantes (manganês, ferro, alumínio, silício) e os elementos secundários mais significativos (magnésio, potássio, sódio e cálcio).

A2

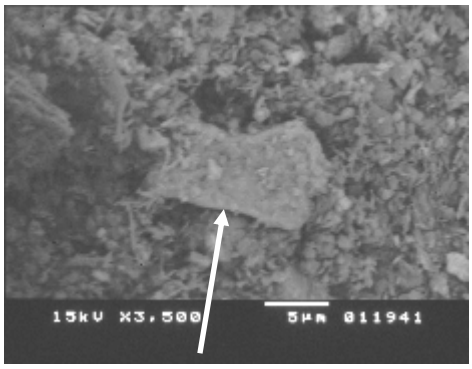


B2





C2



D2

Figura 5.2: Micrografias MEV mostrando: A2) Partícula mista região clara de manganês (1500X); B2) Partícula escura de amostra (2000X); C3) Partícula escura fibrosa da amostra (2000X); D4) Partícula clara de amostra com 3500X. (Imagem de elétrons retroespalhados).

Tabela V.1: Análises química quantitativas correspondentes à amostra.

Elemento % massa	Geral A1	Partícula B1	Partícula C1	Partícula D1	Partícula A2	Partícula B2	Partícula C2	Partícula D2
Al	28,04	6,29	18,48	10,27	3,89	34,91	36,55	12,64
Si	30,16	3,20	14,84	5,63	90,81	57,87	59,94	11,36
Mn	21,87	15,11	21,22	16,56	1,27	1,98	2,17	27,51
Fe	18,77	73,79	44,71	66,42	0,40	3,91	0,63	45,77
Mg	0,00	1,06	0,29	0,29	0,52	0,63	0,00	1,10
K	0,82	0,19	0,09	0,77	0,00	0,00	0,02	0,89
Na	0,23	0,00	0,37	0,00	0,00	0,47	0,54	0,58
Ca	0,11	0,36	0,00	0,07	3,11	0,24	0,15	0,15

Considerando-se as Figuras 5.1 e 5.2 e os valores indicados na Tabela V.1, relativa à composição química das diferentes partes da amostra, pode-se observar:

- Presença de grande quantidade de partículas finas (A1), a predominância dos elementos Mn, Fe, Al e Si. E a presença em pequenas quantidades de K , Na e Ca.

- Partícula B1, de tonalidade mais clara, tem um alto teor de ferro e de manganês, médio de alumínio e muito baixo teor em Si, Mg, K e Ca;

- Partícula C1, de tonalidade bem escura, apresenta alto teor de Fe com relação a Mn, Si, Al (teores médios). Este fato pode indicar uma elevada presença de argilas de ferro e óxidos de manganês como pirolusita (MnO_2);

- Partícula D1, mista, mostra mais alto teor de Fe, teor médio de Mn, teores mais baixos de Al e Si e teores muito baixos de Mg, K e Ca. o que pode significar uma maior presença de argilas de Fe;

- Partícula A2, região de tonalidade clara, apresenta composição química elevada em teor de Si e muito baixa em Al, Mn, Fe, Mg e Ca. Este fato pode indicar a presença de silicatos como o quartzo;

- Partícula B2, região escura sem hábito, tem elevados teores de Si , teores médios de Al e muito baixos de Mn, Fe, Mg, Na e Ca;

- Partícula C2, de tonalidade mais escura e fibrosa, fato que pode mostrar que amostra é de origem sedimentar (depósito sedimentares, usualmente estratiformes ou lenticulares), mostra uma composição muito similar à partícula anterior (B2).

- Partícula D2, região clara, tem elevados teores de Mn e Fe, teores médios de Al e Si e teores muito baixos de Mg, K, Na e Ca.

5.2 Análise mineralógica das amostras sólidas

5.2.1 Espectrometria de Infravermelho (EIV)

Apresenta-se, no anexo 2, o espectro obtido para amostra sólida ao utilizar o espectrômetro de infravermelho. Deste espectro pode-se verificar somente a presença de Caulinita (Picos: 914, 1012, 1035, 1096, 3619 e 3693cm^{-1}, quanto a número de onda). A mostra apresenta pouca cristalinidade.

5.2.2 Difração de Raios X (DRX)

A análise de DRX apresentou um espectro que é mostrado na Figura 5.3, que indica que a amostra não apresenta uma fase cristalina clara o que pode ser devido à origem sedimentar. Além disso não é posível detetar picos característicos por apresentar níveis de intensidade (pulsos/seg) muito baixos da ordem de 70 Counts. Só se pode identificar mediante esta técnica a presença de oxido de manganês na forma de pirolusita (MnO_2).

No anexo 3, apresentam-se também as fichas de padrões e gráfico correspondentes à amostra.

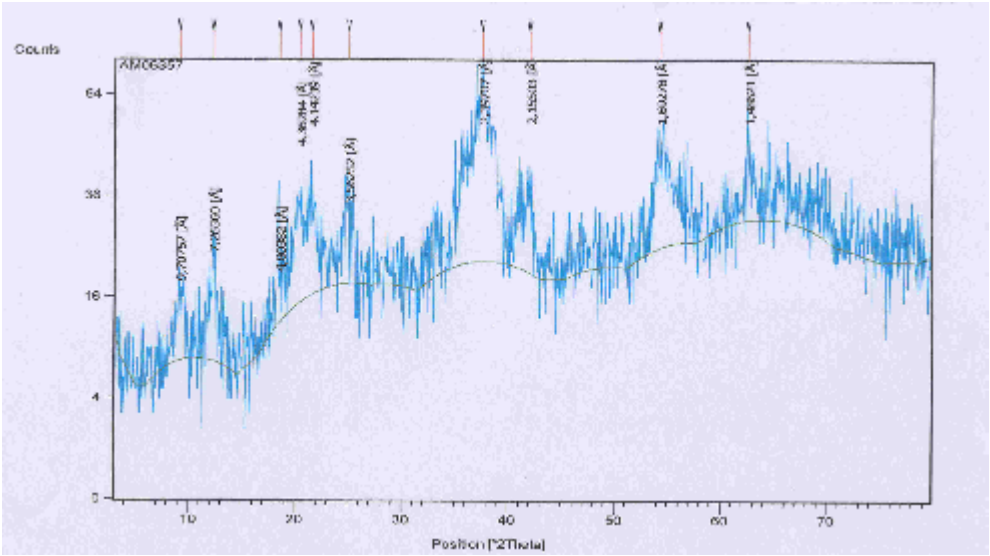


Figura 5.3: Difractograma da amostra.

A análise por DRX corrobora de forma qualitativa somente a presença de pirolusita, que seria a principal fase mineralógica.

Esta afirmação, é ratificada pela EIV, já que nessa técnica foi indicada a presença de pirolusita.

5.3. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO SÓLIDO

A Tabela V.2 mostra os resultados da análise granulométrica por peneiramento.

Tabela V.2: Planilha de resultados de análise granulométrica por peneiramento.

Peneira (Mesh Tyler)	Abertura (µm)	Massa retida (g)	% Retida Simples	% Retida Acumulada	% Passante Acumulada
8	2360	0,1	0,1	0,1	99,9
12	1650	0,4	0,4	0,5	99,5
20	837	4,1	4,1	4,6	95,4
30	592	3,2	3,2	7,8	92,2
40	419	3,4	3,4	11,2	88,8
50	296	2,2	2,2	13,4	86,6
60	248	1,7	1,7	15,1	84,9
70	209	1,1	1,1	16,2	83,8
100	148	3,0	3,0	19,2	80,8
140	105	2,6	2,6	21,8	78,2
200	74	2,7	2,7	24,5	75,5
270	52	3,1	3,1	27,6	72,4
325	44	4,1	4,1	31,7	68,3
400	37	3,4	3,4	35,1	64,9
-400	37	64,9	64,9	100	0
Total		100	100		

Da Tabela V.2 observa-se que aproximadamente 2/3 da amostra tem granulometria inferior a 37µm, indicando que a amostra em estudo corresponde a uma lama (overflow de classificador de espiral).

Nas Figuras 5.4 e 5.5 são apresentados os gráficos da distribuição granulométrica obtido a partir do peneiramento.

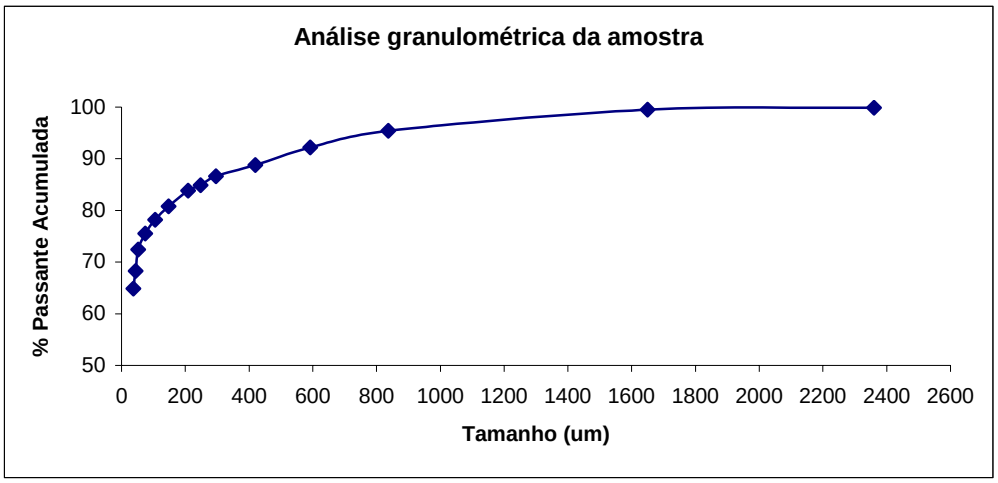


Figura 5.4: Porcentagem acumulada passante em função do tamanho.

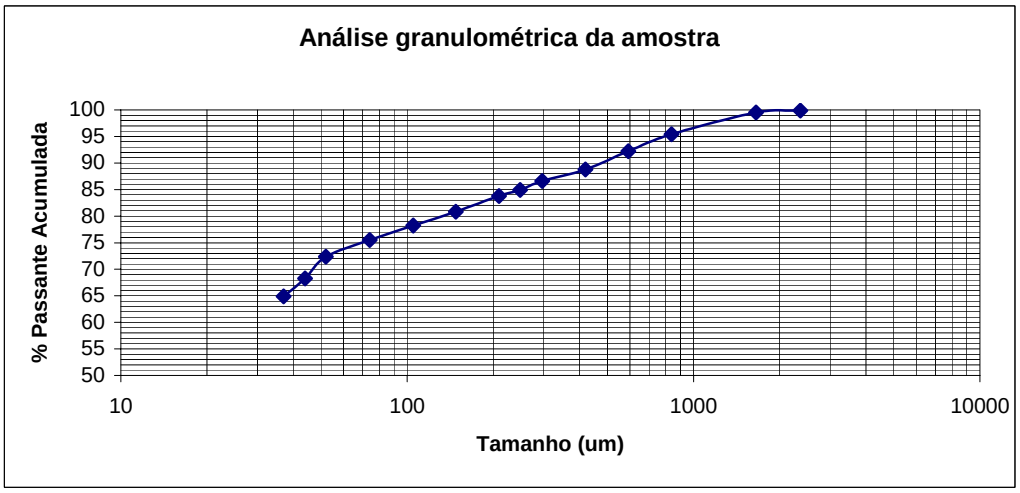


Figura 5.5: Porcentagem acumulada passante em função do tamanho.

A Tabela V.3 mostra a granulometria determinada para a amostra (fração < 37μm) utilizando-se o cyclosizer.

Tabela V.3: Planilha de dados calculados e corrigidos do ensaio de Cyclosizer.

Beque No.	Peso Retido (g)	Retida Simples (%)	Retida Acumulada (%)	Passante Acumulada (%)	Tamanho (µm)	Tamanho Calculado (µm)
1	1,0	2,5	2,5	97,5	42,7	27,9
2	1,0	2,5	5,0	95,0	30,5	19,9
3	3,0	7,5	12,5	87,5	22,1	14,4
4	4,0	10,0	22,5	77,5	15,0	9,8
5	3,0	7,5	30,0	70,0	12,0	7,8
6	28,0	70,0	100,0	0,00	< 12,0	< 7,8
	40,0					

O fator de correção ao considerar as variáveis de operação: temperatura, vazão, massa específica do sólido e tempo de elutriação foi de 0,651.

Da Tabela V.3 observa-se que 97,5% da fração < 37µm tem granulometria inferior a 28µm aproximadamente, e 70% desta fração tem partículas com tamanho menor a 8µm, indicando que a amostra em estudo é bastante fina. A Figura 5.6 apresenta o gráfico da distribuição granulométrica obtida a partir da análise através do Cyclosizer (gráfico da fração acumulada passante, F_3 (%), em função do tamanho calculado, em escala semi-logarítmica).

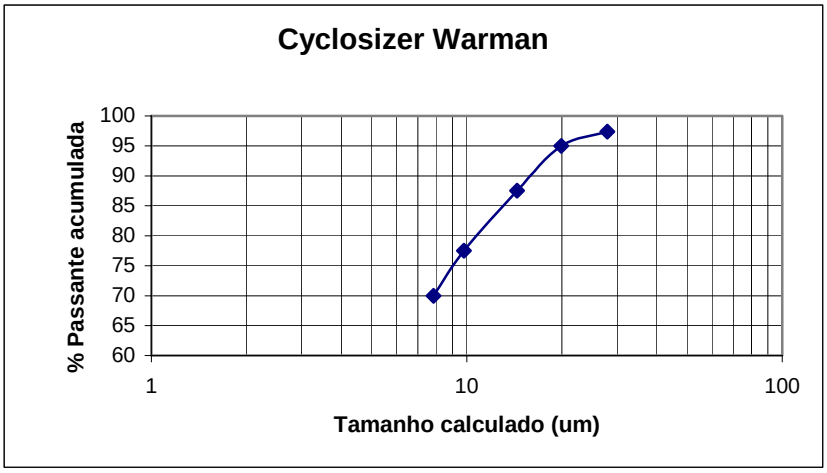


Figura 5.6: Distribuição granulométrica da amostra sólida, para fração < 37µm.

5.3.1. ANÁLISE GRANULÔMETRO SYMPATEC.

A análise granulométrica feita por meio do granulômetro Sympatec considerou a amostra original e aquela com granulometria menor a 400 mesh (< 37µm). Os resultados dos ensaios, são apresentados nas Tabelas V.4 e V.5 respectivamente:

Tabela V.4: Dados da amostra original.

Diâmetro (µm)	% Passante Acumulada	Diâmetro (µm)	% Passante Acumulada
0,18	0,00	3,00	31,27
0,22	0,00	3,60	35,33
0,26	0,03	4,20	39,10
0,30	0,20	5,00	43,74
0,36	0,66	6,00	48,94
0,44	1,55	7,20	54,41
0,52	2,67	8,60	59,85
0,62	4,26	10,20	65,05
0,74	6,29	12,20	70,44
0,86	8,33	14,60	75,85
1,00	10,60	17,40	81,36
1,20	13,58	20,60	87,02
1,50	17,53	24,60	93,02
1,80	20,97	29,40	97,97
2,10	23,99	35,00	100,00
2,50	27,49		

Tabela V.5: Dados de amostra < 37µm (400# Tyler).

Diâmetro (µm)	% Passante Acumulada	Diâmetro (µm)	% Passante Acumulada
0,18	0,00	3,00	37,93
0,22	0,00	3,60	42,71
0,26	0,04	4,20	47,11
0,30	0,25	5,00	52,50
0,36	0,81	6,00	58,52
0,44	1,91	7,20	64,72
0,52	3,30	8,60	70,70
0,62	5,28	10,20	76,29
0,74	7,82	12,20	82,31
0,86	10,38	14,60	88,84
1,00	13,23	17,40	95,29
1,20	16,95	20,60	99,84
1,50	21,81	24,60	100,00
1,80	25,94	29,40	100,00
2,10	29,48	35,00	100,00
2,50	33,52		

Das tabelas V.4 e V.5 observa-se que a amostra tem granulometria muito fina.

Nas figuras 5.7 e 5.8 são mostrados os gráficos da distribuição granulométrica obtida a partir da análise através do granulômetro Sympatec.

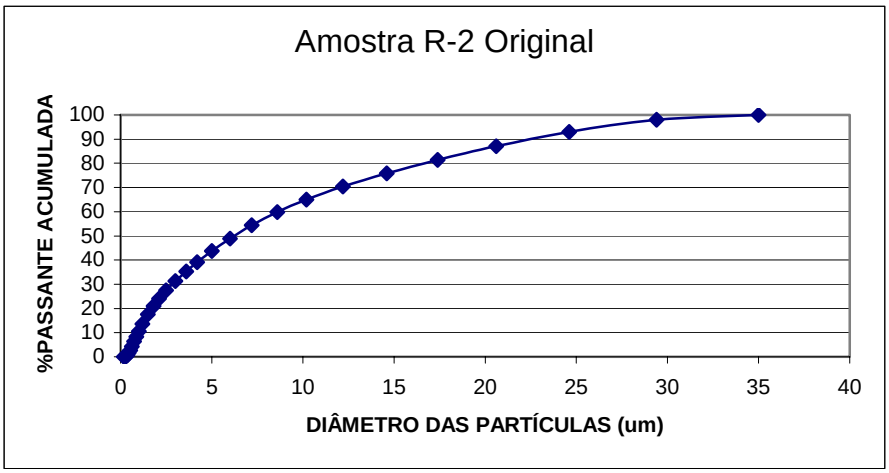


Figura 5.7: Distribuição granulométrica da amostra original.

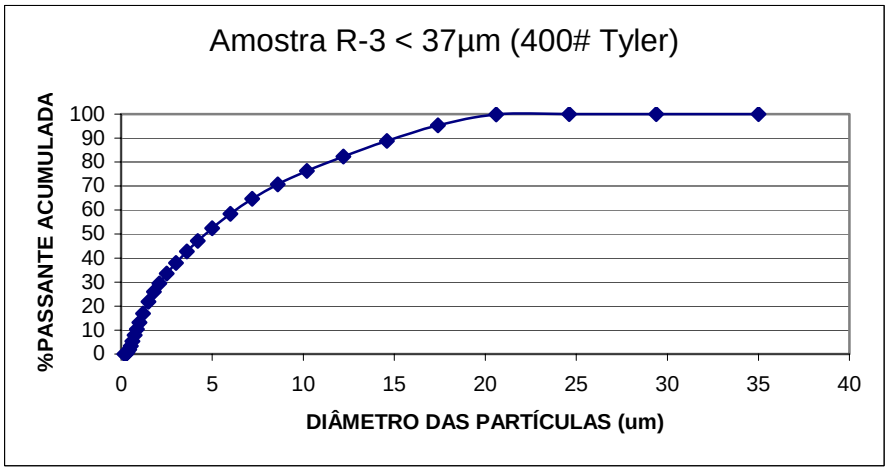


Figura 5.8: Distribuição granulométrica da amostra < 37µm (400# Tyler).

Na Tabela V.6 os valores de diâmetros característicos da análise granulométrica Sympatec.

Tabela V.6: Parâmetros característicos da análise granulométrico Sympatec.

Tamanho (µm)	Amostra original	Amostra < 37µm
d50	6,23	4,63
d90	22,59	15,10

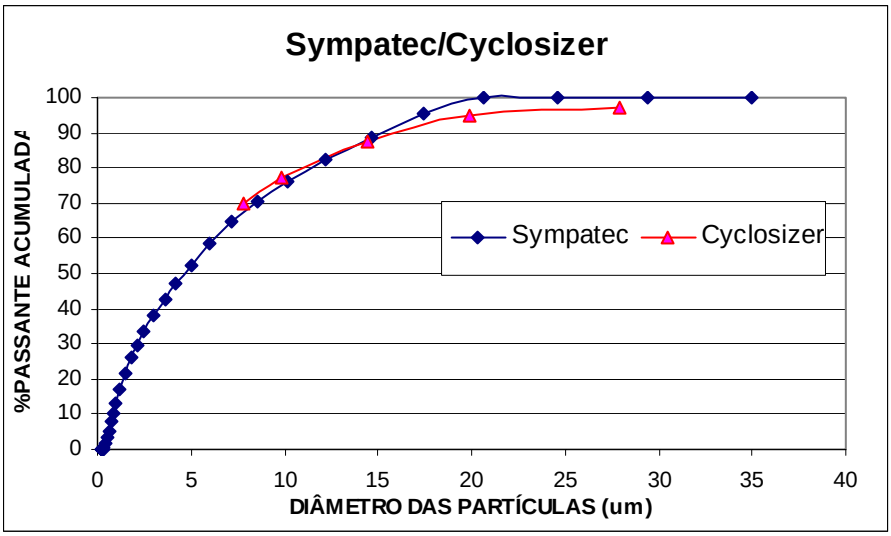


Figura 5.9: Distribuição granulométrica da amostra por meio de Cyclosizer e Sympatec.

As distribuições granulométricas da amostra utilizando cyclosizer e sympatec, mostradas na Figura 5.9, apresentam una distribuição similiar na faixa de granulometria fina (7µm a 15µm) enquanto na faixa de granulometria mais grossa (15µm a 27µm) existe uma pequena diferença de distribuções, apresentando um maior porcentagem passante para o sympatec.

5.4. MASSA ESPECÍFICA DO SÓLIDO

Foram preparadas três amostras do material sólido (Amostras 1, 2 e 3), de aproximadamente 10g cada uma, com as quais determinou-se o valor da massa específica, utilizando a metodologia do picnômetro simples. Os dados experimentais são apresentados na Tabela V.7 a seguir:

Tabela V.7: Valores experimentais obtidos pela picnometria simples.

Elemento/Massas	**Código**	**Amostra 1**	**Amostra 2**	**Amostra 3**
Picnômetro vazio (g)	a	44,766	44,334	44,466
Picnometro + sólido (g)	b	54,761	54,501	54,017
Picnometro + sólido + líquido (g)	c	158,901	168,797	168,395
Picnometro + líquido (g)	d	152,377	162,184	162,169
Valor da massa específica (g/cc)	ρ	2,879	2,861	2,872

Utilizando a equação básica da picnometria apresentada como (5.1), pode-se determinar a meia dos valores de massa específica considerando as três amostras. O resultado foi uma densidade de 2,871 (g/cm^3).

$$\rho = \frac{(b - a)}{(d - a) - (c - b)} \qquad (5.1)$$

No caso da determinação da densidade através da metodologia de picnometria à gás, obteve-se um valor de massa específica de 3,142 (g/cm^3), que é apresentada na Tabela V.8. (Anexo 4). Como o valor obtido através da picnometria simples, foi o primeiro disponível, todos os cálculos em que se utilizou a densidade de sólido foram feitos considerando aquele valor (2,871 g/cm^3).

Tabela V.8.: Valores experimentais obtidos pela picnometria a gás.

Número Medida	Parâmetros P2	Parâmetros P3	Parâmetros VP (cm^3)	Densidade (g/cm^3)	Media Harmônica
1	19,881	6,167	2,417	3,144	3,142
2	19,882	6,168	2,411	3,151	
3	19,881	6,166	2,425	3,132	

5.5 ÁREA SUPERFICIAL ESPECÍFICA

5.5.1 Método de Blaine

Neste método o cálculo da massa de sólido utilizada, segundo a utilização da equação 4.1 mencionada anteriormente foi de 2,96g de sólido.

A determinação da área superficial específica, ASE, foi realizada através da equação 4.2 tambem mencionada na metodologia.

O valor obtido da ASE foi de 8.932,44 (cm^2/g), já que o tempo médio dos três ensaios realizados foi de 329,24(s). A Tabela V.9 apresenta os tempos determinados para cada teste.

Tabela V.9: Valor de Índice de Blaine da amostra de manganês.

Número do teste	Tempo passagem do ar (s)	Valor médio ASE (cm^2/g)
1	330,70	8.932,44
2	327,92	
3	329,09	

5.5.2 Método BET

Todas as tabelas e gráficos correspondentes a esta metodologia, são apresentados no anexo 5. Especificamente, o valor da ASE obtida através da metodologia BET foi de 28,9628 (m^2/g), o qual é muito maior que aquele obtido pelo método de Blaine (0,893 m^2/g). No estudo BET, a isoterma resultante é do tipo III, correspondente a formação de multicamadas, fato que não garante um bom resultado nesta técnica, pois ela é mais precisa quando há formação de monocamada (isoterma de tipo I) das moléculas de nitrogênio sobre o sólido. A Figura 5.10 apresenta a isoterma obtida.

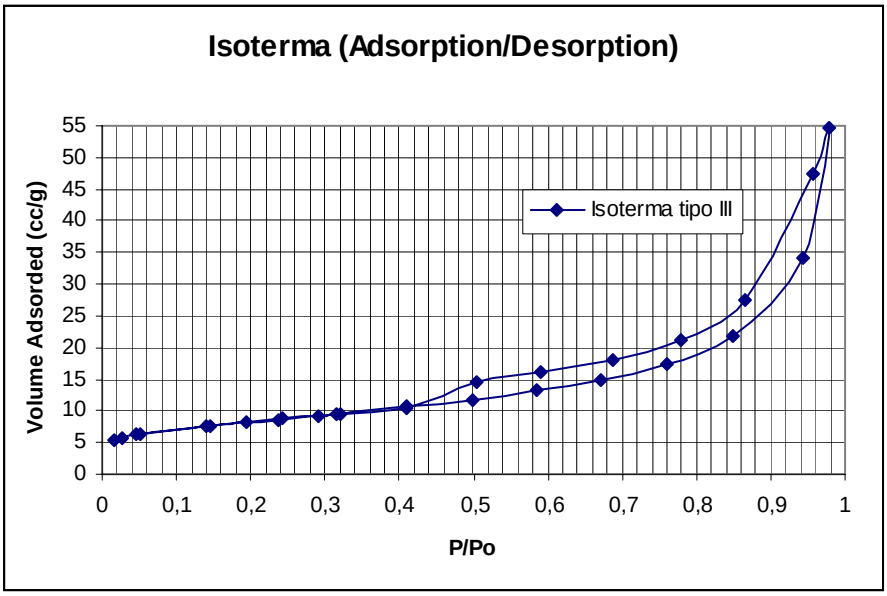


Figura 5.10: Isoterma (Adsorption/Desorption) BET.

5.6. TESTES DE SEDIMENTAÇÃO DESCONTÍNUA.

5.6.1 Testes de Sedimentação Descontínua.

No anexo 6, são apresentados os dados dos testes de sedimentação descontínua. A seguir apresentam-se nas Figura 5.11 e 5.12 o comportamento da variação da altura de interface em função do tempo em escala normal e logaritmica dos dados dos testes da amostra para as seguintes percentagens de sólidos: 10%, 15% e 20% em provetas de 2000 ml.

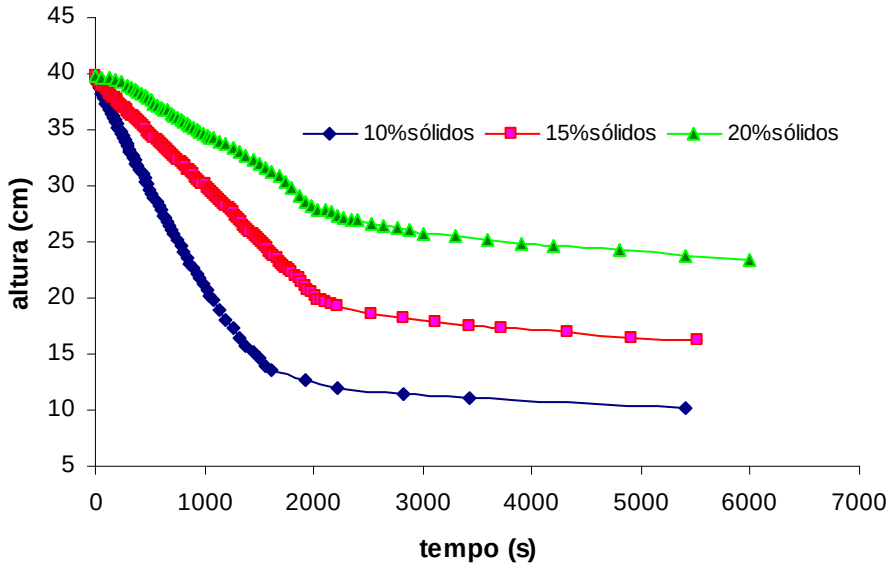


Figura 5.11: Variação da altura de interface em função do tempo em escala normal da amostra para 10%, 15% e 20% de sólidos em proveta de 2000ml.

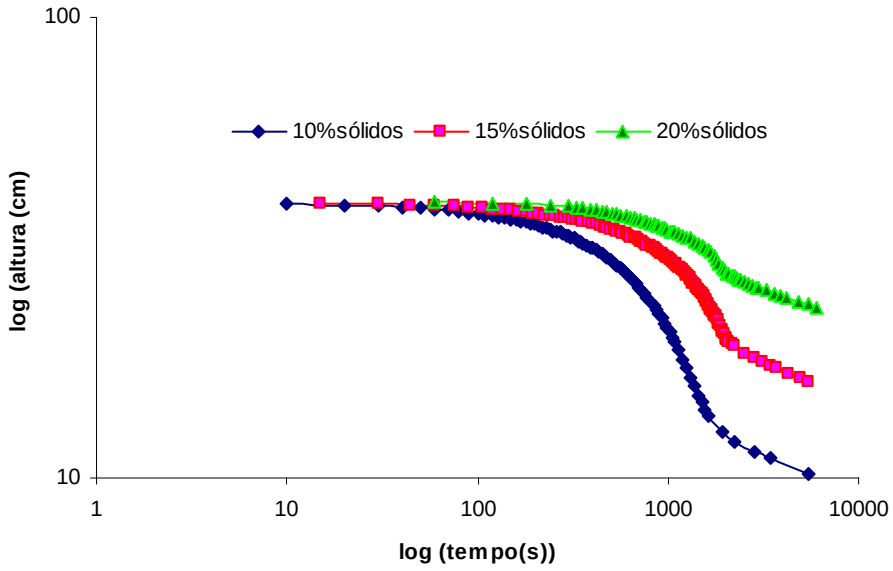


Figura 5.12: Variação da altura de interface em função do tempo em escala log-log da amostra para 10%, 15% e 20% de sólidos em proveta de 2000ml.

As Figuras 5.11 e 5.12 indicam que o ponto de compressão para uma concentração de polpa de 15% sólidos é acima dos 2000s, ou seja, são necessários pelo menos 33 minutos de sedimentação para alcançar a maior concentração de sólidos na zona de compressão (zona IV).

A Tabela V.10 mostra as velocidades de sedimentação da amostra para 10%, 15% e 20% de sólidos e a Figura 5.13 mostra a variação da velocidade de sedimentação em função da porcentagem de sólidos.

Tabela V.10: Velocidades de sedimentação: 10%, 15% e 20% de sólidos sem floculante.

Sólidos (%)	**Velocidade (cm/s)**	**Correlação (r^2)**
10	$2,112*10^{-2}$	0,999
15	$1,067*10^{-2}$	0,991
20	$2,833*10^{-3}$	0,990

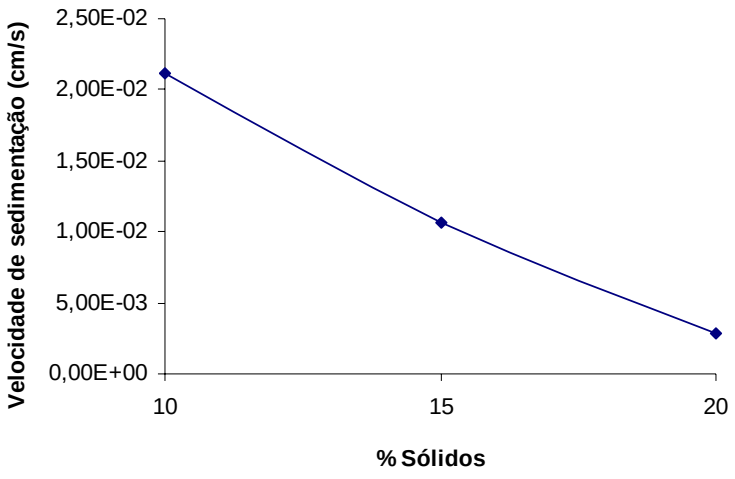


Figura 5.13: Variação da velocidade de sedimentação em função do porcentagem de sólidos da polpa.

A Figuras 5.13 mostra que a variação da velocidade de sedimentação em função da porcentagem de sólidos da polpa tem um comportamento linear, que se ajusta à seguinte equação: **y = -9E-05x + 0,0003** com uma correlação de 0,9933.

5.6.2 Testes de Floculantes Catiônicos, Aniônicos e Não Iônicos.

Os testes foram realizados para uma polpa de 15% de sólidos para todos os floculantes em provetas de 250ml com dosagem de 5g/t mostrando-se o melhor floculante.

a) Floculantes Catiônicos

No anexo 7 são apresentados os dados dos testes de sedimentação dos floculantes: BC630, SC492, SC494 e SC496. A figura 5.14 mostra a variação da altura de interface em função do tempo para os floculantes catiônicos testados.

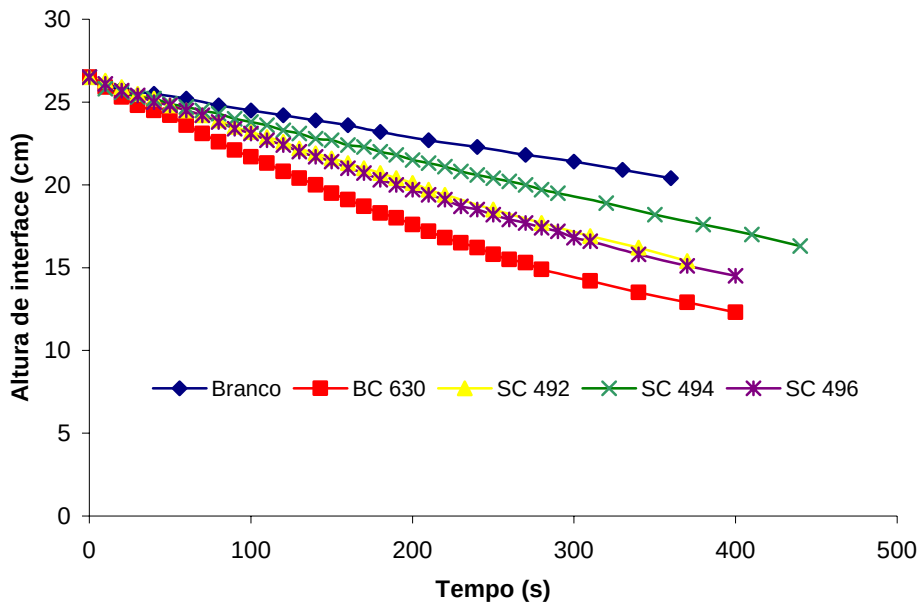


Figura 5.14: Variação da altura de interface em função do tempo para os floculantes catiônicos testados.

A Tabela V.11 e a Figura 5.15 mostram os valores das velocidades de sedimentação para os floculantes catiônicos BC630, SC492, SC494 e SC496.

Tabela V.11: Velocidade de sedimentação para floculantes catiônicos.

Teste Tipo	Velocidade (cm/s)	Correlação r^2
Branco	0,0182	0,9808
BC630	0,0465	0,9974
SC492	0,0332	0,9987
SC494	0,0239	0,9838
SC496	0,0335	0,9979

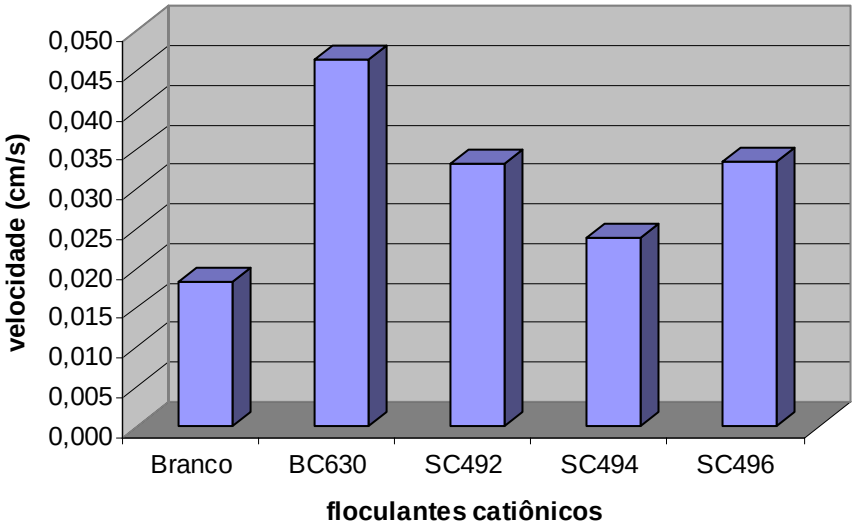


Figura 5.15: Velocidade de sedimentação para floculantes catiônicos.

Como o floculante BC630 foi o melhor neste grupo, foi feita uma análises mais detalhada da velocidade de sedimentação em função da dosagem. A Figura 5.16 indica a influência da dosagem de floculante BC630 sobre a velocidade de sedimentação. No anexo 7 são apresentados os dados de cada teste.

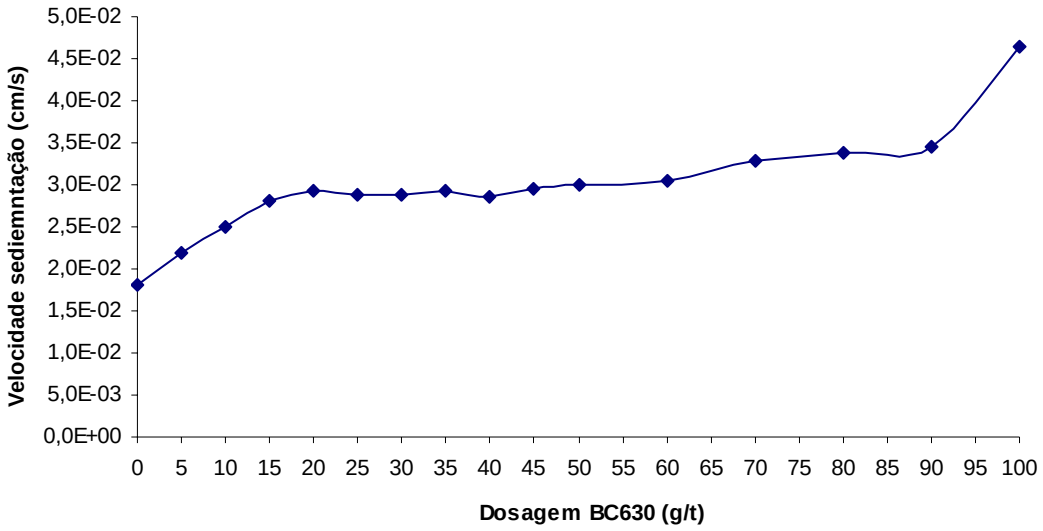


Figura 5.16: Velocidade de sedimentação em função da dosagem do floculante catiônico BC630.

Verifica-se pela Figura 5.16 que em dosagens mais elevadas de floculante (com mais de 90g/t), onde, se tem um efeito maior de aumento na velocidade na razão de 2,5 respecto a teste em branco para uma dosagem de 100g/t.

b) Floculantes Aniônicos

No anexo 7, são apresentados os dados dos testes de sedimentação dos floculantes: SA130, SA110, BA61BT, M338 e M10. A Figura 5.17 apresenta o comportamento da variação da altura de interface em função do tempo para os floculantes aniônicos.

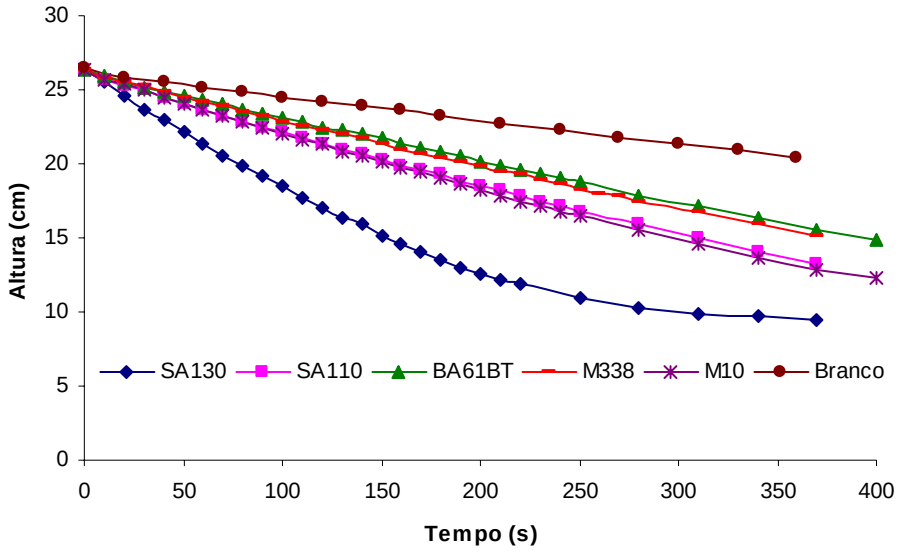


Figura 5.17: Variação da altura de interface em função do tempo para os floculantes aniônicos.

A Tabela V.13 e a Figura 5.18 mostram os valores das velocidades de sedimentação para os floculantes aniônicos.

Tabela V.13: Velocidade de sedimentação para floculantes aniônicos.

Teste Tipo	**Velocidade (cm/s)**	**Correlação (r^2)**
Branco	0,0182	0,9808
SA130	0,0775	0,9985
SA110	0,0407	0,9966
BA61BT	0,0314	0,995
M338	0,0332	0,9964
M10	0,0422	0,9978

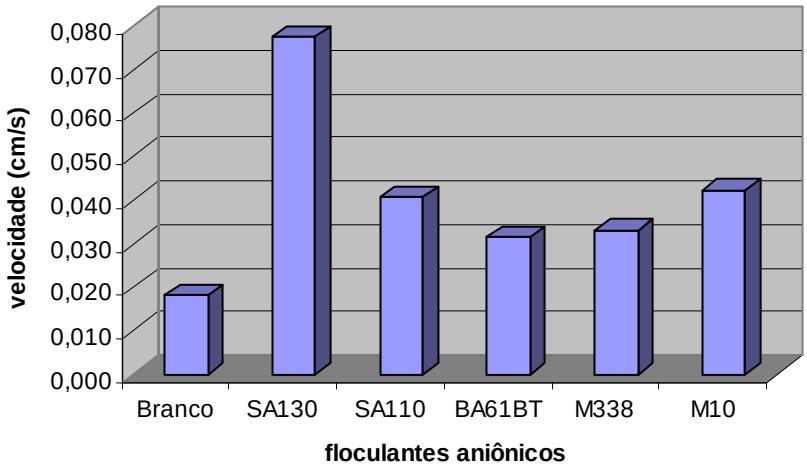


Figura 5.18: Velocidade de sedimentação para floculantes aniônicos.

O floculante SA130 foi o melhor neste caso. Foi realizada uma análises da velocidade de sedimentação em função da dosagem. A Figura 5.19 mostra a influência da dosagem de floculante SA130 sobre a velocidade de sedimentação. No anexo 7 são apresentados os dados de cada teste.

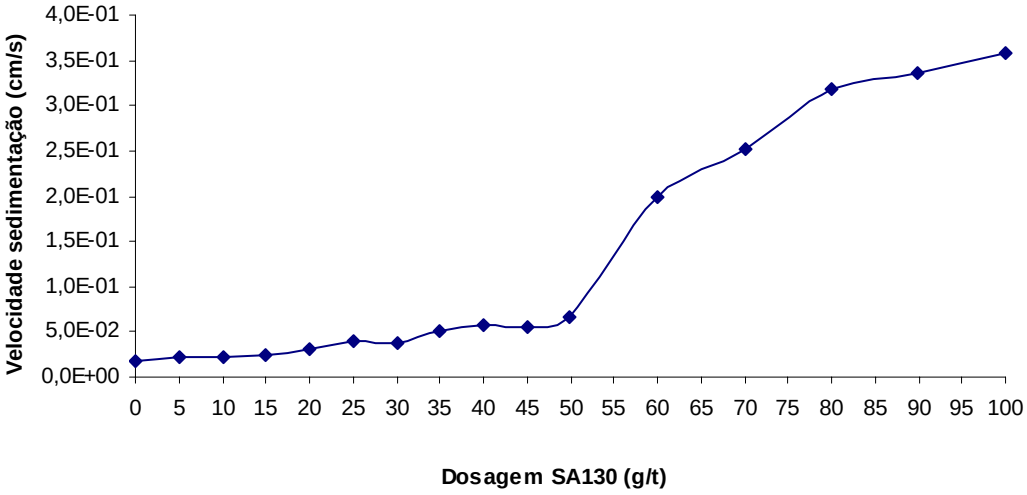


Figura 5.19: Velocidade de sedimentação em função da dosagem do floculante aniônicos SA130.

A Figura 5.19 indica que até a dosagem de floculante de 50g/t não é significativa a variação da velocidade de sedimentação, e que só com dosagems muito elevadas (mais de 60g/t) inicia o aumento mais significativo da velocidade de sedimentação.

c) Floculantes não iônicos.

No anexo 7 são apresentados os dados dos testes de sedimentação dos floculantes: SN100, SN300 e M351. A Figura 5.20 apresenta o comportamento da variação da altura de interface em função do tempo dos floculantes não iônicos.

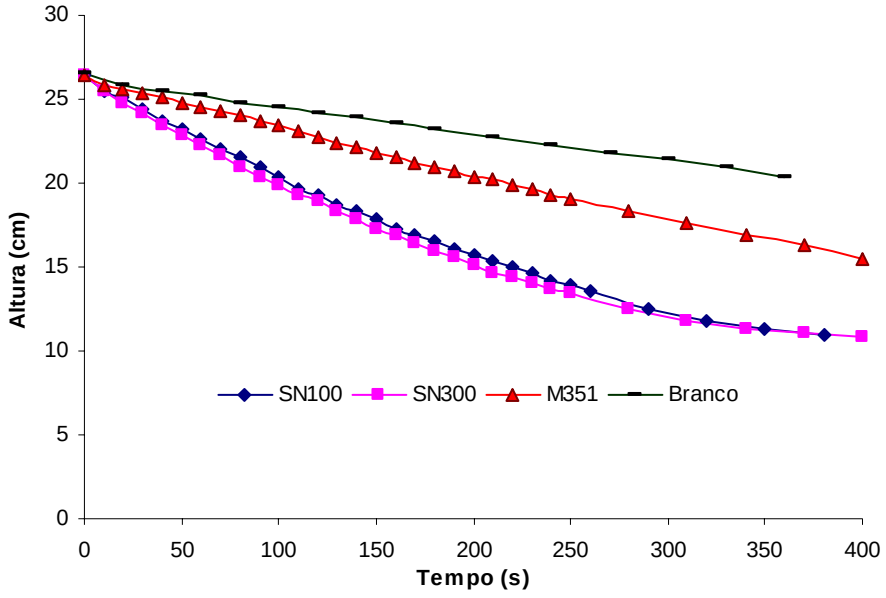


Figura 5.20: Variação da altura de interface em função do tempo para os floculantes não iônicos.

A Tabela V.14 e a Figura 5.21 mostram os valores das velocidades de sedimentação para os floculantes não iônicos SN100, SN300 e M351.

Tabela V.14: Velocidade de sedimentação para floculantes não iônicos.

Teste Tipo	Velocidade (cm/s)	Correlação (r^2)
Branco	0,0182	0,9808
SN100	0,0587	0,9981
SN300	0,0622	0,9969
M351	0,0287	0,9951

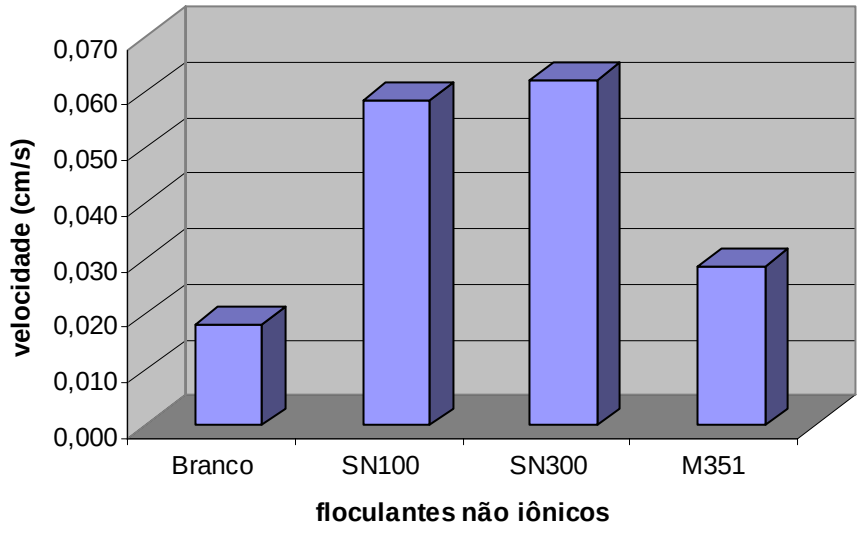


Figura 5.21: Velocidade de sedimentação para floculantes não iônicos.

O floculante SN300 foi o que apresentou melhor resultado. Estudou-se a velocidade de sedimentação em função da dosagem. A Figura 5.22 mostra a influência da dosagem de floculante SN300 sobre a velocidade de sedimentação. No anexo 7 são apresentados os dados de cada teste.

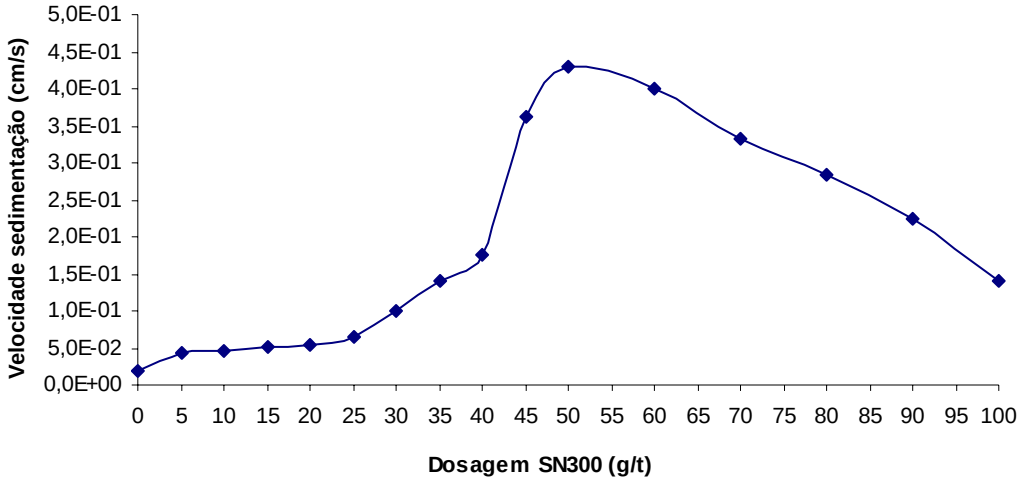


Figura 5.22: Velocidade de sedimentação em função da dosagem do floculante não iônico.

A Figura 5.22 indica que a dosagem de floculante até 25g/t não causa diferença significativa na velocidade de sedimentação, e que com dosagem igual a 50g/t se tem a maior velocidade de sedimentação. Maiores dosagens causam diminuição da velocidade de sedimentação devida provavelmente à saturação de floculante no sistema que provoca um efeito inverso no aumento da velocidade.

Considerando-se os dados obtidos para os três grupos de floculantes testados se optou pela escolha do floculante SN300 pertencente ao grupo dos não iônicos.

5.7. TESTES DE SEDIMENTAÇÃO DESCONTÍNUA, SEMICONTÍNUA E CONTÍNUA NO EQUIPAMENTO PRODUTOR DE PASTA MINERAL.

5.7.1 Testes de Sedimentação Descontínua com um Módulo sem Adição de Floculante SN300- Não iônico.

Foram feitas diferentes testes de sedimentação descontínua para a obtenção de diferentes porcentagens de sólidos na descarga do equipamento. As condições de operação foram para diferentes volumes de polpa com 1000, 2000, 3000 e 4000ml (que corresponde ao volume máximo deste primeiro módulo), variações tempos de residência

no equipamento de 5, 10, 15min sem adição de floculante SN300. As provas foram feitas com uma alimentação de 15% de sólidos.

Nas Tabelas V.15, V.16, V.17, V.18 são apresentadas as porcentagens de sólidos na descarga do equipamento para as condições de operação mencionadas, sem adição de floculante.

Tabela V.15: Porcentagem de sólidos na descarga para 1000ml de polpa e tempos de residência de 5, 10 e 15min.

Peso g.	**Tempo 5min.**	**Tempo 10min.**	**Tempo 15min.**
Polpa g.	117,6	81,1	122,9
Sólido g.	47,8	36,3	53,2
%Sólidos descarga	**40,6**	**44,8**	**43,3**

Tabela V.16: Porcentagem de sólidos na descarga para 2000ml de polpa e tempos de residência de 5, 10 e 15min.

Peso g.	**Tempo 5min.**	**Tempo 10min.**	**Tempo 15min.**
Polpa g.	179,5	103,7	115,6
Sólido g.	74,8	46,8	51,1
%Sólidos descarga	**41,7**	**45,1**	**44,2**

Tabela V.17: Porcentagem de sólidos na descarga para 3000ml de polpa e tempos de residência de 5, 10 e 15min.

Peso g.	**Tempo 5min.**	**Tempo 10min.**	**Tempo 15min.**
Polpa g.	93,3	75,7	117
Sólido g.	43,2	35,8	53
%Sólidos descarga	**46,3**	**47,3**	**45,3**

Tabela V.18: Porcentagem de sólidos na descarga para 4000ml de polpa e tempos de residência de 5, 10 e 15min.

Peso g.	**Tempo 5min.**	**Tempo 10min.**	**Tempo 15min.**
Polpa g.	98,3	90,6	184,7
Sólido g.	47,8	47,9	96,6
%Sólidos descarga	**48,6**	**52,9**	**52,3**

A Figura 5.23 mostra as porcentagens de sólidos obtidas na descarga para as diferentes condições de operação de sedimentação sem floculante SN300.

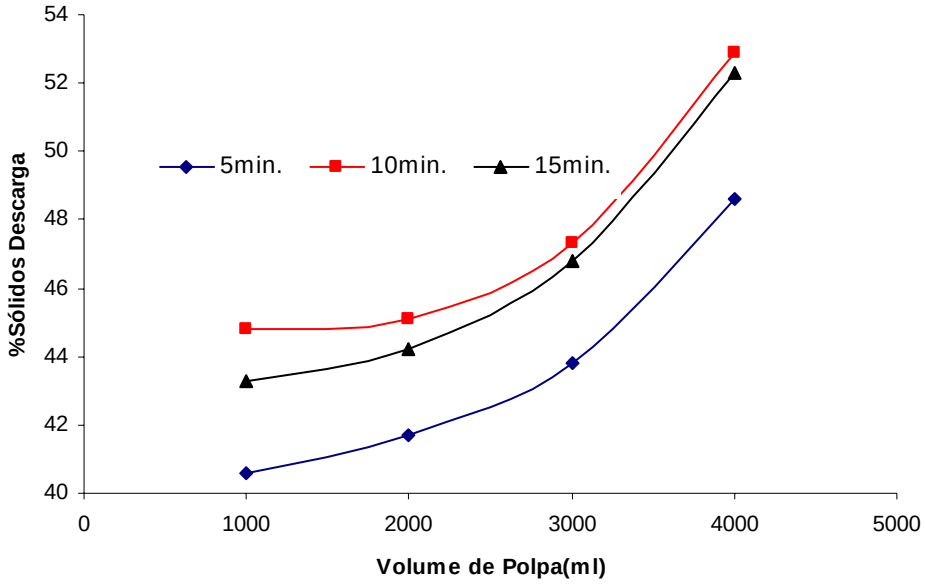


Figura 5.23: Variação de porcentagem de sólidos na descarga em função do volume de polpa para diferentes tempos de residência: 5, 10 e 15min.

A Figura 5.23 indica que a porcentagem de sólidos na descarga é maior à medida que aumenta o volume de polpa no equipamento para os diferentes tempos de residência. A melhor condição de operação foi obtida para um tempo de residência de 10min, com um volume de 4000ml atingindo 52,9%. O aumento na concentração de sólidos em relação à alimentação foi de 3,53 vezes.

5.7.2. Testes de Sedimentação Descontínua com um Módulo e com Adição de Floculante SN300- Não iônico.

O floculante SN300 foi utilizado em diferentes dosagens 25, 50 e 75g/t, com uma alimentação da polpa de 15% de sólidos e tempos de residência de 5, 10 e 15min. Nestes testes foi considerado o volume de 4000ml devido à maior porcentagem de sólidos na descarga atingida nos testes anteriores.

Na seguinte Tabela V.18 são apresentadas as porcentagens de sólidos na descarga do equipamento para as condições de operação mencionadas.

Tabela V.18: Porcentagem de sólidos na descarga para 4000ml de volume total, polpa de alimentação com 15% sólidos, dosagem de 25, 50 e 75g/t e tempos de residência de 5, 10 e 15min.

Tempo (min)	25g/t	50g/t	75g/t
5	37,1	47,9	49,8
10	45,3	53,7	48,6
15	50,8	53,6	45,3

A Figura 5.24 mostra as porcentagens de sólidos obtidas na descarga para as diferentes condições de operação de sedimentação com floculante SN300.

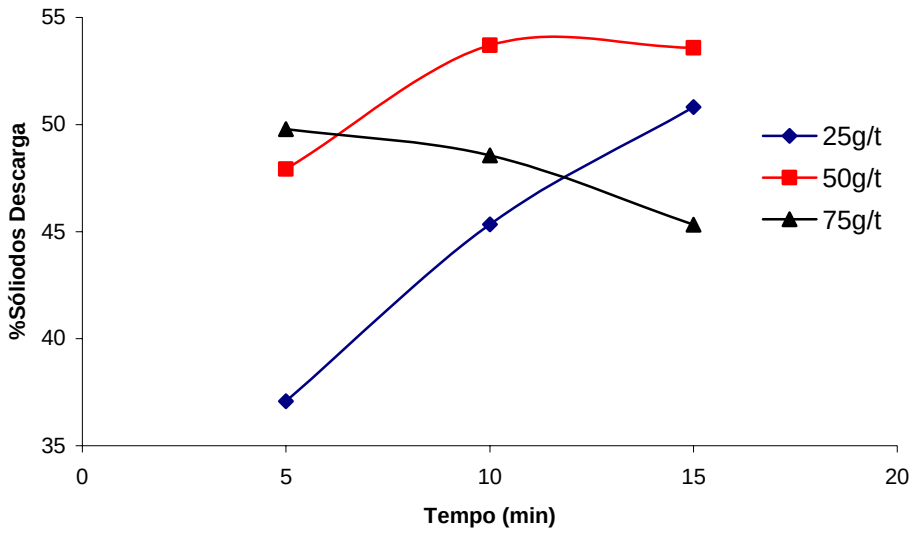


Figura 5.24: Variação de porcentagem de sólidos na descarga em funçao do tempo para diferentes dosagens de floculante SN300 - não iônico: 25, 50 e 75g/t com volume da polpa igual a 4000ml e tempos de residência de 5, 10 e 15min.

A Figura 5.24 mostra que a porcentagem de sólidos na descarga é maior à medida que aumenta o tempo de residência para as dosagems de 25 e 50 g/t. No caso da dosagem de 75g/t observa-se uma diminuição da porcentagem de sólidos na descarga devido provavelmente a uma saturação de floculante no sistema. A melhor condição de operação foi para um tempo de residência de 10min com uma dosagem de 50g/t atingindo uma porcentagem de sólidos na descarga de 53,7%. O aumento na concentração de sólidos em relacão à alimentação está na razão de 3,58 vezes.

5.7.3. Testes de Sedimentação Semicontínua com um Módulo, sem Adição de Floculante SN300- Não iônico.

Forem feitos diferentes testes semicontínuos para a obtenção de porcentagem de sólidos na descarga com as seguintes condições de operação: sem adição de floculante não iônico SN300, recirculação da polpa em diferentes alturas do equipamento, alimentação da polpa de 15% de sólidos, 4000ml de volume total, e com tempo de residência de 10min.

Os bicos do primeiro módulo foram enumerados de 1 até 6 de baixo para cima. Observe-se que a distância entre os bicos é de 9cm. As Tabelas V.19 e V.20 mostram as combinações de recirculação feitas para a entrada e saída da polpa no equipamento e as porcentagens de sólidos obtidas na descarga do equipamento produtor de pasta mineral.

Tabela V.19: Combinações de saída/entrada da polpa no equipamento para a obtenção da descarga da pasta mineral num volume total 4000ml de polpa.

Numeração dos bicos	**Numeração da Saída**	**Numeração da Entrada**
1	1	2
2	2	1
3	3	1
4	4	1
5	5	1
6	6	1

Tabela V.20: Porcentagem de sólidos na descarga a partir de recirculação da polpa de 4000ml e tempo de residência igual a 10min.

	Combinações dos Bicos					
Massa (g)	**1 até 2**	**2 até 1**	**3 até 1**	**4 até 1**	**5 até 1**	**6 até 1**
Massa polpa	47,5	57,0	73,6	38,0	61,0	66,2
Massa sólido	25,4	27,3	40,9	20,0	33,2	34,3
%sólidos	53,5	47,9	55,6	52,6	54,4	51,8

A Figura 5.25 mostra as porcentagens de sólidos das pastas em função das combinações dos bicos de saída/entrada.

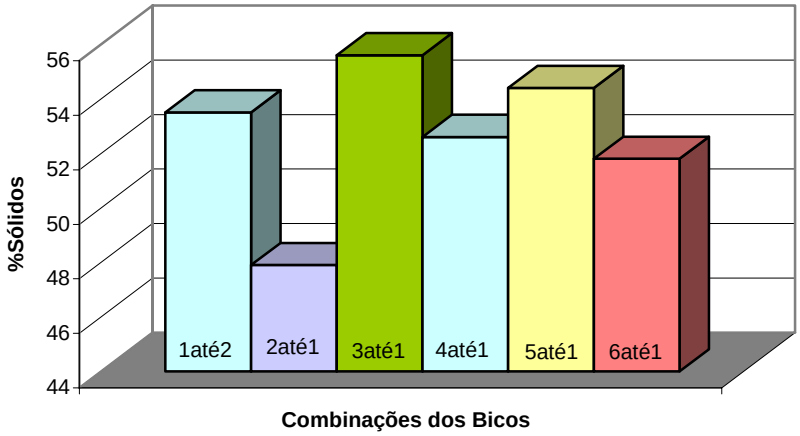


Figura 5.25: Variação de porcentagem de sólidos em função das combinações dos bicos (saída/entrada) com tempo de residência de 10min e volume de polpa igual a 4000ml.

Na Figura 5.25 pode se observar que a melhor condição de operação (maior porcentagem de sólidos na descarga) foi obtida a partir de recirculação da polpa do bico 3 para o bico 1 atingindo-se um valor de 55,6% de sólidos, ou seja, um aumento na concentração de sólidos em relação à alimentação de 3,71 vezes.

Considerando-se aos resultados obtidos foram realizados combinações à procura de uma maior procentagem de sólidos na descarga do equipamento. As Tabelas V.21 e V.22 mostram respectivamente as outras combinações feitas para a saída/entrada da polpa no equipamento e as porcentagems de sólidos obtidas na descarga do equipamento produtor de pasta mineral.

Tabela V.21: Combinações de saída/entrada da polpa no equipamento para a obtenção da descarga da pasta mineral num volume total 4000ml de polpa.

Numeração dos bicos	Numeração da Saída	Numeração da Entrada
1	3	2
2	4	2
3	5	2
4	4	3
5	5	3
6	5	4

Tabela V.22: Porcentagem de sólidos na descarga a partir de recirculação da polpa de 4000ml e tempo de residência igual a 10min.

	Combinações dos Bicos					
Massa (g)	**3 até 2**	**4 até 2**	**5 até 2**	**4 até 3**	**5 até 3**	**5 até 4**
massa polpa	129,7	53,3	45,2	93,1	73,4	70,2
massa sólido	66,0	27,8	23,9	49,9	40,0	38,8
%sólidos	50,9	52,2	52,9	53,6	54,5	55,3

A Figura 5.26 os porcentagens de sólidos das pastas em função das combinações dos bicos de saída/entrada.

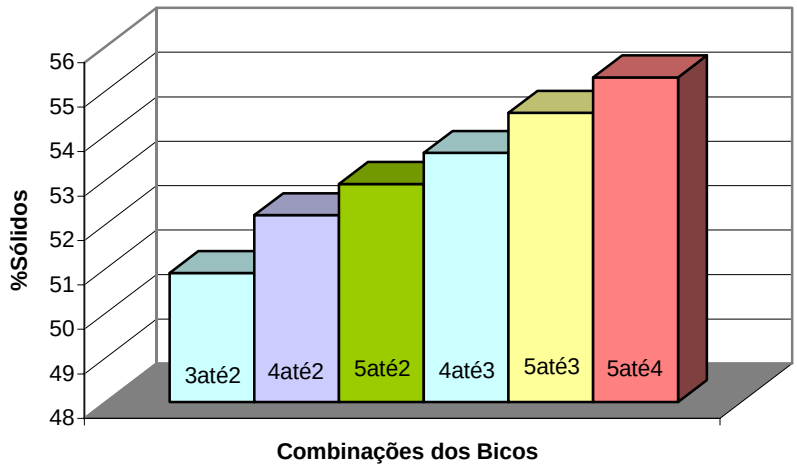


Figura 5.26: Variação de porcentagem de sólidos em função das combinações dos bicos com tempo de residência de 10min e volume de polpa igual a 4000ml.

Na Figura 5.26 pode se observar que a melhor condição de operação foi do bico 5 para o bico 4 com um valor de 55,3% de sólidos, ou seja, um aumento na concentração de sólidos em relação à alimentação na razão de 3,69 vezes.

5.7.4. Testes de Sedimentação Semicontínua com um Módulo, com Adição de Floculante SN300- Não iônico.

Os testes semicontínuos foram realizados nas seguintes condições de operação: adição de 50g/t de floculante não iônico SN300, recirculação da polpa em diferentes alturas do equipamento com uma alimentação da polpa de 15% de sólidos, 4000ml de volume total, e tempo de residência de 10min.

A Tabela V.23 mostra as combinações feitas. Neste caso, devido à ação do floculante, o número de combinações foi reduzido na busca da recirculação da polpa e não de água do sistema.

Tabela V.23: Combinações de saída/entrada da polpa com floculante SN300 no equipamento para a obtenção da descarga num volume total 4000ml de polpa.

Numeração dos bicos	Numeração da Saída	Numeração da Entrada
1	2	1
2	3	1
3	4	1

Na Tabela V.24 são apresentadas as porcentagens de sólidos obtidas para as combinações feitas, com floculante SN300.

Tabela V.24: Porcentagem de sólidos na descarga a partir de recirculação da polpa com floculante SN300 e tempo de residência igual a 10min.

	Combinações dos Bicos		
Peso (g)	**2 até 1**	**3 até 1**	**4 até 1**
massa polpa	85,7	193,2	108,3
massa sólido	45,2	91,7	57,4
%sólidos	52,7	47,5	53,0

A Figura 5.27 as porcentagens de sólido das pastas em função das combinações dos bicos de saída/entrada.

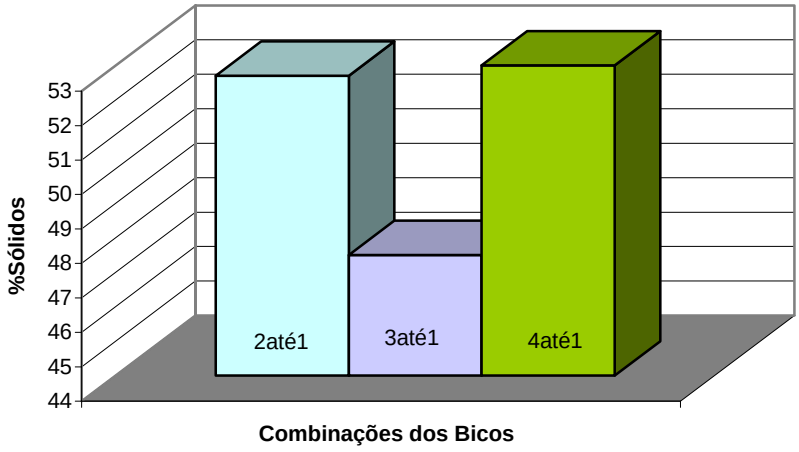


Figura 5.27: Variação de porcentagem de sólidos em função das combinações dos bicos com 50g/t de floculante SN300, tempo de residência de 10min, e volume de polpa igual a 4000ml.

Na Figura 5.27 pode se observar que a melhor condição de operação obtida foi do bico 4 para o bico 1 com um valor de 53,0% de sólidos, ou seja, um aumento na concentração de sólidos em relação à alimentação de 3,53 vezes.

5.7.5. Testes de Sedimentação Descontínua com dois Módulos acoplados, sem e com Adição de Floculante SN300- Não iônico.

Foram feitos diferentes testes de sedimentação descontínua para a obtenção de diferentes porcentagens de sólidos na descarga do equipamento com dois módulos, as condições de operação foram para diferentes volumes de polpa: 5000, 6000 e 7000ml (que corresponde ao volume máximo deste equipamento com dois módulos acoplados). O tempo de residência considerado para cada teste no equipamento foi de 10min, sem e com dosagens de floculante SN300. Os testes foram feitos com uma alimentação de 15% de sólidos.

Na Tabela V.25 são apresentadas as porcentagens de sólidos na descarga do equipamento para as condições de operação mencionadas sem adição de floculante.

Tabela V.25: Porcentagem de sólidos na descarga para 5000, 6000 e 7000ml de polpa e tempo de residência de 10min.

Peso g.	5000ml	6000ml	7000ml
Polpa g.	112,3	104,1	83,4
Sólido g.	62,1	58,0	46,9
%Sólidos descarga	**55,3**	**55,7**	**56,2**

A Figura 5.28 mostra a porcentagem de sólidos da descarga em função do volume de polpa para sedimentação descontínua, sem adição de floculante.

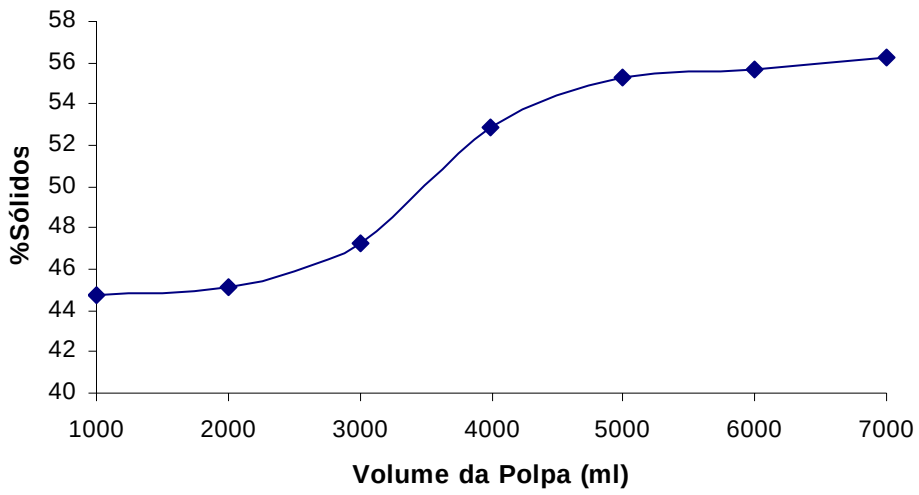


Figura 5.28: Variação de porcentagem de sólidos em função do volume de polpa para os módulos 1 e 2 acoplados, sem adição de floculante e 10min de residência.

Na Figura 5.28 observa-se que à medida que aumenta o volume da polpa ocorre um aumento da porcentagem de sólidos na descarga, chegando a um valor máximo de 56,2%. A tendência da curva desde os 5000ml tem um comportamento quase constante e se relaciona muito bem com uma tendência polinomial de ordem 5, mostrada a seguir: **y = 4E-17x5 - 7E-13x4 + 4E-09x3 - 1E-05x2 + 0,0124x + 39,919**, com um coeficiente de correlação de 0,9963.

Os testes com adição de floculante SN300 foram realizados com 50g/t, para todos os volumes de polpa e as mesmas condições de operação mencionadas anteriormente. Na

Tabela V.26 são apresentadas as porcentagens de sólidos na descarga do equipamento com adição de floculante.

Tabela V.26: Porcentagem de sólidos na descarga para 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000 e 7000ml de polpa com adição de floculante e tempo de residência de 10min.

Peso g.	**1000ml**	**2000ml**	**3000ml**	**4000ml**	**5000ml**	**6000ml**	**7000ml**
Polpa g.	86,7	69,7	111,5	76,9	66,9	87,8	78,9
Sólido g	37,8	30,9	54,9	41,3	36,9	48,7	44
%Sólidos	**43,6**	**44,3**	**49,2**	**53,7**	**55,2**	**55,5**	**55,8**

A Figura 5.29 apresenta os resultados de porcentagem de sólidos da descarga em função do volume de polpa para sedimentação descontínua, sem e com adição de floculante.

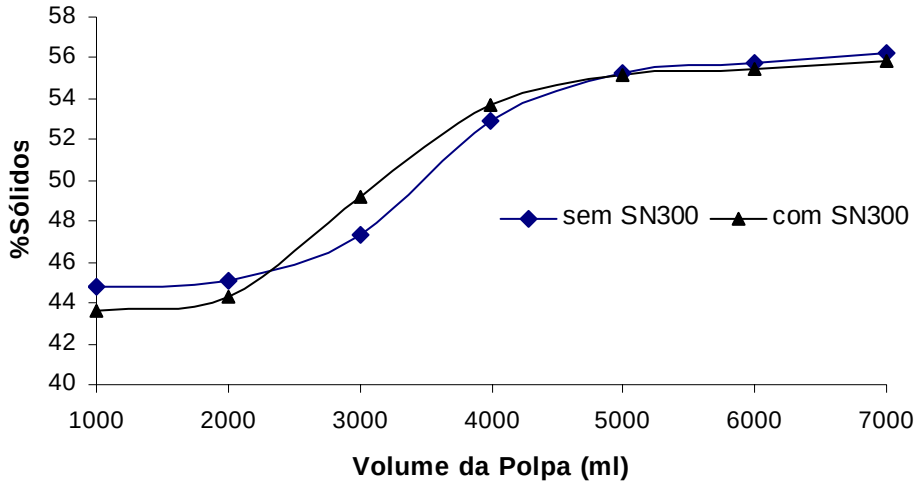


Figura 5.29: Variação da porcentagem de sólidos em função do volume de polpa para os modulos 1 e 2 acoplados, sem e com adição de floculante e 10min de residência.

Na Figura 5.29 observa-se que à medida que aumenta o volume da polpa se tem um aumento no porcentagem de sólidos na descarga o que é similar aos testes sem floculante, chegando a um valor máximo de 55,8%. A tendência da curva desde os 5000ml é para um valor quase constante da porcentagem de sólidos e se relaciona muito bem com uma tendência polinomial de ordem 5: **y = -1E-17x5 + 3E-13x4 - 3E-09x3 + 2E-05x2 - 0,0263x + 57,643**, com uma correlação de 0,9997 .

5.7.6. Testes de Sedimentação Semicontínua com Dois Módulos Acoplados, sem Adição de Floculante SN300- Não iônico.

Foram feitos diferentes testes semicontínuos com dois módulos para a obtenção de porcentagem de sólidos na descarga. Foram utilizadas as seguintes condições de operação: sem adição de floculante não iônico SN300, recirculação da polpa em diferentes alturas do equipamento com uma alimentação da polpa de 15% de sólidos, 7000ml de volume total e com tempo de residência de 10min.

A Tabela V.27 mostra as combinações feitas para saída/entrada da polpa no equipamento para a obtenção da descarga com as condições de operação mencionadas.

Tabela V.27: Combinações de entrada e saída da polpa sem floculante SN300 no equipamento para a obtenção da descarga num volume total 7000ml de polpa.

Numeração dos bicos	Numeração da Saída	Numeração da Entrada
7	7	1
8	8	1
9	9	1
10	10	1

Na Tabela V.28 são apresentadas as porcentages de sólidos obtidas para as combinações feitas sem floculante SN300.

Tabela V.28: Porcentagem de sólidos na descarga a partir da recirculação da polpa nos módulos de uma polpa de 7000ml e tempo de residência igual a 10min.

	Combinações dos Bicos			
Massa (g)	**7 até 1**	**8 até 1**	**9 até 1**	**10 até 1**
massa polpa	221,3	229,2	109,5	53
massa sólido	125,5	168,3	61,5	29,7
%sólidos	56,7	56,3	56,2	56,0

A Figura 5.30 mostra as porcentagens de sólidos obtidas nas pastas em função das combinações dos bicos.

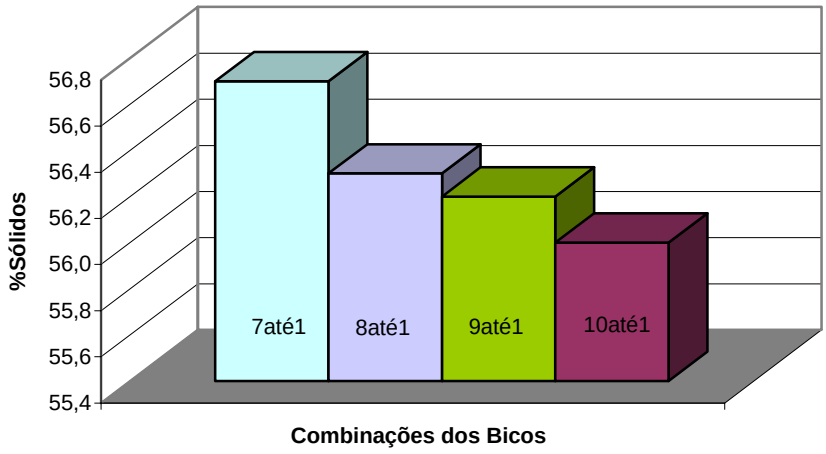


Figura 5.30: Variação de porcentagem de sólidos em função das combinações dos bicos com tempo de residência de 10min e volume de polpa igual a 7000ml.

Na Figura 5.30 pode-se observar que a melhor condição de operação para a maior porcentagem de sólidos na descarga a partir de recirculação da polpa sem adição de floculante, foi a recirculação da polpa desde o bico 7 para o bico 1 com um valor de 56,7% de sólidos.

De acordo aos resultados obtidos foram realizadas mais combinações à procura de uma maior procentagem de sólidos na descarga do equipamento. As Tabelas V.29 e V.30 mostram respectivamente as outras combinações feitas para a saída/entrada da polpa no equipamento e as porcentagems de sólidos obtidas na descarga do equipamento produtor de pasta mineral.

Tabela V.29: Combinações de saída/entrada da polpa sem floculante SN300, no equipamento para a obtenção da descarga num volume total 7000ml de polpa.

Numeração dos bicos	Numeração da saída	Numeração da entrada
1	2	1
2	3	1
3	4	1
4	5	1
5	6	1
6	7	1
7	8	1
8	9	1
9	10	1
10		

Tabela V.30: Porcentagem de sólidos na descarga a partir da recirculação da polpa nos módulos de uma polpa de 7000ml e tempo de residência igual a 10min.

	Combinações dos Bicos								
	2até1	**3até1**	**4até1**	**5até1**	**6até1**	**7até1**	**8até1**	**9até1**	**10até1**
% Sólidos	47,9	55,6	52,6	54,4	51,8	56,7	56,3	56,2	56,0

A Figura 5.31 mostra as porcentagens de sólidos obtidas para as pastas em função das combinações dos bicos de ordem global.

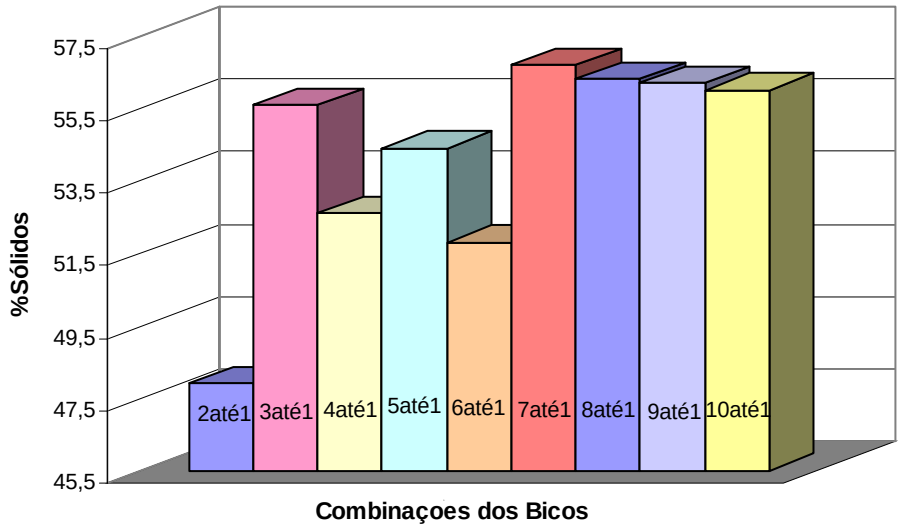


Figura 5.31: Variação de porcentagem de sólidos em função das combinações dos bicos com tempo de residência de 10min e volume de polpa igual a 7000ml.

Na Figura 5.31 pode se observar que a melhor condição de operação para o maior porcentagem de sólidos na descarga, a partir de recirculação da polpa sem adição de floculante de ordem global, continua sendo a recirculação da polpa desde o bico 7 para o bico 1.

5.7.7. Testes de Sedimentação Semicontínua com Dois Módulos Acoplados, com Adição de Floculante SN300.

Foram feitos diferentes testes semicontínuos para a obtenção de porcentagem de sólidos na descarga, com as seguintes condições de operação: adição de 50g/t de floculante não iônico SN300, recirculação da polpa em diferentes alturas do equipamento, alimentação da polpa de 15% de sólidos, 7000ml de volume total, e com tempo de residência de 10min.

A Tabela V.31 mostra as combinações feitas para esta operação. Neste caso, devido á ação do floculante, o número de combinações foi reduzido.

Tabela V.31: Combinações de saída/entrada da polpa com floculante SN300 no equipamento para a obtenção da descarga num volume total 7000ml de polpa.

Numeração dos bicos	Numeração da Saida	Numeração da Entrada
1	2	1
2	3	1
3	4	1
4	5	1
5	6	1

A Tabela V.32 indica as porcentages de sólidos obtidas nas combinações feitas com floculante SN300.

Tabela V.32: Porcentagem de sólidos na descarga a partir de recirculação da polpa com floculante SN300 e tempo de residência igual a 10min.

	Combinações dos Bicos				
Massa (g)	**2 até 1**	**3 até 1**	**4 até 1**	**5 até 1**	**6 até 1**
massa polpa	67,4	145,6	123,8	116,5	88,6
massa sólido	35,9	75,4	66,5	57,9	40,9
%sólidos	53,3	51,8	53,7	49,7	46,2

Na Figura 5.32 são apresentadas as porcentages de sólidos obtidas em função das combinações feitas com floculante SN300.

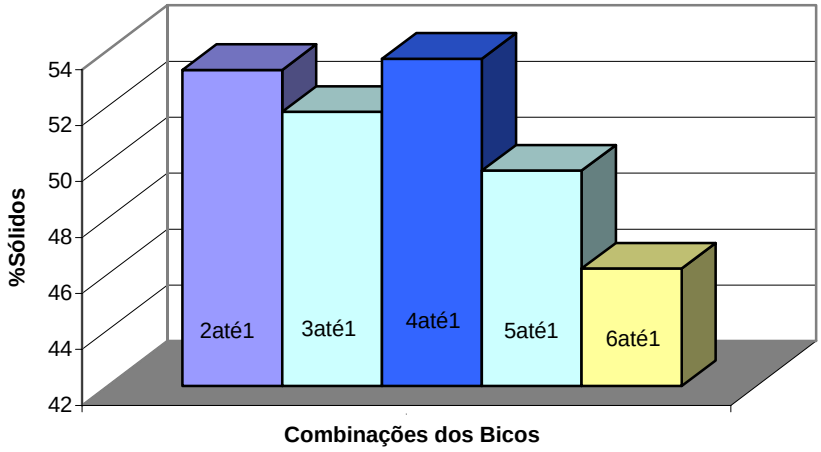


Figura 5.32: Variação de porcentagem de sólidos em função das combinações dos bicos com tempo de residência de 10min e volume de polpa igual a 7000ml.

Na Figura 5.32 pode-se observar que a melhor condição de operação para a maior porcentagem de sólidos na descarga, a partir de recirculação da polpa com adição de floculante, é a recirculação da polpa desde o bico 4 para o bico 1, com um valor de 53,7%.

5.7.8. Testes de Sedimentação Contínua com Dois Módulos Acoplados, com Adição de Floculante SN300 e sem Floculador em Espiral.

Foram feitos testes contínuos para a obtenção de porcentagem de sólidos na descarga, com as seguintes condições de operação: adição de 25, 50 e 75g/t de floculante não iônico SN300, alimentação da polpa de 15% de sólidos, 7000ml de volume total, tempo de operação contínua que chegaram até 180min (3 horas).
Primeiro foram avaliados as porcentagens de sólidos na descarga do equipamento para diferentes alturas de alimentação considerando os bicos 3 e 6 que correspondem respetivamente a uma altura de 27 e 54cm desde a base da descarga do equipamento.

As Tabelas V.33 e V.34 mostram porcentagens de sólidos obtidas na descarga para tempos de residência de 10, 20, 30 e 60min, através de uma alimentação pelos bicos 3 e 6 com um dosagem de 50g/t de floculante SN300.

Tabela V.33: Porcentagem de sólidos na descarga com alimentação da polpa pelo bico 3 e tempos de residência de 10, 20, 30 e 60min.

Peso g.	Tempo 10min.	Tempo 20min.	Tempo 30min.	Tempo 60min
Polpa g.	67,9	67,3	89,2	101,4
Sólido g.	17,4	20,6	29,6	35,1
%S. descarga	**25,6**	**30,6**	**33,2**	**34,6**

Tabela V.34: Porcentagem de sólidos na descarga com alimentação da polpa pelo bico 6 e tempos de residência de 10, 20,30 e 60min.

Peso g.	Tempo 10min.	Tempo 20min.	Tempo 30min.	Tempo 60min
Polpa g.	97,3	122,6	126,3	108,3
Sólido g.	27,4	41,5	44,3	40,5
%S. descarga	**28,2**	**33,8**	**35,1**	**37,4**

Na Figura 5.33 são apresentadas as porcentagens de sólidos obtidas em função do tempo de residência das diferentes alimentações no equipamento.

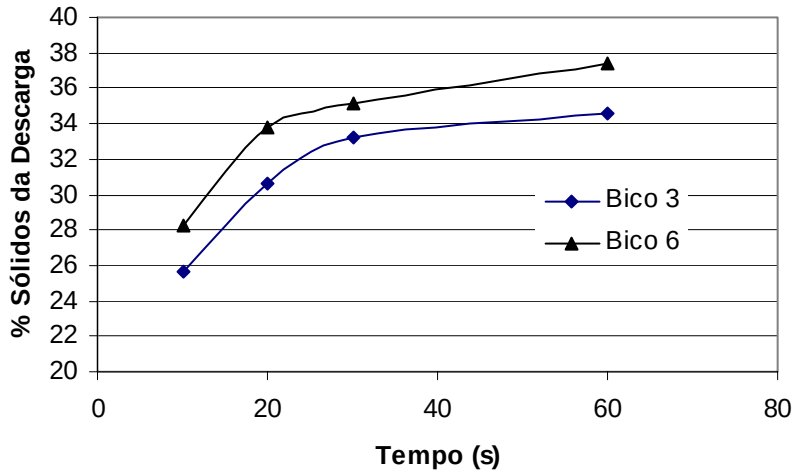


Figura 5.33: Variação de porcentagem de sólidos em função do tempo de residência para diferentes alturas de alimentação.

Na Figura 5.33, pode-se observar que a melhor condição de operação é para uma alimentação através do bico 6 para um tempo de 60min de operação contínua com 37,4% de sólidos na descarga.

Utilizando-se a alimentação através do bico 6 (melhor), foram feitos testes com um aumento do tempo de operação de até 180min (3 horas) e variações de dosagens de floculante de 25, 50 e 75g/t. As Tabelas V.35, V.36 e V.37 mostram as porcentagens de sólidos obtidas nesses processos contínuos.

Tabela V.35: Porcentagem de sólidos na descarga para 7000ml de polpa e tempos de residência de 30, 60, 90, 120, 150, 180min e 25g/t de SN300.

Peso g.	30min	60min	90min	120min	150min	180min
Polpa g.	77,3	45,3	146,2	132,0	86,9	90,6
Sólido g	34,2	21,1	71,0	65,0	42,7	44,7
%S Descarga	**44,2**	**46,6**	**48,6**	**49,2**	**49,1**	**49,3**

Tabela V.36: Porcentagem de sólidos na descarga para 7000ml de polpa e tempos de residência de 30, 60, 90, 120, 150, 180min e 50g/t de SN300.

Peso g.	30min	60min	90min	120min	150min	180min
Polpa g.	58,6	67,5	239,5	60,5	104,7	93,3
Sólido g	26,4	33,6	124,8	31,8	54,9	49,2
%S Descarga	**45,1**	**49,8**	**52,1**	**52,6**	**52,4**	**52,7**

Tabela V.37: Porcentagem de sólidos na descarga para 7000ml de polpa e tempos de residência de 30, 60, 90, 120, 150, 180min e 75g/t de SN300.

Peso g.	30min	60min	90min	120min	150min	180min
Polpa g.	45,3	121,8	133,2	106,3	90,0	136,2
Sólido g	17,9	54,7	63,0	49,6	43,0	65,5
%S Descarga	**39,5**	**44,9**	**47,3**	**46,7**	**47,8**	**48,1**

Na Figura 5.34 são apresentadas as porcentagens de sólidos obtidas em função do tempo de operação para diferentes dosagens na alimentação, sem a utilização do espiral gerador de flocos.

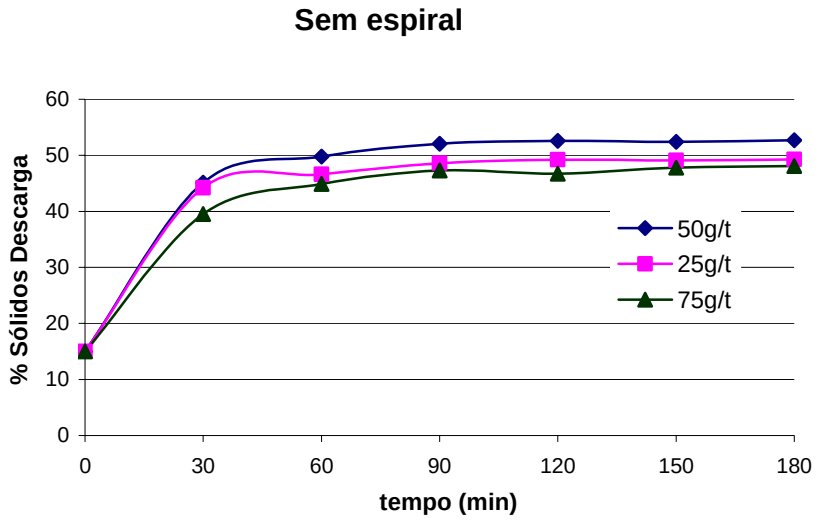


Figura 5.34: Variação das percentagens de sólidos da descarga em função do tempo de operação para diferentes dosagens de floculantes SN300, sem uso do espiral.

Na Figura 5.34, pode se observar que a melhor condição de operação para uma maior porcentagem de sólidos na descarga do equipamento sem a utilização do gerador de floculos é para uma dosagem de 50g/t e para um tempo de 180min de operação contínua. O valor alcançado foi de 52,7% de sólidos que representa um aumento na concentração de sólidos em relação à alimentação de 3,51 vezes.

5.7.9. Perfil de Concentração de Sólidos no Equipamento Produtor de Pasta Mineral, com Adição de Floculante SN300 sem Floculador em Espiral.

Forem feitas amostragens no equipamento a partir dos testes contínuos, para a obtenção de porcentagem de sólidos em diversos pontos. As condições de operação foram: adição de 25, 50 e 75g/t de floculante não iônico SN300, alimentação da polpa de 15% de sólidos em forma direta desde o tambor de alimentação, 7000ml de volume total de polpa, e as amostras foram obtidas uma vez que a velocidade de sedimentação na coluna permaneceu em estado quase estacionário na razão de 1mm/min.

As Tabelas V.38, V.39 e V.40 mostram as porcentagens de sólidos para diferentes alturas da coluna obtidas em relação à altura do equipamento para diferentes dosagens de floculante 25, 50 e 75g/t sem a utilização do espiral gerador de flóculos.

Tabela V.38: Porcentagem de sólidos na coluna de sedimentação depois de alcançar uma velocidade de sedimentação quase estacionária, para 25g/t SN300.

Peso g.	Bico 5	Bico 4	Bico 3	Bico 2	Bico 1	Under
Polpa g.	121,5	96,4	57,9	122,5	94,7	112,5
Sólido g.	44,7	37,3	24,3	52,8	41,9	56,5
%S Descarga	**36,8**	**38,7**	**42,0**	**43,1**	**44,2**	**50,2**

Tabela V.39: Porcentagem de sólidos na coluna de sedimentação depois de alcançar uma velocidade de sedimentação quase estacionária, para 50g/t SN300.

Peso g.	Bico 5	Bico 4	Bico 3	Bico 2	Bico 1	Under
Polpa g.	76,4	86,9	123,7	57,3	68,3	118,1
Sólido g.	28,7	34,4	54,2	25,7	32,9	62,8
%S Descarga	**37,6**	**39,6**	**43,8**	**44,9**	**48,2**	**53,2**

Tabela V.40: Porcentagem de sólidos na coluna de sedimentação depois de alcançar uma velocidade de sedimentação quase estacionária, para 75g/t SN300.

Peso g.	Bico 5	Bico 4	Bico 3	Bico 2	Bico 1	Under
Polpa g.	56,2	55,2	78,3	40,2	101,5	222,6
Sólido g.	19,6	20,5	31,4	16,6	44,2	110,8
%S Descarga	**34,9**	**37,1**	**40,1**	**41,3**	**43,5**	**49,8**

A Figura 5.35 mostra as porcentagens de sólidos obtidas em função da altura da camada de mineral no equipamento para diferentes dosagens de floculante SN300, sem a utilização do espiral gerador de flocos.

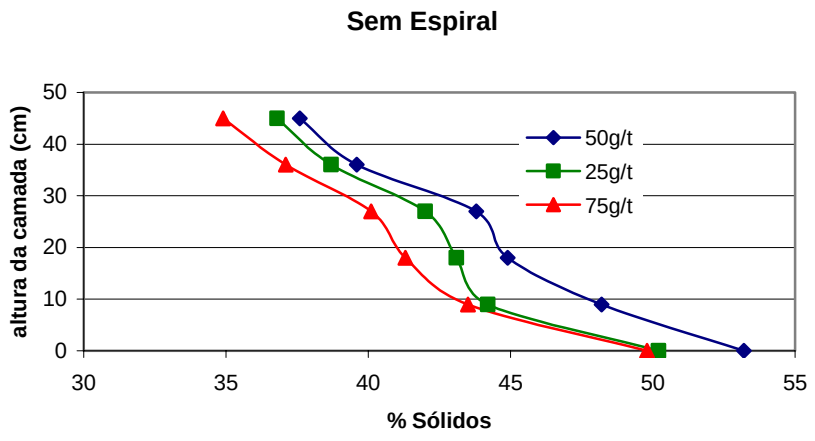


Figura 5.35: Perfil de concentração da camada de mineral no equipamento, para dosagens de 25, 50 e 75g/t de floculante SN300.

Na Figura 5.35, pode se observar que a melhor condição de operação sem a utilização do gerador de floculos, é para uma dosagem de 50g/t que apresenta o maior valor para todas as alturas da camada em comparação com as outras dosagens.

Também pode se observar que existe uma etapa de transição de polpa para pasta na faixa entre 40% e 45% de sólidos em massa, ou seja, que para porcentagems maiores que 45% de sólidos se tem a presença de pasta mineral para este tipo de rejeito, fato que será mostrado com maior detalhe nos testes de reologia.

5.7.10. Testes de Sedimentação Contínua com Dois Módulos Acoplados, com Adição de Floculante SN300 e com Floculador em Espiral.

Foram feitos diferentes testes contínuos para a obtenção da porcentagem de sólidos na descarga. As condições de operação foram: adição de 25, 50 e 75g/t de floculante não iônico SN300, alimentação da polpa de 15% de sólidos com a utilização do sistema de espiral buscando melhorar a formação dos flóculos, 7000ml de volume total, tempo de operação contínua que alcançou até 180min (3 horas).

De forma similar aos testes anteriores, primeiro foram avaliadas as porcentagens de sólidos na descarga do equipamento para diferentes alturas de alimentação, utilizando-se os bicos 3 e 6 que correspondem respetivamente a uma altura de 27 e 54cm desde a base da descarga do equipamento.

As Tabelas V.41 e V.42 mostram as porcentagens de sólidos obtidas na descarga para tempos de residência de 10, 20, 30 e 60min, através de uma alimentação pelo bico 3 e 6 com um dosagem de 50g/t de floculante SN300.

Tabela V.41: Porcentagem de sólidos na descarga com alimentação da polpa pelo bico 3 e tempos de residência de 10, 20, 30 e 60min.

Peso g.	Tempo 10min.	Tempo 20min.	Tempo 30min.	Tempo 60min
Polpa g.	82,8	59,4	45,3	54,7
Sólido g.	24,6	20,3	16,1	19,8
%S. Descarga	**29,7**	**34,2**	**35,6**	**36,2**

Tabela V.42: Porcentagem de sólidos na descarga com alimentação da polpa pelo bico 6 e tempos de residência de 10, 20, 30 e 60min.

Peso g.	Tempo 10min.	Tempo 20min.	Tempo 30min.	Tempo 60min
Polpa g.	29,9	49,5	22,3	38,2
Sólido g.	9,4	19,7	9,0	15,7
%S. Descarga	**31,4**	**39,8**	**40,4**	**41,1**

A Figura 5.36 apresenta as porcentagens de sólidos obtidas em função do tempo de operação para diferentes dosagens na alimentação, com a utilização do espiral gerador de flocos.

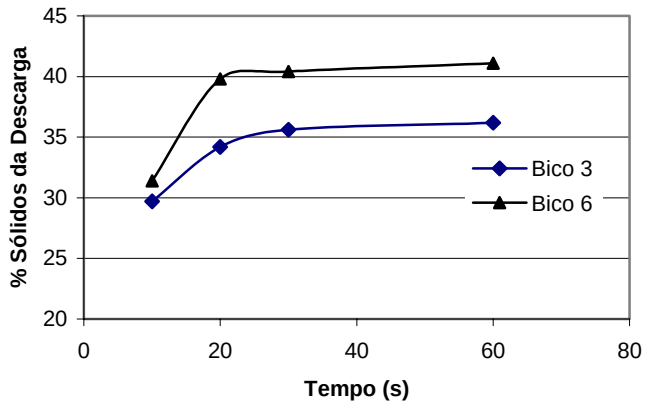


Figura 5.36: Variação de porcentagem de sólidos em função do tempo de residência para diferentes alturas de alimentação, com a utilização do espiral gerador de flocos.

Na Figura 5.36, pode se observar que a melhor condição de operação é para uma alimentação através do bico 6, cujo valor para um tempo de 60min de operação contínua é de 41,1% de sólidos, ou seja, um aumento na concentração de sólidos em relação à alimentação de 2,74 vezes.

Foram feitos testes com um aumento do tempo de operação de até 180min (3 horas) e variações de dosagens de floculante de 25, 50 e 75g/t. As Tabelas V.43, V.44 e V.45 mostram as porcentagens de sólidos obtidas nesses processos contínuos.

Tabela V.43: Porcentagem de sólidos na descarga para 7000ml de polpa e tempos de residência de 30, 60, 90, 120, 150, 180min e 25g/t de SN300.

Peso g.	30min	60min	90min	120min	150min	180min
Polpa g.	82,0	188,9	92,6	197,1	114,7	162,4
Sólido g	33,4	91,2	45,4	101,7	59,7	87,5
%S Descarga	**40,7**	**48,3**	**49,0**	**51,6**	**52,0**	**53,9**

Tabela V.44: Porcentagem de sólidos na descarga para 7000ml de polpa e tempos de residência de 30, 60, 90, 120, 150, 180min e 50g/t de SN300.

Peso g.	30min	60min	90min	120min	150min	180min
Polpa g.	104,7	114,6	46,1	139,4	33,9	124,9
Sólido g	44,6	57,2	23,6	75,7	18,6	69,3
%S Descarga	**42,6**	**49,9**	**51,2**	**54,3**	**54,9**	**55,5**

Tabela V.45: Porcentagem de sólidos na descarga para 7000ml de polpa e tempos de residência de 30, 60, 90, 120, 150, 180min e 75g/t de SN300.

Peso g.	30min	60min	90min	120min	150min	180min
Polpa g.	68,7	87,4	122,8	112,6	78,9	146,3
Sólido g	27,4	40,5	58,8	54,9	39,1	75,6
%S Descarga	**39,9**	**46,3**	**47,9**	**48,8**	**49,6**	**51,7**

Na Figura 5.37 são apresentadas as porcentagens de sólidos obtidas em função da altura da camada de mineral no equipamento para diferentes dosagens de floculante SN300, com a utilização do espiral gerador de flocos.

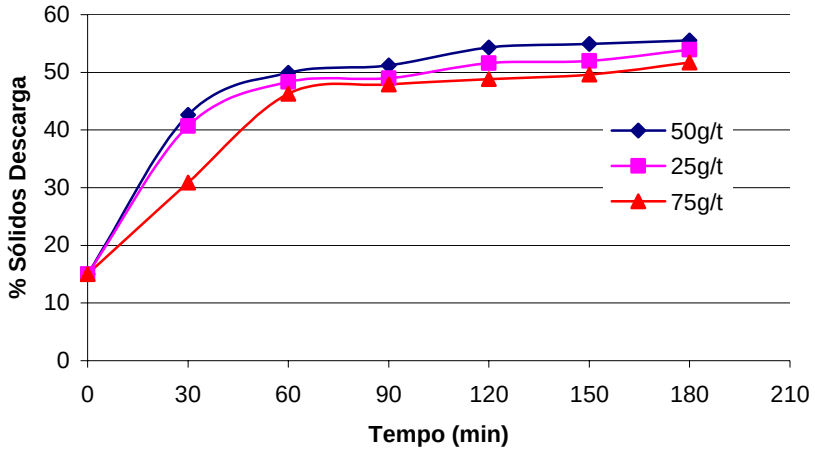


Figura 5.37: Variação da procentagem de sólidos da descarga em função do tempo de operação para diferentes dosagens de floculantes SN300, com uso do espiral gerador de flocos.

Na Figura 5.37 pode-se observar que a melhor condição de operação com gerador de floculos é para uma dosagem de 50g/t. O maior valor para um tempo de 180min de operação contínua foi de 55,5% de sólidos, ou seja, um aumento na concentração de sólidos em relação à alimentação de 3,70 vezes.

5.7.11. Perfil de Concentração de Sólidos no Equipamento Produtor de Pasta Mineral, com Adição de Floculante SN300 e com Floculador em Espiral.

Foram feitas amostragens no equipamento a partir dos testes continuos para a obtenção de porcentagem de sólidos em diversos pontos. As condições de operação foram: adição de 25, 50 e 75g/t de floculante não iônico SN300, alimentação da polpa de 15% de sólidos através do espiral gerador de flocos, 7000ml de volume total de polpa e as amostras forem obtidas uma vez que a velocidade de sedimentação na coluna permaneceu em estado quase estacionário na razão de 1mm/min.

As Tabelas V.46, V.47 e V.48 mostram as porcentagens de sólidos para diferentes alturas da coluna obtidas em relação à do equipamento para diferentes dosagens de floculante 25, 50 e 75g/t com a utilização do espiral gerador de flocos.

Tabela V.46: Porcentagem de sólidos na coluna de sedimentação depois de alcançar uma velocidade de sedimentação quase estacionária, para 25g/t SN300.

Peso g.	Bico 5	Bico 4	Bico 3	Bico 2	Bico 1	Under
Polpa g.	36,2	66,3	49,3	44,7	79,7	356,8
Sólido g.	13,4	26,4	20,7	19,1	35,5	183,3
%S Descarga	**37,0**	**39,8**	**42,0**	**42,7**	**44,5**	**51,4**

Tabela V.47: Porcentagem de sólidos na coluna de sedimentação depois de alcançar uma velocidade de sedimentação quase estacionária, 50g/t SN300.

Peso g.	Bico 5	Bico 4	Bico 3	Bico 2	Bico 1	Under
Polpa g.	43,3	45,3	63,6	63,7	25,6	240,7
Sólido g.	16,5	18,4	28,1	28,5	12,6	131,9
%S Descarga	**38,1**	**40,6**	**44,2**	**44,7**	**49,2**	**54,8**

Tabela V.48: Porcentagem de sólidos na coluna de sedimentação depois de alcançar uma velocidade de sedimentação quase estacionária, 75g/t SN300.

Peso g.	Bico 5	Bico 4	Bico 3	Bico 2	Bico 1	Under
Polpa g.	46,8	55,8	64,3	59,4	80,2	222,6
Sólido g.	16,7	22,0	26,4	24,9	34,7	111,9
%S Descarga	**35,7**	**39,4**	**41,1**	**41,9**	**43,3**	**50,3**

A Figura 5.38 apresenta as porcentagens de sólidos obtidas em função da altura da camada de mineral no equipamento para diferentes dosagens de floculante SN300, com a utilização do espiral gerador de flocos.

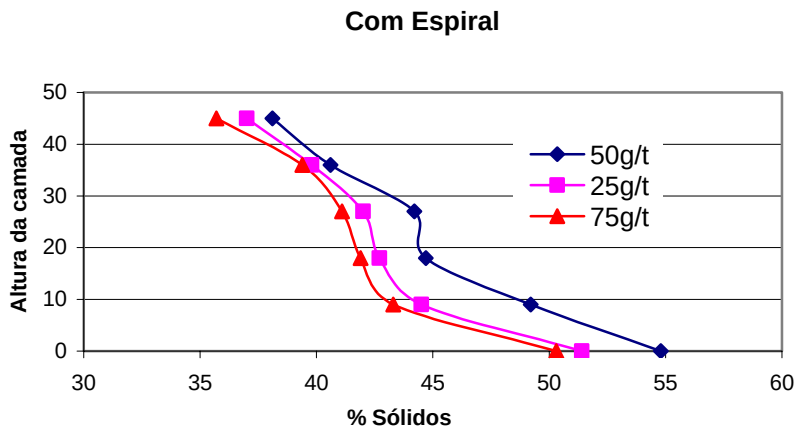


Figura 5.38: Perfil de concentração da camada de mineral no equipamento, para dosagens de 25, 50 e 75g/t de floculante SN300 utilizando o espiral gerador de flocos.

Na Figura 5.38 pode-se observar que a melhor condição de operação com a utilização do gerador de floculos, é para uma dosagem de 50g/t. Pode-se observar que existe uma etapa de transição de polpa para pasta na faixa entre 40% e 45% de sólidos em massa, ou seja, que para porcentagens maiores do que 45% de sólidos se tem a presença de pasta mineral para este tipo de minério, fato que será caraterizado com detalhe nos testes de reologia.

5.7.12. Testes de Sedimentação Contínua com Dois Módulos Acoplados, Adição de Floculante SN300, Floculador em Espiral e Recirculação da Polpa.

Foram feitos testes contínuos com as melhores condições de operação para a obtenção de porcentagem de sólidos na descarga nas seguintes condições operação: adição 50g/t de floculante não iônico SN300, alimentação da polpa de 15% de sólidos, sistema de espiral para melhorar a formação dos flóculos, recirculação da polpa no equipamento, 7000ml de volume total, tempo de operação contínua que chegou até 180min (3 horas).

A Tabela V.49 mostra as porcentagens de sólidos obtidas na descarga para tempos de residência de 30, 60, 90, 120, 150 e 180min, através de uma alimentação pelo bico 6 e uma recirculação interna do bico 4 para o bico 1.

Tabela V.49: Porcentagem de sólidos na descarga para 7000ml de polpa com tempos de residência de 30, 60, 90, 120, 150, 180min, 50g/t de SN300 e recirculação da polpa.

Peso g.	30min	60min	90min	120min	150min	180min
Polpa g.	55,2	68,9	88,4	45,2	58,1	60,8
Sólido g	24,8	35,6	46,8	24,6	32,1	34,1
%S Descarga	**44,9**	**51,7**	**52,9**	**54,4**	**55,2**	**56,1**

Na Figura 5.39 são apresentadas as porcentagens de sólidos obtidas em função do tempo de operação para as melhores condições.

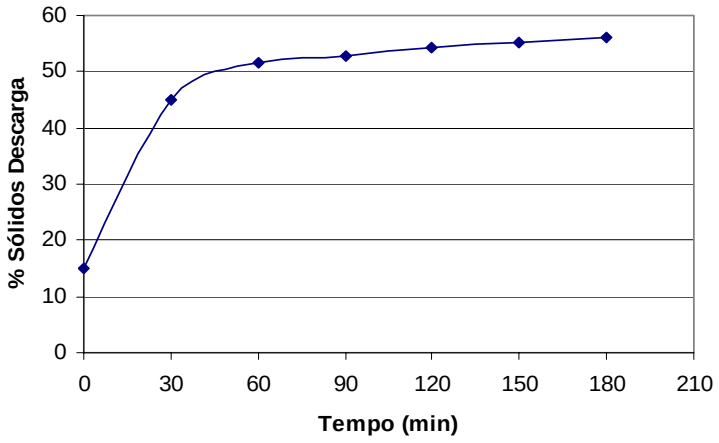


Figura 5.39: Variação do procentagem de sólidos da descarga em função do tempo de operação para as melhores condições.

Na Figura 5.39, tem-se que com as melhores condições de operação, o maior valor de adensamento foi para um tempo de 180min de operação contínua com 56,1% de sólidos. Um aumento na concentração de sólidos em relação à alimentação de 3,74 vezes.

5.8. Caracterização das Pastas Minerais Produzidas pelo Equipamento.

5.8.1. Teste de Abatimento ("Slump").

O comportamento desta pasta foi estudado em função da porcentagem de sólidos, a partir de 47% até 59% de sólidos em massa. Os resultados dos testes de abatimento são mostrados na Tabela V.50.

Tabela V.50: Resultados de altura de abatimento de cone (H_S) das pastas minerais.

% Sólidos	Água Adic.(ml)	Hs (cm).	% Sólidos	Água Adic.(ml)	Hs (cm).
58,6	-----	1,25	52,5	300	4,08
57,8	200	1,36	51,6	300	4,62
57,1	200	1,58	50,8	300	5,10
56,4	200	1,92	49,9	300	5,36
55,4	300	2,26	49,0	300	5,64
54,4	300	3,36	48,3	300	6,35
53,4	300	3,52	47,6	300	7,28

Na Figura 5.40 são mostrdas as porcentagens de abatimentos em função do adensamento de sólidos da pasta mineral.

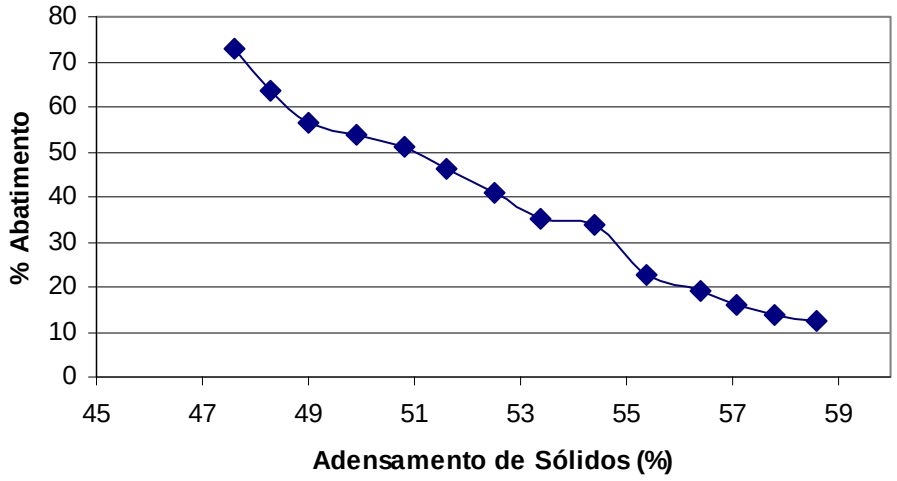


Figura 5.40: Porcentagens de abatimento obtidas para as pastas minerais.

A Tabela V.50 e a Figura 5.40 indicam que o rejeito de manganês se apresenta como pasta na faixa de adensamento entre 48 e 56% de sólidos em massa, sendo isto observado na porcentagem de abatimento em função do adensamento da pasta. Portanto, os consumos de água nestas misturas vão de 44 até 52% em massa, que podem ser considerados como valores elevados. O valor de 50% de abatimento de cone foi alcançado para um adensamento de pasta de aproximadamente 51% de sólidos (49% de água).

5.8.2. Teste de Calha ("Flume").

Os testes forem feitos numa calha de acrílico de laboratório com as dimensões de 100cm×20cm×20cm. As pastas minerais foram preparadas em porcentagens de sólido adequadas à faixa em estudo, ou seja, entre 47% e 59% de adensamento. Nestes testes foram consideradas inclinações da calha de 0%, 3%, e 6%. Os resultados dos testes de calha são mostrados na Tabela V.51.

Tabela V.51: Resultados de teste de calha das pastas minerais produzidas.

% Sólidos	Inclinaçao (%)	Largura L (cm)	Altura 1 (cm)	Altura 2 (cm)	Angulo repouso (graus)
	0	23,0	12,5	13,0	1,25
58,6	3	22,0	12,0	12,7	1,82
	6	23,0	11,8	12,5	1,74
	0	23,0	11,5	13,0	3,7
57,8	3	23,0	11,5	13,0	3,7
	6	22,5	11,0	12,5	3,8
	0	23,0	11,0	12,6	4,0
57,1	3	23,5	11,1	12,5	3,4
	6	23,5	10,8	12,3	3,7
	0	23,3	10,6	12,6	4,9
56,4	3	24,2	10,0	12,0	4,7
	6	24,0	10,0	12,0	4,8
	0	25,0	10,0	12,8	6,4
55,4	3	24,8	10,0	12,5	5,8
	6	25,7	9,5	12,0	5,6
	0	27,0	8,8	12,8	8,4
54,4	3	27,5	8,5	12,0	7,3
	6	28,0	8,2	11,8	7,3
	0	30,0	8,0	12,0	7,6
53,4	3	31,0	7,0	11,0	7,4
	6	31,8	6,8	10,5	6,6
	0	37,0	5,1	9,6	6,9
52,5	3	38,8	4,9	9,0	6,0
	6	40,2	4,3	8,0	5,3
	0	44,0	4,0	9,2	6,7
51,6	3	46,0	3,2	8,5	6,6
	6	47,0	2,2	7,4	6,3
	0	43,0	2,5	7,2	6,2
50,8	3	46,1	3,1	7,2	5,1
	6	48,3	2,5	6,7	5,0
	0	54,0	1,6	6,5	5,2
49,9	3	52,0	1,7	6,3	5,1
	6	55,0	1,5	5,8	4,5
	0	52,2	1,6	6,8	5,7
49,0	3	54,5	1,2	6,3	5,4
	6	55,7	1,7	5,5	3,9
	0	57,0	1,5	6,5	5,0
48,3	3	60,0	1,3	6,2	4,7
	6	64,7	1,3	4,8	3,1
	0	60,8	1,0	6,2	4,9
47,6	3	65,8	1,0	5,0	3,5
	6	72,0	0,9	4,0	2,5

A Figura 5.41 apresenta os diferentes ângulos de repouso em função do adensamento de sólidos da pasta mineral.

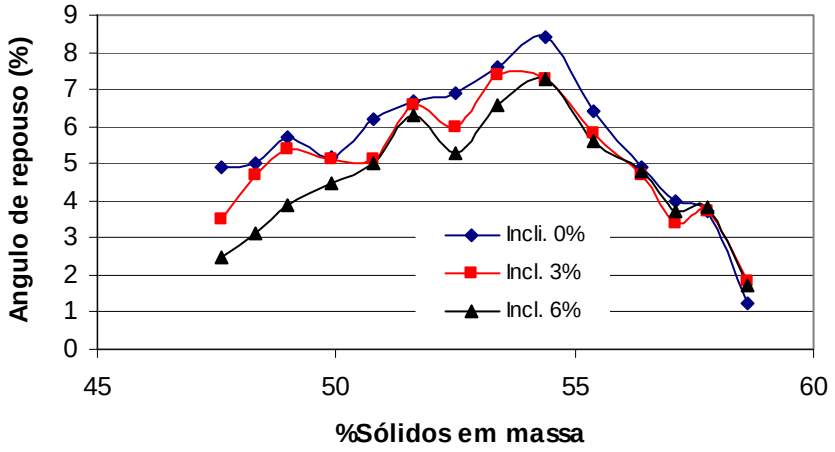


Figura 5.41: Ângulos de repouso obtidos nas pastas minerais de manganês.

No que se refere aos ângulos de repouso, valores superiores a 8° foram alcançados para o caso da pasta preparada com 54,4% de sólidos (45,6% de água), com uma consistência de pasta equivalente a um 33,6% de abatimento ("slump"), e sem considerar inclinação da calha. Tambem observa-se que os ângulos de repouso aumentan com a diminuição da inclinação da calha.

5.8.3. Viscosidade das Pastas Minerais.

Foram estudadas faixas de adensamento nas quais o comportamento foi de pasta, segundo os resultados preliminares do teste de "slump". Os ciclos reológicos empregados foram de 1-20-1 rpm para baixas rotações da haste, 1-100-1 rpm e 1-180-1 rpm para altas rotações da haste.

As Tabelas de dados correspondentes aos testes são apresentadas no anexo 8. Nas Figuras 5.42, 5.43 e 5.44 são apresentados os ciclos reológicos de 1-20-1 rpm, 1-100-1 e 1-180-1 rpm respectivamente.

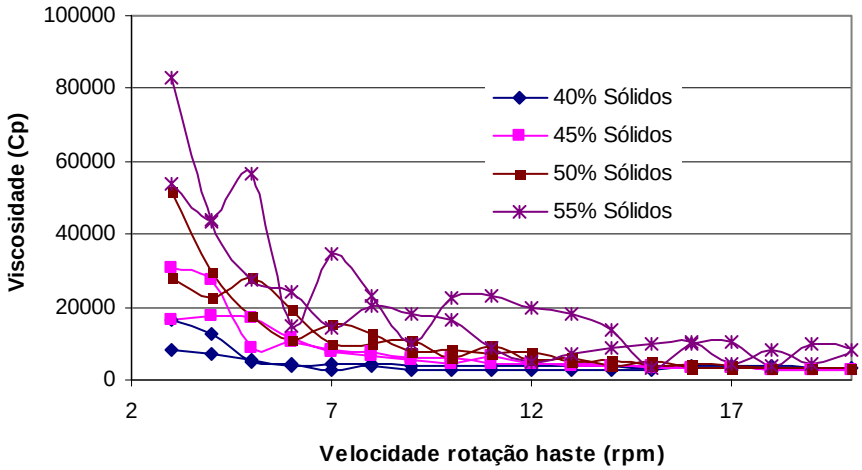


Figura 5.42: Ciclos reológicos das pastas de rejeito de manganês: 1 – 20 – 1 rpm.

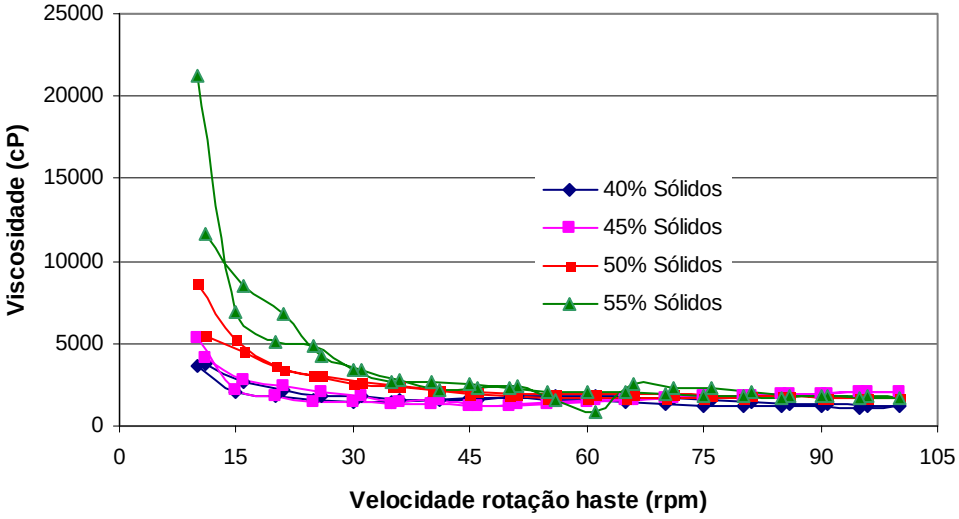


Figura 5.43: Ciclos reológicos das pastas de rejeito de manganês: 1 – 100 – 1 rpm.

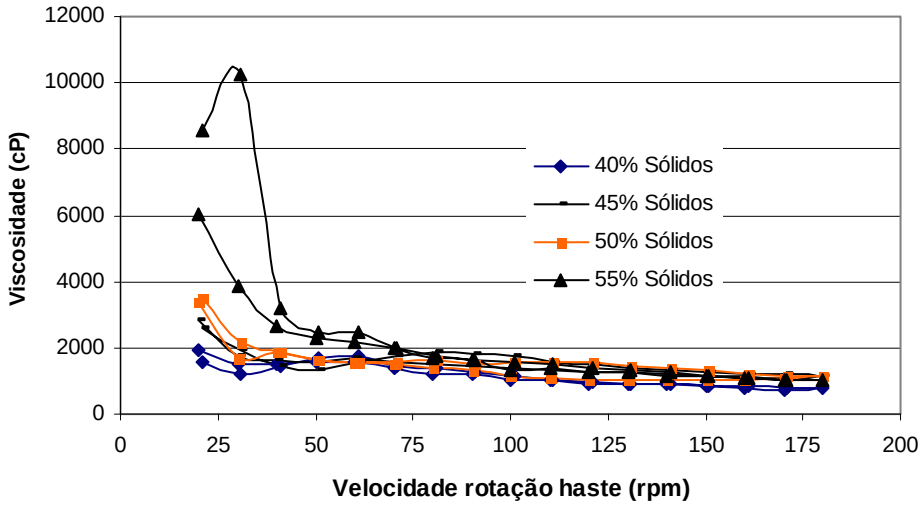


Figura 5.44: Ciclos reológicos das pastas de rejeito de manganês: 1 – 180 – 1 rpm.

Considerando-se as Figuras 5.42, 5.43 e 5.44 e os dados apresentados nas Tabelas do anexo 8, verifica-se que o comportamento reológico de todas as pastas estudadas apresenta um caráter misto ou duplo, tixotrópico e reotrópico. Observa-se, também, elevados valores de viscosidade exibidos pela pasta mais adensada com 55% de sólidos em massa. Os maiores valores de viscosidade foram registrados nas pastas submetidas ao ciclo reológico 1, que são da ordem dos 80000cP. No caso do ciclo 2 tem se menores valores de viscosidade aparente nas pastas com 40 e 45% de sólidos em massa da ordem dos 1150cP. Já os menores valores de viscosidade aparente correspondem ao ciclo 3 que são das pastas com 40 e 45% de sólidos em massa da ordem dos 720cP e 1080cP respectivamente.

Pode-se observar que a tendência geral do comportamento da viscosidade é de aumentar à medida que aumenta a porcentagem de sólidos em massa do sistema.

5.8.4. Tensão de Escoamento das Pastas Minerais ("Yield Stress").

Os resultados de "yield stress" feitos para diferentes adensamentos de sólidos são apresentados a seguir. Foram estudadas faixas de adensamento nas quais seu comportamento foi de pasta, segundo os resultados preliminares do teste abatimento, calha e viscosidade. Os parâmetros utilizados foram um incremento da base de

calibração em 1,70% com base de incremento de 200milisegundos e torque de redução de 100%. A haste utilizada foi a 73 que permite registrar valores de tensão de escoamento mais elevados.

As Tabelas de dados correspondentes aos testes são apresentadas no anexo 9. Na Tabela V.52 são apresentados os valores de cada teste e na Figura 5.55 são apresentados os resultados dos testes mencionados para cada concentração.

Tabela V.52: Resultados de testes de tensão de escoamento ("yield strees") das pastas minerais produzidas.

%Sólidos massa	40	45	50	55
Tensão de Escoamento (Pa)	40,55	52,89	67,29	98,99

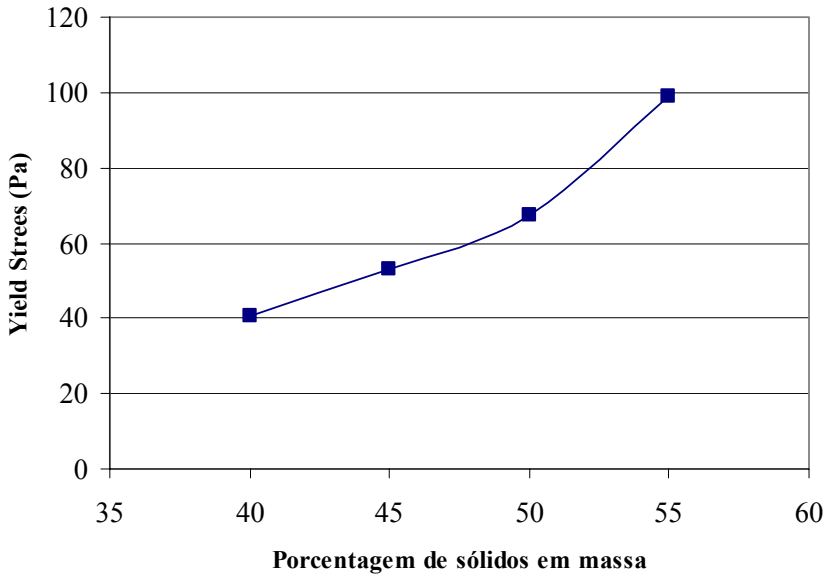


Figura 5.45: Yield strees para diferentes concentrações da pasta mineral.

Na Figura 5.45 pode-se observar que à medida que aumenta a concentração em massa da pasta mineral tem se também um aumento da tensão de escoamento, este comportamento se ajusta muito bem à seguinte equação polinomial de segunda ordem: $\mathbf{y = 0{,}1936x^2 - 14{,}598x + 315{,}46}$ com uma correlação igual a 0,9939.

6. CONCLUSÕES

De acordo com ánalise de microscopia eletrônica com EDS a composição química, da amostra sólida estudada apresenta os seguintes conteúdos de elementos: 21,8% Mn, 18,77% Fe, 28,04% Al, 30,16% Si e pequenas quantidade de potássio, sódio, magnésio e cálcio.

As análises por DRX e EIV indicaram a presença dos seguintes compostos ou espécies mineralógicas na amostra sólida: pirolusita, que seria a principal, e caulinita. Além disso, a análise vía DRX mostrou que a amostra tem pouca cristalinidade.

Cerca de 2/3 do material apresenta um tamanho inferior a 37um sendo 70% < 8 um. O anterior é ratificado pelos valores elevados da área superficial específica obtidos através dos métodos BET e de Blaine.

O valor da ASE obtido através da metodologia BET foi de 28,9628 (m^2/g), o qual é muito maior que aquele obtido via o método Blaine (0,893 m^2/g). Verifica-se na determinação da ASE por BET, que a isoterma resultante é próxima da tipo III, correspondente a formação de multicamadas, o que reduz a precisão do método.

A densidade determinada por picnômetro foi de 2,871(g/cm^3). No picnômetro a gás o valor obtido foi maior, 3,142(g/cm^3).

Nos testes de sedimentação descontinua em provetas de 2000ml o tempo mínimo requerido para alcançar o ponto de compressão é 2000s (40min).

A variação da velocidade de sedimentação nos testes de 2000ml em função da porcentagem de sólidos da polpa tem um comportamento linear, que se ajusta à equação: $y = -9E-05x + 0,0003$.

Dentro dos floculantes catiônicos o floculante BC630 foi o melhor. O efeito maior no aumento na velocidade só foi alcançado em dosagens muito elevadas (100g/t).

O floculante SA130 foi o melhor entre os aniônicos. O efeito sobre a velocidade de sedimentação se torna maior a partir de dosagens de cerca de 60g/t.

O floculante SN300 foi o melhor entre os não iônicos. Em dosagens não excessivamente elevadas (50g/t), obteve-se a maior velocidade de sedimentação.

Nos testes descontínuos a porcentagem de sólidos na descarga aumenta com o volume de polpa no equipamento para os diferentes tempos de residência. Sendo a melhor condição de operação para um tempo de residência de 10min com um volume de 4000ml.

Para uma dosagem de 75g/t de floculante SN300 nos testes descontinuos tem-se uma diminuição do porcentagem de sólidos na descarga.

A melhor condição de operação sem adição de floculante para a maior porcentagem de sólidos na descarga a partir de recirculação da polpa de 4000ml e tempo de residência igual a 10min foi a recirculação desde o bico 3 para o bico 1 com um valor de 55,6% de sólidos.

A melhor condição de operação com adição de floculante foi a recirculação da polpa de 4000ml desde o bico 4 para o bico 1 com um valor de 53,0% de sólidos.

Nos testes descontínuos sem floculante para um volume maior de 4000ml a porcentagem de sólidos na descarga aumenta com o volume de polpa no equipamento chegando a uma estabilização em 5000ml. A tendência se relaciona muito bem com a equação polinomial de ordem 5: $y = 4E\text{-}17x5 - 7E\text{-}13x4 + 4E\text{-}09x3 - 1E\text{-}05x2 + 0{,}0124x + 39{,}919$.

Para os testes descontínuos com floculantes para um volume maior de 4000ml o comportamento foi similar aos testes sem floculante, onde, relaciona-se muito bem com uma tendência polinomial de ordem 5: $y = -1E\text{-}17x5 + 3E\text{-}13x4 - 3E\text{-}09x3 + 2E\text{-}05x2 - 0{,}0263x + 57{,}643$.

Nos testes semicontínuos sem adição de floculante no volume de 7000ml de polpa a melhor condição de operação para o maior porcentagem de sólidos foi a partir da recirculação da polpa desde o bico 7 para o bico 1 com um valor de 56,7%.

Nos testes semicontínuos com adição de floculante no volume de 7000ml de polpa a melhor condição de operação foi com recirculação da polpa desde o bico 4 para o bico 1, com um valor de 53,7%.

Para testes contínuos o maior porcentagem de sólidos foi através da alimentação pelo bico 6 com 37,4% de sólidos.

Nos testes contínuos sem alimentação com espiral a melhor condição de operação foi para uma dosagem de 50g/t com 52,7% de sólidos, enquanto que com a utilização do gerador de floculos apresento um valor de 55,5% de sólidos para o mesmo dosagem.
O perfil de concentração com maior porcentagem de sólidos em toda a camada de mineral sem e com a utilização do gerador de flóculos foi para uma dosagem de 50g/t.

Existe uma etapa de transição de polpa para pasta na faixa entre 40% e 45% de sólidos em massa, ou seja, que para porcentagems maiores a 45% de sólidos se tem a presença de pasta mineral para este tipo de minério.

Nos testes de operação contínua com as melhores condições de operação, o maior valor atingido foi de 56,1% sólidos para um tempo de operação de 180min.

Segundo testes de abatimento o rejeito de manganês se apresenta como pasta na faixa de adensamento entre 48 e 56% de sólidos em massa.

Nos testes de calha valores superiores a 8 graus foram alcançados para a pasta preparada com 54,4% de sólidos, com uma consistência de pasta equivalente a um 33,6% de abatimento e sem considerar inclinação da calha. Tem-se que os ângulos de repouso aumentam com a diminuição da inclinação da calha.

O comportamento reológico de todas as pastas estudadas apresenta um caráter misto ou duplo,ou seja, tixotrópico e reotrópico. A tendência geral do comportamento da viscosidade é de aumentar à medida que aumenta a porcentagem de sólidos em massa do sistema.

A tensão de escoamento das pastas minerais aumenta à medida que aumenta a concentração de sólidos em massa, onde, a equação polinomial $y = 0{,}1936x^2 - 14{,}598x + 315{,}46$ de segundo ordem se ajusta muito bem ao comportamento desta propriedade reológica.

No aumento da concentração de sólidos das pastas minerais, tem-se: diminuição do porcentagem de abatimento, aumento da viscosidade e da tensão de escoamento. Enquanto que os ângulos de repouso aumentam com a diminuição da calha.

7. CONTRIBUIÇÕES ORIGINAIS AO CONHECIMENTO

Desenvolvimento de equipamento produtor de pasta mineral para utilização nos testes batch, semicontinuos e continuos.

Montagem de sistema gerador de flocos como forma de avaliar sua influença na produção de pasta mineral.

Utilizar o perfil de concentração de sólidos na coluna do equipamento para conhecer o comportamento deste na transição polpa-pasta mineral.

Relacionar a concentração de sólidos na descarga do equipamento com o volume e floculante, com a equação polinomial de ordem 5.

Conhecer o grau de incidencia da recirculação de polpa em diferentes condições, na produção de pasta mineral no equipamento

Avaliar as carateristicas reologicas das pastas minerias produzidas pelo equipamento.

8. RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos mostraram que o floculante não iônico SN300 foi o melhor para o rejeito de manganês, já que aumentaron significativamente a velocidade de sedimentação indicando que existe um potencial de uso deste para aplicação industrial.

A recirculação da polpa no sistema em determinadas condições de operação, aumento de forma significativa o porcentagem de sólidos na descarga, adição, e contirbuiu, em obter uma pasta mineral com carateristicas de maior consistencia.

O sistema gerador de flocos instalada na alimentação mostrou ser uma técnica boa que pode ser utilizada nos estudos de agregação de particulas finas de um sistema, com a obtenção de um produto mais denso.

Com os testes reologicos se constato que para este tipo de minério de manganês tem-se pasta mineral com valores superiores a 45% de sólidos.

O equipamento produtor de pasta mineral empregado neste trabalho pode ser utilizado para outros tipos de minérios e em outras áreas, tais como: recuperação de água de processo, meio ambiente, emtre outras.

9. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As principais sugestões relacionados com este trabalho seriam:

Realizar testes com outros minérios e reagentes utilizando o procedimento feito neste trabalho.

Medir as características reologicas das pastas produzidas com a montagem desenvolvida

Estudar a implementação de um sistema de aspas para remoção de ar e água preso no sedimento.

Estudar a influência do tamanho das partículas na produção da pasta mineral.

Instalação de um densimetro para control de porcentagem de sólidos na descarga do equipamento.

.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS MAIS RELEVANTES

AGRAWAL, S; NIGAM, K.D.P. Modelling of a Coiled Tubular Chemical reator. Chemical Engineering Journal, v. 84 , p. 437-444, 2001.

AMARATUNGA L.M; YASCHYSHYN D.N, Development of a high modulus paste fill using fine gold mill tailings, Geotechnical and Geological Engineering, Volume 15, Number 3, pp. 205-219(15),1997.

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

ASHLEY H.E. Theory of the settlement of slimes, Mining and Scientific Press, June 12, 1909.

BERGER, S, A, TALBOT, L, YAO, L, S. Flow in Curved Pipes. Annual Review of Fluid Mechanics, 15,p. 461-512,1983.

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.

BUCHANAN, I. D., NICELL, J.A.,WAGNER ,M. Reactor models for horseradish peroxidase-catalysed aromatic removal. Journal of Engineering, p. 794-802, 1998.

BUSTOS, M.C. and CONCHA, F., Simulation of batch sedimentation with compression, AIChE. J., 34,(5) 1988, 859-861.

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.

CARISSIMI, E. Desenvolvimento do Reator Gerador de flocos (RGF): Aspectos Teóricos e Aplicaçoes no Tratamento e Reúso de Águas e Efluentes. Dissertaçao de Doutorado PPGEM-UFRGS, Orientador: Prof. Jorge Rubio, 2007.

CASTRO, S. and CONCHA, F., Eds. Mineral Processing and Environment, Vol. 1, Universidad de Concepción, 1994, pp. 409.

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.

COE H.S. and CLEVENGER G.H., Methods for determining the capacity of slime-settling tanks, Trans AIME 55, 356-385, 1916.

COMING E.W., PRUISS C.E. and DEBORD C., Continuous settling and thickening, Ind. Eng. Chem. Des. Process Dev. 46 (6), 1164-1172, 1954.

CONCHA, F., Manual de Filtración y Separación, Ed. Centro de Imagen Corporativa Red Cettec, ISBN 956-291-042-3, July 2001.

CONCHA, F. and BUSTOS, M. C., Theory of sedimentation of flocculated particles, in Flocculation, Sedimentation and Consolidation, Ed. B.M. Moudgil and P. Somasundaran, AIChE., New York, 1985, 275-254.

CONCHA, F. and BUSTOS, M. C., A. Settling velocities of particulate systems. Part 6. Kynch sedimentation processes: Batch settling, Int. J. Mineral Process., 32, 1991, 193-212.

CONCHA, F. and BARRIENTOS, A., A Critical Review of thickener desing methods, KONA, 11, 1-26.1993.

COOLING, D. Improving the Sustainability of Residue Storage Practices. Dry Stacking of Residue of Alcoa World Alumina Australia, International Seminar on Paste and Thikened Tailings, Section 22 (2003).

COSTA, M. R. M e FIGUEREDO, R. C. (2001) Manganês, Balanço Mineral Brasileiro. DNPM.

ECKLUND L.G. and JERNQVIST A., Experimental study of the dynamics of vertical continuous thickener I, Chem. Eng. Sci. 30, 597-605, 1975.

ELMALEH, J.; JABBOURI, A. Flocculation Energy Requirement. Water Research, 25 (8), p. 939-943, 1991.

FITCH E.B. and STEVENSON D.G., Gravity separation equipment. In solid separation equipment Scale-up, Ed. D.B. Purchas, Uplands Press Ltd., Croydon, England, 1977.

FREE, E.E. Rate of slime settling, Eng. Mining J. 101.1912 243,429,509,681.

FREITAS, L. F e LUZ, A. B e. (2005) ROCHAS & MINERAIS INDUSTRIAIS: Usos e Especificações. Centro de Tecnologia Mineral – CETEM/MCT, p515-528.

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.

GREGORY J. In: Ives KJ (ed) The scientific basis on flocculation, Sijthoff and Noordhoff, Netherlands, 1978.

GREGORY J. Polymer adsorption and flocculation in Sheared Suspension. Colloids and Surfaces, 31, p. 231-253, 1988.

HARBEN, P. W. e KUZVART, M. (1996) Industrial Minerals – A Global Geology, 462 p., p.247-257.

HAROLD. A. e TAYLOR JR. (1994) Manganese minerals. In: Industrial Minerals and Rocks, 6th Edition, D. D. Carr (Senior Editor), Society of Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. Littleton, Colorado, 1196p., p.655-660.

HERNANDEZ, C. A. O. Caracterizaçao de Pastas Minerais, Dissertaçao de Mestrado do Cpgem, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil. Fevereiro de 2005.

HERNANDEZ, C. A. O., ARAUJO, A. C., VALADÂO, G. E. S., AMARANTE, S. C. Pasting Characterics of Hematite/Quartz System. In: SOLID LIQUID SEPARATION, NOV.-2004, Cape Town – África do Sul, Apresentaçoes digitais. Cape Town, Nov.-2004.

HOUMAN, J., JHONSON, G. "Commissioning and Operation of the Paste Thickening Farm at Kimberley Combined Treatment Plant", International Seminar on Paste and Thickened Tailings, Melbourne, 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.

JEWELL, R. “An Introduction to Thickened Tailings Applications”. Australian Centre for Geomechanics. International Seminar on Paste and Thikened Tailings, Section 1 (2003).

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, Brazil, April – 2002, p. 1 – 34.

KWAK, M., JAMES, D. and KLEIN, K. Flow behaviour of tailings paste for surface disposal. Mineral Processing, 139-153, 2005.

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.

MISHLER R.T., Settling slimes at the Tigre Mill, Eng. Mining JI. 94 (14),p. 643-646,1917.

NICHOLS, H.G. Theory of settlement of slimes. Mining and scientific Press, July 11, 1908, p. 54-56.

ODEGARD, H., GRUTLE, S., RATNAWEERA, H. An analysis of floc separation characteristics in chemical wastewater treatment. Chemical Water and Wastewater Treatment II. Anais…5th Gothenburg Symposium, Nice-França. Eds. R. Klute e H.Hahn, p.247-262, 1992.

PEARSE, M.J. Historical use and future development of chemicals for solid-liquid separation in the mineral processing industry. Minerals Engineering, 103-108, 2003.

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.

SAMPAIO, J. A. e PENNA, M. T. M. (2001). Manganês-CVRD/Mina do Azul. In: Usinas de Beneficiamento de Minérios do Brasil. Sampaio, J. A; Luz, A. B. da e Lins, F. F. (Editores). Centro de Tecnologia Mineral – CETEM/MCT, p49-60.

SHANNON P.T. and TORY E.M., The analysis of continuous thickeninig, Trans. AIME 235, 375-382, 1966.

SHARMA B.R, DHULDHOYA and MERCHANT U.C, Flocculants an Ecofriendly Approach, Journal of Polymers and the Environment, 4 may-2006.

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

SLOTTEE, S., JHONSON, J. ,CROZIER, M. Paste Thickening Iron Ore Tailings. In: XXXV SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO E MATÉRIAS PRIMAS, VI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO, 30 Agosto a 2 Setembro de 2005 Florianópolis - Santa Catarina-Brasil, p. 904-911.

STREETER, V.L. Handbook of fluid dynamics. McGraw-Hill Book Company, Inc, New York, 1st Edition, 1961.

THERIAULT, J. A., FROSTIAK, J., WELCH, D. Surface Disposal of Paste Tailigns at the Bulyanhulu Gold Mine, Tanzania, 2001, p.1-8.

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.