

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**

**“TRATABILIDADE DO LODO DE
DECANTADORES CONVENCIONAL E DE ALTA
TAXA”**

ARCHIMEDES P. SILVA JUNIOR

Campinas

2003

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

**“TRATABILIDADE DO LODO DE DECANTADORES
CONVENCIONAL E DE ALTA TAXA”**

Archimedes P. Silva Junior

Orientador: Prof. Dr. Ricardo de Lima Isaac

Dissertação de Mestrado apresentada à Comissão de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Saneamento e Ambiente.

Campinas

2003

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

**“TRATABILIDADE DO LODO DE DECANTADORES
CONVENCIONAL E DE ALTA TAXA”**

Archimedes P. Silva Junior

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

Prof. Dr. Ricardo de Lima Isaac
Presidente e Orientador – FEC/Unicamp

Prof. Dr. Pedro Alem Sobrinho
Escola Politécnica/USP

Prof^a. Dr^a. Dione Mari Morita
FEC/Unicamp

Campinas, 26 de fevereiro de 2003

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Si38t Silva Junior, Archimedes Pereira da
 Tratabilidade do lodo de decantadores convencional
 e de alta taxa / Archimedes Pereira da Silva Junior. --
 Campinas, SP: [s.n.], 2003.

 Orientador: Ricardo de Lima Isaac.

 Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
 Campinas, Faculdade de Engenharia Civil.

 1. Lodo. 2. Centrifugação. 3. Polímeros solúveis em
 água. 4. Água estações de tratamento. I. Isaac,
 Ricardo de Lima. II. Universidade Estadual de
 Campinas. Faculdade de Engenharia Civil. III. Título.

DEDICATÓRIA

**Dedico este trabalho aos meus pais,
Archimedes e Eliana.**

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Ricardo de Lima Isaac pela orientação.

Aos meus pais Archimedes e Eliana, e a minha irmã Elen pelo apoio e incentivo durante a realização deste trabalho. Palavras não são suficientes para expressar o quanto sou grato: MUITO OBRIGADO.

Às amigas Carla e Laura, pessoas com as quais convivo desde minha infância, sempre se fizeram presentes na minha vida e com quem tenho a honra do convívio até os dias de hoje. Obrigado por poder chamá-las de AMIGAS.

À Patrícia pela amizade e companheirismo, pelas inúmeras viagens Lins-Campinas e pelo apoio e incentivo durante o Mestrado. Iniciamos o curso junto e hoje concluímos mais uma etapa.

Aos amigos Lígia, Vanessinha, Fernando, Vicente, Zezé, Patrícia, Vivi, Marcos pelos churrascos, viagens, jantares e principalmente pela amizade.

Aos colegas de república Luis Rômulo, Zé Luis, Gener, Marcão, Carlão e Ovídio pela amizade e companheirismo.

Aos colegas do Laboratório de Saneamento da FEC/UNICAMP Enelton, Edmar, Alexandre, Fabião, Adriano, Marta, Carol, Fernando, Gláucia, Maíra, Andréa, Fernanda, Kelly pela amizade, ajuda e companhia durante a realização os ensaios da fase experimental.

À FAPESP, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo suporte financeiro para realização desta pesquisa.

Aos funcionários da SANASA que trabalham nas ETAs 3 e 4, na cidade de Campinas, pela colaboração e ajuda durante as coletas de lodo.

Aos funcionários da FEC/UNICAMP do Setor de Apoio Operacional, Saul, Rosângela e Aguinaldo, pelo auxílio com transporte para as coletas de lodo.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para realização deste trabalho.

“Que os nossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes proezas da história foram conquistas do que pareciam impossíveis”.

Charlie Chaplin

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	XII
LISTA DE TABELAS	XIX
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	XXI
RESUMO	XXV
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS	4
3 REVISÃO DA LITERATURA.....	5
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	5
3.2 GERAÇÃO DE LODOS NAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA.....	6
3.2.1 ORIGEM DOS LODOS	6
3.2.2 CARACTERÍSTICA DOS LODOS	11
3.3 QUANTIDADE DE LODO PRODUZIDO	31
3.4 VELOCIDADE DE SEDIMENTAÇÃO	34
3.5 TRATAMENTO DO LODO	39
3.5.1 ADENSAMENTO	40
3.5.2 CONDICIONAMENTO	46

3.5.3	DESAGUAMENTO.....	53
3.6	DISPOSIÇÃO FINAL DO LODO	62
4	METODOLOGIA.....	64
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	64
4.2	AMOSTRAGEM DE LODO	68
4.3	POLÍMEROS ORGÂNICOS SINTÉTICOS.....	68
4.4	FASE I: DETERMINAÇÃO DO POLÍMERO A SER UTILIZADO NO ADENSAMENTO POR GRAVIDADE.....	69
4.5	FASE II: DETERMINAÇÃO DA CONDIÇÃO ÓTIMA DE ADENSAMENTO DO LODO	73
4.6	FASE III: DESAGUAMENTO DO LODO POR CENTRIFUGAÇÃO.....	79
4.6.1	PREPARO DO LODO ADENSADO PARA ENSAIO DE DESAGUAMENTO	79
4.6.2	AVALIAÇÃO DO DESAGUAMENTO POR CENTRIFUGAÇÃO DO LODO PRÉ-ADENSADO ..	83
4.7	VELOCIDADE DE SEDIMENTAÇÃO	84
5	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE Dos RESULTADOS.....	86
5.1	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ADENSAMENTO POR GRAVIDADE EM COLUNAS DE SEDIMENTAÇÃO – FASE I.....	87
5.1.1	PERÍODO DE CHUVAS.....	87
5.1.2	PERÍODO DE ESTIAGEM.....	93
5.2	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES ÓTIMAS DE ADENSAMENTO DO LODO – FASE II	98
5.2.1	PERÍODO DE CHUVAS.....	98
5.2.2	PERÍODO DE ESTIAGEM.....	106
5.3	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DESAGUAMENTO POR CENTRÍFUGA	113
5.3.1	PERÍODO DE CHUVAS.....	113
5.3.2	PERÍODO DE ESTIAGEM.....	121
6	CONCLUSÕES.....	130
7	ANEXOS.....	132
7.1	ANEXO A: FASE I – DETERMINAÇÃO DO POLÍMERO A SER UTILIZADO NO ADENSAMENTO POR GRAVIDADE	133

7.1.1	PERÍODO DE ESTIAGEM.....	133
7.2	ANEXO B: FASE II – DETERMINAÇÃO DA CONDIÇÃO ÓTIMA DE ADENSAMENTO DO LODO	135
7.2.1	PERÍODO DE CHUVAS.....	135
7.2.2	PERÍODO DE ESTIAGEM.....	137
7.3	ANEXO C: FASE III – DESAGUAMENTO DO LODO POR CENTRIFUGAÇÃO	140
7.3.1	PERÍODO DE CHUVAS.....	140
7.3.2	PERÍODO DE ESTIAGEM.....	145
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	150
	ABSTRACT.....	156

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1 – ESQUEMA TÍPICO DE DESAGUAMENTO NATURAL DE LODO EM ETA.	10
FIGURA 3.2 – ESQUEMA TÍPICO DE DESAGUAMENTO MECÂNICO DE LODO EM ETA.	10
FIGURA 3.3 – VARIAÇÃO NA RESISTÊNCIA AO CISLHAMENTO EM FUNÇÃO DO TEOR DE UMIDADE.	22
FIGURA 3.4 – VARIAÇÃO DA TENSÃO DE CISLHAMENTO E DA VISCOSIDADE EM FUNÇÃO DO TEOR DE UMIDADE.	23
SEDIMENTABILIDADE.....	29
FIGURA 3.5 – DISTRIBUIÇÃO DA ÁGUA NO FLOCO DE LODO.....	31
FIGURA 3.6 – DIAGRAMA DAS UNIDADES DO PROCESSO DE TRATAMENTO DO LODO.	40
FIGURA 3.7 – EXEMPLO ESQUEMÁTICO DE ADENSADOR POR GRAVIDADE.....	41
FIGURA 3.8 – CURVA TÍPICA DO ESPESSAMENTO DE LODO EM COLUNA DE SEDIMENTAÇÃO.	44
FIGURA 3.9 – PROCEDIMENTOS GRÁFICOS PROPOSTOS POR TALMADGE E FITCH.	44
FIGURA 3.10 – EXEMPLO ESQUEMÁTICO DE ADENSADOR POR FLOTAÇÃO.....	46
FIGURA 3.11 – ESQUEMA DE CENTRÍFUGA COM EIXO HORIZONTAL.	56
FIGURA 3.12 – CORTE EM PERSPECTIVA MOSTRANDO INTERIOR DE UMA CENTRÍFUGA DE EIXO HORIZONTAL.	56
FIGURA 3.13 – ESQUEMA DE UM SISTEMA DE DESAGUAMENTO CONTÍNUO.	57
FIGURA 3.14 – ESQUEMA TÍPICO DO FUNCIONAMENTO DE UM FILTRO PRENSA DE PLACAS.....	58
FIGURA 3.15 – ETAPAS DE OPERAÇÃO DE UMA PRENSA DESAGUADORA.	59
FIGURA 3.16 – CONSTRUÇÃO TÍPICA DE UM LEITO DE SECAGEM DE AREIA.	60

FIGURA 4.1 – LOCALIZAÇÃO DAS ETAS E DOS PONTOS DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA NO MUNICÍPIO DE CAMPINAS	64
FIGURA 4.2 – FOTOGRAFIA AÉREA DAS ETAS 3 E 4 DA SANASA NA CIDADE DE CAMPINAS/SP	65
FIGURA 4.3 – FOTOGRAFIA AÉREA DO PONTO DE CAPTAÇÃO DA ÁGUA BRUTA NO RIO ATIBAIA	65
FIGURA 4.4 – APLICAÇÃO DE CARVÃO ATIVADO EM PÓ À ÁGUA BRUTA (ETAS 3 E 4).....	66
FIGURA 4.5 – APLICAÇÃO DE CLORETO FÉRRICO (COAGULANTE).....	66
FIGURA 4.6 – HOMOGENEIZAÇÃO DO LODO BRUTO	71
FIGURA 4.7 – APLICAÇÃO DE POLÍMERO AO LODO BRUTO.....	72
FIGURA 4.8 – TRANSFERÊNCIA DO LODO FLOCULADO PARA A COLUNA DE SEDIMENTAÇÃO	72
FIGURA 4.9 – SISTEMA DE BANCADA PARA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE ADENSAMENTO POR GRAVIDADE.....	74
FIGURA 4.10 – COLUNAS DE SEDIMENTAÇÃO	75
FIGURA 4.11 – PONTOS LATERAIS PARA COLETA DE SOBRENADANTE	75
FIGURA 4.12 – DESCARGA DE FUNDO DAS COLUNAS	76
FIGURA 4.13 – INSTALAÇÃO PARA PROMOVER A MISTURA DO POLÍMERO AO LODO BRUTO	77
FIGURA 4.14 – AGITADOR MECÂNICO E RECIPIENTE PARA CONDICIONAMENTO DO LODO ADENSADO .	81
FIGURA 4.15 – SISTEMA DE BANCADA PARA EXECUÇÃO DOS ENSAIOS PRELIMINARES DE DESAGUAMENTO DO LODO	82
FIGURA 4.16 – CENTRÍFUGA DE LABORATÓRIO COM ALIMENTAÇÃO POR BATELADA.	82
FIGURA 5.1 - CURVAS DE ADENSAMENTO POR GRAVIDADE ASSOCIADA A DIFERENTES POLÍMEROS REFERENTES A ENSAIO REALIZADO PARA LODO DA ETA 3 NO PERÍODO DE CHUVAS.	89
FIGURA 5.2 - CURVAS DE ADENSAMENTO POR GRAVIDADE PARA LODO DA ETA 3 EM ESCALA AMPLIADA.	89
FIGURA 5.3 - CURVAS DE ADENSAMENTO POR GRAVIDADE ASSOCIADA A DIFERENTES POLÍMEROS REFERENTES A ENSAIO REALIZADO PARA LODO DA ETA 4 NO PERÍODO DE CHUVAS.	91
FIGURA 5.4 - CURVAS DE ADENSAMENTO POR GRAVIDADE PARA LODO DA ETA 4 EM ESCALA AMPLIADA.	92
FIGURA 5.5 - CURVAS DE ADENSAMENTO POR GRAVIDADE ASSOCIADA A DIFERENTES POLÍMEROS REFERENTES A ENSAIO REALIZADO PARA O LODO DA ETA 3 – ENSAIO 3.....	94
FIGURA 5.6 - CURVAS DE ADENSAMENTO POR GRAVIDADE ASSOCIADA A DIFERENTES POLÍMEROS REFERENTES A ENSAIO REALIZADO PARA O LODO DA ETA 4 – ENSAIO 2.....	97
FIGURA 5.7 - CURVAS DE ADENSAMENTO POR GRAVIDADE ASSOCIADA A DIFERENTES TEMPOS DE MISTURA DO POLÍMERO 2 REFERENTES A ENSAIO REALIZADO COM DOSAGEM DE 2 G/KG DE SST PARA ETA 3.	100

FIGURA 5.8 - CURVAS DE ADENSAMENTO POR GRAVIDADE ASSOCIADA A DIFERENTES TEMPOS DE MISTURA DO POLÍMERO 2 REFERENTES A ENSAIO REALIZADO COM DOSAGEM DE 2 G/KG DE SST PARA ETA 4.	102
FIGURA 5.9 – CURVAS DE ADENSAMENTO POR GRAVIDADE ASSOCIADA A DIFERENTES DOSAGENS DO POLÍMERO 4 REFERENTES A ENSAIO REALIZADO COM TEMPO DE MISTURA DE 30 S – ETA 3. ...	105
FIGURA 5.10 – CURVAS DE ADENSAMENTO POR GRAVIDADE ASSOCIADA A DIFERENTES DOSAGENS DO POLÍMERO 4 REFERENTES A ENSAIO REALIZADO COM TEMPO DE MISTURA DE 15 S – ETA 4. ...	106
FIGURA 5.11 - CURVAS DE ADENSAMENTO POR GRAVIDADE ASSOCIADA A DIFERENTES TEMPOS DE MISTURA DO POLÍMERO 5 REFERENTES A ENSAIO REALIZADO COM DOSAGEM DE 2 G/KG DE SST PARA ETA 3.	108
FIGURA 5.12 – CURVAS DE ADENSAMENTO POR GRAVIDADE ASSOCIADA A DIFERENTES DOSAGENS DO POLÍMERO 1 REFERENTES A ENSAIO REALIZADO COM TEMPO DE MISTURA DE 45 S – ETA 3. ...	112
FIGURA 5.13 – CURVAS DE ADENSAMENTO POR GRAVIDADE ASSOCIADA A DIFERENTES DOSAGENS DO POLÍMERO 1 REFERENTES A ENSAIO REALIZADO COM TEMPO DE MISTURA DE 60 S – ETA 4. ...	112
FIGURA 5.14 - CURVAS DA VARIAÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO DO AGITADO MECÂNICO PARA DIFERENTES TEMPOS DE MISTURA DO POLÍMERO 1 REFERENTES A ENSAIO REALIZADO COM DOSAGEM DE 1 G/KG DE SST PARA ETA 3 – ENSAIO 1.	114
FIGURA 5.15 – VARIAÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS EM FUNÇÃO DA DOSAGEM DE POLÍMERO CATIONICO PARA O LODO DA ETA 3 NO PERÍODO DE CHUVAS.	116
FIGURA 5.16 - CURVAS DE CENTRIFUGAÇÃO OBTIDAS EM ENSAIOS COM DIFERENTES ROTAÇÕES DA CENTRÍFUGA, PARA LODO ADENSADO E PRÉ-CONDICIONADO DA ETA 3.	117
FIGURA 5.18 - CURVAS DA VARIAÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO DO AGITADOR MECÂNICO PARA DIFERENTES TEMPOS DE MISTURA DO POLÍMERO 1 REFERENTES A ENSAIO REALIZADO COM DOSAGEM DE 1 G/KG DE SST PARA ETA 4 – ENSAIO 2.	118
FIGURA 5.18 – VARIAÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS EM FUNÇÃO DA DOSAGEM DE POLÍMERO CATIONICO PARA O LODO DA ETA 4 NO PERÍODO DE CHUVAS.	119
FIGURA 5.19 - CURVAS DE CENTRIFUGAÇÃO OBTIDAS EM ENSAIOS COM DIFERENTES ROTAÇÕES DA CENTRÍFUGA, PARA LODO ADENSADO E PRÉ-CONDICIONADO DA ETA 4, CHUVAS (ST=21,9%).	120
FIGURA 5.20 - CURVAS DE CENTRIFUGAÇÃO OBTIDAS EM ENSAIOS COM DIFERENTES ROTAÇÕES DA CENTRÍFUGA, PARA LODO ADENSADO E PRÉ-CONDICIONADO DA ETA 4, CHUVAS (ST=9,4%).	120
FIGURA 5.21 - CURVAS DA VARIAÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO DO AGITADOR MECÂNICO PARA DIFERENTES TEMPOS DE MISTURA DO POLÍMERO 1 REFERENTES A ENSAIO REALIZADO COM DOSAGEM DE 1 G/KG DE SST PARA ETA 3 – ENSAIO 1.	121

FIGURA 5.22 – VARIAÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS EM FUNÇÃO DA DOSAGEM DE POLÍMERO CATIÔNICO PARA O LODO DA ETA 3 NO PERÍODO DE ESTIAGEM.	123
FIGURA 5.23 - CURVAS DE CENTRIFUGAÇÃO OBTIDAS EM ENSAIOS COM DIFERENTES ROTAÇÕES DA CENTRÍFUGA, PARA LODO ADENSADO E PRÉ-CONDICIONADO DA ETA 3 – PERÍODO DE ESTIAGEM.	124
FIGURA 5.24 - CURVAS DA VARIAÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO DO AGITADOR MECÂNICO PARA DIFERENTES TEMPOS DE MISTURA DO POLÍMERO 1 REFERENTES A ENSAIO REALIZADO COM DOSAGEM DE 1 G/KG DE SST PARA ETA 4 – ENSAIO 1.	125
FIGURA 5.25 – VARIAÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS EM FUNÇÃO DA DOSAGEM DE POLÍMERO CATIÔNICO PARA O LODO DA ETA 4 NO PERÍODO DE ESTIAGEM.	127
FIGURA 5.26 - CURVAS DE CENTRIFUGAÇÃO OBTIDAS EM ENSAIOS COM DIFERENTES ROTAÇÕES DA CENTRÍFUGA, PARA LODO ADENSADO E PRÉ-CONDICIONADO DA ETA 4, ESTIAGEM (ST=29,4%).	128
FIGURA 5.27 - CURVAS DE CENTRIFUGAÇÃO OBTIDAS EM ENSAIOS COM DIFERENTES ROTAÇÕES DA CENTRÍFUGA, PARA LODO ADENSADO E PRÉ-CONDICIONADO DA ETA 4, ESTIAGEM (ST=13,1%)	128
FIGURA 7.1 - CURVAS DE ADENSAMENTO POR GRAVIDADE ASSOCIADA A DIFERENTES POLÍMEROS REFERENTES A ENSAIO REALIZADO PARA O LODO DA ETA 3 – ENSAIO 1.	133
FIGURA 7.2 - CURVAS DE ADENSAMENTO POR GRAVIDADE ASSOCIADA A DIFERENTES POLÍMEROS REFERENTES A ENSAIO REALIZADO PARA O LODO DA ETA 3 – ENSAIO 2.	133
FIGURA 7.3 - CURVAS DE ADENSAMENTO POR GRAVIDADE ASSOCIADA A DIFERENTES POLÍMEROS REFERENTES A ENSAIO REALIZADO PARA O LODO DA ETA 4 – ENSAIO 1.	134
FIGURA 7.4 - CURVAS DE ADENSAMENTO POR GRAVIDADE ASSOCIADA A DIFERENTES POLÍMEROS REFERENTES A ENSAIO REALIZADO PARA O LODO DA ETA 4 – ENSAIO 3.	134
FIGURA 7.5 - CURVAS DE ADENSAMENTO POR GRAVIDADE ASSOCIADA A DIFERENTES TEMPOS DE MISTURA DO POLÍMERO 4 REFERENTES A ENSAIO REALIZADO COM DOSAGEM DE 2 G/KG DE SST PARA ETA 3.	135
FIGURA 7.6 - CURVAS DE ADENSAMENTO POR GRAVIDADE ASSOCIADA A DIFERENTES TEMPOS DE MISTURA DO POLÍMERO 4 REFERENTES A ENSAIO REALIZADO COM DOSAGEM DE 2 G/KG DE SST PARA ETA 4.	135
FIGURA 7.7 – CURVAS DE ADENSAMENTO POR GRAVIDADE ASSOCIADA A DIFERENTES DOSAGENS DO POLÍMERO 2 REFERENTES A ENSAIO REALIZADO COM TEMPO DE MISTURA DE 30 S – ETA 3. ...	136
FIGURA 7.8 – CURVAS DE ADENSAMENTO POR GRAVIDADE ASSOCIADA A DIFERENTES DOSAGENS DO POLÍMERO 2 REFERENTES A ENSAIO REALIZADO COM TEMPO DE MISTURA DE 15 S – ETA 4. ...	136

FIGURA 7.9 - CURVAS DE ADENSAMENTO POR GRAVIDADE ASSOCIADA A DIFERENTES TEMPOS DE MISTURA DO POLÍMERO 1 REFERENTES A ENSAIO REALIZADO COM DOSAGEM DE 2 G/KG DE SST PARA ETA 3.	137
FIGURA 7.10 - CURVAS DE ADENSAMENTO POR GRAVIDADE ASSOCIADA A DIFERENTES TEMPOS DE MISTURA DO POLÍMERO 1 REFERENTES A ENSAIO REALIZADO COM DOSAGEM DE 2 G/KG DE SST PARA ETA 4.	137
FIGURA 7.11 - CURVAS DE ADENSAMENTO POR GRAVIDADE ASSOCIADA A DIFERENTES TEMPOS DE MISTURA DO POLÍMERO 5 REFERENTES A ENSAIO REALIZADO COM DOSAGEM DE 2 G/KG DE SST PARA ETA 4.	138
FIGURA 7.12 – CURVAS DE ADENSAMENTO POR GRAVIDADE ASSOCIADA A DIFERENTES DOSAGENS DO POLÍMERO 5 REFERENTES A ENSAIO REALIZADO COM TEMPO DE MISTURA DE 45 S – ETA 3. ...	138
FIGURA 7.13 – CURVAS DE ADENSAMENTO POR GRAVIDADE ASSOCIADA A DIFERENTES DOSAGENS DO POLÍMERO 5 REFERENTES A ENSAIO REALIZADO COM TEMPO DE MISTURA DE 60 S – ETA 4. ...	139
FIGURA 7.14 - CURVAS DA VARIAÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO DO AGITADO MECÂNICO PARA DIFERENTES TEMPOS DE MISTURA DO POLÍMERO 1 REFERENTES A ENSAIO REALIZADO COM DOSAGEM DE 1 G/KG DE SST PARA ETA 3 – ENSAIO 2.	140
FIGURA 7.15 - CURVAS DA VARIAÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO DO AGITADO MECÂNICO PARA DIFERENTES TEMPOS DE MISTURA DO POLÍMERO 1 REFERENTES A ENSAIO REALIZADO COM DOSAGEM DE 1 G/KG DE SST PARA ETA 3 – ENSAIO 3.	140
FIGURA 7.16 - CURVAS DA VARIAÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO DO AGITADO MECÂNICO PARA DIFERENTES TEMPOS DE MISTURA DO POLÍMERO 2 REFERENTES A ENSAIO REALIZADO COM DOSAGEM DE 1 G/KG DE SST PARA ETA 3 – ENSAIO 1.	141
FIGURA 7.17 - CURVAS DA VARIAÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO DO AGITADO MECÂNICO PARA DIFERENTES TEMPOS DE MISTURA DO POLÍMERO 2 REFERENTES A ENSAIO REALIZADO COM DOSAGEM DE 1 G/KG DE SST PARA ETA 3 – ENSAIO 2.	141
FIGURA 7.18 - CURVAS DA VARIAÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO DO AGITADO MECÂNICO PARA DIFERENTES TEMPOS DE MISTURA DO POLÍMERO 2 REFERENTES A ENSAIO REALIZADO COM DOSAGEM DE 1 G/KG DE SST PARA ETA 3 – ENSAIO 3.	142
FIGURA 7.19 - CURVAS DA VARIAÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO DO AGITADO MECÂNICO PARA DIFERENTES TEMPOS DE MISTURA DO POLÍMERO 1 REFERENTES A ENSAIO REALIZADO COM DOSAGEM DE 1 G/KG DE SST PARA ETA 4 – ENSAIO 1.	142
FIGURA 7.20 - CURVAS DA VARIAÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO DO AGITADO MECÂNICO PARA DIFERENTES TEMPOS DE MISTURA DO POLÍMERO 1 REFERENTES A ENSAIO REALIZADO COM DOSAGEM DE 1 G/KG DE SST PARA ETA 4 – ENSAIO 3.	143

FIGURA 7.21 - CURVAS DA VARIAÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO DO AGITADO MECÂNICO PARA DIFERENTES TEMPOS DE MISTURA DO POLÍMERO 2 REFERENTES A ENSAIO REALIZADO COM DOSAGEM DE 1 G/KG DE SST PARA ETA 4 – ENSAIO 1. 143

FIGURA 7.22 - CURVAS DA VARIAÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO DO AGITADO MECÂNICO PARA DIFERENTES TEMPOS DE MISTURA DO POLÍMERO 2 REFERENTES A ENSAIO REALIZADO COM DOSAGEM DE 1 G/KG DE SST PARA ETA 4 – ENSAIO 2. 144

FIGURA 7.23 - CURVAS DA VARIAÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO DO AGITADO MECÂNICO PARA DIFERENTES TEMPOS DE MISTURA DO POLÍMERO 2 REFERENTES A ENSAIO REALIZADO COM DOSAGEM DE 1 G/KG DE SST PARA ETA 4 – ENSAIO 3. 144

FIGURA 7.24 - CURVAS DA VARIAÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO DO AGITADO MECÂNICO PARA DIFERENTES TEMPOS DE MISTURA DO POLÍMERO 1 REFERENTES A ENSAIO REALIZADO COM DOSAGEM DE 1 G/KG DE SST PARA ETA 3 – ENSAIO 2. 145

FIGURA 7.25 - CURVAS DA VARIAÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO DO AGITADO MECÂNICO PARA DIFERENTES TEMPOS DE MISTURA DO POLÍMERO 1 REFERENTES A ENSAIO REALIZADO COM DOSAGEM DE 1 G/KG DE SST PARA ETA 3 – ENSAIO 3. 145

FIGURA 7.26 - CURVAS DA VARIAÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO DO AGITADO MECÂNICO PARA DIFERENTES TEMPOS DE MISTURA DO POLÍMERO 2 REFERENTES A ENSAIO REALIZADO COM DOSAGEM DE 1 G/KG DE SST PARA ETA 3 – ENSAIO 1. 146

FIGURA 7.27 - CURVAS DA VARIAÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO DO AGITADO MECÂNICO PARA DIFERENTES TEMPOS DE MISTURA DO POLÍMERO 2 REFERENTES A ENSAIO REALIZADO COM DOSAGEM DE 1 G/KG DE SST PARA ETA 3 – ENSAIO 2. 146

FIGURA 7.28 - CURVAS DA VARIAÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO DO AGITADO MECÂNICO PARA DIFERENTES TEMPOS DE MISTURA DO POLÍMERO 2 REFERENTES A ENSAIO REALIZADO COM DOSAGEM DE 1 G/KG DE SST PARA ETA 3 – ENSAIO 3. 147

FIGURA 7.29 - CURVAS DA VARIAÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO DO AGITADO MECÂNICO PARA DIFERENTES TEMPOS DE MISTURA DO POLÍMERO 1 REFERENTES A ENSAIO REALIZADO COM DOSAGEM DE 1 G/KG DE SST PARA ETA 4 – ENSAIO 2. 147

FIGURA 7.30 - CURVAS DA VARIAÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO DO AGITADO MECÂNICO PARA DIFERENTES TEMPOS DE MISTURA DO POLÍMERO 1 REFERENTES A ENSAIO REALIZADO COM DOSAGEM DE 1 G/KG DE SST PARA ETA 4 – ENSAIO 3. 148

FIGURA 7.31 - CURVAS DA VARIAÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO DO AGITADO MECÂNICO PARA DIFERENTES TEMPOS DE MISTURA DO POLÍMERO 2 REFERENTES A ENSAIO REALIZADO COM DOSAGEM DE 1 G/KG DE SST PARA ETA 4 – ENSAIO 1. 148

FIGURA 7.32 - CURVAS DA VARIAÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO DO AGITADO MECÂNICO PARA DIFERENTES TEMPOS DE MISTURA DO POLÍMERO 2 REFERENTES A ENSAIO REALIZADO COM DOSAGEM DE 1 G/KG DE SST PARA ETA 4 – ENSAIO 2. 149

FIGURA 7.33 - CURVAS DA VARIAÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO DO AGITADO MECÂNICO PARA DIFERENTES TEMPOS DE MISTURA DO POLÍMERO 2 REFERENTES A ENSAIO REALIZADO COM DOSAGEM DE 1 G/KG DE SST PARA ETA 4 – ENSAIO 3. 149

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 - CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DOS LODOS GERADOS EM ETAS.	14
TABELA 3.2 – PARÂMETROS NÃO CONVENCIONAIS PARA LODO DE ETA.	15
TABELA 3.3 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS LODOS GERADOS EM ETAS.	15
TABELA 3.4 – RESUMO DA DENSIDADE DO FLOCO E DO TEOR DE SÓLIDOS NA TORTA DESIDRATADA PARA VÁRIOS TIPOS DE LODO.	25
TABELA 3.5 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E QUÍMICAS DOS LODOS DE ETAS.	29
TABELA 3.6 – TEOR DE SÓLIDOS NO LODO APÓS O DESAGUAMENTO.	61
TABELA 4.1 – CARACTERÍSTICAS DOS POLÍMEROS ESCOLHIDOS	69
TABELA 5.1 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ADENSAMENTO POR GRAVIDADE DO LODO DA ETA-3 NO PERÍODO DE CHUVAS.	87
TABELA 5.2 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ADENSAMENTO POR GRAVIDADE DO LODO DA ETA-4 NO PERÍODO DE CHUVAS.	90
TABELA 5.3 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ADENSAMENTO POR GRAVIDADE DO LODO DA ETA-3 NO PERÍODO DE ESTIAGEM.	93
TABELA 5.4 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ADENSAMENTO POR GRAVIDADE DO LODO DA ETA-4 NA ÉPOCA DE ESTIAGEM.....	96
TABELA 5.5 – TEMPOS DE MISTURA PARA O ADENSAMENTO POR GRAVIDADE DO LODO DA ETA 3.	99
TABELA 5.6 – TEMPOS DE MISTURA PARA O ADENSAMENTO POR GRAVIDADE DO LODO DA ETA 4. .	101
TABELA 5.7 – MELHOR DOSAGEM DE POLÍMERO PARA O ADENSAMENTO POR GRAVIDADE DO LODO DA ETA 3.....	103

TABELA 5.8 – MELHOR DOSAGEM DE POLÍMERO PARA O ADENSAMENTO POR GRAVIDADE DO LODO DA ETA 4.....	104
TABELA 5.9 – TEMPOS DE MISTURA PARA O ADENSAMENTO POR GRAVIDADE DO LODO DA ETA 3. .	107
TABELA 5.10 – TEMPOS DE MISTURA PARA O ADENSAMENTO POR GRAVIDADE DO LODO DA ETA 4.	109
TABELA 5.11 – MELHOR DOSAGEM DE POLÍMERO PARA O ADENSAMENTO POR GRAVIDADE DO LODO DA ETA 3.	110
TABELA 5.12 – MELHOR DOSAGEM DE POLÍMERO PARA O ADENSAMENTO POR GRAVIDADE DO LODO DA ETA 4.	111
TABELA 5.13 – RESULTADOS DOS TESTES PRELIMINARES DE PRÉ-CONDICIONAMENTO, NO PERÍODO DE CHUVAS E LODO DA ETA 3.	115
TABELA 5.14 – RESULTADO DOS TESTES PRELIMINARES, NO PERÍODO DE ESTIAGEM, PARA O LODO DA ETA 3.	122
TABELA 5.15 – RESULTADO DOS TESTES PRELIMINARES, NO PERÍODO DE ESTIAGEM, PARA O LODO DA ETA 4.	126

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ϕ Diâmetro

μ Micra

μm Micrômetro

APHA..... *American Public Health Association*

ASCE..... *American Society of Civil Engineers*

AWWA..... *American Water Works Association*

CAG..... Carvão Ativado Granular

CAP..... Carvão Ativado em Pó

CST..... *Capillary Suction Time*

C_0 Concentração inicial de lodo

C_u	Concentração final desejada no efluente
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO.....	Demanda Química de Oxigênio
d_p	Dosagem de polímero
ETAs	Estações de Tratamento de Água
ETEs	Estações de Tratamento de Esgoto
F_c	Fator de clarificação
F_e	Fator de espessamento
G	Gradiente de velocidade
H_0	Altura inicial de lodo
H_u	Altura da interface sólido/líquido
NTU	<i>Nephelometric Turbidity Unit</i>
P	Poises
Prosab	Programa de pesquisas em saneamento básico
pH	Potencial hidrogeniônico
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
rpm.....	Rotações por minuto

S	Coeficiente de compressibilidade
Sanasa.....	Sociedade de Abastecimento de Água e Saneamento S.A.
SRF.....	<i>Specific Resistência to Filtration</i>
SDT.....	Sólidos Dissolvidos Totais
SSF.....	Sólidos em Suspensão Fixos
SST.....	Sólidos em Suspensão Totais
SSV.....	Sólidos em Suspensão Voláteis
ST	Sólidos Totais
STF	Sólidos Totais Fixos
STV.....	Sólidos Totais Voláteis
TES.....	Taxa de Escoamento Superficial
t_f	Tempo de floculação
TM.....	Tempo de mistura
THMs	Trihalometanos
TTF	<i>Time to Filter</i>
t_u	Tempo necessário para alcançar a concentração C_u .
uH	Unidade hazen

Unicamp..... Universidade Estadual de Campinas

USEPA..... *United States Environmental Protection Agency*

V_s Velocidade de sedimentação

V_{s0} Velocidade de sedimentação da partícula discreta

WEF *Water Environment Federation*

RESUMO

Silva Jr., Archimedes Pereira. Tratabilidade do lodo de decantadores convencional e de alta taxa. Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 2003. p. 159. Dissertação de Mestrado.

Os principais resíduos de ETAs são os lodos gerados nos decantadores, a água de lavagem dos filtros e o rejeito de limpeza dos tanques de produtos químicos. Os lodos mesmo classificados como resíduos sólidos, apresentam baixíssimo teor de sólidos. Sendo o custo do transporte e disposição final bastante elevado, a redução do volume constitui-se em alternativa, economicamente, viável. Os principais processos utilizados para redução de volume do lodo são o adensamento, o condicionamento químico e a desaguamento. A pesquisa teve por objetivo comparar a tratabilidade do lodo do decantador do tipo convencional e do decantador de alta taxa, da SANASA, na cidade de Campinas. Foi verificada a influência dos parâmetros que caracterizam a qualidade do lodo, no seu desaguamento; o efeito do adensamento do lodo por gravidade, com auxílio de polímeros e o efeito do condicionamento químico com polímeros no desaguamento, por centrifuga. O lodo bruto foi pré-condicionado com polímeros sintéticos, e também se investigou a eficiência destes no condicionamento do lodo já adensado, para sua centrifugação. O adensamento mostrou que o polímero aniônico foi o melhor para ambas as ETAs. A dosagem ótima foi a mesma para ambas as épocas, para as duas ETAs, sendo de 1mg/g para ETA-3 e 3g/Kg para ETA-4. O tempo de mistura, para ETA-3, foi maior na época seca (45s) do que no período de chuvas (30s). Para ETA-4 o tempo de mistura foi o mesmo (60s) para as duas épocas. O lodo adensado foi condicionado com polímero e submetido à centrifugação. Desta, concluiu-se que, para o período de chuvas e para os dois tipos de lodo a condição ótima foi: polímero catiônico, 1g/Kg, 5s de mistura e 200rpm de rotação. Na época de estiagem e lodo da ETA-3 a condição ótima foi dada por: polímero catiônico, 1g/Kg, 60s de mistura e 200rpm de rotação. No caso da ETA-4, a condição é dada por: polímero catiônico, 2,5g/Kg, 60 s de mistura e 100 rpm.

Palavras Chave: Lodo, Adensamento, Centrifugação, Polímeros Orgânicos Sintéticos.

1 INTRODUÇÃO

A região de Campinas alcançou nas últimas décadas elevado grau de desenvolvimento industrial, agrícola, comercial e de serviços, constituindo-se em importante centro científico, tecnológico e cultural do Estado de São Paulo e também do País. A intensa urbanização (caracterizada por uma alta densidade demográfica) trouxe, por outro lado, problemas de infraestrutura e ambientais diversos. Entre eles destaca-se a questão da disponibilidade hídrica das bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (onde aquele município e outros estão localizados), bastante restrita para atender às múltiplas demandas existentes. Fato este agravado com o conflito pelo uso da água estabelecido com a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), que importa 33 m³/s da bacia do rio Piracicaba através do Sistema Cantareira.

Os mananciais superficiais dessa região estão com sua qualidade bastante comprometida. Ainda é praticado o lançamento de esgotos sanitários, despejos industriais e agrícolas não tratados nos corpos d'água. Devido ao reduzido efeito de diluição e depuração, a carga poluidora lançada por uma cidade compromete a qualidade da água captada a jusante por outra, e assim sucessivamente. Durante a estiagem a situação é agravada, pois vazões reduzidas acarretam uma maior concentração dos poluentes.

O lançamento de resíduos de ETAs sem nenhum tipo de recuperação ou tratamento pode acarretar um aumento na quantidade de sólidos, assoreamento, mudança na cor, turbidez, e composição química dos corpos receptores. Os resíduos dos decantadores, em particular, têm em sua composição grandes quantidades de alumínio, quando o sulfato de alumínio é

utilizado como coagulante principal, com toxicidade potencial para o meio e, indiretamente, para o homem.

Os principais resíduos gerados nas ETAs do tipo convencional são o lodo dos decantadores, a água de lavagem dos filtros e o rejeito de limpeza dos tanques de produtos químicos. Esses resíduos têm características e frequência de descarga diferentes que influenciam no processo de tratamento a ser empregado (CORDEIRO, 1999). Devido à escassez crescente dos mananciais há interesse na clarificação da água de lavagem de filtros para posterior recirculação do sobrenadante, podendo ser tratada juntamente com o lodo do fundo dos decantadores. Este lodo é gelatinoso e volumoso, sendo constituído por hidróxidos de alumínio ou ferro, além dos outros produtos químicos adicionados no tratamento mais o material inerte e orgânico removido da água.

A adoção da recirculação do sobrenadante da água de lavagem dos filtros torna imprescindível o monitoramento microbiológico, pois este pode contribuir para um aumento significativo no número de microrganismos na água a ser tratada. Esta prática, quando realizada sem controle adequado, pode prejudicar a qualidade da água final, pela presença de microrganismos indesejáveis como cistos de *Giardia* e *Cryptosporidium*, de precursores de trihalometanos (THMs) e substâncias que conferem sabor e odor à água.

Há no mundo toda uma preocupação crescente quanto aos riscos à saúde dos consumidores pela presença de alumínio na água. Sendo assim, em diversas ETAs dessa região tem-se substituído o sulfato de alumínio pelo cloreto férrico, particularmente aquelas que devem tratar água bruta contendo elevados teores de ferro e manganês. Nesse caso, pela adição de cal à água, eleva-se o valor do pH (da ordem de 10) para provocar a precipitação dos metais. Já a prática da pré-cloração tem sido evitada, a fim de minimizar a formação de THMs e outros subprodutos organoclorados. Contudo, algumas ETAs que passaram a utilizar o cloreto férrico em substituição ao sulfato de alumínio, estão agora, novamente voltando ao uso deste coagulante, devido à dificuldade no fornecimento do cloreto férrico, como é o caso da RMSP.

Outros processos e produtos têm sido aplicados, principalmente para o controle de algas e redução de compostos orgânicos causadores de cor, sabor e odor. O permanganato de potássio (KMnO_4) tem sido utilizado como oxidante dos precursores de THMs, reduzindo assim a demanda de outros desinfetantes. Sua eficácia aumenta com o decréscimo no valor do pH e

aumento da temperatura. Sendo assim, o KMnO_4 é utilizado em pré-tratamento, na oxidação da matéria orgânica, em combinação com a pós-cloração (desinfecção).

Os lodos de ETAs, apesar de classificados como resíduos sólidos pela NBR-10.004 (1989), apresentam baixíssimo teor de sólidos, e uma vez que o custo do transporte e disposição final é bastante elevado, a redução prévia do volume constitui-se em alternativa técnica e economicamente viável. Os principais processos utilizados para redução do volume do lodo, dependendo da disposição final pretendida, podem ser o adensamento, o condicionamento químico e o desaguamento.

Os lodos gerados nas ETAs apresentam, em geral, baixo teor de matéria orgânica não necessitando estabilização biológica antes de seu desaguamento, como é o caso dos lodos primários e secundários do tratamento de esgotos. Porém, suas características são bastante variáveis, em função da qualidade da água bruta e dos produtos químicos aplicados, devendo ser caracterizados e submetidos a ensaios de tratabilidade em escala de laboratório e piloto a fim de nortear o pré-dimensionamento e a operação de unidades de tratamento.

Hoje a Sociedade de Abastecimento de Água e Saneamento S.A. (SANASA) capta 4,5 m^3/s de água, sendo 92% no rio Atibaia e o restante no rio Capivari. A água é tratada em 5 estações (ETAs 1, 2, 3, 4 e Capivari) e depois distribuída à população. O volume de água potável produzido chega a uma média mensal de 9,6 milhões de metros cúbicos.

As estações de tratamento de água 3 e 4, objeto deste estudo produzem juntas 2,9 m^3/s , a ETA-3 entrou em operação em 1972 e a ETA-4 começou suas atividades em 1991. As duas estações se diferem pelo tipo de decantador utilizado, enquanto a ETA-3 possui decantador convencional, na outra o decantador é de alta taxa (placas planas paralelas). Este último tipo de decantador apresenta a vantagem de tratar um volume maior de água em uma área menor, se comparado com decantadores do tipo convencional.

A presente dissertação, a partir de estudos de tratabilidade, tentará responder a pergunta no que diz respeito ao resíduo gerado pelos dois tipos de decantadores, e também compará-los. O sistema que irá tratar os lodos das duas estações de tratamento, já projetado, encontra-se em fase de licitação, com previsão de entrada em operação em 2003.

2 OBJETIVOS

A presente pesquisa tem por objetivo comparar a tratabilidade do lodo originário das descargas dos decantadores do tipo convencional (ETA-3) e de alta taxa (ETA-4), da SANASA, na cidade de Campinas. Através de estudo experimental em escala de laboratório, busca-se investigar:

I) a influência dos parâmetros de caracterização da qualidade do lodo (teor de sólidos e turbidez) no seu desaguamento;

II) o efeito do uso de polímeros no adensamento do lodo por gravidade;

III) o efeito do condicionamento químico com polímero orgânico sintético no desaguamento por centrífuga, do lodo, bem como as respectivas faixas de dosagens ótimas.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Considerações Iniciais

No tratamento de água, onde o material em suspensão e dissolvido é separado da água para que seja efetuada sua purificação, uma quantidade considerável de lodos sobra do tratamento após a água seguir para o abastecimento. Parece imprudente referir-se a todos estes lodos como “lixo”, uma vez que este termo implica claramente que nenhum fim benéfico pode ser dado a eles e que os mesmos devam ser descartados, como observou O’CONNOR (1971).

Estudos referentes à caracterização e tratabilidade de lodo de estações de tratamento de esgoto (ETEs) são bastante abundantes na literatura, assim como de lodos de ETAs. Contudo, são escassas as pesquisas sobre o reuso do lodo destas últimas. Os países desenvolvidos começaram a praticar o tratamento de esgotos há muitas décadas, em geral pelo processo de lodos ativados. Como consequência, tiveram que lidar com a enorme quantidade de lodo biológico gerado, seu tratamento, condicionamento, desaguamento e disposição final adequada. Com relação ao lodo de ETA, embora alguns projetos de pesquisa nesta área no Brasil venham se desenvolvendo já há algum tempo, o assunto tomou maior vulto somente a partir da década de 90, e os resultados disponíveis ainda são relativamente escassos. Além de

algumas dissertações e teses, há os trabalhos publicados pelo Programa de Pesquisas em Saneamento Básico (Prosab), rede nacional de pesquisas formada em torno do tema.

3.2 Geração de Lodos nas Estações de Tratamento de Água

3.2.1 Origem dos Lodos

Os tipos de ETAs podem ser basicamente quatro, de acordo com a classificação da AWWA (CORNWELL *et al.*, 1987). O primeiro tipo é as estações do tipo convencional, objeto desta investigação experimental, onde a meta principal é a remoção de substâncias causadoras de turbidez e cor, bactérias, algas, compostos orgânicos e, em alguns casos, ferro e manganês.

O segundo tipo de ETA refere-se aquelas que utilizam o abrandamento da água (remoção de cálcio e magnésio), por meio da aplicação de cal, soda cáustica ou barrilha. O terceiro tipo de estação é aquela projetada para remover substâncias inorgânicas, como nitratos, fluoretos, arsênio, estas empregam processos de troca iônica, osmose reversa ou adsorção. O último tipo de ETA destina-se à remoção de compostos voláteis.

A indústria da água de abastecimento, quando utiliza o tratamento do tipo completo ou convencional (coagulação, floculação, decantação e filtração) transforma água bruta, inadequada para o consumo humano, em água potável. Faz uso de processos e operações com a introdução de produtos químicos, gerando lodos (lodo). Estes têm origem nos decantadores (ou eventualmente em flutuadores com ar dissolvido), na lavagem dos filtros e na lavagem dos tanques de preparação de soluções e suspensões de produtos químicos.

Os lodos do tratamento de água contêm materiais removidos durante o processo de tratamento, junto com qualquer parcela de água que é removida com eles. Estes lodos incluem substância causadora de turbidez, na água bruta, matéria orgânica e inorgânica, algas, bactérias, vírus, material coloidal, sais e compostos químicos precipitados da água bruta e aqueles adicionados no tratamento MONTGOMERY (1985).

Os lodos gerados nos decantadores, nos sistemas do tipo convencional, podem ficar retidos durante vários dias (30, 40, 60) ou apenas algumas horas, dependendo da forma de limpeza utilizada nos tanques (CORDEIRO, 1999). Este lodo é frequentemente caracterizado pela grande quantidade de água (acima de 80%), bem como alta resistência ao adensamento ou desaguamento mecânico como observou WU & HUANG (1997).

Como apontado por MONTGOMERY (1985) do ponto de vista técnico, o objetivo do gerenciamento de lodos é minimizar a quantidade de material que deve ser disposto, pela recuperação de material reciclável e pela redução do conteúdo de água dele. Em muitos casos, o custo do transporte e disposição final dos lodos corresponde a maior parte dos gastos com o seu gerenciamento, sendo a solução mais econômica reduzir a quantidade de material para disposição final.

Existem técnicas alternativas, de tratamento de água que, mesmo empregando a coagulação química, acarreta a menor formação de lodo, como a filtração direta descendente ou ascendente. Nesta técnica são eliminadas as unidades de decantação e, algumas vezes, até mesmo os floculadores, as dosagens de coagulante são menores se comparadas àquelas aplicadas ao tratamento convencional, resultando em menor quantidade de lodo produzido na ETA (REALI, 1999).

Outras técnicas alternativas para algumas das operações que ocorrem em uma ETA podem ser a flotação, a adsorção em carvão ativado e a oxidação com ozônio, que têm sido estudadas por DI BERNARDO *et al.* (2002).

Em função da qualidade da água bruta nem sempre é possível o emprego de tais técnicas, sendo as ETAs do tipo convencional a grande maioria no País.

Em termos volumétricos, em geral, a maior quantidade de lodo gerado é proveniente da lavagem dos filtros. Em se tratando de massa de sólidos, a maior quantidade tem origem nos decantadores convencionais de fluxo horizontal ou nos decantadores laminares (FERREIRA FILHO, 1999).

Conforme observado por FULTON (1974), sendo a quantidade, em volume, da água de lavagem dos filtros a maior parcela do total de lodos de uma ETA, atenção especial deve ser dispensada a ela, pois tal parcela de água deveria ser recirculada e voltar ao início do processo de tratamento. A alternativa exposta por aquele pesquisador é interessante desde de que a água a ser recirculada tenha suas características microbiológicas analisadas.

A quantidade de lodo gerado em uma ETA, é função principalmente da qualidade da água bruta, do tipo e dosagem do coagulante e também da operação e projeto da mesma. A parcela de lodo oriunda dos decantadores pode variar na faixa de 60 a 95% da quantidade total produzida na ETA, enquanto que a água de lavagem dos filtros fica na faixa de 5 a 40% (YUZHU, 1996).

Segundo O'CONNOR (1971) os lodos oriundos de ETAs, em ordem de abundância, naquela época foram classificados como:

a) Resíduos de coagulação química: além dos hidróxidos do sal utilizado na coagulação, o lodo contém material particulado orgânico e inorgânico. Na ausência de contaminação da fonte de água bruta, a fração orgânica é pequena, sendo por esta razão estável e não putrescível. Conseqüentemente, ele pode ficar acumulado no decantador por um longo período de tempo que varia de dias a meses. A maior parcela do lodo é composta por material inorgânico como areias finas, silte e argila.

b) Resíduos do abrandamento por precipitação química: é constituído, freqüentemente, por: carbonato de cálcio, hidróxido de magnésio e cal. Devido à fraca característica de sedimentação da fração coloidal o abrandamento, normalmente é seguido de coagulação.

c) Água de lavagem dos filtros: toda estação de tratamento de água que utiliza filtração em meio granular, produz uma grande quantidade de água de lavagem com baixa concentração de sólidos, devido à operação de limpeza dos filtros. O volume de água usado na lavagem dos filtros de uma ETA é alto devido à taxa de lavagem que pode variar entre 10 e 20 vezes do valor da taxa de filtração. Tal volume gasto na operação de limpeza dos filtros varia de 2 a 3% do total de água filtrada. O teor de sólidos na água de lavagem reflete a eficiência do pré-tratamento, enquanto que a composição dos mesmos normalmente é semelhante a dos sólidos

produzidos em outras unidades de tratamento. Do total de lodo produzido em uma ETA a parcela oriunda dos filtros fica compreendida entre 30 e 40%.

d) Resíduos da pré-sedimentação da água bruta: O material sedimentado geralmente pode ser composto por areias, siltes, argilas e detritos orgânicos de origem vegetal. Estes sólidos podem ficar acumulados por meses ou anos no fundo dos pré-sedimentadores e, subseqüentemente, serem removidos por drenagem.

e) Resíduos do uso de auxiliares de coagulação: Embora seja de grande eficiência o emprego de polímeros orgânicos no tratamento, o custo deste material faz com que ele seja utilizado apenas como auxiliar de coagulação. O emprego de polímeros, sozinho ou como auxiliar de coagulação resulta em uma menor produção de sólidos. Areias (bentonita) e sílica ativada, além dos polímeros, podem ser adicionadas em algumas águas para atuarem como partículas de cargas negativas e aumentarem a densidade do lodo.

O tipo de decantador adotado e a maneira pela qual é feita a descarga no fundo dos mesmos têm influência no valor do teor de sólidos desse lodo conforme descrito por REALI (1999). Decantadores retangulares convencionais desprovidos de raspadores de fundo acumulam grande quantidade de lodo até o momento de sua limpeza, e o teor de sólidos totais pode variar de 4 a 13% GRANDIN (1992).

Por sua vez, decantadores retangulares, providos de tais equipamentos mecânicos, com operações de descarte diárias (ou, em muitos casos, em períodos menores), acabam produzindo volumes de lodo maiores se comparados aos decantadores, com operação manual de limpeza, cuja freqüência em geral é de 1 a 3 meses. Geralmente, decantadores com remoção mecanizada de lodo apresentam teor de sólidos totais entre 0,1 e 1% conforme descrito por GRANDIN (1992). Ainda de acordo com este pesquisador, nos filtros, o lodo é removido por meio da lavagem que é feita, em geral, em intervalos de 12 a 24 horas, sendo o valor da turbidez da água de lavagem da ordem de 200 NTU.

Nas Figuras 3.1 e 3.2, serão apresentados esquemas típicos do desaguamento de lodos gerados em estações de tratamento de água.

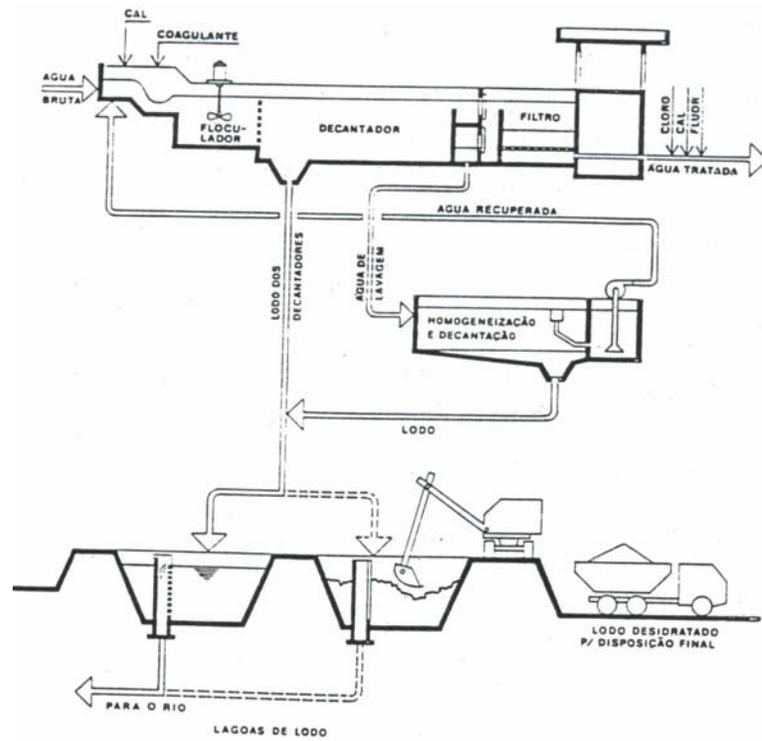


Figura 3.1 – Esquema típico de desaguamento natural de lodo em ETA.

Fonte: Grandin (1992)

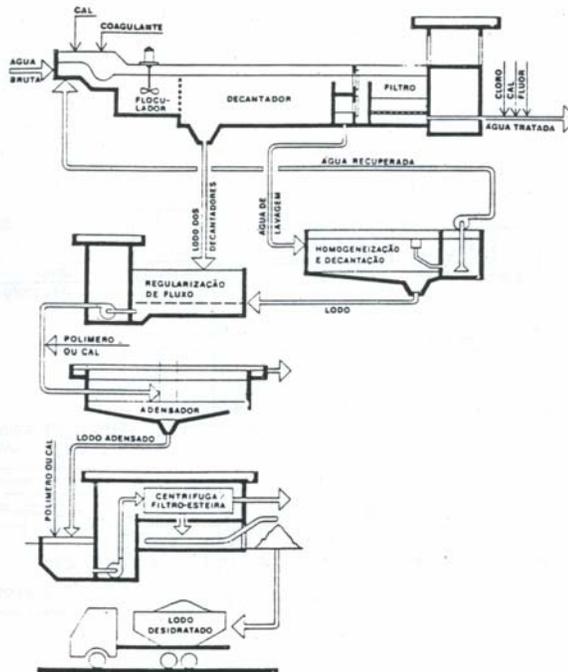


Figura 3.2 – Esquema típico de desaguamento mecânico de lodo em ETA.

Fonte: Grandin (1992)

3.2.2 Característica dos Lodos

A quantidade de resíduos produzidos pelos processos de tratamento e suas propriedades são, primeiramente, função da qualidade da água bruta que está sendo tratada, (MONTGOMERY, 1985).

A qualidade da água bruta é profundamente afetada pelas variações sazonais, no período de estiagem ocorre uma diminuição na quantidade de material orgânico e na época de chuvas acontece o contrário, conforme apontado por YUZHU (1996). De acordo com FULTON (1974), isto ocorre, pois no período mais úmido do ano, época de chuvas, o material por ela carregado juntamente com água subterrânea e contribuições superficiais, podem alterar não somente os sólidos em suspensão, mas também o índice mineral do corpo d'água.

Outro fator que afeta esta qualidade é a mudança nos valores da temperatura, que influencia a taxa de crescimento de plantas e algas. O aumento daquela, por exemplo, acelera a decomposição anaeróbia do material orgânico, que juntamente com o material que está presente no fundo do rio, aumenta a quantidade de matéria orgânica e inorgânica na água (YUZHU, 1996).

Conforme apresentado por KNOCKE & WAKELAND (1983) os lodos de ETAs são freqüentemente caracterizados pelo alto teor de umidade (baixa concentração de sólidos em suspensão), alta resistência ao desaguamento por gravidade ou mecânico e outros problemas associados com seu manuseio e disposição final.

MONTGOMERY (1985) evidenciou que os lodos das estações de tratamento de água podem ser agrupados nas seguintes categorias:

a) **Resíduos da coagulação**: tem origem nos decantadores e filtros. A concentração de sólidos depende do projeto e operação das unidades, além do tipo de lodo e sua composição. Por exemplo, lodo proveniente da coagulação com sais de alumínio em decantador de fluxo ascendente apresenta concentração de sólidos entre 0,1 e 0,3% enquanto que aqueles oriundos de sedimentadores de fluxo horizontal podem alcançar concentrações de sólidos que variam de 0,2 a 1,0%, ou mais.

Lodos, em geral, apresentam baixa concentração de sólidos totais ficando compreendida na faixa de 1,5 a 3%, a quantidade de sólidos em suspensão totais de 75 a 90% e a quantidade de sólidos voláteis da ordem de 20 a 35%, conforme estudo realizado por ALBRECHT (1972).

De acordo com o pesquisador O'CONNOR (1971), o valor do pH está próximo do neutro, variando de 6 a 8. Esta faixa de valores também foi apresentada por ALBRECHT (1972).

Ainda conforme aquele autor, O nível de DBO_5 , normalmente, está entre 30 e 100 mg O_2/L . Os altos valores da DQO compreendidos entre 500 e 10000 mg O_2/L mostram que embora o lodo não seja biodegradável ele é facilmente oxidável. Hoje em dia sabe-se que os parâmetros DBO_5 e DQO não são adequados para caracterização de lodos de ETAs.

Segundo O'CONNOR (1971) que se baseou em análises feitas no lodo de uma ETA que utiliza sais de alumínio como coagulante, o contínuo aumento no valor da DBO_5 , ao longo do tempo, pode ser tomado como indicação da baixa taxa de biodegradabilidade do material orgânico presente. Por exemplo, a alta relação entre DQO/ DBO_5 , da ordem de 13/1, indica a estabilidade da fração orgânica.

A DBO_5 , DQO e matéria orgânica relacionada são representativas de matéria orgânica dissolvida em suspensão, e de algas removidas da água. Os sólidos inorgânicos são devidos ao coagulante químico, areia e sedimentos retirados da água bruta. Estes lodos poderão ainda conter bactérias que foram removidas no processo de sedimentação. Estas da ordem de 2300 / 100mL para 1% de lodo sólido, contudo este valor pode sofrer variações dependendo da qualidade da água bruta e do processo de tratamento empregado (MONTGOMERY, 1985).

A viscosidade, a velocidade de sedimentação e outras propriedades físicas depende da concentração de sólidos, da dosagem do coagulante e de outros materiais presentes no lodo. A resistência específica aumenta com teor de sólidos abaixo de 2%, acima deste valor e dependendo do tipo de lodo o valor da resistência é relativamente constante. Já a tensão de cisalhamento e a viscosidade são diretamente proporcionais ao aumento do teor de sólidos.

b) **Resíduo do abrandamento com cal:** oriundos da precipitação do carbonato de cálcio e hidróxido de magnésio pelo processo da cal e soda. Lodos que contêm mais $CaCO_3$,

normalmente, possuem maior concentração de sólidos do que aqueles com mais $Mg(OH)_2$, isto é devido ao $CaCO_3$ ser um grão fino e denso enquanto o outro é um material gelatinoso.

O valor do pH varia de 10,5 a 11,5 e o lodo, em geral, é de cor branca a menos que seja colorido pela turbidez ou pelo ferro e manganês. Normalmente, não apresentam partículas causadoras de odor, e tem pouca ou nenhuma DBO_5 e DQO. Devido ao alto valor do pH, este resíduo não contém número significativo de bactérias. A densidade depende do teor de umidade. O sólido seco de $CaCO_3$ possui densidade relativa da ordem de $2,71 \text{ Kg/m}^3$.

c) **Salmoura:** a principal fonte produtora deste tipo de lodo é o abrandamento por troca iônica. Outras fontes que podem ser citadas são: a osmose reversa, a desmineralização por troca iônica e o alívio de pressão em torres de resfriamento e caldeiras. Todos estes processos produzem lodos com alto teor de sólidos dissolvidos, e baixo teor de sólidos em suspensão.

Estes sedimentos apresentam densidade relativa que depende da concentração do sal. Aquela, tipicamente, está compreendida na faixa de $1,02$ a $1,11 \text{ Kg/m}^3$. Quando a água de lavagem dos filtros é incluída neste tipo de lodo algum material em suspensão presente na água bruta poderá ser incluído ao lodo.

O pesquisador O'CONNOR (1971) considerou mais uma categoria de lodo além destas apresentadas por Montgomery, que é a água de lavagem dos filtros. Para aquele pesquisador estes tipos de lodos são bastante semelhantes aos sólidos que tem origem nas unidades de decantação.

Os valores baixos de DBO_5 , na faixa de 2 a $4 \text{ mg O}_2/\text{L}$, e valores relativamente altos de DQO, da ordem de 30 a $160 \text{ mg O}_2/\text{L}$, são uma indicação da presença de pequena quantidade de matéria orgânica relativamente estável. O material orgânico, presente na água de lavagem, pode aparecer na forma de algas, plâncton, carvão ativado residual e bactérias (O'CONNOR, 1971).

Ainda segundo aquele autor, nas ETAs em que foram utilizados sais de alumínio como coagulante, a quantidade de sólidos totais ($0,01$ a $0,04\%$) e sólidos em suspensão ($< 0,01\%$) foram baixos. Assim sendo, há a necessidade de se fazer uma coagulação química ou processos de remoção física para se aumentar a concentração de sólidos neste lodo.

Nas Tabelas 3.1 e 3.3 apresenta-se, respectivamente, um resumo das características químicas e físicas dos lodos de ETA. A Tabela 3.2 mostra alguns parâmetros não convencionais para lodo de decantador.

Tabela 3.1 - Características químicas dos lodos gerados em ETAs.

Tipo de lodo	Características químicas
Lodo de alumínio	DBO ₅ – 30 a 300 mg/L DQO – 30 a 5000 mg/L pH – 6 a 8 Sólidos Totais – 0,1 a 4% Sólidos: 15 a 40% - Al ₂ O ₃ 5,5 H ₂ O 35 a 70% - silicatos e matéria inerte 15 a 25% - matéria orgânica
Lodo de ferro	pH – 7,4 a 8,5 Sólidos Totais – 0,25 a 3,50% Sólidos: 4,6 a 20,6% – Fe 5,1 a 14,1% – SV
Água de lavagem dos filtros	DBO ₅ – 2 a 10 mg/L DQO – 28 a 160 mg/L pH – 7,2 a 7,8 Sólidos Totais – 0,01 a 0,1% Sólidos: 25 a 50% - Al ₂ O ₃ 34 a 35% - SiO ₂ 15 a 22% - carbono e matéria orgânica
Lodo de abrandamento (cal)	DBO ₅ e DQO – aproximadamente zero Sólidos Totais – 2 a 15% Sólidos de água com pouco magnésio: 75% - CaCO ₃ (42% do cálcio como CaO) 6% - sílica como SiO ₂ 7% - carbono total 3% - alumínio como Al ₂ O ₃ 2% - magnésio como MgO
Salmoura	SDT – 15000 a 35000 mg/L Cloreto – 9000 a 22000 mg/L Sódio – 2000 a 5000 mg/L Cálcio – 3000 a 6000 mg/L Magnésio – 1000 a 2000 mg/L Sulfato – 328 mg/L

Fonte: Adaptado de Montgomery (1985)

Tabela 3.2 – Parâmetros não convencionais para lodo de ETA.

Parâmetros	BARROSO <i>et al.</i> (2001)	PAULSRUD <i>et al.</i> (2002)
Alumínio	0,3 - 11100 (mgAl/L)	-
Zinco	0,11 - 4,25 (mgZn/L)	66 – 296 (mgZn/Kg ST)
Cádmio	0,01 - 0,14 (mgCd/L)	0,06 - 1,2 (mgCd/Kg ST)
Níquel	1,06 - 2,70 (mgNi/L)	3,4 - 39,7 (mgNi/Kg ST)
Manganês	0,1 – 60 (mgMn/L)	-
Cobre	0,06 - 2,05 (mgCu/L)	<10 – 110 (mgCu/Kg ST)
Cromo	0,35 - 3,82 (MGCR/L)	<5,8 – 33 (mgCr/Kg ST)
Chumbo	0,50 - 2,32 (mgPb/L)	6,4 - 29,4 (mgPb/Kg ST)
Mercúrio	-	0,01 - 0,46 (mgHg/Kg ST)

Tabela 3.3 - Características físicas dos lodos gerados em ETAs.

Tipo de Lodo	Características Físicas
Lodo de alumínio	SRF – 1,0 a 540x109 s ² /g Viscosidade – 0,03 g/cm.s (não Newtoniano) Vel. Sedimentação Inicial – 0,06 a 0,15 cm/s Densidade (seco) – 1200 a 1520 Kg/m ³
Lodo de ferro	SRF – 4,1 a 19500x108 s ² /g Vel. Sedimentação Inicial – 0,007 cm/s
Lodo de abrandamento (cal)	SRF – 0,20 a 25,6x107 s ² /g Viscosidade Plástica – 0,001 a 0,1 g/cm. s. Vel. Sedimentação – 0,001 a 0,1 cm/s Densidade (seco) – 2,75 Kg/m ³

Fonte: Adaptado de Montgomery (1985)

Outra forma na qual pode ser classificada a maioria dos lodos de ETA é a seguinte: a) ocorrência natural (areia, silte, alga) – composto por materiais coloidais ou particulados, removidos da água bruta por sedimentação, filtração, membranas ou outro processo, e por material inerte do tratamento químico; b) ocorrência natural (ferro, manganês, cálcio e magnésio) – composto por substâncias solúveis convertidas em suas formas de precipitados insolúveis por oxidação e ajuste no valor do pH; c) precipitados (Al (OH)₃, Fe(OH)₃) – quando

químicos são adicionados à água; e d) materiais gastos (carvão ativado granular - CAG, carvão ativado em pó - CAP, meio filtrante, resinas) – que devem ser periodicamente removidos da unidade de tratamento após excederem a vida útil (ASCE, 1996).

Embora os lodos variem de uma ETA para outra, as características básicas são similares. O lodo do decantador é caracterizado como sendo um fluido não Newtoniano, volumoso e tixotrópico, ou seja, apresenta-se no estado de gel quando em repouso, mas torna-se relativamente fluido quando agitado, além de ser de difícil sedimentação ou flotação (MONTGOMERY, 1985 e YUZHU, 1996). Para complementar, pode-se dizer que ainda se encontra na composição do lodo hidróxido de ferro ou de alumínio – dependendo do coagulante utilizado – matéria inorgânica como areias ou argilas, material coloidal, microorganismos incluindo plâncton, e outros organismos removidos da água a ser tratada (ALBRECHT, 1972).

Segundo REALI (1999) os principais parâmetros que podem ser utilizados na caracterização do lodo de ETA são: sólidos totais (ST); sólidos totais voláteis (STV); sólidos em suspensão totais (SST); sólidos em suspensão voláteis (SSV); pH; demanda bioquímica de oxigênio (DBO); demanda química de oxigênio (DQO); concentração dos principais íons metálicos (alumínio, ferro, manganês, cádmio, mercúrio, chumbo, cromo, cobre, etc.); concentração de fósforo total; nitrogênio total; além de índices bacteriológicos e biológicos de interesse sanitário (coliforme total e fecal, contagem de ovos de helmintos, etc.).

KNOCKE & WAKELAND (1983) em um de seus estudos atentaram para o fato, de naquela época as pesquisas realizadas enfocarem mais as macro-propriedades do lodo (resistência específica, taxa de drenagem e concentração de sólidos na torta) do que suas micro-propriedades como, por exemplo, o tamanho e distribuição das partículas e a densidade. Nos dias de hoje, estudos de tais micro-propriedades são mais abundantes na literatura.

Os principais parâmetros que caracterizam os lodos em uma estação de tratamento de água podem ser divididos segundo suas características físicas e químicas.

As características físicas afetam significativamente as propriedades de trabalhabilidade, espessamento e desaguamento do lodo. O teor de sólidos, resistência específica, compressibilidade, tensão de cisalhamento, densidade e tamanho das partículas, são

propriedades físicas que podem influenciar o processo de desaguamento do lodo (ASCE, 1996).

De acordo com NOVAK & CALKINS (1975) as propriedades físicas do lodo somente ampliam o problema e aumentam os gastos do processo envolvido em torná-lo trabalhável.

Sendo, geralmente, os coagulantes mais utilizados nas ETAs os sais de alumínio ou de ferro, e sendo os hidróxidos dos respectivos metais os principais constituintes do lodo, o teor de sólidos, a dosagem do coagulante e os materiais constituintes do lodo influenciam suas características físicas, filtrabilidade, viscosidade e sedimentabilidade (YUZHU, 1996).

Conforme exposto por NIELSEN et al (1973) sendo, por exemplo, a quantidade de hidróxido de alumínio no lodo baixa, este sofre desaguamento mais rapidamente, o condicionamento químico necessitará de menor quantidade de polímero e o teor de sólidos poderá ser mais significativo.

Teor de Sólidos

Este parâmetro varia muito e depende de fatores como a qualidade da água bruta, tipo e dosagem de coagulante e do uso, ou não, de cal.

Diz respeito à estimativa do teor de sólidos no lodo descartado dos decantadores e filtros. Sendo de interesse para o projeto de sistemas de tratamento de lodos de ETAs do tipo convencional. O teor de sólidos no lodo é usualmente expresso em porcentagem (em massa) de sólidos secos presentes no lodo (REALI, 1999).

Quanto menor o valor da turbidez na água bruta menor será o teor de sólidos no lodo, o contrário também é verdadeiro (ASCE, 1996).

Devido ao valor de pH ser determinante no mecanismo de coagulação, este tem influência sobre o teor de sólidos no lodo. Assim sendo, o espessamento e desaguamento do lodo não são eficientes quando a coagulação é realizada com pH da ordem de 8,1. O que não acontece se tais processos forem realizados com valor de pH de 6,5 (ASCE, 1996).

Com o valor de pH da ordem de 6,5 a coagulação, dependendo da qualidade da água bruta, pode ocorrer no mecanismo de adsorção e neutralização de cargas. Neste caso, a dosagem de coagulante necessária poderá ser menor e, conseqüentemente o lodo será mais facilmente adensado e desaguado (ASCE, 1996).

Com pH da ordem de 8,1 a coagulação, dependendo da qualidade da água bruta, pode ocorrer ou no mecanismo de adsorção e formação de pontes ou na varredura, o lodo resultante deste tipo de coagulação é mais difícil de ser adensado (ASCE, 1996).

Segundo aquela publicação, os lodos resultantes da coagulação com alumínio, ferro ou cal, em geral, apresentam baixo teor de sólidos que varia de ETA para ETA e depende dos produtos químicos adicionados e das etapas do tratamento (ASCE, 1996).

Em estudo realizado por WU & HUANG (1997) verificou-se que lodo produzido por coagulação feita no mecanismo de varredura geralmente contém grande quantidade de água, por isso resulta em um lodo mais difícil de ser desaguado do que o gerado pelo mecanismo de neutralização de cargas. Ainda de acordo com aqueles pesquisadores, a coagulação realizada no mecanismo da varredura pode resultar em floco leve e com sedimentação lenta.

A quantidade de sólidos presentes na água de lavagem dos filtros, geralmente, é menor do que aquela encontrada no lodo do decantador. O teor de sólidos apresentado por aquele tipo de lodo é menor do que no lodo do decantador, variando na faixa de 0,01% a 0,1% (YUZHU, 1996). Neste caso, a recirculação da água de lavagem torna-se uma alternativa interessante, desde que seja controlada sua qualidade microbiológica.

Segundo REALI (1999) o teor de sólidos no lodo descartado pelos decantadores varia bastante, podendo apresentar valores na faixa de 0,1% a 2,0%. Entretanto, na maioria dos casos, os valores situam-se abaixo de 1%.

No desaguamento, daquele tipo de lodo, por filtração forçada o aumento da pressão aplicada no processo promove também, o aumento na concentração de sólidos na torta de lodo. Todavia, o teor de sólidos na torta de um lodo coagulado com sais de alumínio é sempre bem abaixo do teor atingido para o lodo de abrandamento com cal, independente do processo que seja utilizado (ASCE, 1996).

Alguns estudos tratam teor de sólidos na torta como sendo o parâmetro principal para definição das características de trabalho do lodo. Entretanto, existem outras pesquisas que apontam que a ocorrência de variação neste parâmetro pode, por exemplo, produzir lodo com tensão de cisalhamento e características semelhantes (KNOCKE & WAKELAND, 1983).

Resistência Específica

Define a resistência oferecida pelo lodo à passagem de água por ele (KNOCKE & WAKELAND, 1983). Assim, quanto maior o valor da resistência específica à filtração (SRF – Specific Resistance to Filtration), menor a capacidade de filtração da água (CORDEIRO, 1999).

A resistência depende da porosidade ou permeabilidade da torta de lodo. Permeabilidade é função do tamanho das partículas e de sua deformação (compressibilidade) quando a pressão é aplicada (ASCE, 1996).

De acordo com estudo realizado por HAWKINS et al (1974), a SRF foi escolhida como parâmetro para medir diferenças na filtrabilidade do lodo. A equação 3.1 é usada para o cálculo da resistência e foi obtida por meio de dados de ensaios de filtração.

$$r = \frac{2 P A^2 b}{\mu c} \quad (3.1)$$

onde:

r – resistência específica à filtração (m/Kg)

P – pressão de vácuo aplicada (N/m²)

A – área filtrante (m²)

μ - viscosidade do filtrado (Ns/m²)

c – massa de sólidos depositada no filtro por volume de filtrado (Kg/m³)

b – inclinação da reta ajustada ao gráfico de t/V versus V (s/m³)

t – tempo para filtrar

V – volume do filtrado

Os valores obtidos com este parâmetro são, geralmente, para comparação de lodos de ETA e para a avaliação do efeito do polímero no desaguamento. Sabe-se que tal comparação não é possível ser feita, pois a SRF depende da concentração de sólidos.

Devido a sua dependência em relação à pressão aplicada durante a filtração e em relação à mistura dos químicos adicionados, a SRF é mais utilizada como sendo um índice de desidratabilidade do que uma propriedade bem definida do lodo. A resistência específica do lodo muda durante o armazenamento, resultado de ação química e atividade biológica (ASCE, 1996).

Lodos com resistência específica de valor igual ou menor que 1.10^{12} m/Kg são considerados como de desaguamento rápido, enquanto que aqueles com resistência em torno de 1.10^{14} m/Kg apresentam desidratabilidade deficiente. Este parâmetro para o lodo condicionado torna-se maior à medida que o valor do pH é aumentado e o valor da turbidez da água bruta diminuído (ASCE, 1996).

Normalmente, lodos de decantadores de ETAs apresentam valores de resistência específica entre 5.10^{12} e 70.10^{12} m/Kg. Enquanto, que os lodos gerados por ocasião da lavagem dos filtros apresentam valores na faixa de 0,1 a 15.10^{12} m/Kg, como apontado por REALI (1999).

De acordo com aquele autor, a adição de polímeros sintéticos para condicionamento químico dos lodos geralmente acarreta uma diminuição no valor da SRF, indicando melhora nas condições de desaguamento.

Os condicionadores químicos, especialmente, os polímeros aniônicos, podem ser adicionados ao lodo com o intuito de promover a diminuição da SRF. A seleção do polímero e sua dosagem ótima para o condicionamento são determinadas por ensaios de laboratório. É interessante ressaltar que fatores como: teor de sólidos, valor do pH e intensidade de mistura pode influenciar a dosagem do polímero (ASCE, 1996).

Segundo HAWKINS et al (1974), naquela época, existiam autores que defendiam que a resistência específica era independente da concentração de sólidos. Contudo, estudos

mostraram que houve redução da SRF para concentrações baixas de sólidos. Pesquisas mais recentes também mostram a dependência da SRF ao teor de sólidos (YUZHU, 1996).

Os lodos dos decantadores apresentam partículas de tamanho pequeno, dificultando a remoção de água livre para a redução de volume. Este fato implica no aumento da SRF como foi observado por CORDEIRO (1999).

O impacto provocado pela variação do tamanho da partícula de lodo em sua resistência específica é evidente, partículas de tamanho grande produzem uma redução na SRF (KNOCKE & WAKELAND, 1983).

Compressibilidade

Compressão é o que promove a deformação do floco durante o desaguamento pela aplicação de pressão. Sua maior consequência é a diminuição nas taxas de desaguamento, provocada pelo aumento da pressão aplicada durante o processo (ASCE, 1996).

Devido à natureza compressível das partículas do lodo, variações na pressão diferencial aplicada sobre a torta, poderão acarretar mudanças na resistência específica, segundo KNOCKE & WAKELAND (1983). Segundo estes pesquisadores, mudanças no tamanho das partículas não afetam a compressibilidade do lodo.

O coeficiente de compressibilidade, S , normalmente é determinado por meio de um gráfico dilogarítmico da resistência específica versus à pressão. Para lodos floculados o valor de S varia de aproximadamente 0,8 a 1,5; enquanto que para lodos de abrandamento o valor de S pode ser menor do que 0,4, no caso de materiais que sofreram uma compressão prévia com carbonato de cálcio (ASCE, 1996).

De acordo com pesquisa de KNOCKE & WAKELAND (1983), as amostras de lodo ensaiadas por eles apresentaram os seguintes valores de S : lodo proveniente da coagulação com sais de alumínio a compressibilidade foi da ordem de 0,97. Tal valor caiu para 0,94, quando aquele lodo sofreu condicionamento químico; e para lodo de abrandamento com cal o valor foi de 0,79.

Geralmente, os sólidos que compõem o resíduo oriundo da limpeza da água bruta, têm desagamento pouco eficiente quando se aplica pressão. Por outro lado, sólidos com grande parcela de partículas rígidas como, por exemplo, os lodos do abrandamento, não sofrem deterioração expressiva quando a pressão é aplicada. Se este efeito é causado pela deformação, quebra ou formação de camada em torno da partícula, isto pode ser menos importante do que o grande efeito que a compressibilidade tem sobre a seleção do equipamento a ser utilizado no desagamento e sobre o processo em si (ASCE, 1996).

Tensão de Cisalhamento

É um importante parâmetro na determinação da trabalhabilidade do lodo.

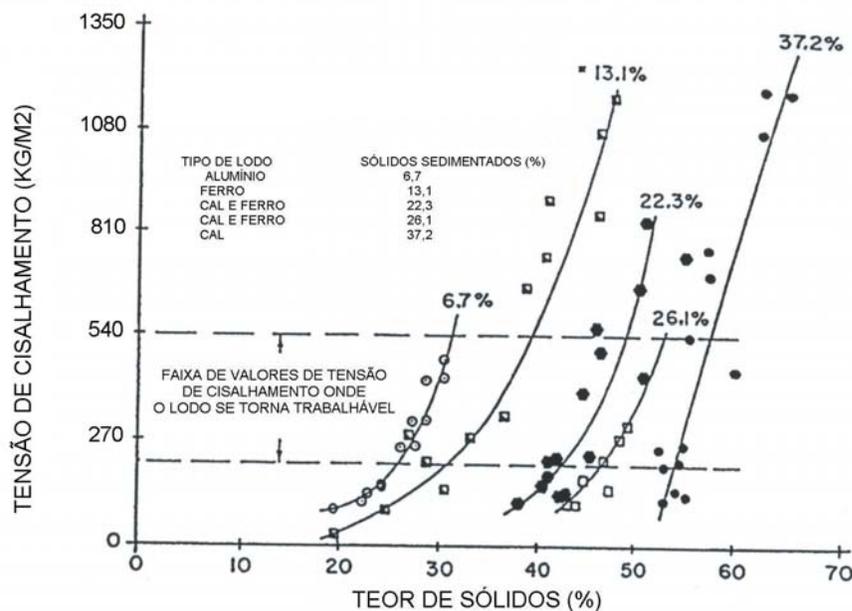


Figura 3.3 – Variação na resistência ao cisalhamento em função do teor de umidade.

Fonte: Adaptado de ASCE, 1996.

Os lodos, resultante da coagulação com sais de alumínio, geralmente produzem torta com teor de sólidos de no máximo 7%, como pôde ser observado na Figura 3.3. Entretanto, lodos desidratados que apresentem teores de sólidos na faixa de 15 a 20%, podem possuir melhores características de trabalhabilidade (ASCE, 1996).

O cisalhamento e a viscosidade são medidas quantitativas da resistência a deformação oferecida pelo lodo, a tensão cisalhamento aumenta com o aumento da concentração de sólidos ou decréscimo do teor de umidade (NOVAK & CALKINS, 1975). De acordo com estes pesquisadores, à medida que o lodo tem seu teor de umidade reduzido, pelo processo de desaguamento, o mesmo passa a resistir à deformação pela tensão de cisalhamento.

Para lodo desaguado com filtração a vácuo uma tensão de cisalhamento menor do que 323 ou 430 Kg/m² pode ser suficiente para o manuseio do lodo. Por outro lado, lodo drenado em leito de areia que permite a secagem ao ar, pode alcançar uma tensão de cisalhamento compreendida entre 430 e 538 Kg/m² (NOVAK & CALKINS, 1975).

Uma resistência ao cisalhamento compreendida na faixa de 292 a 390 Kg/m² foi adequada para trabalhabilidade do lodo e posterior desaguamento com equipamento mecânico (KNOCKE & WAKELAND, 1983).

A Figura 3.4 mostra que a tensão de cisalhamento e a viscosidade aumentam quando o teor de sólidos aumenta.

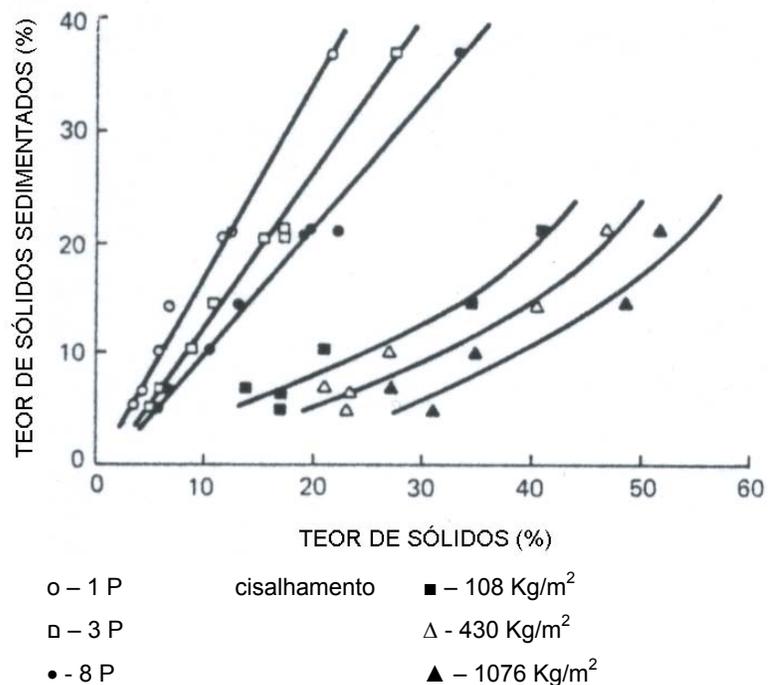


Figura 3.4 – Variação da tensão de cisalhamento e da viscosidade em função do teor de umidade.

Fonte: Adaptado de NOVAK & CALKINS (1975)

Densidade

Este parâmetro varia de acordo com o tamanho do floco, e é inversamente proporcional a ele. Para lodos com flocos de, aparentemente, mesmo tamanho a intensidade de agitação, utilizada na coagulação, não tem efeito sobre a densidade daquele. A capacidade de sedimentação e desaguamento do lodo aumenta com o aumento do teor de sólidos em suspensão nele. A densidade aparente ou relativa do floco é utilizada como parâmetro prévio do teor de sólidos que poderá ser alcançado na torta após o desaguamento realizado por vários processos (ASCE, 1996).

Lodos oriundos do tratamento de água bruta que apresenta baixo valor de turbidez, conseqüentemente possuirá os valores de densidade mais baixos (KNOCKE & WAKELAND, 1983).

Em estudo realizado sobre os efeitos da matéria orgânica na densidade do floco, foi observado que quando o floco contém maior quantidade de matéria orgânica sua densidade, as taxas de desaguamento e o teor de sólidos diminuem. A densidade do floco, originário da coagulação com sais de alumínio pode estar na faixa de 1,14 a 1,22 g/mL, dependendo da quantidade de matéria orgânica total incorporada ao floco (ASCE, 1996).

KNOCKE & WAKELAND (1983) realizaram pesquisa com amostras de lodo coletadas em várias ETAs do estado da Virgínia, nos Estados Unidos, que utilizam como coagulante íons metálicos para tratamento de água superficial. Aqueles autores verificaram a relação entre a densidade do floco e o teor de sólidos na torta após a fase de desaguamento.

Ainda segundo aquele pesquisador, floco de lodos que possuem em sua composição hidróxido de alumínio foi caracterizado como tendo densidade baixa, aproximadamente, 1,005 g/ml e apresentaram teor de sólidos, correspondentemente, baixo (compreendido na faixa de 7 a 19%) obtido após desaguamento a vácuo. Um segundo grupo daquele lodo caracterizado pela alta densidade do floco, da ordem de 1,013 g/mL, atingiu melhora significativa no teor de sólidos, variando entre 20 e 34%.

Na Tabela 3.4 apresentam-se as densidades de floco de vários lodos de ETA, bem como o teor de sólidos máximo encontrado na torta, após o desaguamento.

Tabela 3.4 – Resumo da densidade do floco e do teor de sólidos na torta desidratada para vários tipos de lodo.

Tipo de Lodo	Densidade do Floco (g/mL)	Densidade do Sólido Seco (g/mL)	Teor Máximo de Sólidos na Torta Desaguada (% em massa)			
			Adensamento por Gravidade	Filtração a Vácuo	Centr.	Filtro Prensa
Lodo cond.	1,06 - 1,08	1,58	2,7	17,0	11,0	21,0
Lodo cond.(*)	> 1,30	1,60	25,0	45,0	33,0	40,0
Ferro I	1,26 - 1,28	2,86	8,9	27,0	31,0	30,0
Ferro I	>1,30	2,86	16,0	54,0	44,0	53,0
Alumínio I	1,22 - 1,25	2,55	3,0	17,0	15,0	25,0
Alumínio III	1,14 - 1,16	2,45	3,0	14,0	10,0	
Cal	> 1,30	2,47	13,0	41,0	42,0	

(*) - lodo previamente condicionado através do método do congelamento e degelo

Fonte: Adaptado de ASCE, 1996.

A concentração de sólidos, obtida por vários métodos de desaguamento, sugere que a densidade do floco pode ser um parâmetro importante como estimativa do teor de sólidos que poderá ser encontrado na torta depois de desaguada (ASCE, 1996).

KNOCKE & WAKELAND (1983) observaram que existe uma relação entre a densidade aparente do floco e o teor de sólidos na torta após o espessamento, realizado com vários equipamentos de desaguamento. O aumento do teor de sólidos é proporcional ao aumento da densidade.

Distribuição de Partículas por Tamanho

O tamanho das partículas tem papel significativo na definição das taxas de desaguamento do lodo que apresenta em sua composição hidróxido de alumínio ou ferro (KNOCKE & WAKELAND, 1983). Segundo estudo destes pesquisadores é errôneo assumir que

as partículas de lodo sejam esferas perfeitas, pois sua observação ao microscópio mostrou que as mesmas não são esféricas, e muitas têm forma elíptica irregular.

Para uma estação piloto, abastecida pelo rio Tamisa, que trata 5 m³/h, utiliza coagulação química, sedimentação e filtração rápida por gravidade, os pesquisadores HALL & CROLL (1997) notaram que os picos nos valores da turbidez (da ordem de 0,1 a 0,3 NTU) no começo da carreira de filtração, foram associados com quantidade de partículas compreendidas na faixa de 1000 a 15000 por mL.

De acordo com dados obtidos pela utilização do contador de partículas, do tipo HIAC, pôde-se observar que os flocos de lodo, da coagulação com sais de alumínio, e que não sofreram condicionamento químico possuíam tamanhos iguais ou menores que 20µm. Deste modo, conclui-se que a utilização de condicionadores influencia no aumento do tamanho das partículas e este está associado com a diminuição da resistência específica à filtração (ASCE, 1996).

Embora o tamanho da partícula seja fator primordial na determinação do comportamento de filtração, dois outros fatores devem ser avaliados. O primeiro se refere à distribuição das partículas, sendo esta bimodal, o lodo será susceptível a colmatação, a qual é definida com a migração de partículas finas por meio da torta, resultando em pouca permeabilidade perto da superfície de filtração. Isto foi notado em alguns lodos de ETEs, contudo não ocorre comumente em lodo de ETAs (ASCE, 1996).

O segundo diz respeito à probabilidade, especialmente, em lodo cujo coagulante foi sal de alumínio, da formação de pequenas partículas por quebra ou desagregação decorrente do cisalhamento. Aquele tipo de lodo é muito sensível ao cisalhamento (ASCE, 1996).

As características químicas do lodo têm maior influência sobre as opções de disposição final e reuso benéfico do que sobre a capacidade de trabalho, adensamento ou desaguamento do lodo. O teor de sólidos varia, amplamente, com o tipo de resíduo. Este pode ser líquido, sólido ou lodo (resíduo semi-sólido) (ASCE, 1996). Dentre as propriedades químicas pode-se citar:

Teor de Sólidos

Segundo apresentado por ASCE (1996), este parâmetro varia significativamente de acordo com o processo de tratamento ao qual o lodo é submetido. Conforme exposto por aquela publicação, igualmente importante ao teor de sólidos é a relação entre os sólidos totais voláteis e os sólidos totais (STV/ST). Felizmente, como a maioria dos sólidos presentes nos lodos de ETAs tende a ser inertes, aquela relação, na maioria das vezes, é menor do que 30%.

Nos lodos condicionados a matéria em suspensão inerte pode ser o hidróxido de alumínio ou ferro precipitados que são difíceis de serem desaguados devido a sua natureza gelatinosa. Nos lodos de abrandamento os sólidos inertes estão associados com o carbonato de cálcio cristalino, que reduz sobremaneira o fluxo da água armazenada dentro do floco (ASCE, 1996).

Com a diminuição da porcentagem de hidróxido, de alumínio ou ferro, no lodo ocorre um aumento na taxa de sedimentação e se pode atingir altas concentrações de sólidos no lodo sedimentado NIELSEN, et al. (1973).

Concentração de Metais

Os teores totais de cádmio, cobre, cromo, níquel, chumbo e zinco presente no lodo oriundo de uma ETA varia na faixa de 10 a 35% dos valores correspondentes para um lodo de ETE. Exceto pelo cádmio, de 76 a 87% daqueles metais foram encontrados na forma de óxidos ou silicatos em lodos condicionados com sais de alumínio ou ferro (ASCE, 1996).

Aquela publicação ainda observa que a presença de vários metais pesados no lodo de uma ETA, abastecida tanto por águas subterrâneas como superficiais, indicou que para valores de pH extremamente baixos (menor do que 2,5) e a alternância de condições (aeróbias / anaeróbias), há o favorecimento da existência daqueles metais na água (ASCE, 1996).

Muitos dos metais pesados encontrados nos lodos de ETAs são, em geral, devidos a impurezas dos produtos químicos. Conseqüentemente, seus teores nos lodos podem ser limitados por meio de especificações cuidadosas dos produtos químicos adicionados à água (ASCE, 1996).

Toxicidade

A toxicidade dos lodos gerados em estações de tratamento de água, para plantas, seres humanos e organismos aquáticos, depende de fatores tais como: características da água bruta; produtos químicos utilizados no tratamento e possíveis contaminantes contidos nesses produtos; reações químicas ocorridas durante o processo; e forma de remoção e tempo de retenção do lodo nos decantadores (CORDEIRO, 1999).

Também relacionado com a toxicidade, como foi observado por HALL & CROLL (1997), pode-se apontar as dificuldades em medir a concentração de oocistos na água de abastecimento, o que tem conduzido à avaliação de parâmetros substitutos com os quais são avaliadas as remoções daqueles pelo tratamento. Ainda de acordo com aqueles autores, a medida do valor da turbidez, na água filtrada, pode dar apenas uma indicação do risco da penetração dos oocistos no filtro. Eles sugerem o contador de partículas como um indicador mais sensível, da presença de tais organismos na água filtrada.

Sendo assim, a aplicação mais adequada para um contador de partículas, seria como uma ferramenta de diagnóstico para a identificação das condições de operação, as quais reduziriam ou minimizariam as partículas na água filtrada. O tamanho dos microrganismos presentes na água, após a unidade de filtração, está compreendido entre 2 e 5 μm (HALL & CROLL, 1997).

Conforme estudado por VLASKI et al (1997), as cianobactérias, *Microcystis aeruginosa*, são reconhecidas como substitutas ideais para se estimar a eficiência do processo de remoção de partículas com tamanho na faixa de 3 a 10 μm . Tal eficiência pode ser avaliada como sendo função da distribuição do tamanho de partículas e da fase de coagulação.

Ainda de acordo com aqueles pesquisadores, as células simples, com tamanho compreendido naquela faixa de valores, com forma circular devido as suas características superficiais permanecem na água filtrada, isto foi notado em muitas ETAs, mesmo quando outros critérios de qualidade são satisfeitos. Isto faz com que as cianobactérias, sejam ideais como referência na remoção de partículas. Até mesmo para a remoção de microrganismos patogênicos como o *Cryptosporidium parvum* e *Giardia lamblia*.

Um problema sério atualmente enfrentado pelas estações do tipo completo é a cryptosporidiose, que é uma diarreia causada pelo parasita protozoário *Cryptosporidium parvum*. Segundo HALL & CROLL (1997) o *Cryptosporidium* tem forma esférica com diâmetro variando entre 4 e 6 μm . Para estes autores, a resistência do oocisto à desinfecção significa que muitas pesquisas devem ser desenvolvidas com o intuito de maximizar a remoção deles no processo de tratamento de água. Uma atenção especial deve ser dispensada as ETAs que operam com filtros rápidos por gravidade.

A Tabela 3.5 apresenta uma comparação, resumida, entre as características do lodo de decantador e da água de lavagem dos filtros de uma ETA.

Tabela 3.5 - Características físicas e químicas dos lodos de ETAs.

Quantidade (% vol. Tratado)	Lodo de Decantador	Água Lav. Filtro
		0,06 – 0,25
Características Físicas		
Cor (UH)	4.800 – 17.500	250 – 1.000
Turbidez (uT)	1.200 – 6.400	15 – 350
Odor	Nenhum	Nenhum
Sedimentabilidade	50% vol. /8 hs.	80% vol. /2-24 hs.
Resistência Específica (cm/g)	5 a 50. 10^{12}	6 a 12. 10^{12}
Viscosidade (g/cm. s).	0,03	0,01
Características Químicas		
Sólidos Totais (mg/L)	1.159 – 16.830	121 – 446
Sólidos Voláteis (mg/L)	571 – 10.166	44 – 115
pH	6 – 8	7,2 – 7,8
Contagem de Bactérias	Elevada	Elevada
Ferro (mg/L)	17,5 – 1.800	4,9 - 20

Fonte: Adaptado de Yuzhu (1996)

Qualquer tipo de lodo de decantador consiste em uma combinação entre uma fase sólida com certa quantidade de líquido. O comportamento deste não deve ser erroneamente assumido como sendo igual ao da água em seu estado líquido natural. Há diferentes formas físicas da água no lodo, as quais exerce influência marcante na maior ou menor dificuldade de separação entre as fases (REALI, 1999).

Conforme apresentado em artigo de autoria de KNOCKE & WAKELAND (1983) a dificuldade ou facilidade em remover a água do lodo, está diretamente relacionada com o tipo de água que é dominante na amostra. O pesquisador Vesilind utilizou o teste de centrifugação para proceder com a quantificação da água presente no lodo. Outros estudos propuseram que técnicas relacionadas com a medida da mudança da pressão de vapor poderiam ser úteis para quantificação da água associada ao floco de lodo.

As diferentes frações de água presente no lodo, mostradas na Figura 3.5, podem ser ordenadas segundo sua dificuldade crescente de separação da fase sólida, segundo VESILIND (1994), são:

- a) **Água livre:** é aquela não associada, nem influenciada, por partículas sólidas em suspensão. Pode ser removida por drenagem, adensamento e desaguamento mecânica;

- b) **Água intersticial:** está retida nos interstícios dos flocos. Parte dela está presa no interior do floco, mas pode ser liberada se a estrutura do floco for destruída. Removível mecanicamente;

- c) **Água vicinal:** constituída por múltiplas camadas de moléculas de água fisicamente ligadas, as quais encontram-se firmemente presas à superfície da partícula por meio de pontes de hidrogênio. Sua diferença com a anterior é que aquela fica livre para se mover quando o confinamento é eliminado, e esta só pode ser removida pela diminuição da área superficial total de partículas sólidas a que ela pode se ligar. Removível por condicionamento químico; e

- d) **Água de hidratação:** quimicamente ligada à superfície da partícula, removível apenas pelo aumento da energia térmica.

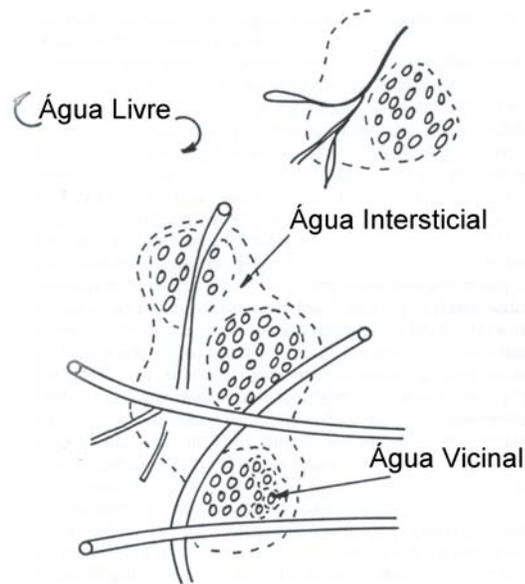


Figura 3.5 – Distribuição da água no floco de lodo.

Fonte: Vesilind (1994)

Os processos de desaguamento, geralmente falham na remoção da água vicinal e de hidratação. Com relação ao efeito da distribuição das frações líquidas do lodo no desaguamento, a água livre, maior parcela no lodo, pode ser facilmente removida pelos equipamentos mecânicos de desaguamento. Contudo, a água vicinal que representa menos de 10% do volume líquido do sedimento, é difícil de ser removida (WU & HUANG, 1997).

Pode-se concluir que o lodo é: 1) insolúvel na faixa de pH natural da água; 2) rapidamente sedimentável, porém a uma concentração que é inadequada para ser trabalhado e posteriormente disposto (20% de teor de sólidos é estimado como sendo o valor mínimo aceitável); e 3) muito compressível e resistente à passagem de água por ele (ALBRECHT, 1972).

3.3 Quantidade de Lodo Produzido

A quantidade de lodo produzido é função da qualidade da água bruta, do tipo e dosagem do coagulante. Diversas fórmulas empíricas diferentes foram desenvolvidas para se estimar a quantidade de lodos produzidos nas ETAs (YUZHU, 1996).

Os pesquisadores GRANDIN (1992) e YUZHU (1996), apresentaram algumas daquelas fórmulas para se determinar o volume de lodo gerado em uma estação de tratamento.

a) a parcela de sólidos secos totais produzidos (S_{sec}) em ETAS pode ser determinada através do valor estimado da quantidade de sólidos produzidos por volume unitário de água bruta tratada (P_s) multiplicado pelo volume de água bruta tratada (V_a). O peso seco de sólidos produzidos por volume unitário de água bruta tratada, P_s , por sua vez, pode ser aproximado pelo valor médio de turbidez da água bruta (T) mais o valor médio da dosagem de coagulante (D_c), conforme exposto na equação 3.2.

$$S_{sec.} = 453,59 (P_s \times V_a) \times 3,785 (T + D_c) \times V_a \quad (3.2)$$

onde:

$S_{sec.}$ - produção de sólidos secos totais na ETA (g)

P_s - produção de sólidos secos por volume unitário de água bruta (g/m^3)

T - turbidez da água bruta (uT)

D_c - dosagem do coagulante (g/m^3)

V_a - volume de água bruta tratada (m^3)

Considera-se neste caso que a fração de sólidos em suspensão do lodo seja igual aos sólidos em suspensão da água bruta, e estes podem ser estimados pelo valor da turbidez daquela.

b) a equação 3.3 é resultado de análises realizadas em várias ETAs norte americanas.

$$P = 3,5 \times 10^{-3} \times T^{0,66} \quad (3.3)$$

onde:

P – produção de sólidos (Kg de sólidos secos por m^3 de água tratada)

T – turbidez da água bruta (uT)

c) a equação 3.4 é uma fórmula desenvolvida pelo *Institution of Water Engineers*, resultado de ensaios com diversas ETAs Inglesas.

$$P = (SS + 0,07C + H + A) \times 10^{-3} \quad (3.4)$$

onde:

P – produção de sólidos (Kg de sólidos secos por m³ de água tratada)

SS – sólidos em suspensão na água bruta (mg/L)

C – cor da água bruta (uH)

H – precipitado do coagulante (mg/L)

A – outros aditivos, por exemplo, polímero, carvão, etc (mg/L)

O autor REALI (1999) apresentou três fórmulas que estimam a taxa de produção de sólidos secos (T_s) em uma ETA. Aquela taxa é expressa em gramas de sólidos por m³ de água tratada.

d) Para ETAs que utilizam sulfato de alumínio – $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14 H_2O$ – como coagulante.

$$T_s = [\text{dosagem de sulfato de alumínio (mg/L)} \times 0,26^*] + [\text{turbidez da água bruta (uT)} \times 1,5^{**}]$$

* - fator que depende do número de moléculas de água associadas a cada molécula de alumínio (varia de 0,23 a 0,26).

** - razão entre a concentração de sólidos em suspensão total presentes na água bruta e a turbidez da mesma (usualmente na faixa de 1 a 2).

e) Para ETAs que utilizam cloreto férrico como coagulante.

$$T_s = [\text{dosagem de cloreto férrico (mg/L)} \times 0,66^*] + [\text{turbidez da água bruta (uT)} \times 1,5]$$

* - considerando cloreto férrico anidro. Para cloreto férrico hidratado ($FeCl_3 \cdot 6 H_2O$) este fator torna-se 0,40.

f) Para casos de lodos gerados em sistemas de abrandamento com cal, T_s varia conforme o nível de redução de dureza da água bruta. Geralmente, de 2 a 3 mg/L de sólidos secos são produzidos para cada mg/L de dureza removida, assim:

$$T_s = [2,5 \times \text{dureza total removida (mg/L como } CaCO_3)]$$

Deve-se ressaltar aqui que estas equações, empíricas, foram desenvolvidas com base

em dados de uma, ou mais, estação de tratamento de água. Sendo assim, elas podem não ser aplicáveis em outras ETAs.

3.4 Velocidade de Sedimentação

Os parâmetros de projeto e operação das unidades de floculação e decantação de uma ETA devem ser otimizados através de ensaios de laboratório.

BRITO *et al*, (1999) relataram que tem sido comumente assumido que o tempo de sedimentação, após a coagulação e floculação realizadas em reatores estáticos, deve ser relativamente longo, correspondendo a velocidades de sedimentação muito baixas (em geral menores que 0,05 cm/min), de forma a resultar somente partículas primárias no sobrenadante. Com isso, procura-se relacionar o número de partículas primárias aos valores de turbidez remanescente, visto que a maioria da modelação matemática foi desenvolvida tendo como base o número de partículas primárias presentes na água, de acordo com aqueles pesquisadores.

A sedimentação é o fenômeno físico no qual as partículas em suspensão apresentam movimento descendente em meio líquido de menor massa específica, devido à ação da gravidade. A ocorrência de sedimentação daquelas partículas propicia a clarificação do meio líquido, ou seja, a separação das fases sólida e líquida (BABBIT *et al*, 1962).

Embora a sedimentação seja uma técnica muito antiga, somente no século XX é que foi registrado e estudo teórico acerca da sua aplicação para a clarificação da água, apesar das leis físicas, básicas, terem sido estabelecidas desde o início do século XIX (DI BERNARDO, 1993).

Conforme exposto por este pesquisador, a teoria da sedimentação baseia-se no fato de que, qualquer partícula, não coloidal, suspensa em um meio líquido em repouso e de menor massa específica, será acelerada pela ação da gravidade até que as forças de resistência viscosa e de deformação do líquido sejam iguais à resultante do peso efetivo da partícula. A partir daí, a sua velocidade descendente será constante e conhecida como velocidade terminal de sedimentação ou, simplesmente, velocidade de sedimentação. Da aplicação das leis básicas da sedimentação resulta que a velocidade de sedimentação depende da dimensão, forma e

massa específica da partícula.

Na prática, a velocidade de sedimentação dos flocos resulta geralmente compreendida entre 1 e 5 cm/min, de forma que os valores otimizados e utilizados em modelos matemáticos, a partir de velocidade de sedimentação muito baixa, podem não corresponder exatamente àqueles que conduzem à maior eficiência da floculação-sedimentação, de acordo com PÁDUA & DI BERNARDO, 1999.

Os pesquisadores BRITO *et al* (1999) concluíram que a velocidade de sedimentação exerce grande influência e deve ser selecionada de forma racional, em consonância com a unidade de decantação existente na ETA. No caso da execução de ensaios visando a elaboração do projeto de novas ETAs, recomendaram estudar pelo menos três velocidades de sedimentação e relacioná-las com a eficiência de remoção de turbidez ou cor, o que permitirá ao projetista adotar aquela considerada apropriada. A velocidade de sedimentação dos flocos é importante para que o projeto do decantador de uma ETA seja executado de forma eficiente.

As partículas grandes ($\phi > 10$ mm) precipitam com movimento acelerado, de acordo com a Lei de Newton (queda dos corpos), e as pequenas ($\phi < 0,1$ mm), no seu movimento de queda atingem um regime de equilíbrio e apresentam velocidade constante. As partículas extremamente pequenas, da ordem de um milésimo de milímetros e menores, são objeto do movimento Browniano contínuo, não sendo sedimentáveis. Para a remoção de partículas coloidais recorre-se à precipitação química ou coagulação (DI BERNARDO, 1993).

Em um decantador ideal, o escoamento de partículas discretas na sedimentação ocorre: sem turbulência; ausente de correntes secundárias (de densidade e de origem térmica); e não há ação de ventos e curtos-circuitos. Porém, quando tais interferências se fazem presentes, a sedimentação dos flocos tende a ser lenta, mesmo que alguma agregação ocorra durante a sedimentação provocando aumento de velocidade. O efeito global das adversidades que ocorrem nos decantadores pode diferir muito dos resultados obtidos nos ensaios, nos quais a água esta em repouso, como observado por BABBIT (1962).

PÁDUA & DI BERNARDO (1999) observaram que, em função da sedimentabilidade dos flocos e da frequência e forma de remoção do lodo, é possível reduzir a relação entre comprimento e largura usualmente adotados no projeto dos decantadores das ETAs do tipo

convencional, com escoamento horizontal, sem afetar de modo significativo à qualidade da água decantada.

Ainda, segundo aqueles pesquisadores, a largura e o comprimento daqueles decantadores, de fluxo horizontal, são estabelecidos em função da Taxa de escoamento superficial (TES), esta geralmente é inferior a $50 \text{ m}^3/\text{m}^2$. A TES de projeto depende basicamente da velocidade de sedimentação dos flocos formados após a coagulação química e posterior floculação.

A teoria de Hazen foi muito importante ao mostrar que a eficiência de remoção de partículas discretas é função da área superficial do tanque de sedimentação e independe de sua profundidade e do tempo de detenção. Hazen ainda sugeriu que, a partir do conhecimento das características de sedimentabilidade das partículas em suspensão, por meio de ensaios e construção do gráfico da velocidade de sedimentação em função da concentração da suspensão, é possível prever o desempenho dos decantadores com relação à remoção de partículas discretas com diferentes velocidades de sedimentação (BRITO *et al*, 1999).

Apesar da grande contribuição de Hazen para um melhor entendimento da sedimentação, coube a Camp, em 1946, a proposição de metodologia racional para a análise das características de sedimentabilidade das partículas floculentas, presentes nos afluentes dos decantadores. As partículas floculentas podem aglomerar-se durante a sedimentação, resultando em flocos que tenham velocidade maior que aquela da partícula inicialmente considerada. (DI BERNARDO, 1993)

Para aquele pesquisador, no decantador não-ideal, não se pode afirmar que a capacidade da remoção das partículas seja independente da profundidade e do tempo médio de detenção, mas sim, que para suspensões de partículas floculentas em decantadores com escoamento contínuo, a área superficial e a TES são parâmetros mais importantes que a profundidade e o tempo médio de detenção.

Emprega-se o processo de sedimentação para: remoção de areia, remoção de partículas sedimentáveis finas, retenção de flocos, entre outros. A sedimentação pode ser classificada de duas maneiras: a) sedimentação simples; e b) sedimentação com floculação ou coágulo-sedimentação (DI BERNARDO, 1993).

A sedimentação simples é aquela na qual ocorre a deposição, quase total, da matéria suspensa na massa líquida a clarificar, de forma natural. Uma quantidade de partículas sólidas em suspensão consegue, em regime quiescente, vencer facilmente as forças resistentes que se opõem à deposição. Isto em consequência de suas densidades, volumes e formas maiores, ou porque tais partículas possuem a propriedade de se aglomerarem espontaneamente, formando flocos mais volumosos e densos, de acordo com aquele autor.

Prevalecendo o material coloidal ou outros de deposição lenta, a técnica sanitária recorre a reagentes químicos (coagulantes), capazes de originar na massa líquida um precipitado de propriedades tais que permite neutralizar a carga elétrica negativa do colóide e aglomerar a matéria fina e microscópica sob a forma de flocos sedimentáveis. A este processo dá-se o nome de sedimentação com floculação (PÁDUA & DI BERNARDO, 1999).

A segunda maneira como a sedimentação pode ser classificada é utilizada como um dos processos de tratamento, sendo um passo preliminar no preparo da água para a filtração, dentro do método completo de tratamento de água para abastecimento.

Como observado por DI BERNARDO (1993), e de acordo com a teoria de sedimentação, a equação de Stokes, considerando partículas discretas (peso, forma e tamanho constante), a velocidade de sedimentação V_s (cm/s) é dada pela equação 3.5.

$$V_s = \frac{G(\rho_s - \rho_a)\phi_p^2}{18\mu} \quad (3.5)$$

onde:

G - aceleração da gravidade em m/s^2

ρ_s - massa específica da partícula em kg/m^3

ρ_a - massa específica da água em kg/m^3

ϕ_p - diâmetro da partícula em m

μ - viscosidade absoluta da água em Ns/m^2

Portanto a V_s depende das dimensões e da massa específica das partículas. No tratamento de água, os flocos obtidos não são partículas discretas. Variam de tamanho, forma, massas específicas, dependendo do tipo de coagulante, auxiliar de floculação, qualidade da

água bruta, características da coagulação e da floculação. Somando-se isso ao fato dos decantadores apresentarem influências hidráulicas, conclui-se que a equação de Stokes não fornece parâmetros utilizados no tratamento de água, de acordo com aquele pesquisador.

A velocidade de sedimentação teórica determinada nos ensaios deve ser reduzida para compensar os efeitos adversos que ocorrem no decantador (PÁDUA E DI BERNARDO, 1999).

Para DI BERNARDO (1993), dada uma certa velocidade de sedimentação V_s , a remoção de partículas é $(1 - Cr_0)$, sendo Cr_0 a fração remanescente. Como mencionado anteriormente, partículas com velocidade de sedimentação menor que V_{s0} , são removidas, desde que estejam localizadas em posição inferior à da superfície, de modo que a fração removida resulte proporcional à relação V_s/V_{s0} . A remoção global para uma certa velocidade de sedimentação, será dada pela equação 3.6.

$$R_g = 1 - Cr_0 + \int_0^{Cr_0} \frac{V_s}{V_{s0}} dC_r \quad (3.6)$$

onde:

R_g - Remoção global

Cr_0 - Fração de turbidez remanescente

V_s - Velocidade de sedimentação em cm/min

V_{s0} - Velocidade de sedimentação da partícula discreta (cm/min)

Os pesquisadores RASMUSSEN & LARSEN (1997) realizaram testes em coluna de sedimentação em que foi analisado lodo de reator por batelada e a sucrose foi adicionada como um estímulo ao lodo ativado. A medição contínua da velocidade de sedimentação mostrou uma resposta positiva após a adição da sucrose.

Segundo aqueles autores, a vantagem da coluna é sua capacidade de medir a velocidade de sedimentação para qualquer tipo de material em qualquer concentração. Em seu experimento foi realizado o balanço de massas para determinar a velocidade de sedimentação no interior da coluna. O aumento na velocidade de sedimentação pode ser o resultado do

crescimento de algumas bactérias ou da produção de material extracelular, como especulado por RASMUSSEN & LARSEN (1997).

3.5 Tratamento do Lodo

Com o objetivo de reduzir os impactos ambientais os lodos produzidos nas ETAs devem ser dispostos de forma econômica e adequada. Pesquisas mostram que os custos com transporte e disposição final daqueles, compreendem a maior parcela do custo total do tratamento. Uma solução que visa minimizar este valor é reduzir a quantidade de água no lodo. Uma seqüência eficiente para tal redução é o adensamento, seguido por desaguamento natural ou mecânico, como apontado por YUZHU (1996).

De acordo com REALI & PATRIZZI (1999), em geral, é necessário fazer, após o adensamento e antes do desaguamento, o condicionamento do lodo. Ainda de acordo com aqueles pesquisadores, em alguns casos o condicionamento se faz necessário antes mesmo da fase de adensamento como forma de obter um melhor resultado.

O pesquisador MONTGOMERY (1985) apresentou um diagrama, generalizado, do processo de tratamento de lodo mostrando as várias unidades que podem ser utilizadas no gerenciamento de lodos, e a seqüência na qual elas podem ser dispostas com o intuito de se formar um sistema completo. A Figura 3.6 mostra uma adaptação do diagrama montado por aquele autor.

Segundo aquele autor, a seleção dos passos e unidades do processo de tratamento do lodo depende de fatores como: área disponível, condições climáticas, tipo de lodo, custo do reuso versus disposição, distância do local de disposição final e tipo de disposição última.

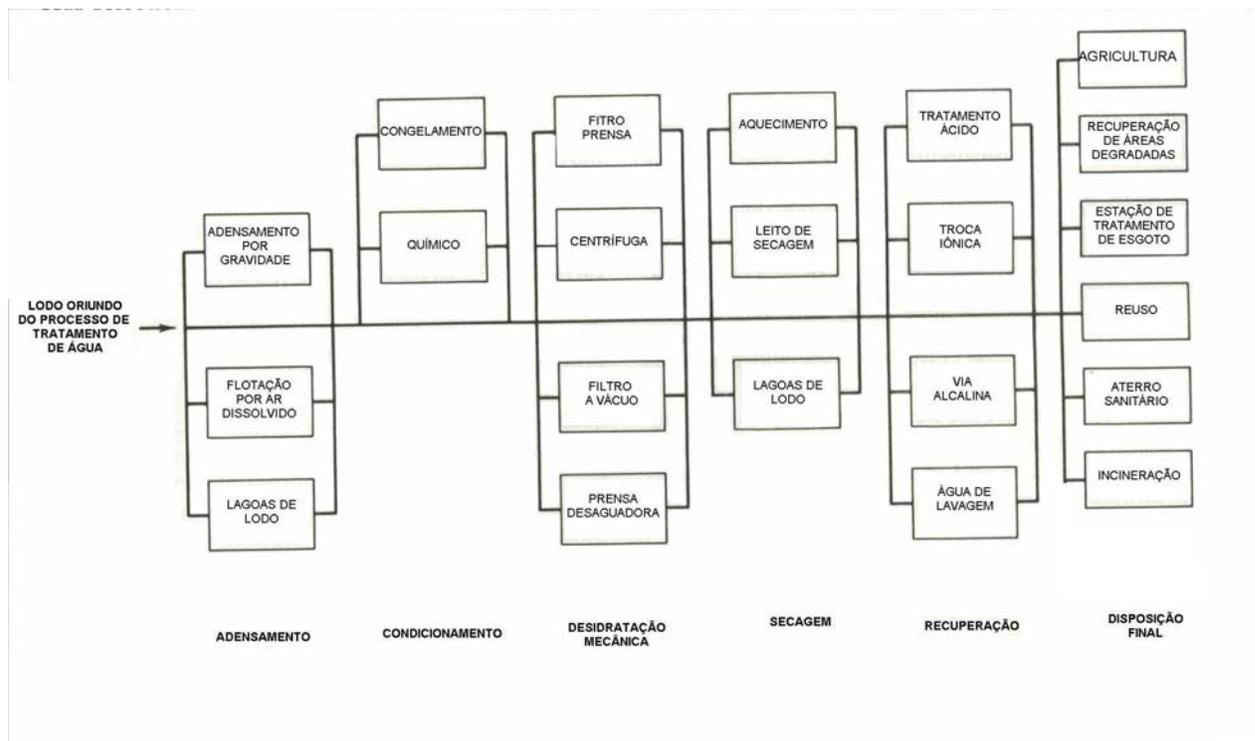


Figura 3.6 – Diagrama das unidades do processo de tratamento do lodo.

Fonte: Adaptado de MONTGOMERY (1985)

O pesquisador MONTGOMERY (1985) em conformidade com a Figura 3.6, apresentou alguns exemplos, típicos, de gerenciamento do lodo. Para aquele autor, por exemplo, no caso da disposição de lodo coagulado com sulfato de alumínio, ele aconselha duas formas de tratamento do lodo a primeira utilizando adensamento por gravidade, condicionamento químico, centrifugação e disposição final em aterro sanitário, e a segunda utilizando lagoa de lodo, recuperação da água de lavagem dos filtros e disposição final em aterro sanitário ou na rede de esgoto sanitário.

3.5.1 Adensamento

O adensamento ou espessamento é uma das operações mais importantes no processo de tratamento de lodos gerados em ETAs. É uma das primeiras unidades do tratamento, e tem por finalidade a remoção da água e o aumento do teor de sólidos do lodo gerado (TEIXEIRA & FERREIRA FILHO, 1999). Tal remoção de água visa reduzir o volume do lodo para posterior desaguamento YUZHU (1996).

Os tipos de unidades de espessamento que podem ser encontradas são os adensadores por gravidade ou de flotação por ar dissolvido (TEIXEIRA & FERREIRA FILHO, 1999).

O adensador por gravidade, Figura 3.7, é o mais usado no tratamento de água. Consiste, geralmente, em um tanque de forma circular, projetado e operado, semelhantemente a um decantador, equipado com raspador mecânico no fundo e podendo possuir, ou não, um depósito de lodo. Este é conduzido até ao tanque, que permite que ocorra a sedimentação e a compactação, conforme apontado por YUZHU (1996).

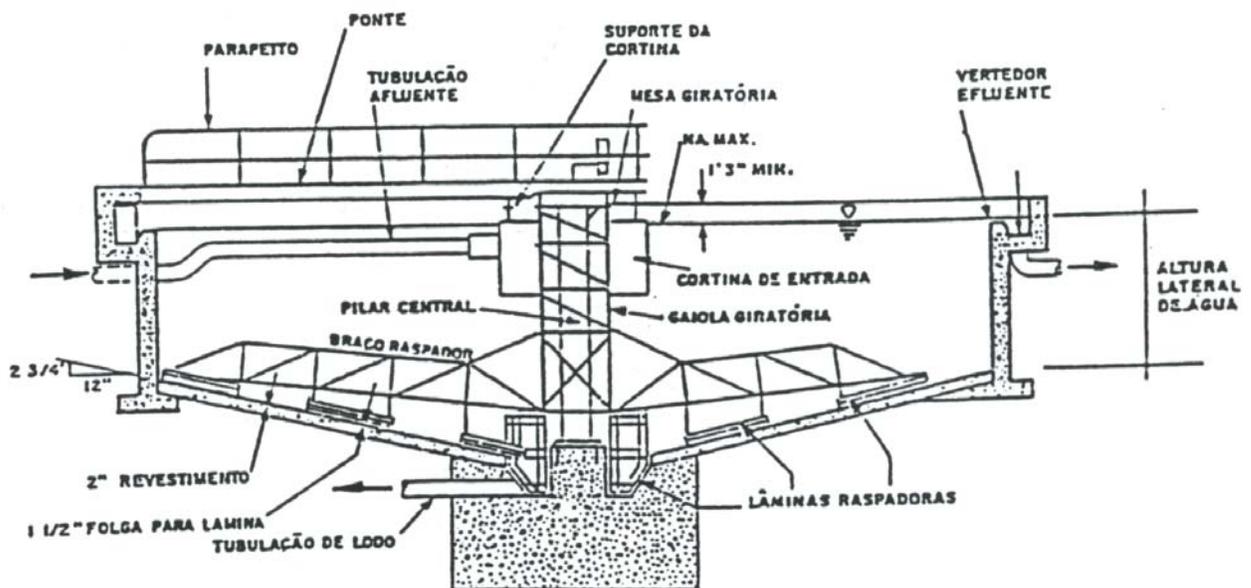


Figura 3.7 – Exemplo esquemático de adensador por gravidade

Fonte: Grandin (1992)

Um adensador por gravidade, atuando de forma eficiente, pode adensar o lodo deixando-o com teor de sólido na faixa de 1 a 2%. Usando pré-condicionamento com polímeros esta concentração pode atingir 5% ou mais (YUZHU, 1996).

Conforme descrito por GRANDIN (1992) o outro processo de adensamento, por flotação, é menos utilizado e pode gerar lodo espessado com teor de sólidos que variam na faixa de 2,5 a 4%. Os tanques de flotação podem ser de forma retangular ou circular e, em geral, são dimensionados com taxas que ficam entre 5 e 10 Kg/m²h.

Os principais parâmetros de projeto de unidades de adensamento por gravidade com escoamento contínuo são a taxa hidráulica de aplicação superficial e a taxa de aplicação de sólidos (REALI, 1999).

Além daqueles dois parâmetros de projeto usados para espessamento por gravidade (taxa hidráulica de aplicação superficial e taxa de aplicação de sólidos), o projeto de adensadores por flotação também depende da relação entre o fluxo de massa de ar dissolvido fornecido e o fluxo de massa de sólidos em suspensão totais afluentes ao flotor (REALI & PATRIZZI, 1999).

Lodos gerados em ETAs que possuem processo de abrandamento com cal, em geral, produzem lodo fácil de ser adensado (15 - 35% de teor de sólidos na torta final). Por outro lado, lodos oriundos de ETAs, que utilizam sais de ferro ou alumínio como coagulante, apresentam maior dificuldade de adensamento por efeito somente da gravidade (2 - 5% de teor de sólidos), requerendo o pré-condicionamento químico com aplicações de polímeros orgânicos sintéticos. Entretanto, este mesmo lodo também pode ser condicionado com adição da cal, embora ocorra aumento significativo da massa de sólidos contida no lodo adensado (teor de sólidos finais na torta 6 - 9%), REALI (1999).

As características de sedimentação de uma suspensão floculenta dependem do tamanho e densidade do floco, temperatura da água e em alguns casos concentração inicial de partículas (VLASKI et al, 1997).

Além de dados de literatura é sempre recomendável a realização de ensaios em laboratório (colunas de sedimentação) para obtenção de estimativas dos parâmetros de projeto. O método de Talmadge e Fitch, bastante simples e rápido, que requer a realização de apenas um ensaio de sedimentação por coluna (REALI & PATRIZZI, 1999).

A sedimentação geralmente é considerada como um processo que se beneficia dos baixos valores do gradiente de floculação, resultando em flocos grandes com características de adensamento supostamente boas. Os pesquisadores REALI & PATRIZZI (1999) obtiveram resultados melhores com altas dosagens de coagulantes o que provocou aumento da concentração inicial de partículas depois da floculação.

Para VLASKI et al (1997) a intensidade de agitação na floculação de baixa a média (G de 10 a 30s-1) resultou em sedimentação eficiente, porém, a última resultou em uma estrutura de floco mais densa e eficiência de sedimentação mais alta.

A escolha de um determinado polímero como o mais apropriado para o adensamento por gravidade de lodo de ETA, e também para a determinação da dosagem ótima, deve basear-se na avaliação de alguns parâmetros. Assim sendo, a condição ótima corresponderá aos maiores valores do fator de espessamento (Fe) e de clarificação (Fc), combinados com o menor valor da turbidez do sobrenadante e maior teor de sólidos no lodo adensado.

Obtidas as curvas de sedimentação para cada polímero estudado, os valores dos fatores Fe e Fc serão determinados por aquele método expedito.

No interior de sedimentadores por gravidade em ETAs, normalmente ocorrem dois tipos de sedimentação: a impedida ou por zona, e a compressão, que ocorre no fundo das unidades, a partir do momento em que os flocos começam a se acumular no fundo destas. O peso das partículas é suportado pela massa em processo de compactação, que é lento.

Tendo por base os teste de adensamento em coluna de sedimentação, na Figura 3.8 é apresentada curva típica de espessamento obtida em ensaios realizados em coluna de sedimentação e na Figura 3.9 são apresentados os procedimentos gráficos propostos por Talmadge e Fitch para estimativa dos parâmetros de projeto.

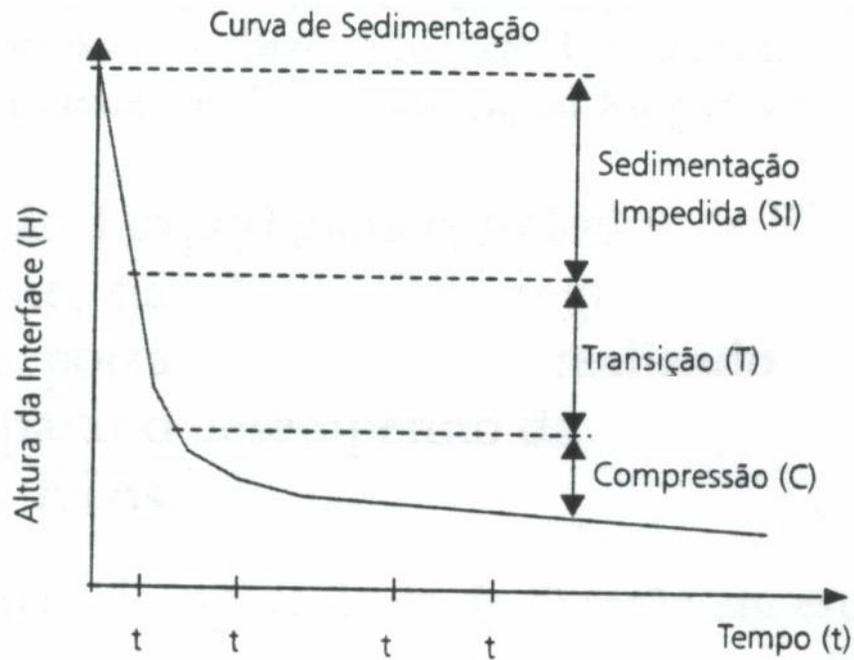


Figura 3.8 – Curva típica do espessamento de lodo em coluna de sedimentação.

Fonte: Reali & Patrizzi (1999)

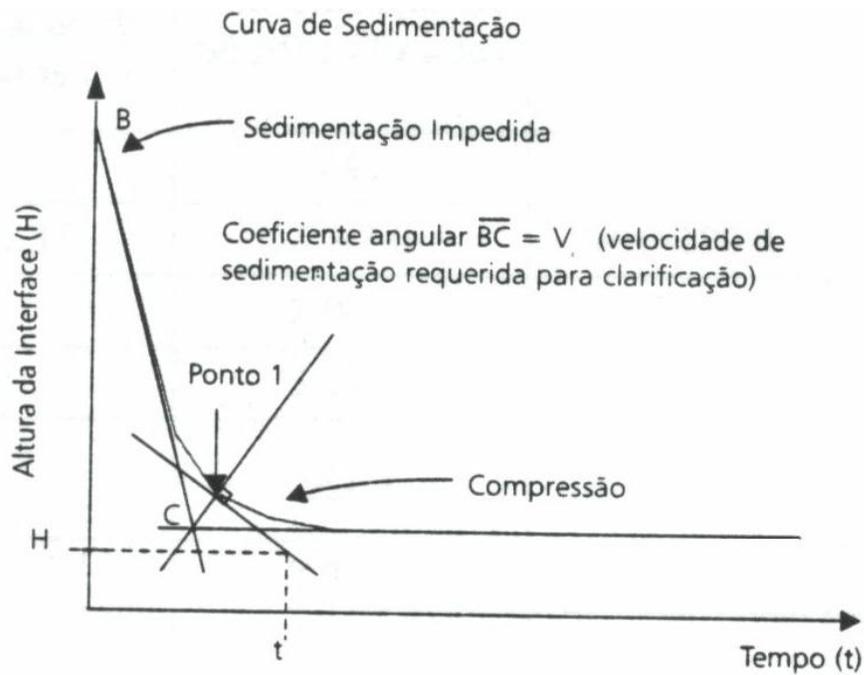


Figura 3.9 – Procedimentos gráficos propostos por Talmadge e Fitch.

Fonte: Reali & Patrizzi (1999)

Os procedimentos para obtenção dos fatores de espessamento e clarificação, adaptados de Reali e Patrizzi são:

1. Determinar o coeficiente angular do primeiro tramo reto que representa a velocidade de sedimentação requerida para a clarificação (V_0).
2. Estender as retas da região de sedimentação impedida (SI) e da região de compressão (C) e traçar a bissetriz do angulo (ponto 1 do gráfico, da figura 3.9).
3. Desenhar a reta tangente à curva no ponto 1.
4. Conhecendo-se a concentração inicial de lodo (C_0) e a altura inicial de lodo (H_0), adotar uma concentração final desejada no efluente (C_u) e determinar a correspondente altura da interface (H_u).

$$H_u = \frac{C_0 \cdot H_0}{C_u} \quad (3.7)$$

5. Desenhar, então, uma linha horizontal a partir de H_u até interceptar a linha tangente ao ponto 1 e encontrar o tempo t_u . Este será o tempo necessário para alcançar concentração C_u no efluente.
6. Determinar, então, os valores de F_c e F_e .

$$F_c = V_0 \quad (3.8)$$

$$F_e = \frac{H_0}{t_u}$$

FERREIRA FILHO (1997) trabalhando com lodo proveniente da ETA Guaraú e da ETA Teodoro Ramos, em São Paulo, fez o espessamento daqueles lodos em sistema piloto de bancada e verificou que a capacidade de adensamento por gravidade do lodo do decantador de ETA que utiliza manancial com alto teor de material orgânico era muito pior do que outra que utilizava um manancial com baixo nível de eutrofização. Foi observado também, que os lodos gerados no tratamento da água dos dois mananciais tiveram o adensamento prejudicado para valores de GT (número de Camp) acima de 10^4 . Ainda de acordo com aquele autor, o sedimento do decantador que trata água do manancial com alto grau de eutrofização, mostrou-se ainda mais sensível ao parâmetro GT e ao tipo de polímero utilizado, para este caso das

ETAs Guaraú e Teodoro Ramos.

A Figura 3.10 apresenta um exemplo esquemático de flotador de forma circular.

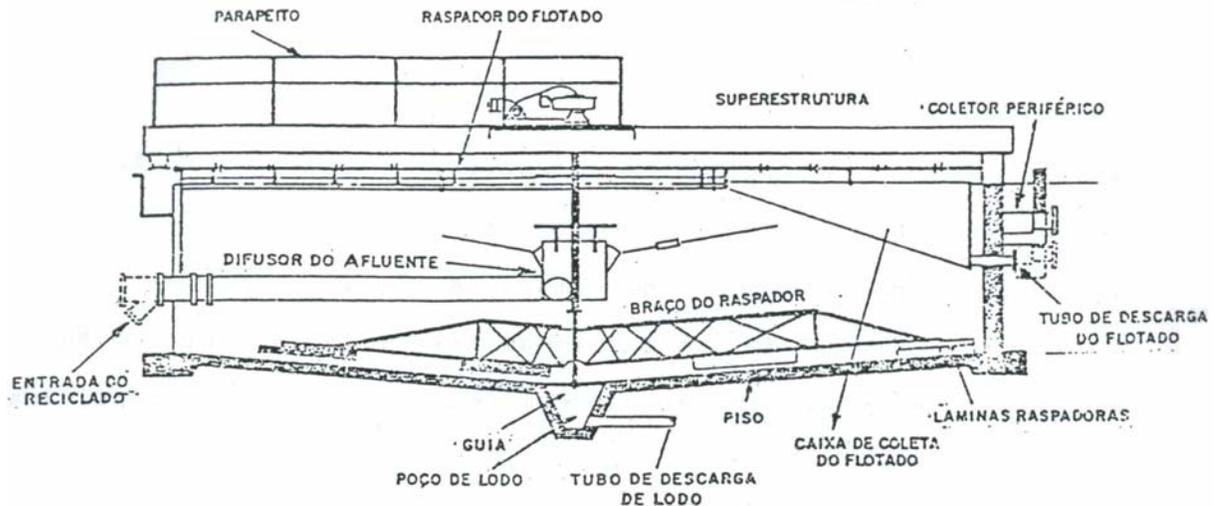


Figura 3.10 – Exemplo esquemático de adensador por flotação.

Fonte: Grandin (1992)

REALI & PATRIZZI (1999) apresentaram os resultados de dois estudos de caso desenvolvidos no programa Prosab. No primeiro, investigou-se o adensamento de lodo de decantador de ETA que utiliza o sulfato de alumínio como coagulante tendo sido obtido o melhor resultado para espessamento por flotação com polímero catiônico, dosagem ótima = 4,5 g/Kg e teor de sólidos no lodo de 7,1%; contra 10,26 g/Kg e 4,6% para adensamento por gravidade. No segundo caso, para ETA que utiliza o cloreto férrico, a partir da aplicação de um polímero aniônico atingiu-se, no espessamento por gravidade 1,6% de teor de sólidos no lodo; contra mais de 3% para o mesmo processo por flotação. O polímero na dosagem de 6,86 g/Kg mostrou-se adequado tanto para lodo adensado por gravidade quanto por flotação.

3.5.2 Condicionamento

O condicionamento tem por objetivo melhorar a propriedade estrutural do floco para permitir a drenagem da água e aumentar o teor de sólidos. Pode ser empregado para melhorar o adensamento por gravidade, porém seu uso é mais freqüente antes dos processos de

desaguamento mecânica (YUZHU, 1996).

Os principais métodos de condicionamento dos lodos de ETAs consistem em congelamento, tratamento térmico, aplicação de auxiliares físicos de filtração e aplicação de produtos químicos (GRANDIN, 1992).

O congelamento é muito eficiente para lodos que têm em sua composição hidróxidos metálicos. Usualmente, é utilizado em locais onde o congelamento natural é possível, pois na utilização artificial deste processo são necessários, aproximadamente, 40 KWh de energia por m³ de lodo (GRANDIN, 1992).

Neste processo a estrutura gelatinosa do lodo é destruída por meio da remoção da água dos flocos ficando aquele, após o descongelamento, com o aspecto de um material de granulação grossa como a areia. Aplicando o método do congelamento em lodos de sulfato de alumínio com 2% de teor de sólidos e posteriormente fazendo um adensamento por gravidade, pode-se gerar tortas com concentração de sólidos de 20%, este valor pode alcançar até 35% caso o desaguamento, mecânico, seja feita por filtração (YUZHU, 1996).

Este método de condicionamento somente é viável para ETA com pequena capacidade, localizada em local de relativa falta de desenvolvimento (FULTON, 1974).

O tratamento térmico baseia-se na quebra dos flocos gelatinosos do lodo por meio de aquecimento, permitindo a drenagem da água e melhorando a desidratabilidade do mesmo. Este processo é considerado inviável devido à má qualidade do efluente, ao seu baixo teor calorífico, aos elevados custos de energia e aos resultados não expressivos atingidos na torta desidratada (YUZHU, 1996). Contudo, trabalhos recentes mostraram que o tratamento térmico tem atingido bons resultados na torta desaguada com teores de sólidos da ordem de 25 a 30%.

Segundo NIELSEN *et al* (1973) o processo térmico produz lodo mais trabalhável do que aquele gerado no tratamento com polímeros. Contudo, o tratamento térmico do lodo acarreta problemas de odor.

Os auxiliares de filtração são indicados para situações em que ocorra o entupimento rápido do meio filtrante. Estes auxiliares podem ser materiais granular ou fibroso que é capaz

de formar uma torta muito permeável. Tais materiais podem ser utilizados de duas maneiras: a primeira como um pré-revestimento, protegendo o meio filtrante e evitando o transpasse de partículas pequenas e a outra maneira consiste em adicioná-lo a suspensão a ser filtrada, para que os flocos resultem em uma torta permeável. Este processo de condicionamento é útil quando se trabalha com suspensões que contêm sólidos finamente divididos ou flocos lamacentos deformáveis. Os custos de aplicação são elevados (GRANDIN, 1992).

Como observado por FULTON (1974), naquela época, os auxiliares mais utilizados eram diatomita e cinza em suspensão.

Entre todos os métodos de condicionamento, o uso de produtos químicos é o mais empregado para melhorar as características de desaguamento do lodo. Dentre os produtos químicos aqueles mais utilizados são os polímeros, que podem aumentar a taxa de desaguamento, melhorar a captura de sólidos e reduzir os custos operacionais. Este processo realizado com uso de polímeros seguido de um desaguamento por centrifugação pode produzir tortas com 20% de sólidos, ou tortas com teor de sólidos de 30% se a desaguamento for feito com filtro prensa (YUZHU, 1996).

Os polímeros cuja função é promover a coagulação dos flocos do lodo foram responsáveis pelas melhoras na taxa de desaguamento. Uma comparação feita entre amostras de lodo condicionadas, ou não, com polímeros não mostrou efeito significativo destes em relação ao teor de sólidos na torta, compressibilidade ou nas características de trabalhabilidade, como descrito por KNOCKE & WAKELAND (1985).

3.5.2.1 Condicionamento com polímeros orgânicos sintéticos

A aplicação de produtos químicos é o método mais utilizado para condicionamento. Para se obter êxito três parâmetros devem ser observados: a dosagem do polímero; o tempo e a intensidade de mistura.

Pesquisas envolvendo o uso de polímeros no condicionamento do lodo mostraram, que não ocorreu influência do uso daquele tanto na densidade do floco quanto no teor de sólidos da torta. O uso de polímero influenciou apenas a taxa de desaguamento e não o grau de desaguamento (NIELSEN *et al*, 1973).

Segundo estudo daqueles pesquisadores, os testes indicaram que o tratamento do lodo é sensível a dosagem de polímero. Dosagens de polímero inferiores a 0,90 g/Kg quase não teve efeito sobre a recuperação de sólidos, por outro lado a adição de apenas mais 0,45 g/Kg provocou a recuperação de, aproximadamente, 90% dos sólidos.

De acordo com KNOCKE & WAKELAND (1983) a adição de polímero promoveu o aumento do tamanho dos flocos do lodo por coagulação das partículas menores resultando em redução na resistência específica do mesmo.

Como exposto por LEE & LIU (2000), convencionalmente, o condicionamento de lodo é feito com um único polímero, no qual os mecanismos de neutralização de cargas e formação de pontes estão envolvidos nas reações. O tempo de sucção capilar (CST – *Capillary Suction Time*), a SRF e a taxa de sedimentação são utilizados para avaliar o comportamento do lodo quanto ao desaguamento. No caso de condicionamento realizado com aplicação de dois tipos de polímeros, há um melhor desempenho na captura de partículas finas e na formação de flocos grandes que resultam em um melhor desaguamento e diminuição na ocorrência de sobredosagem.

VLASKI *et al* (1997) estudaram em sistema piloto uma água bruta, coagulada com cloreto férrico e observaram que: a floculação feita com coagulante dosado a 6 mg Fe(III)/L resultou na produção de flocos com tamanho maior que 50 μm . A floculação feita com 15 mg que Fe(III)/L também contribuiu para produção de floco daquele tamanho, contudo houve a formação de coágulos com dimensões menores que 50 μm .

O lodo utilizado no experimento daqueles pesquisadores, era coletado na ETA Princesa Juliana situada nas proximidades do lago Ijssel em Andijk, na Holanda. O espessamento foi realizado por meio da flotação por ar dissolvido.

A respeito daquela pesquisa, o uso de auxiliar de coagulação orgânico ou inorgânico, de natureza catiônica, não-iônica ou aniônica mostrou-se benéfico para sedimentação em vários casos, especialmente quando baixas concentrações iniciais de partículas são envolvidas. O polímero sintético catiônico mostrou-se o mais eficiente dentre os investigados.

Geralmente, quando o condicionamento é feito com apenas um polímero os dois principais mecanismos envolvidos são: neutralização de cargas e formação de pontes. Recomenda-se que seja feito um bom controle sobre a dosagem de polímero no condicionamento do lodo, uma vez que a sobredosagem aumentará os custos e reduzirá as características de desaguamento do lodo, de acordo com relato dos pesquisadores LEE & LIU (2000).

Segundo estes pesquisadores, no condicionamento com dois tipos de polímeros, para que bons resultados sejam atingidos, estes dependem, principalmente, da natureza dos condicionantes. Eles observaram neste estudo, que houve troca iônica entre os dois tipos de polímeros e uma alta adsorção na superfície dos sólidos.

NOVAK & HAUGAN (1979) propuseram um modelo de adsorção superficial para partículas coloidais em suspensão no lodo. Com base neste modelo é possível explicar os efeitos do pH, da força iônica e da agitação, nas propriedades de desaguamento do lodo. E também, a escolha do condicionador químico e sua dosagem ótima; e a melhor forma de manuseio e agitação podem ser determinadas.

A sobredosagem em suspensões diluídas é atribuída a baixa capacidade de agregação dos sólidos coloidais, associada com a saturação da superfície coloidal com o polímero, normalmente acompanhada pela reversão de carga. A dosagem ótima do polímero é associada com o recobrimento parcial da superfície coloidal acompanhada por uma carga superficial mínima, de acordo com aqueles autores.

Nos estudos realizados por VLASKI *et al* (1997), em todos os casos, para condições de valores de pH menor ou igual a 7, a dose de coagulante aplicada produziu flocos de tamanho maior que foram removidos de maneira muito eficiente pela flotação por ar dissolvido. Porém, para valores baixos de pH (da ordem de 5 a 6), a coagulação aconteceu no mecanismo de adsorção e neutralização de carga. Dependendo da dosagem de coagulante foi possível observar a formação de flocos também no mecanismo da varredura.

Em outro estudo, o lodo condicionado com polímeros apresentou características reológicas, do filtrado do teste de SRF, com comportamento Newtoniano para condição de subdosagem, e para condição de sobredosagem o mesmo filtrado comportou-se como fluido

não Newtoniano. No caso do lodo condicionado com agente inorgânico (FeCl_3 ; CaO) as características reológicas do filtrado, para o mesmo teste, também apresentaram comportamento Newtoniano segundo CHRISTENSEN *et al.* (1993).

Em outra investigação experimental, a carga das partículas medida no filtrado revelou que em altas dosagens de polímeros (5-7 g/Kg de polímero catiônico, aplicado em lodo de ETE), o excesso do mesmo fica na solução. Isto não necessariamente é uma indicação de sobredosagem desde que, com tempo de agitação e/ou aumento da sua intensidade, este excesso de polímero possa ser adsorvido nas superfícies dos flocos, segundo LANGER *et al.* (1994).

NOVAK & HAUGAN (1979) investigaram o efeito da dosagem de polímero sobre um lodo de sulfato de alumínio e mediram sua desidratabilidade pelo CST; e a mobilidade eletroforética das partículas no sobrenadante em função da dosagem. Os resultados mostraram que a dosagem ótima de polímero para o desaguamento coincidia com a dosagem de polímero associada ao valor zero para mobilidade eletroforética.

Os pesquisadores NIELSEN *et al.* (1973) realizaram estudo com lodo da ETA Sobrante de São Francisco, na Califórnia, Estados Unidos. Esta estação é do tipo convencional – coagulação, floculação, sedimentação e filtração rápida em filtro de areia – e utiliza alumínio como coagulante.

Ainda de acordo com aqueles autores, quando o lodo daquela ETA foi desaguado por centrifugação o teor de sólidos na torta ficou na faixa de 22 a 26%, nos casos em que a turbidez da água bruta esteve acima de 35 NTU. A dosagem de polímero necessária para que fosse atingido aquele teor de sólidos foi da ordem de 1,4 a 1,8 g/Kg.

A respeito daquele experimento, foram testados dois tipos de polímeros catiônicos, com alto peso molecular, para coagulação e, posterior, sedimentação dos flocos. Eles mostraram ser mais econômico, no processo de coagulação, do que o alumínio, nas ocasiões em que o valor da turbidez, na água bruta, era superior a 20 NTU.

A adsorção do polímero catiônico pode ser atribuída principalmente à força eletrostática resultante da neutralização de cargas. A força de Van der Waals também pode ser importante

na reação de adsorção devido ao alto peso molecular do polímero e ao baixo valor do potencial zeta (-7,1 mV) na superfície do lodo, conforme concluído por LEE & LIU (2000).

A medida da viscosidade na fase líquida do lodo (filtrado ou sobrenadante) pode ser capaz de indicar a dosagem ótima de polímero, ou seja, a quantidade acima da qual o excesso de polímero na fase líquida se torna significativa (CHRISTENSEN *et al.*, 1993). De acordo com LANGER *et al.* (1994), a destruição do floco pode ser observada para dosagens baixas de polímero (3 g/Kg), rendendo assim um decréscimo no teor de sólidos. Contudo, se a dosagem de polímero for alta o suficiente para produzir flocos resistentes ao cisalhamento, o aumento na intensidade de agitação resulta em uma torta de lodo mais favorável ao desaguamento.

Com o aumento da agitação a taxa de floculação aumenta, e o tempo para se atingir a floculação máxima é reduzido (GREGORY, 1988).

Uma agitação intensa acelera a destruição das ramificações dos flocos; a ruptura dos flocos volumosos; um rearranjo dos polímeros adsorvidos. Promovendo a agitação do lodo floculado por 30 s, ocorre melhora da filtrabilidade. Contudo, quanto maior a intensidade de mistura maior será os valores da SRF, isto porque o excesso de agitação resulta na destruição dos flocos. Um desaguamento eficaz foi atingido quando uma alta a dosagem de polímero foi aplicada (4 g/Kg), a mistura rápida for feita de forma eficiente e o lodo floculado passou por, no mínimo, 30s de agitação de acordo com LANGER *et al.* (1994).

VLASKI *et al* (1997) concluíram que a intensidade de floculação de baixa a média, com valores de G variando entre 10 e 30 s⁻¹, resultaram em uma sedimentação feita de forma eficiente, entretanto para o valor de G igual a 30 s⁻¹ o floco formado foi mais denso e a eficiência de sedimentação maior se comparado com o floco formado quando a intensidade de agitação na floculação foi de 10 s⁻¹. Também foi concluído que a densidade do floco representa um papel igualmente importante quanto seu tamanho. Os melhores resultados produzidos foram conseguidos para G = 30 s⁻¹, em combinação com tempo de floculação de 30 segundos.

Aqueles pesquisadores também observaram que a floculação realizada com valor de G de 50 s⁻¹ produziu uma melhor captura de sólidos em suspensão e em conseqüência, obteve-se menor valor na turbidez do sobrenadante. Ainda concluíram que a remoção de partículas foi semelhante para todos os valores de G, sendo ligeiramente melhor para o gradiente de

velocidade de 10 s^{-1} .

3.5.3 Desaguamento

É uma operação física utilizada para reduzir o teor de umidade do lodo, acarretando com isso, na redução do volume do lodo e do custo de transporte para destinação final (GRANDIN, 1992). A desaguamento do lodo de ETA pode ser mecânico ou natural.

Segundo o pesquisador MONTGOMERY (1985) os processos que apresentavam capacidade, significativa, de sucesso no desaguamento de lodos de estações de tratamento de água eram: leito de secagem, filtração a vácuo, filtro prensa, filtro prensa de esteiras, centrifugação e recuperação do sulfato de alumínio e da cal.

A eficiência do método de desaguamento é avaliada pela sua capacidade de gerar lodo com teor de sólidos da ordem de 20%. Contudo, os resultados do teor de sólidos de um lodo são uma indicação fraca da sua trabalhabilidade, conforme observado, por NOVAK & CALKINS (1975).

Para NIELSEN *et al* (1973) o sucesso na operação de qualquer equipamento de desaguamento mecânico requer que o lodo, a ser desaguado, seja condicionado adequada e cuidadosamente.

Ainda segundo aquele pesquisador, no caso de lodo gerado pela coagulação da água bruta com sais de alumínio, valores baixos de turbidez da água (4 NTU) anterior a unidade de filtração, indicam que o lodo é mais difícil de ser desaguado devido à alta concentração de hidróxido de alumínio no mesmo. A redução da concentração do hidróxido deste metal no lodo pode contribuir, significativamente, com melhora no processo de desaguamento.

Segundo estudo de KNOCKE & WAKELAND (1983) o efeito do tamanho das partículas nas características de desaguamento do lodo, oriundo da coagulação com hidróxido metálico – o qual tem características similares ao lodo de ETA - tem influência nas taxas de desaguamento a vácuo, além de não afetar a compressibilidade do lodo e o teor de sólidos da torta.

Em conformidade com aquele estudo, observou-se que o teor de sólidos na torta após o

desaguamento foi maior para lodo gerado no abrandamento com cal do que na torta resultante do desaguamento do lodo de alumínio. Isto se deve, pois o carbonato de cálcio precipitado é bem menos hidratado do que o hidróxido de alumínio correspondente.

Os equipamentos mecanizados que podem ser utilizados no desaguamento de lodos são: centrífuga, filtro, prensa de placas, secadores elétricos e de esteira, prensa desaguadora e sistemas de desaguamento contínuo.

Floco de lodo que possui baixa tensão de cisalhamento, em geral, causa problemas operacionais, devido à captura ineficiente dos sólidos durante o desaguamento. Isto é muito importante para sistemas de desaguamento por centrífuga, nos quais grandes forças de cisalhamento mecânicas são aplicadas ao lodo. A quebra dos flocos também pode causar problemas nos sistemas de filtração, uma vez que aqueles podem penetrar nos poros do filtro, resultando na colmatação e em um desaguamento deficiente (KNOCKE & WAKELAND, 1985).

Os sistemas de desaguamento por filtração forçada empregam pressões diferentes da atmosférica para promover a separação sólido-líquido. Podem ser utilizados filtros prensa de placas, filtro prensa de correia ou filtro a vácuo.

É importante salientar que quando lodos são filtrados, um aumento no diferencial da pressão aplicada não causa necessariamente um aumento na taxa de filtração (BIERCK & DICK, 1990). O aumento da SRF com o aumento da pressão aplicada é uma manifestação da compressibilidade do lodo. Os mesmos autores ao examinarem o efeito da pressão diferencial na filtrabilidade de suspensões, observaram que para suspensão de caulim a torta formada era relativamente incompressível (valor do coeficiente de compressibilidade $S = 0,34$), enquanto que ao filtrar lodo ativado, a torta formada mostrou-se altamente compressível (valor de $S = 1,02$).

Centrífuga

É um equipamento de desaguamento, no qual é adicionado lodo dentro de recipientes cilíndricos. Estes giram em alta velocidade, aumentando a força centrífuga que incide sobre o lodo. Este é lançado contra a parede da centrífuga, que pode possuir furos ou estar revestida com material filtrante, e ocorre a remoção de água. Na parede do equipamento forma-se uma

camada de sólidos, também chamada de torta. Terminado o processo, a torta de sólidos é coletada e a água é removida por meio do canal de descarga do líquido clarificado, de acordo com descrição feita por YUZHU (1996).

O emprego de centrífuga com o propósito de remover a água de lodos de ETA é bem recente. Para lodos de decantadores de ETAs do tipo convencional bons resultados são obtidos somente a partir do uso de condicionadores químicos. Porém, resultados bem melhores são obtidos para lodos gerados em sistemas de abrandamento com cal. Neste caso, o lodo pré-adsensado com teor de sólidos variando entre 10-25% é encaminhado para as centrífugas, as quais são capazes de produzirem tortas com teor de sólidos na faixa de 55-60% (REALI *et al*, 1999).

Para NOVAK & CALKINS (1975) o uso de centrífugas em escala de laboratório não tem a finalidade de produzir tortas com teor de sólidos esperado em escala real. A velocidade e o raio da centrífuga e, desta maneira, a força aplicada ao lodo será diferente entre a centrífuga de laboratório e a outra. Contudo, o método aplicado em escala de bancada produz valores para o sólido centrifugado que podem ser correlacionados com a instalação real.

Segundo YUZHU (1996) as centrífugas podem ser de eixo vertical ou horizontal, sendo esta última a que apresenta os melhores resultados, em termos de teor de sólidos na torta final.

Como os lodos de ETAs e de ETEs apresentam uma gama muito ampla de tamanho das partículas, incluindo materiais muito finos ou gelatinosos, em geral, é preferível o uso de centrífugas de tambor cilíndrico de parede não perfurada. As centrífugas de eixo horizontal são as mais utilizadas hoje em dia. De acordo com REALI *et al*. (1999) há quatro parâmetros de interesse neste caso: o grau de clarificação do líquido centrifugado, a capacidade de processamento e potência da centrífuga, o teor de sólidos da torta produzida e a dosagem requerida de polímeros. Esses quatro parâmetros são interdependentes e variam para cada tipo de lodo considerado.

Na pesquisa feita por NIELSEN *et al* (1973) foi verificado que para o lodo condicionado com polímero orgânico (não iônico de alto peso molecular) um curto tempo de desaguamento (aproximadamente 1 minuto) por centrifugação foi necessário para o espessamento do lodo. Ainda com relação a este estudo, o desaguamento realizado com centrífuga de eixo horizontal

produziu lodo com teor de sólidos de 16%, sendo necessária para isto uma dosagem de polímero variando de 1,4 a 2,0 g/Kg. Aquele tipo de centrífuga, indicou que um gradiente de velocidade da ordem de 2100 s^{-1} foi o que apresentou os melhores resultados de desaguamento.

As Figuras 3.11 e 3.12 mostram detalhes esquemáticos das unidades de centrifugação de eixo horizontal. Na primeira a alimentação de lodo é do tipo contracorrente, e na outra a alimentação de lodo é feita do lado oposto à coleta da torta desaguada.

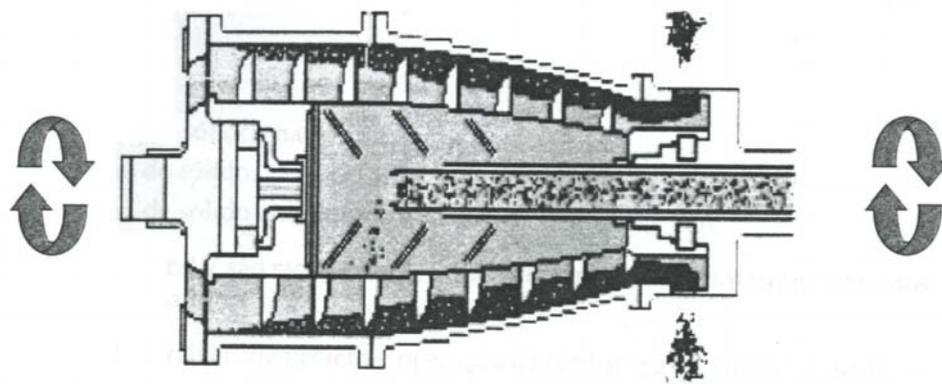


Figura 3.11 – Esquema de centrífuga com eixo horizontal.

Fonte: Reali et al (1999)

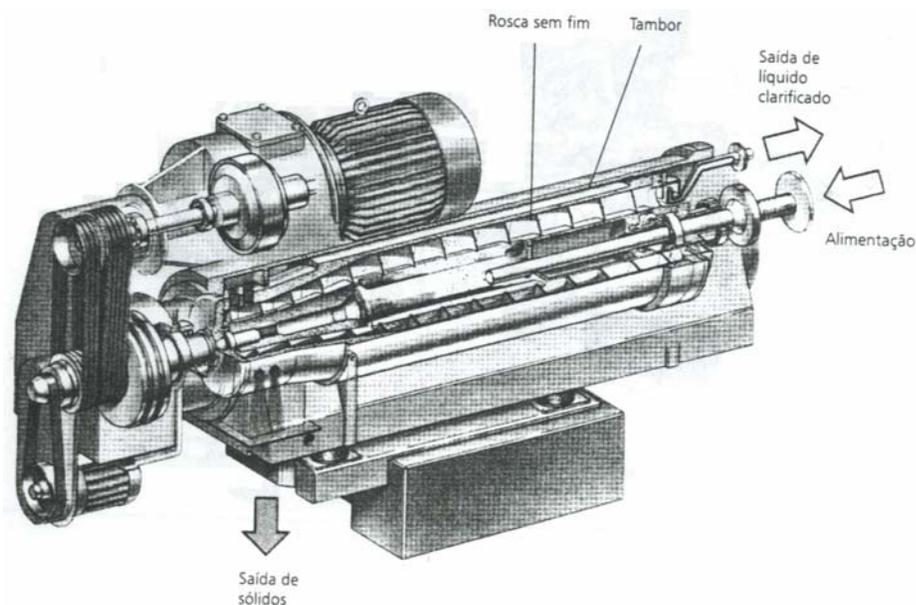


Figura 3.12 – Corte em perspectiva mostrando interior de uma centrífuga de eixo horizontal.

Fonte: Reali et al (1999)

Sistema de Desaguamento Contínuo

Consiste no emprego de um equipamento semelhante a uma centrífuga de eixo horizontal, com o diferencial de este ser alimentado continua e ininterruptamente por lodo condicionado. A torta desaguada por meio deste sistema se assemelha à gerada por uma centrífuga. Este equipamento trabalha com rotações baixas que variam de 0,5 a 2 rpm (NETZSCH, 2003).

A Figura 3.13 apresenta de modo esquemático um sistema de desaguamento contínuo de lodo.

Figura 3.13 – Esquema de um sistema de desaguamento contínuo.

Fonte: Netzsch (2003)

Filtro Prensa de Placas

Consiste em uma série de placas verticais suportadas por uma armação comum, aquelas são mais espessas nas bordas do que no centro. O tecido filtrante é colocado nas duas faces das placas. A superfície destas possui ranhuras para permitir o escoamento do filtrado. O lodo é bombeado para dentro do filtro, em seguida é aplicada pressão que força o líquido a passar pelo meio filtrante, e os sólidos ficam retidos entre as placas (YUZHU, 1996).

Pelas ranhuras das placas o filtrado é coletado e conduzido para fora do filtro através de dutos. À medida que as tortas de lodo começam a se formar no interior das placas, a pressão de alimentação aumenta, gradativamente, até atingir um valor máximo, a partir do qual qualquer acréscimo se torna antieconômico. Neste ponto é feita a descarga do lodo pela separação das placas, uma a uma, e as tortas, por gravidade, se deslocam para a canaleta de coleta (YUZHU, 1996).

A pressão de operação dos filtros varia na faixa de 2 a 15 MPa, podendo em certos casos atingir 20 MPa, sendo a mesma fixada em função do tipo de lodo e do teor de sólidos de se deseja atingir. Este equipamento desidrata lodos diluídos e difíceis de serem desidratados, produzindo uma torta com aproximadamente, 30 a 50% de teor de sólidos. Mesmo com elevados custos de operação e manutenção, a utilização deste equipamento, dentre os mecânicos, pode ser um dos mais econômicos. As principais desvantagens que se pode apontar são: alto custo da mão-de-obra e o processo não ser completamente automático, pois requer o desligamento periódico para remoção das tortas e inspeção do tecido filtrante (YUZHU, 1996).

A Figura 3.14 apresenta o esquema de funcionamento de um filtro prensa de placas.

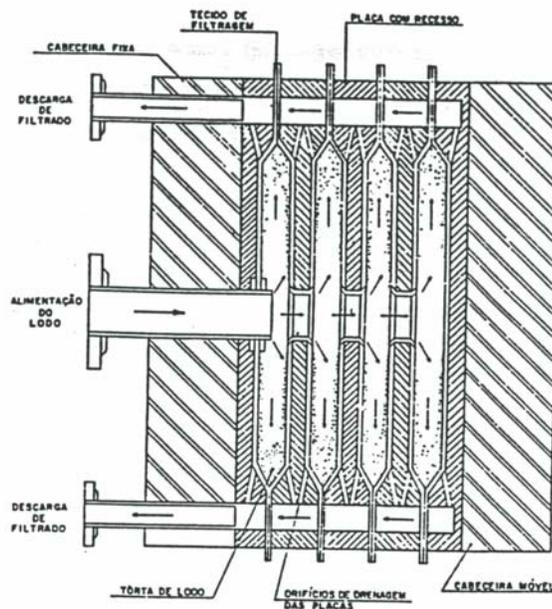


Figura 3.14 – Esquema típico do funcionamento de um filtro prensa de placas.

Fonte: Yuzhu (1996)

Prensa Desaguadora

Também conhecida como filtro prensa de esteira é o equipamento que funciona com o lodo sendo introduzido entre duas correias, em que uma delas é o meio filtrante. Aquelas se deslocam entre roletes que promovem a compressão de uma esteira sobre a outra provocando a drenagem do líquido. O processo de desaguamento envolve duas etapas, conforme exibidas na Figura 3.15. A primeira é a drenagem gravitacional e a segunda é a compactação, por meio de forças de compressão, o lodo antes de ser utilizado neste equipamento deve passar por algum método de condicionamento (YUZHU, 1996).

Ainda segundo aquela autora, o lodo é introduzido na esteira orientado por rastelos de distribuição, para uniformizá-los. Em seguida, é comprimido por um rolo; até este ponto é a etapa de drenagem por gravidade. Assim o lodo é introduzido entre as esteiras que são comprimidas por uma série de roletes que aumentam a pressão de desaguamento, as duas esteiras se separam e o lodo seco é removido por raspadores. As maiores vantagens que podem ser observadas no uso deste equipamento são: simplicidade de operação e manuseio, baixo consumo de energia. E a desvantagem fica por conta da relativa sensibilidade do sistema em relação à qualidade e a eficiência do condicionamento prévio do lodo.

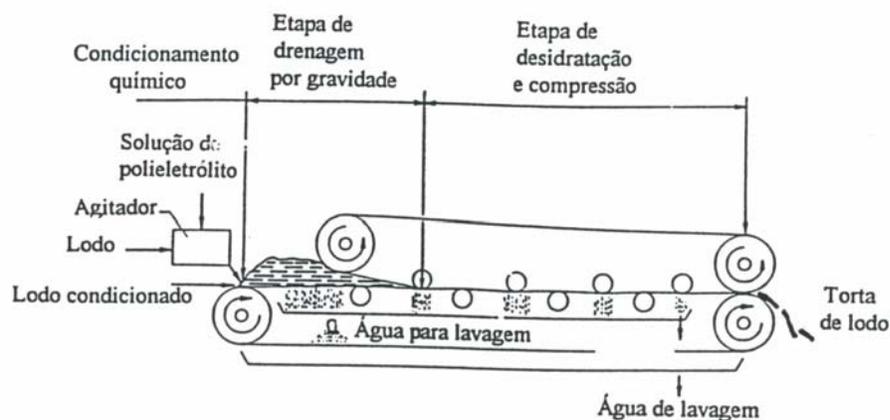


Figura 3.15 – Etapas de operação de uma prensa desaguadora.

Fonte: Yuzhu (1996)

Outra forma de desaguamento de lodos é utilizando técnicas naturais. Estas podem ser por meio de leitos de secagem ou lagoas de lodo.

Leitos de Secagem

São muito utilizados na Europa e nos Estados Unidos. Fatores como: características físico-químicas do material a ser desaguado, espessura da camada aplicada, teor de sólidos, condicionamento do lodo, condições climáticas do meio, características e condições do meio de drenagem, entre outros, afetam o desempenho dos leitos de secagem (CORDEIRO, 1999).

Depois de seca, a torta de lodo é removida de forma mecânica ou manual. Neste caso, há a necessidade de emprego de mão-de-obra durante a maior parte do período, também se deve utilizar pranchas para que não ocorra contato e circulação direta de pneus, dos carrinhos de mão, sobre o leito de drenagem de modo, que este venha a ser danificado. No caso de remoção mecanizada da torta, em países desenvolvidos, são utilizados caminhões equipados com sistema de vácuo, conforme apresentado por CORDEIRO (1999).

Conforme FULTON (1974), observou naquela época, a utilização de leito de secagem, somente é indicada quando a composição do lodo e as condições climáticas forem vantajosas. Em locais com chuva e umidade que dificultam a secagem do lodo, este método pode ser considerado, somente, se a dosagem de alumínio empregada na coagulação for baixa (geralmente, menor que 17 ppm).

A Figura 3.16 mostra exemplo típico da construção de um leito de secagem.

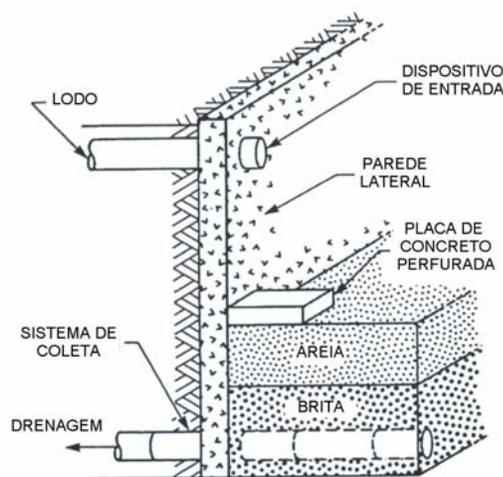


Figura 3.16 – Construção típica de um leito de secagem de areia.

Fonte: Adaptado de ASCE (1996)

Lagoas de Lodo

Podem ser naturais ou artificiais, são necessárias grandes áreas e o custo da terra é um dos fatores essenciais na definição pela utilização deste método. O desaguamento do lodo ocorre em fases: drenagem e evaporação. A primeira independe da profundidade da lagoa e a segunda é o principal fator para o desaguamento, e depende da profundidade da lagoa e da porcentagem de sólidos contida no lodo (CORDEIRO, 1999).

A primeira fase pode se estender por longos períodos, pois na camada superior ocorre a formação de uma crosta, que não permite o desaguamento das camadas inferiores. O sobrenadante pode ser removido de forma intermitente ou contínua, podendo retornar ao sistema de tratamento de água. Os fatores que devem ser analisados antes da utilização deste método são: clima, permeabilidade do solo, características do lodo, profundidade da lagoa e área superficial (cordeiro, 1999).

A Tabela 3.6 mostra que o valor de concentração de sólidos ao qual cada tipo de lodo pode ser desidratado depende da natureza dos sólidos em suspensão.

Tabela 3.6 – Teor de sólidos no lodo após o desaguamento.

Tipo de Lodo	Método de Desaguamento			
	Adensamento (%)	Drenagem (%)	Centrifugação (%)	Filtração (%)
Alumínio	6,8	14,1	10,5	29,5
Cal e Ferro	14,4	21,5	25,6	40,0
Cal	36,8	47,5	44,3	58,9

Fonte: Adaptado de NOVAK & CALKINS (1975)

Conforme observado por NOVAK & CALKINS (1975) o teor de sólidos alcançado com cada tipo de processo de desaguamento, apresentados na Tabela 3.6, dependem das características físicas inerentes ao lodo e do tipo de processo empregado.

3.6 Disposição Final do Lodo

Uma vez que os lodos gerados nas ETAs caracterizam-se pelo elevado teor de umidade, acima de 95%, seu tratamento visa principalmente a redução do volume, para transporte e disposição final adequado.

Nos dias de hoje, a maior parte das ETAs no Brasil lança os resíduos gerados pelo processo de tratamento de água no corpo d'água mais próximos. Deste modo, causa problemas ambientais como aumento na quantidade de sólidos em suspensão, assoreamento, alterações na cor, aumento das concentrações de alumínio, ou ferro.

A NBR 10.004 classifica os lodos do tratamento de água com resíduos sólidos. Eles devem ser tratados e dispostos segundo as determinações daquela norma, evitando assim causar impactos ao meio ambiente.

Em levantamento feito nos Estados Unidos, sobre a forma como os resíduos do tratamento de água estavam sendo dispostos, mostrou que 25% das ETAs optavam pela disposição no solo, 24% pela descarga no sistema público de esgoto, 20% pela disposição em aterro sanitário, 13% enviavam seus lodos para aterros exclusivos, 11% ainda continuavam a fazer o descarte em corpos d'água, e o restante optava por outras formas de disposição, ou reuso benéfico (CORNWELL *et al.*, 2000).

Em outra pesquisa realizada com ETAs francesas a respeito da destinação dos seus resíduos, 30% lançavam no sistema público de esgoto, 13% dispunham em aterros sanitários, 6% aplicavam no solo, e a grande maioria, ou seja 51 %, possuíam outras formas de disposição, tais como compostagem, construção de diques e incorporação em materiais de construção civil (ADLER, 2002).

Já no Reino Unido foi feito levantamento junto às concessionárias de abastecimento de água, para se saber qual o meio de disposição de lodo estava sendo utilizado. Daquele levantamento pôde-se verificar que 52% dos lodos eram dispostos em aterros sanitários, 29% das ETAs dispunham no sistema de esgoto, 6% mandaram seus resíduos para aterros

exclusivos. O restante praticava lançamento em corpo d'água, disposição e aplicação no solo, recuperação de áreas degradadas e incorporação em materiais de construção (SIMPSON et al., 2002).

Dispor o lodo no solo significa que o resíduo foi, apenas, lançado sobre o solo em área específica para este fim e aplicar o lodo no solo implica no revolvimento da terra e do lodo, resultando na incorporação deste ao solo (USEPA, 1999).

Por fim pode-se citar como os principais usos benéficos, ou disposição final do lodo, nos dias de hoje os aterros sanitário e exclusivo, descarga no sistema de esgoto, indústrias cerâmicas e da construção civil, agricultura, disposição no solo, recuperação de áreas degradadas e reflorestamento.

4 METODOLOGIA

4.1 Considerações Iniciais

As ETAs operadas pela SANASA na cidade de Campinas, bem como os pontos de captação de água bruta estão ilustrados na Figura 4.1.

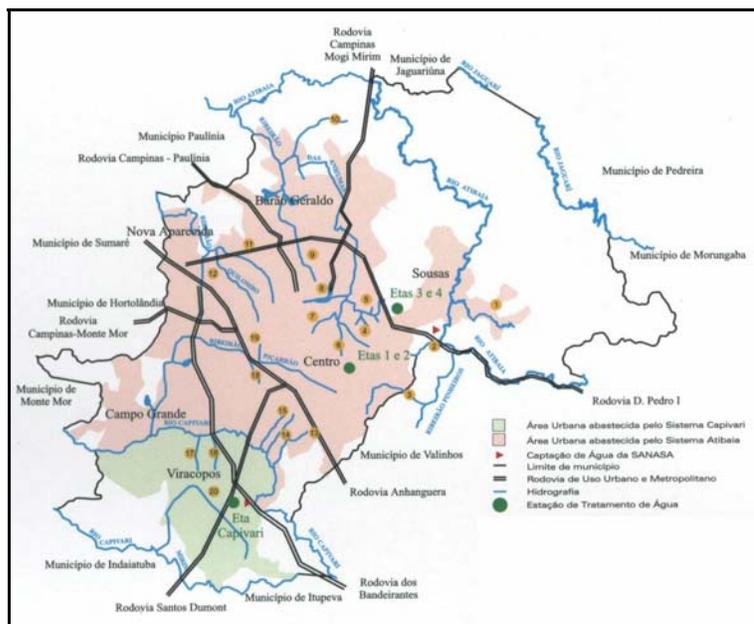


Figura 4.1 – Localização das ETAs e dos pontos de captação de água no município de Campinas

As duas principais estações de tratamento de água para abastecimento de Campinas/SP são denominadas ETA-3 e ETA-4 (Figura 4.2), localizadas na mesma área, dispostas lado a lado, e que tratam cerca de $2,9 \text{ m}^3/\text{s}$ de água captada do rio Atibaia (Figura 4.3). No ponto de captação, a água bruta passa por tanques de areia, em que ficam retidos os materiais grosseiros, sendo em seguida recalçada por meio de bombas para a entrada das ETAs.



Figura 4.2 – Fotografia aérea das ETAs 3 e 4 da SANASA na cidade de Campinas/SP



Figura 4.3 – Fotografia aérea do ponto de captação da água bruta no rio Atibaia

Ambas estações compartilham um sistema único de pré-tratamento, no qual se faz a adição de carvão ativado em pó à água bruta (Figura 4.4), assim que esta chega ao início do processo de tratamento. O carvão tem a finalidade de remover as substâncias causadoras de cor, sabor e odor e, eventualmente, algas. Este produto é, então, removido em pré-sedimentadores anteriores à unidade de mistura rápida. O cloreto férrico é utilizado como coagulante (Figura 4.5).



Figura 4.4 – Aplicação de carvão ativado em pó à água bruta (ETAs 3 e 4)



Figura 4.5 – Aplicação de cloreto férrico (coagulante)

O valor do pH de floculação está na faixa de 9 a 10, é elevado em decorrência da introdução de cal. Naquela faixa de valores, a precipitação de ferro e manganês fica facilitada. Uma grande parcela do manganês é proveniente, como impureza, do próprio coagulante. A coagulação ocorre predominantemente no mecanismo de varredura.

Os decantadores na ETA 3 são do tipo convencional (duas unidades) com raspadores contínuos de lodo, e os da ETA 4 são do tipo laminar, com placas planas paralelas (duas unidades). Nestes a remoção do lodo ocorre pelo sistema de manifold. As unidades de decantação antecedem os filtros rápidos por gravidade, nestes o meio filtrante é composto por antracito e areia sobre camada suporte de pedregulho. Os filtros operam por taxa declinante. Seu sistema de lavagem é com ar e água em sentido ascendente. A água de lavagem de filtros é recirculada, após equalização, para o início do tratamento.

A água clarificada, nos decantadores, recebe dosagem de cloro, antes das unidades de filtração. Após a filtração ocorre outra dosagem de cloro, o suficiente para manutenção de residual de cloro livre, além da aplicação de amônia para formação de cloraminas e da adição de flúor.

Os lodos gerados nos decantadores de ambas as ETAs foram objeto desta investigação experimental, que foi desenvolvida em três fases: a) Escolha do polímero para execução de ensaios de adensamento por gravidade em colunas de sedimentação; b) Determinação das condições ótimas (tempo de mistura e dosagem de polímero) para os ensaios de adensamento; e c) Ensaios de desaguamento do lodo pré-adensado com utilização de centrífuga de laboratório.

Os testes de tratabilidade das amostras de lodo foram feitos no Laboratório de Saneamento da Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP. As atividades que foram desenvolvidas são descritas a seguir.

4.2 Amostragem de Lodo

Os processos e operações unitárias que fazem parte do tratamento nas referidas estações são: adsorção em carvão ativado em pó, pré-sedimentadores, coagulação; floculação; decantação, filtração, desinfecção e fluoretação.

Amostras de lodo do fundo dos decantadores das duas ETAs foram coletadas semanalmente nos respectivos canais de descarga de cada estação (no período de chuvas e de estiagem), em bombonas de plástico de 20 L. Assim foram transportadas para o laboratório, onde foram armazenadas e, após homogeneização, ensaiadas.

No mesmo dia da coleta procedeu-se à caracterização da amostra quanto aos parâmetros: pH e sólidos sedimentáveis. Nos dias seguintes parâmetros como sólidos totais (fixos e voláteis), sólidos em suspensão totais (fixos e voláteis), foram determinados. As séries de sólidos foram realizadas de acordo com metodologia descrita no APHA, AWWA, WEF (1998).

4.3 Polímeros Orgânicos Sintéticos

Recomenda-se que a solução de polímero a ser utilizada em um estudo tenha a concentração variando na faixa de 0,1 a 0,5%. Para valores superiores a este, ela poderá ficar muito concentrada e apresentar uma viscosidade alta sendo, desta forma, difícil de ser trabalhada.

Neste trabalho, o polímero foi aplicado nas amostras de lodo, inicialmente em uma concentração de 0,5%. Contudo, a solução ficou muito viscosa tornando seu manuseio difícil. Então, optou-se por preparar polímeros concentrados a 0,25%, que apresentam viscosidade menor se comparados a soluções concentradas a 0,5%. E seu manuseio era mais fácil.

As soluções de polímeros a 0,25% eram preparadas, antes dos ensaios, como segue:

1. Pesava-se 250 mg do polímero.
2. Colocava-se os 250 mg de polímero dentro de um balão volumétrico de 150 mL.
3. O balão era posto em uma balança e esta tinha sua tara medida.
4. Adicionava-se 1 mL de acetona.
5. Acrescentava-se água ultrapura no balão, com o auxílio de uma pipeta, até que a balança indicasse o peso de 100 g.
6. Feito isto, colocava-se o balão sobre um agitador magnético, para que a solução de polímero ficasse completamente dissolvida e uniforme. A rotação do agitador era de aproximadamente, 25 rpm.
7. Após 90 minutos de agitação a solução estava pronta.

Quando foi necessário produzir um maior volume de solução, após a etapa 5 o conteúdo do balão era transferido para um béquer e homogeneizado com auxílio de um agitador mecânico de paleta. Todos os polímeros testados para o adensamento do lodo eram de alto peso molecular ($\geq 10^6$ g). Na Tabela 4.1 estão apresentadas as características dos polímeros utilizados nesta investigação experimental.

Tabela 4.1 – Características dos polímeros escolhidos

	Polímero	Fabricante	Carga	Aparência	Cor
1	Praestol 2640	Stockhausen	Médio Aniônico	Granular	Branco
2	Praestol 852BC	Stockhausen	Médio Catiônico	Granular	Branco
3	G 999	Nalco	Não Iônico	Granular	Branco
4	G 998	Nalco	Alto Aniônico	Granular	Branco
5	G 9046	Nalco	Alto Catiônico	Granular	Branco

4.4 Fase I: Determinação do Polímero a ser Utilizado no Adensamento por Gravidade

Os cinco polímeros apresentados na Tabela 4.1 foram testados e dentre eles escolheu-se os dois que melhor influenciaram o adensamento, por gravidade, do lodo. A seleção foi feita a partir de testes nas colunas de sedimentação, para os períodos de chuvas e de estiagem.

Os ensaios foram realizados aplicando-se a mesma dosagem de cada um dos cinco polímeros a amostras de lodo, sob condições fixas de mistura e rotação, esta foi de 645 rpm. O tempo de floculação em ambos experimentos foi de 30s.

Nestes ensaios utilizou-se como agitador uma bateadeira da marca “Tok Line”, modelo HM-501. Este equipamento possui seis diferentes rotações: 645, 735, 810, 895, 985 e 1080 rpm. O batedor do equipamento foi substituído por uma haste com paleta, aquela com 40 cm de comprimento e a esta com 2,5 x 7,5 cm de dimensões.

Nos testes realizados nas colunas, verificou-se a dosagem de polímero de 2 g/Kg de SST, para ambas as épocas investigadas.

Os ensaios da fase I foram realizados nas colunas de sedimentação, de acordo com a metodologia ora apresentada:

1. Coletar, homogeneizar (Figura 4.6) e determinar os parâmetros pH e série de sólidos do lodo bruto.
2. Colocava-se 5 L de lodo bruto em um recipiente de seção quadrada (para evitar a formação de vórtice), onde se efetuava a floculação.
3. Ligava-se o agitador. A rotação utilizada era a menor disponível no equipamento, 645 rpm.
4. Adicionava-se o polímero (Figura 4.7) e o cronômetro era disparado. O tempo de floculação era de 30 s.
5. Após a floculação, o agitador era desligado. O lodo floculado era, então, transferido para a coluna de sedimentação (Figura 4.8), tomando-se o cuidado de evitar a quebra dos flocos formados.
6. O tempo de sedimentação era de 5 horas.
7. Durante a sedimentação o valor da altura da interface (sólido/líquido) era monitorado nos tempos: 1, 3, 6, 9, 12, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 120, 180, 240 e 300 minutos.
8. Terminada a sedimentação o sobrenadante e o lodo adensado eram coletados.
9. Determinava-se o valor da turbidez do sobrenadante. Para o lodo adensado era verificado o parâmetro teor de sólidos (fixos e voláteis).
10. Plotava-se a curva de adensamento por gravidade (altura da interface sólido/líquido em função do tempo de sedimentação).
11. De acordo com metodologia descrita por Talmadge e Fitch, foram determinados os fatores de clarificação e espessamento, com base na curva de adensamento.

12. O procedimento descrito, para época de chuvas, era repetido para cada um dos cinco polímeros e para os dois tipos de lodo (ETAs 3 e 4). Para o período de estiagem, o ensaio foi repetido três vezes para cada polieletrólito e também para os dois tipos de lodos.

13. Também foi analisada uma coluna em que não houve a aplicação de polímero.



Figura 4.6 – Homogeneização do lodo bruto



Figura 4.7 – Aplicação de polímero ao lodo bruto



Figura 4.8 – Transferência do lodo floculado para a coluna de sedimentação

Dos cinco polímeros testados, dois foram escolhidos para serem utilizados nos ensaios de adensamento do lodo, por gravidade, nas colunas de sedimentação (fase II).

As colunas de sedimentação, bem como a instalação onde foi montada a bateadeira, são apresentadas em item posterior a este (Figuras 4.9, 4.10 e 4.13). O tacômetro utilizado para determinar as rotações do agitador era da marca Instrutherm, modelo TD-704. Era possível medir a rotação de duas maneiras: a) utilizando o equipamento na posição foto, pode-se medir rotações compreendidas entre 5 e 999 rpm; b) na posição contato o tacômetro trabalha na faixa de 0,5 a 19.999 rpm. A precisão deste aparelho era de 0,05%.

O turbidímetro era da marca Hach, modelo 2100-P. Utilizado no modo automático o instrumento é capaz de detectar valores de turbidez que ficam entre 0,01 e 1.000 NTU. No modo manual o equipamento pode trabalhar com três faixas de valores, a primeira detecta valores de turbidez de 0,01 a 9,99 NTU, a segunda para valores de 10 a 99,9 NTU e a última que trabalha com valores compreendidos entre 100 e 1.000 NTU. O turbidímetro operava pelo princípio nefelométrico de medição de turbidez. O instrumento seguia critérios específicos da Agência de Proteção do Meio Ambiente dos Estados Unidos (USEPA), método 180.1, e a precisão do equipamento era de $\pm 2\%$.

4.5 Fase II: Determinação da Condição Ótima de Adensamento do Lodo

Nesta segunda fase da investigação experimental, foram determinadas as condições ótimas (tempo de mistura e dosagem de polímero) para o adensamento do lodo por gravidade. Estes parâmetros eram determinados para os lodos oriundos dos decantadores das duas ETAs, no período de chuvas e de estiagem, e para os dois polímeros escolhidos na fase anterior.

Os ensaios constituíram-se basicamente em: a) fixar a rotação do agitador, fixar a dosagem de polímero e variar o tempo de mistura do condicionador; e b) com o melhor tempo de mistura, rotação fixa, variar a dosagem de polímero. Mais à frente, neste item, será descrito em detalhes a metodologia para a execução dos ensaios.

Foram utilizados os mesmos equipamentos da fase I. O agitador foi bateadeira da marca “Tok Line”, modelo HM-501, com haste e paleta adaptadas. Optou-se, nesta fase, por fixar a rotação do agitador sendo escolhida a menor disponível no equipamento, pois esta mostrou ser suficiente para uma mistura adequada do lodo bruto com o polímero. O valor da rotação foi de 645 rpm.

Nos testes realizados para escolha do melhor tempo de mistura, além da rotação fixa, escolheu-se a dosagem de polímero de 2 g/Kg de SST (mesma da fase I) para a execução dos ensaios, em ambos os períodos estudados.

O sistema de bancada para execução dos ensaios de adensamento, como ilustrado nas Figuras 4.9 e 4.10, era constituído de seis colunas de sedimentação, feitas de acrílico, em formato cilíndrico, com diâmetro interno $\phi = 11$ cm, altura $h = 75$ cm, espessura da parede de 1 cm e capacidade total de, aproximadamente, 7 L cada uma.



Figura 4.9 – Sistema de bancada para realização dos ensaios de adensamento por gravidade



Figura 4.10 – Colunas de sedimentação

Cada coluna continha quatro pontos para coleta de amostras e descarga do sobrenadante nas laterais distantes 10 cm entre si (Figura 4.11), e também um ponto de descarga de fundo para coleta de lodo adensado (Figura 4.12).



Figura 4.11 – Pontos laterais para coleta de sobrenadante



Figura 4.12 – Descarga de fundo das colunas

A instalação onde era feita a mistura do lodo bruto ao polímero era constituída de uma caixa de mistura dotada de um agitador mecânico de paleta, com haste de 40 cm e paleta com 2,5 x 7,5 cm de dimensões. A mistura era realizada naquela caixa feita em acrílico com largura, altura e profundidade iguais a 19 cm (dimensões internas) e espessura da parede de 1 cm, e cuja seção era quadrada (para evitar a formação de vórtice).

No instante da transferência dos flocos (contidos na caixa de mistura) para a coluna de sedimentação, foi colocado no ponto de descarga da caixa um tubo flexível para minimizar a queda do lodo, evitando assim o rompimento dos flocos formados. A instalação está ilustrada Figura 4.13.



Figura 4.13 – Instalação para promover a mistura do polímero ao lodo bruto

Com o objetivo de determinar o tempo de mistura e dosagem ótima, os procedimentos descritos abaixo foram seguidos durante a realização dos ensaios da fase II.

Para a escolha do melhor tempo de mistura:

1. Coletava-se e homogeneizava-se o lodo bruto. O valor do pH era determinado, bem como eram realizadas as determinações de sólidos do lodo.
2. 5 L de lodo bruto eram colocados em um recipiente de seção quadrada (caixa de mistura), onde ocorria o condicionamento químico.
3. Ligava-se o agitador. A rotação utilizada era a menor disponível no equipamento, 645 rpm.
4. Dosava-se o polímero (2 g/Kg de SST) e o cronômetro era disparado. Foram investigados seis tempos de mistura diferentes: 15, 30, 45, 60, 90 e 120 s.
5. Após a mistura, o agitador era desligado. O lodo condicionado era, então, transferido para a coluna de sedimentação. Na descarga de fundo da caixa de mistura onde estava o lodo, colocou-se um tubo flexível para evitar a quebra dos flocos formados.

6. O período de sedimentação era de 5 horas.
7. Durante a sedimentação o valor da altura da interface sólido/líquido era monitorado nos tempos: 1, 3, 6, 9, 12, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 120, 180, 240 e 300 minutos.
8. Passadas às 5 horas, amostras do sobrenadante e o lodo adensado eram coletadas.
9. Determinava-se o valor da turbidez do sobrenadante. Para o lodo adensado o parâmetro teor de sólidos (fixos e voláteis) era determinado.
10. Plotava-se a altura da interface sólido/líquido versus o tempo de sedimentação.
11. De acordo com metodologia descrita por Talmadge e Fitch, eram determinados os valores de F_c e F_e (fatores de clarificação e espessamento respectivamente), com base na curva de adensamento.
12. O procedimento descrito foi executado para cada um dos dois polímeros e para os dois tipos de lodo (ETAs 3 e 4).
13. Os valores de F_e , F_c , turbidez do sobrenadante e teor de sólidos no lodo adensado, para cada um dos tempos de mistura era analisado e comparado. Daí então, foi escolhido o melhor tempo de mistura (lodo bruto/polímero) para o ensaio de adensamento.

Obtidos, assim, o tempo ótimo e fixada a rotação, desenvolveram-se os ensaios para determinar a melhor dosagem de polímero. Foram investigadas oito dosagens diferentes: 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13 e 15 g/Kg de SST, além de uma coluna controle onde não houve a aplicação de polímero.

O procedimento adotado para escolha da melhor dosagem era o mesmo empregado para determinação do tempo ótimo, repetiam-se então as treze etapas descritas anteriormente. Obviamente, três alterações mostraram ser necessárias. Na etapa 4 a dosagem de polímero não permanecia fixa, eram analisados oito valores diferentes. O tempo de floculação por sua vez não variava, era adotado aquele escolhido como ótimo. No item 12 a metodologia era repetida para o lodo das duas ETAs e para as oito diferentes dosagens. E por último na etapa 13 a combinação dos melhores resultados dos quatro parâmetros indicava a melhor dosagem.

Finalizada a fase II o lodo era adensado nas condições ótimas determinadas, para a realização dos estudos de desaguamento.

4.6 Fase III: Desaguamento do Lodo por Centrifugação

4.6.1 Preparo do Lodo Adensado para Ensaio de Desaguamento

Concluída a fase na qual tinha sido determinado o melhor tipo de polímero para o espessamento, este foi utilizado em sua condição ótima na produção de lodo adensado para o desaguamento (fase III).

Para os estudos de desaguamento, também era investigada a eficiência de polímeros no condicionamento do lodo já adensado, através de ensaios de centrifugação. Foram avaliados dois tipos de polímeros: um catiônico e um aniônico. Diferentes dosagens foram verificadas, no intuito de se determinar o melhor tipo de polímero dentre aqueles investigados e sua dosagem ótima, bem como, o tempo de mistura e rotação do agitador, segundo metodologia proposta por REALI *et al* (1999).

Decidiu-se que os polímeros testados seriam: 1 (aniônico) e 2 (catiônico). Também foram determinados os valores das rotações e tempos de mistura investigados. Foram eles, respectivamente: 20, 40, 60, 80, 100 e 200 rpm; e 5, 10, 15, 30, 45 e 60s. Para estas análises prévias a dosagem de polímero foi fixada em 1 g/Kg de SST. Para a centrifuga, de acordo com metodologia apresentada por Reali *et al* (1999), fixou-se a rotação em 700 rpm.

A realização destes ensaios prévios deu-se de acordo com a metodologia ora apresentada:

1. Coletava-se e homogeneizava-se o lodo bruto.
2. Produzia-se lodo adensado dentro das condições ótimas determinadas e estabelecido na fase II desta investigação.
3. Coletava-se o lodo adensado e eram feitas análises de sólidos totais e sólidos em suspensão totais.
4. Colocava-se 250 mL do lodo espessado em um recipiente de seção quadrada.
5. Ligava-se o agitador. Com a ajuda do tacômetro a rotação do agitador era ajustada. Seis rotações foram testadas (20, 40, 60, 80, 100 e 200 rpm).

6. Pipetava-se polímero (1 g/Kg de SST) e o cronômetro era disparado. Foram investigados seis tempos de mistura diferentes: 5, 10, 15, 30, 45 e 60 s.

OBS: Todas as rotações foram testadas com cada um dos tempos de mistura.

7. Após a mistura, desligava-se o agitador. O lodo (15 mL) era então transferido para a cubeta graduada da centrífuga. Esta comporta, em seu interior, quatro cubetas.

8. O período de centrifugação era de 1,5 hora.

9. Durante a centrifugação o volume de lodo no interior da cubeta era monitorado em intervalos de 10 minutos.

10. Terminada a centrifugação, calculava-se o teor de sólidos totais finais na torta.

11. Plotava-se a curva de variação do teor de sólidos totais finais na torta em função da rotação.

12. O procedimento descrito foi executado, em triplicata, para cada um dos dois polímeros e para os lodos da ETAs 3 e 4.

Finalizada esta investigação e de posse do gráfico do teor de sólidos totais finais na torta em função da rotação, para cada polímero, o melhor condicionador foi aquele que alcançou o maior teor de sólidos finais na torta. Daquele gráfico determinava-se também a rotação do equipamento bem como o tempo de mistura.

Utilizou-se um agitador mecânico de paleta do tipo “*Phipps and Bird*”, da empresa Ética, modelo 218.E, a haste do equipamento e sua paleta eram de aço inox. A primeira tinha 40 cm de comprimento e diâmetro de 1 cm, a paleta possuía 2,5 x 7,5 cm de dimensões.

O recipiente onde ocorreu o condicionamento do lodo adensado tinha as seguintes dimensões: seção quadrada de 9,4 x 9,4 cm e altura de 11,5 cm, como pode ser observado na Figura 4.14.

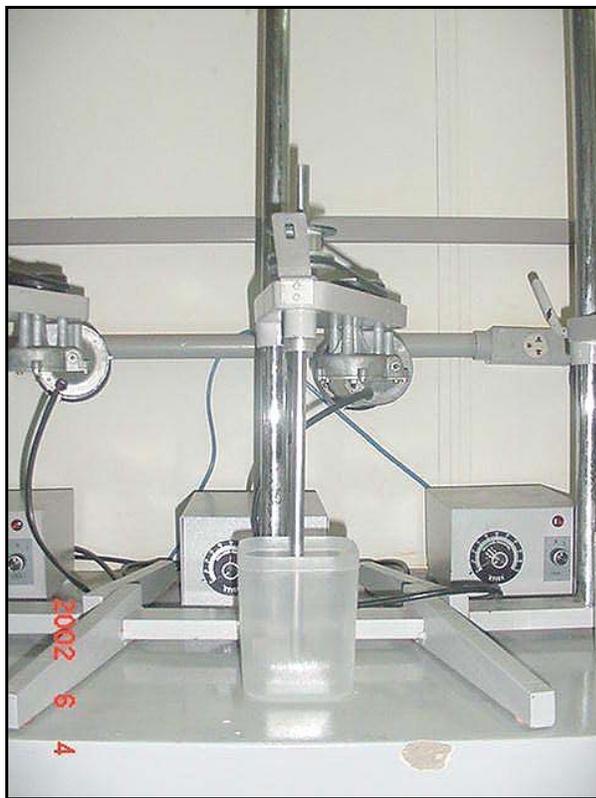


Figura 4.14 – Agitador mecânico e recipiente para condicionamento do lodo adensado

Como a centrífuga comportava quatro cubetas de cada vez, o sistema de bancada, para os ensaios preliminares da fase III, era constituído por quatro instalações idênticas à descrita anteriormente (Figura 4.15).

A centrífuga utilizada, nesta fase preliminar e também nas análises de desaguamento, era um equipamento de laboratório com alimentação por batelada da marca Fanem, modelo: Excelsa II – 206 BL, com potência de 600 W e rotação na faixa de 500 a 5000 rpm (Figura 4.16).



Figura 4.15 – Sistema de bancada para execução dos ensaios preliminares de desaguamento do lodo



Figura 4.16 – Centrífuga de laboratório com alimentação por batelada.

4.6.2 Avaliação do Desaguamento por Centrifugação do Lodo Pré-Adensado

A fase III desta investigação experimental destinou-se a estudar o desaguamento do lodo, utilizando para isto uma centrífuga de laboratório com alimentação por batelada.

Obtidos o tempo de mistura, a rotação do agitador e o melhor polímero os ensaios para obter a melhor dosagem foram realizados. Foram investigadas sete dosagens diferentes: 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 4 e 5 g/Kg de SST, além de uma cubeta, com amostra de lodo espessado, em que não houve a aplicação de polímero.

A seguir segue a metodologia utilizada para este ensaio:

1. Coletava-se e homogeneizava-se o lodo bruto.
2. Produzia-se lodo adensado (dentro das condições ótimas determinadas e estabelecidas na fase II desta investigação).
3. Coletava-se o lodo adensado e eram feitas determinações de sólidos totais.
4. Colocava-se 250 mL do lodo espessado em um recipiente de seção quadrada.
5. Ligava-se o agitador. Com a ajuda do tacômetro a rotação daquele era ajustada para a rotação ótima determinada nos testes preliminares.
6. Pipetava-se polímero e o cronômetro era disparado. Foram investigadas as sete dosagens apresentadas no início deste item.
7. Após a mistura, desligava-se o agitador. O lodo (15 mL) era então transferido para a cubeta graduada da centrífuga.
8. O período de centrifugação era de 1,5 hora, com rotação de ensaio de 700 rpm.
9. Durante a centrifugação o volume de lodo no interior da cubeta era monitorado em intervalos de 10 minutos.
10. Terminada a centrifugação, calculava-se o teor de sólidos totais finais na torta.
11. Plotava-se a curva de variação do teor de sólidos totais finais na torta em função da dosagem.
12. O procedimento descrito foi executado, em triplicata, para cada dosagem e para os dois tipos de lodos (ETAs 3 e 4).

Deste modo, pôde-se avaliar qual a dosagem ótima, ou seja, aquela que forneceu a maior porcentagem de remoção de água do lodo. Para esta dosagem, era repetido o procedimento, ora apresentado, mais três vezes. Obviamente, neste caso, a dosagem de

polímero não variou, permanecendo fixa na ótima determinada. No item 8, da metodologia apresentada neste item, foram impostas três rotações diferentes à centrífuga (1.500, 2.200 e 3.000 rpm).

Para cada uma das rotações investigadas, era construída a curva de centrifugação (teor de sólidos na torta em função do tempo de centrifugação). Isto permitiu avaliar a influência do tempo de centrifugação e da intensidade da força centrífuga aplicada, na porcentagem de remoção de água da torta.

4.7 Velocidade de Sedimentação

Nesta investigação experimental utilizando-se os parâmetros ótimos determinados nos ensaios anteriores (fase II), foram executados estudos para se verificar as eficiências de remoção de turbidez (para a condição ótima de adensamento) como função da velocidade de sedimentação dos flocos.

Os ensaios foram executados nas colunas de sedimentação. Estas possuíam pontos de coletas laterais distantes 10 cm entre si. O primeiro ponto encontrava-se a 13 cm da superfície livre.

Nos itens a seguir estão descritos os procedimentos que foram seguidos no laboratório visando a determinação da velocidade de sedimentação:

1. Coletava-se e homogeneizava-se o lodo bruto. Determinava-se o valor do pH, bem como eram realizadas as análises da série de sólidos do resíduo.
2. 5 L de lodo bruto eram colocados em um recipiente de seção quadrada (caixa de mistura), onde ocorria o condicionamento químico.
3. Ligava-se o agitador. A rotação utilizada era de 645 rpm.
4. Dosava-se o polímero e o cronômetro era disparado. A dosagem e tempo de mistura eram aqueles ótimos encontrados na fase II.
5. Após a mistura, o agitador era desligado. O lodo condicionado era transferido para a coluna de sedimentação.

6. Iniciada a sedimentação, coletava-se, aproximadamente, 60 mL de amostra do sobrenadante nos seguintes tempos de sedimentação: 1; 3; 7; 12; 20 , 30 e 60 minutos. Isto, para que fosse possível determinar as eficiências de remoção de turbidez como função da velocidade de sedimentação dos flocos.

OBS:- Como em cada coluna havia mais de um ponto lateral, as amostras de sobrenadante foram coletadas naqueles pontos onde era possível.

7. Procedia-se a leitura dos valores de turbidez do sobrenadante de cada amostra e de cada ponto lateral. Tinha-se o cuidado de não permitir que ocorresse sedimentação no interior do frasco de leitura da turbidez.

8. Mediam-se as respectivas alturas da interface sólido/líquido (distância do ponto de coleta à superfície livre) de cada amostra de sobrenadante.

9. Plotava-se a curva de variação de eficiência como função de cada velocidade de sedimentação estabelecida.

Durante este ensaio a temperatura do lodo bruto era medida.

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

O presente estudo foi dividido em três fases: I) Escolha do polímero para execução dos ensaios de adensamento por gravidade em colunas de sedimentação; II) Determinação das condições ótimas de adensamento; e III) Ensaio de desagumamento por centrifugação do lodo pré-adensado.

De acordo com dados apresentados na revisão da literatura, o teor de sólidos do lodo bruto varia de 0,1 a 2%, entretanto na maioria das ETAs este valor fica abaixo de 1%. Como foi constatado o teor de sólidos do lodo bruto da ETA do tipo convencional ficou compreendido na faixa de 0,3 a 1,3% na época de chuvas e entre 0,5% a 1,1% na estiagem. Para o lodo oriundo do decantador de alta taxa (placas paralelas) o teor de sólidos ficou entre 0,2 e 0,4% no período de chuvas e variou de 0,1% a 0,4% na estiagem.

Em uma das amostras coletadas, no decantador laminar para o período de chuvas, o teor de sólidos foi de 2,3%. Em condições não adversas, o teor de sólidos no lodo do decantador da ETA-4 é menor se comparado ao da ETA-3 devido a esta estação ter descargas menos frequentes.

No tocante as características químicas do lodo os parâmetros, sólidos totais e sólidos em suspensão, ficaram dentro da faixa de valores apresentados por Yuzhu (1996) para lodo de decantador. Todavia os valores de pH encontrados foram maiores (8,4 a 8,9) do que os apresentados por aquela pesquisadora. Isto se deve ao fato da água ter o valor de seu pH

aumentado (da ordem de 9) para que o coagulante utilizado (cloreto férrico) possa fazer a precipitação de ferro e manganês.

5.1 Resultados dos Ensaios de Adensamento por Gravidade em Colunas de Sedimentação – Fase I

5.1.1 Período de Chuvas

Um acontecimento que chamou a atenção na realização dos testes de adensamento do lodo, nas amostras onde foram aplicados os polímeros 2 e 5, ambos catiônicos, alguns flocos não sedimentaram e permaneceram junto à superfície d'água.

Na tabela 5.1 apresentam-se os resultados referentes ao estudo de cada polímero para o adensamento por gravidade. Os parâmetros ótimos encontram-se em destaque.

Tabela 5.1 – Resultados dos ensaios de adensamento por gravidade do lodo da ETA-3 no período de chuvas.

Polímero	Dosagem (g/Kg)	F_e (cm/min)	F_c (cm/min)	Teor de Sólidos no Lodo (%)	Turbidez do Sobrenadante (NTU)
1		2,1	36,0	1,8	9,5
2	2,0	1,5	9,0	2,5	0,9
3		3,6	36,0	2,6	8,5
4		2,4	36,0	2,3	5,7
5		1,1	6,0	2,7	1,8

Para o lodo oriundo da ETA 3 (decantador do tipo convencional) o teor de sólidos do lodo bruto ficou entre 0,3 e 1,3%. Os ensaios realizados mostraram que os polímeros 2 e 5 foram os que obtiveram uma melhor captura dos sólidos em suspensão e portanto, apresentaram os menores resultados do valor da turbidez. Estes valores foram de 0,9 NTU para o polímero 2 e de 1,8 NTU para o polímero 5.

Ainda para os polímeros 2 e 5, os valores do teor de sólidos no lodo adensado foram bastante satisfatórios, sendo de 2,5% e de 2,7%, respectivamente.

Cabe ainda mencionar que os polímeros 3 e 4, também tiveram um bom desempenho no tocante ao parâmetro teor de sólidos no lodo adensado. Contudo, a turbidez residual no sobrenadante após a sedimentação foi, extremamente, alta chegando a valores da ordem de 8,5 e 5,7, respectivamente, para os polímeros 3 e 4.

As amostras de lodo condicionadas com os polímeros 1, 3 e 4 foram as que resultaram em maiores valores para o fator de clarificação, isto é, 36 cm/min. Quando este parâmetro é combinado com o fator de espessamento, apenas os polímeros 3 e 4 se sobressaíram com valores de F_e de 3,6 e 2,4 cm/min, respectivamente.

A Figura 5.1 ilustra as curvas de adensamento por gravidade, obtidas dos ensaios executados nas colunas de sedimentação, para o lodo da ETA 3. A Figura 5.2 mostra as mesmas curvas da Figura 5.1 em escala ampliada.

Para se escolher os melhores polímeros devem-se combinar os parâmetros: menor valor da turbidez do sobrenadante; maior teor de sólidos no lodo adensado; e maiores valores dos fatores de clarificação e espessamento. A decisão sobre os polímeros escolhidos, será tomada após serem apresentados os dados obtidos com os ensaios no lodo da ETA 4, para fase I.

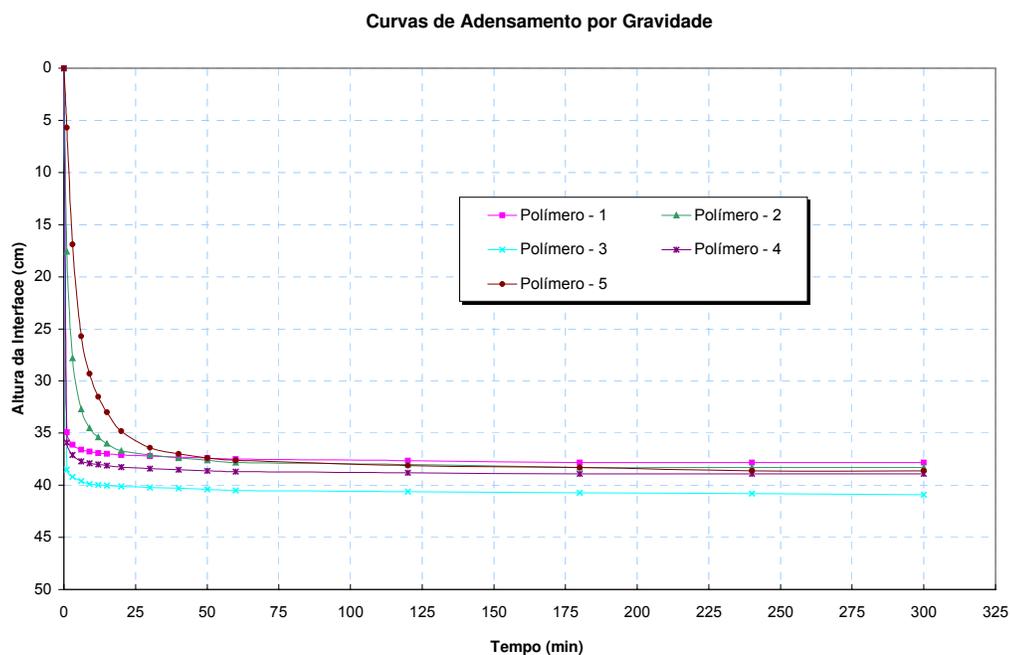


Figura 5.1 - Curvas de adensamento por gravidade associada a diferentes polímeros referentes a ensaio realizado para lodo da ETA 3 no período de chuvas.

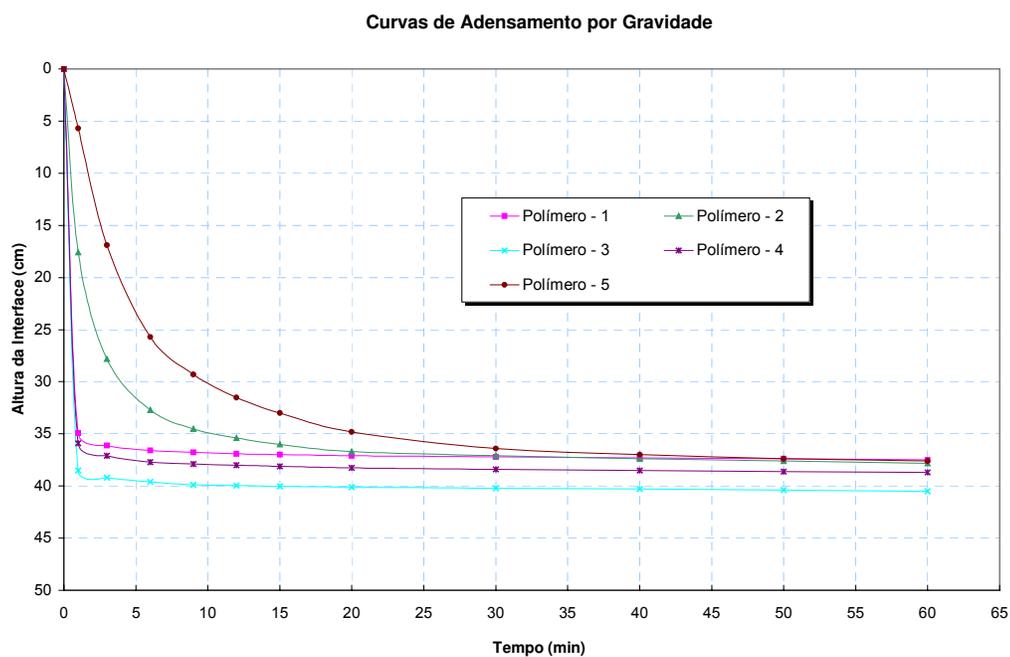


Figura 5.2 - Curvas de adensamento por gravidade para lodo da ETA 3 em escala ampliada.

Na tabela 5.2 apresentam-se os resultados referentes ao estudo de cada polímero para o adensamento por gravidade. Os parâmetros ótimos encontram-se em destaque.

Tabela 5.2 – Resultados dos ensaios de adensamento por gravidade do lodo da ETA-4 no período de chuvas.

Polímero	Dosagem (g/Kg)	F_e (cm/min)	F_c (cm/min)	Teor de Sólidos no Lodo (%)	Turbidez do Sobrenadante (NTU)
1	2,0	2,3	37,4	1,7	2,0
2		2,1	37,4	1,3	0,8
3		2,7	37,4	1,6	3,2
4		1,8	12,5	0,8	1,5
5		1,4	9,4	0,7	1,1

O lodo proveniente da ETA 4 (decantador com placas paralelas) apresentou teor de sólidos do lodo bruto na faixa de 0,2 a 2,3%. Os ensaios realizados mostraram que os polímeros 2 e 5 foram os que obtiveram uma melhor captura dos sólidos em suspensão e portanto, apresentaram os menores resultados do valor da turbidez. Estes foram de 0,8 NTU para o polímero 2 e de 1,1 para o polímero 5.

Ainda para os polímeros 2 e 5, os valores do teor de sólidos no lodo adensado não foram os maiores sendo eles, respectivamente, de 1,3% e de 0,7%. Os maiores valores para o teor de sólidos foram obtidos com os polímeros 1 que foi de 1,7% e com o polímero 3 que foi de 1,6%.

Cabe ainda mencionar que o polímero 2, também teve um bom desempenho no tocante ao parâmetro teor de sólidos no lodo adensado, e que a turbidez residual no sobrenadante adensado com os polímeros 1 e 3, após a sedimentação foram altas chegando a valores da ordem de 2,0 e 3,2, respectivamente, para os polímeros 1 e 3.

As amostras de lodo condicionadas com os polímeros 1, 2 e 3 foram as que resultaram em maiores valores para o fator de clarificação, isto é, 37,4 cm/min. Quando este parâmetro é combinado com o fator de espessamento, apenas os polímeros 1 e 3 se sobressaíram com valores de F_e de 2,3 e 2,7 cm/min, respectivamente.

Ressalta-se que o polímero 2, também teve um bom desempenho no tocante ao parâmetro fator de espessamento, sendo que seu valor foi da ordem de 2,1 cm/min.

A Figura 5.3 apresenta as curvas de adensamento por gravidade, obtidas dos ensaios realizados nas colunas de sedimentação, para o lodo da ETA 4. A Figura 5.4 ilustra as mesmas curvas da Figura 5.3 em escala ampliada.

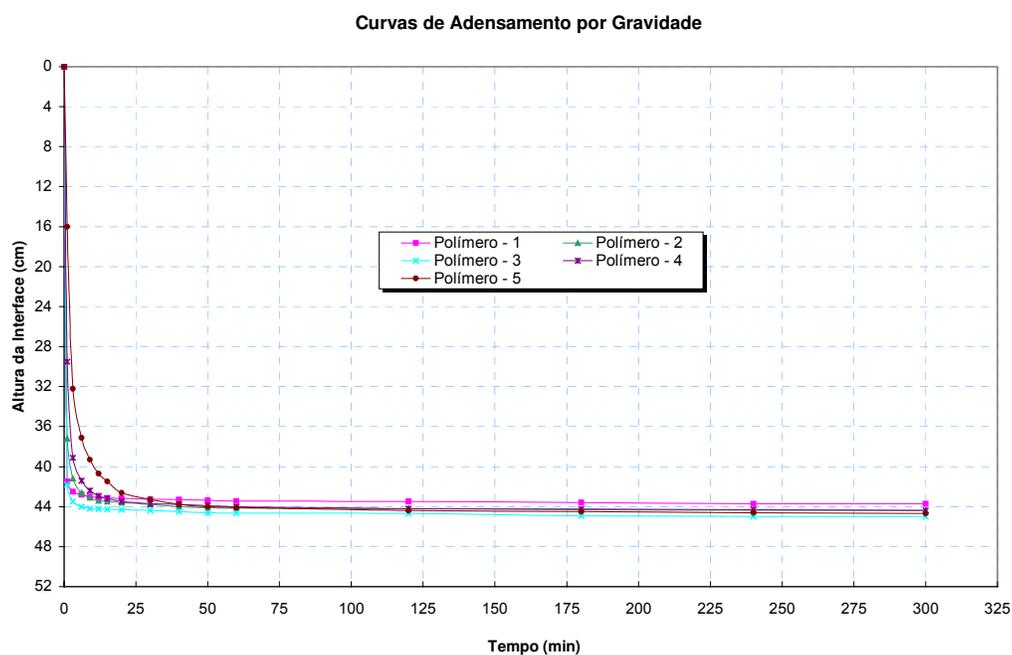


Figura 5.3 - Curvas de adensamento por gravidade associada a diferentes polímeros referentes a ensaio realizado para lodo da ETA 4 no período de chuvas.

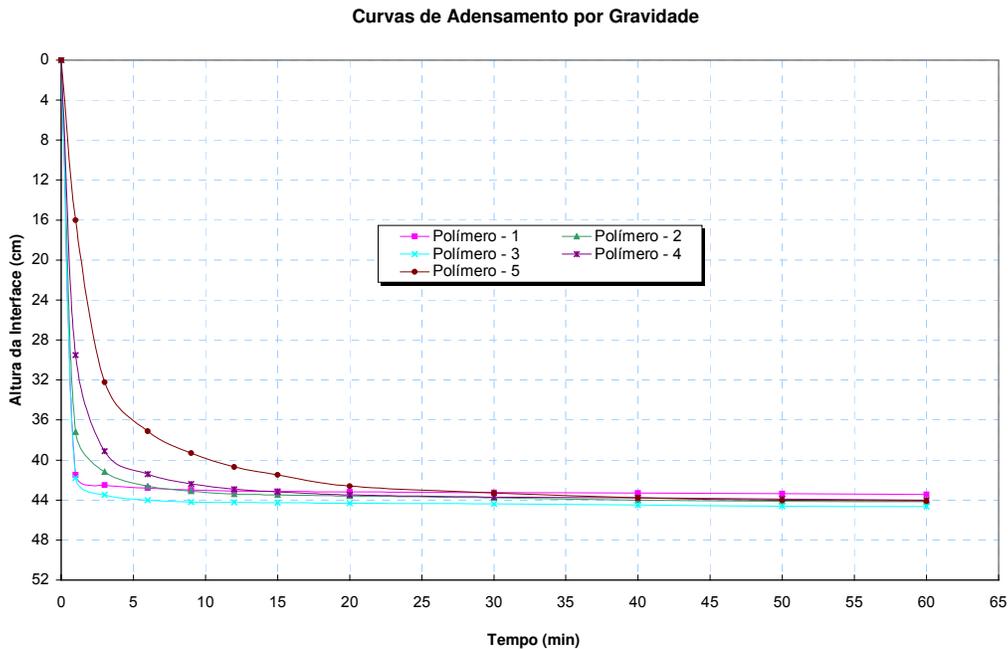


Figura 5.4 - Curvas de adensamento por gravidade para lodo da ETA 4 em escala ampliada.

Analisados em separado, os polímeros 2 e 5 foram os que obtiveram os melhores resultados no parâmetro valor da turbidez do sobrenadante e resultados satisfatórios para o teor de sólidos do lodo adensado. Para os parâmetros F_c e F_e o polímero 3 foi o que teve melhor desempenho. Isto ocorreu para os dois tipos de lodo, oriundos das ETAs 3 e 4, analisados nesta fase da investigação experimental.

Quando os quatro parâmetros foram combinados para se determinar qual seriam os dois tipos de polímeros escolhidos a serem utilizados na próxima fase da pesquisa, foi observado que os lodos condicionados com o polímero 2, mostraram um desempenho não muito inferior àqueles condicionados com o polímero 3, no tocante ao valor de F_e . Todavia, este polímero teve um desempenho muito ruim no parâmetro turbidez do sobrenadante, quando comparado com todos os outros polímeros.

Desta maneira uns dos polímeros escolhidos para seguir para a próxima fase foi o polímero 2 (catiônico). Como uma das alternativas ao sobrenadante gerado do tratamento do lodo, nas ETAs 3 e 4, é a recirculação para o início do tratamento o polímero 3, que após o

adensamento apresentou os maiores valores para a turbidez do sobrenadante, foi descartado para prosseguir na pesquisa.

O polímero 5 também foi descartado pois o polímero 2 já havia sido escolhido, e ambos são catiônicos. Restava então, os polímeros 1 e 4, das Tabelas 5.1 e 5.2, e também visando a recirculação do sobrenadante, escolheu-se o polímero 4. Assim posto, foram escolhidos para os ensaios de adensamento da fase II, para o período de chuvas, os polímeros: 2 e 4, catiônico e aniônico respectivamente.

5.1.2 Período de Estiagem

Na Tabela 5.3 encontra-se o resultado da fase I para o lodo da ETA 3.

Tabela 5.3 – Resultados dos ensaios de adensamento por gravidade do lodo da ETA-3 no período de estiagem.

Ensaio	Polímero	Dosagem (g/Kg)	F _e (cm/min)	F _c (cm/min)	Teor de Sólidos no Lodo (%)	Turbidez do Sobrenadante (NTU)
1	1	2,0	1,4	18,7	1,8	8,8
	2				1,6	1,3
	3		1,6	18,7	2,0	16,2
	4		1,2	5,8	1,8	7,4
	5				1,8	0,9
2	1	2,0	1,4	18,7	1,9	7,4
	2				1,8	0,8
	3		1,9	18,7	2,0	10,3
	4		1,3	7,5	2,2	5,9
	5				1,8	1,0
3	1	2,0	0,8	4,7	2,4	6,3
	2				2,5	0,5
	3		1,1	6,2	2,5	6,5
	4		0,5	0,9	2,6	5,0
	5				2,4	0,5

Para o lodo da ETA 3 (decantador do tipo convencional) o teor de sólidos do lodo bruto foi da ordem de 1,1%. Os ensaios mostraram que os polímeros 2 e 5 conseguiram uma melhor

captura dos sólidos em suspensão, sendo assim, resultaram em sobrenadante com os menores resultados do valor da turbidez. Estes ficaram compreendidos entre 0,5 e 1,3 NTU para o polímero 2 e de 0,5 a 1,0 para o polímero 5, como pôde ser observado na Tabela 5.3.

Os polímeros 1 e 3, de maneira geral, foram os que tiveram os melhores desempenhos para o lodo da ETA 3 no período de estiagem. Contudo, os valores da turbidez no sobrenadante após a sedimentação foram, extremamente, altos chegando a 8,8 e 16,2 NTU respectivamente para os polímeros 1 e 3.

A Figura 5.5 mostra as curvas de adensamento por gravidade, obtidas dos ensaios realizados em colunas de sedimentação, para o lodo da ETA 3.

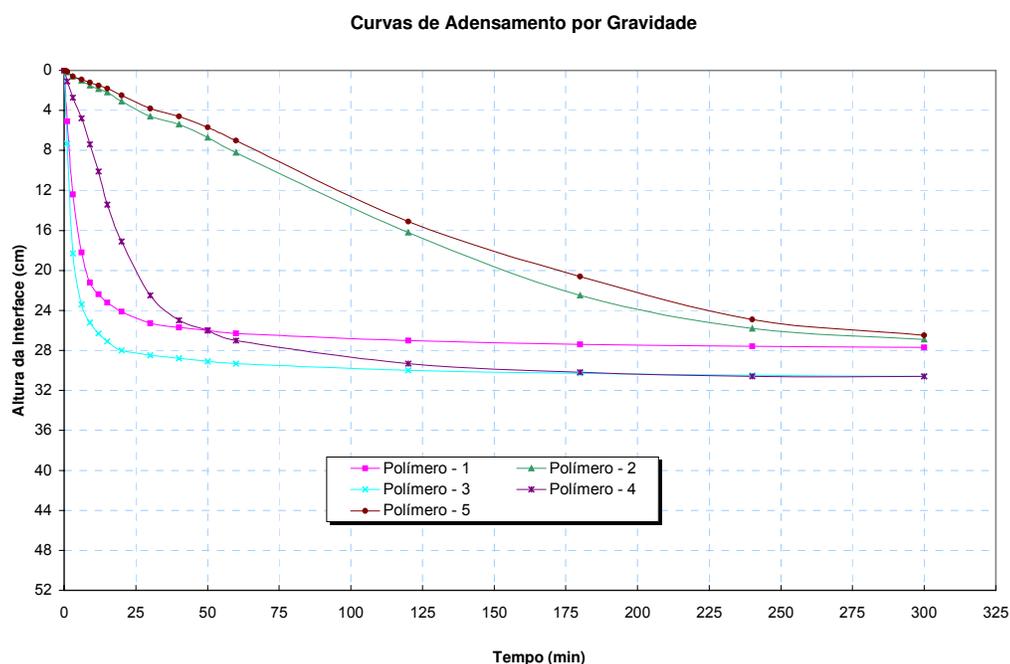


Figura 5.5 - Curvas de adensamento por gravidade associada a diferentes polímeros referentes a ensaio realizado para o lodo da ETA 3 – Ensaio 3.

As curvas dos ensaios 1 e 2 estão apresentadas no anexo A.

Destes ensaios observou-se que os lodos condicionados com os polímeros 2 e 5 (ambos catiônicos) apresentaram baixa velocidade de sedimentação e sua curva assemelha-se

a uma reta descendente. Para estes polímeros, e tendo por base tais curvas, não foi possível determinar os valores de F_c e F_e .

Lodos condicionados com os polímeros 1 e 3 foram os que produziram os maiores valores para o fator de clarificação, isto é, 18,7 cm/min, nos dois primeiros ensaios, e 4,7 e 6,2 cm/min para os polímeros 1 e 3, respectivamente, no terceiro ensaio. Quando este parâmetro foi combinado com o parâmetro F_e , os mesmos polímeros 1 e 3 se sobressaíram com valores de F_e de 0,8 a 1,4 cm/min e entre 1,1 e 1,9 cm/min, respectivamente. Da mesma maneira, como foi feita para o período de chuvas, foram escolhidos dois polímeros.

Os condicionadores que obtiveram melhores desempenhos, como já foi apresentado, foram o 1 e 3. Contudo, como uma das alternativas ao sobrenadante gerado do tratamento do lodo, pode ser a recirculação para o início do tratamento o polímero 3, que após o adensamento apresentou os maiores valores para a turbidez do sobrenadante, foi descartado para prosseguir nos ensaios.

Como um dos polímeros escolhidos foi o 1, o condicionador 4 que também é aniônico estava descartado. Restaram os polímeros catiônicos 2 e 5, que conforme os resultados apresentados na Tabela 5.3 tiveram comportamento muito semelhante para os parâmetros turbidez do sobrenadante e teor de sólidos do lodo adensado. Neste ponto optou-se por esperar os resultados para o lodo da ETA 4, para depois decidir qual seria o segundo polímero.

A Tabela 5.4 traz o resultado da fase I para o lodo da ETA 4.

Tabela 5.4 – Resultados dos ensaios de adensamento por gravidade do lodo da ETA-4 na época de estiagem.

Ensaio	Polímero	Dosagem (g/Kg)	F _e (cm/min)	F _c (cm/min)	Teor de Sólidos no Lodo (%)	Turbidez do Sobrenadante (NTU)
1	1	2,0	2,2	37,4	0,8	1,6
	2		1,0	7,5	0,5	1,3
	3		2,7	37,4	1,2	3,6
	4		2,5	37,4	1,0	1,6
	5		0,9	5,4	0,5	0,9
2	1	2,0	2,5	37,4	1,2	2,0
	2		1,2	9,4	0,8	1,0
	3		2,9	37,4	1,1	3,6
	4		2,0	18,7	0,6	
	5		0,9	5,4	0,4	1,1
3	1	2,0	2,5	37,4	1,1	1,6
	2		1,0	7,5	0,6	1,4
	3		2,4	37,4	1,0	3,6
	4		2,3	37,4	0,8	1,5
	5		1,0	7,5	0,4	1,2

O lodo oriundo da ETA 4 (decantador alta taxa) apresentou teor de sólidos do lodo bruto em torno de 0,1%. Os ensaios também mostraram que os polímeros 2 e 5 foram os que apresentaram melhor captura dos sólidos em suspensão e conseqüentemente, os melhores resultados para o valor da turbidez do sobrenadante do lodo espessado.

Para o polímero 2 a turbidez residual do sobrenadante ficou compreendida entre 1,0 e 1,4 NTU. O sobrenadante do lodo condicionado com polímero 5 apresentou valores de turbidez que foram de 0,9 a 1,2 NTU, como pôde ser visto na Tabela 5.4.

Os polímeros 1 e 3 foram os que obtiveram os melhores resultados referentes ao parâmetro teor de sólido no lodo adensado. Todavia, os valores da turbidez residual no sobrenadante depois de terminada a sedimentação para o polímero 3, foram os mais altos, sendo da ordem de 3,6 NTU.

A Figura 5.6 mostra as curvas de adensamento por gravidade, obtidas dos ensaios realizados em colunas de sedimentação, para o lodo da ETA 4 na época de estiagem.

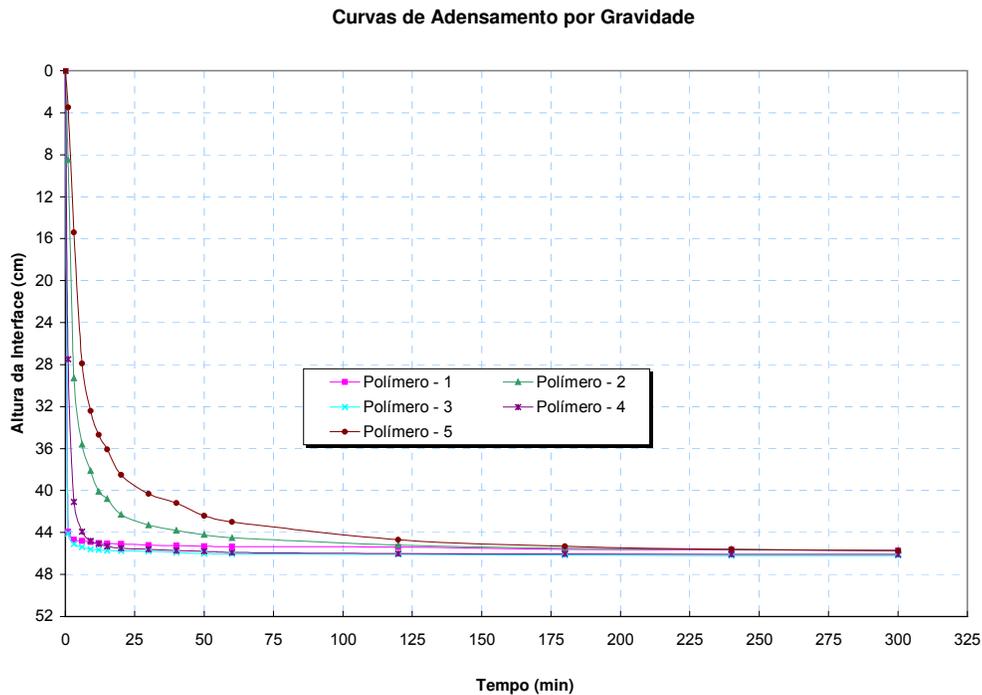


Figura 5.6 - Curvas de adensamento por gravidade associada a diferentes polímeros referentes a ensaio realizado para o lodo da ETA 4 – Ensaio 2.

As curvas dos ensaios 1 e 3 estão apresentadas no anexo A.

Na Figura 5.6 pôde-se observar que os polímeros catiônicos (2 e 5), diferentemente do que ocorreu com o lodo da ETA 3, não apresentaram sedimentação lenta.

Os lodos espessados com os condicionadores 1, 3 e 4 apresentaram os maiores valores para o fator de clarificação, isto é, 37,4 cm/min. Contudo, somente os polímeros 1 e 3 atingiram bom desempenho para F_e , com valores entre 2,2 e 2,5 cm/min e entre 2,4 a 2,9 cm/min, respectivamente. O polímero 4 apresentou valor de F_e de 2,5 cm/min em apenas um dos ensaios, fato este que não voltou a ocorrer novamente.

Os polímeros que obtiveram melhores desempenhos, como mencionado e apresentado na Tabela 5.4, foram os polímeros 1 e 3. Sendo que uma das alternativas ao sobrenadante gerado do tratamento do lodo, pode vir a ser a recirculação para o início do

tratamento o polímero 3, que após o adensamento apresentou os maiores valores para a turbidez do sobrenadante, foi descartado para prosseguir na pesquisa.

Como um dos polímeros escolhidos foi o 1, o condicionador 4 que também é aniônico estava descartado. Restando os polímeros catiônicos 2 e 5, e como estes apresentarem desempenho semelhante, optou-se por substituir o polímero 3 pelo polímero 5.

Tomada à decisão, ora apresentada, os ensaios para determinação da condição ótima de adensamento por gravidade, para o período de estiagem e lodo da ETA 4, seriam realizados com os polímeros 1 e 5, aniônico e catiônico respectivamente.

Conforme exposto anteriormente, o segundo polímero para a ETA 3 seria escolhido depois de apresentado o resultado da ETA 4. Decidiu-se então, que para a ETA 3, no período de estiagem, os polímeros escolhidos para a fase II seriam os condicionadores 1 e 5, visando a comparação entre as duas ETAs.

5.2 Resultados dos Ensaios de Determinação das Condições Ótimas de Adensamento do Lodo – Fase II

Na escolha do melhor tempo de mistura, a rotação do agitador foi fixada em 645 rpm e a dosagem de polímero foi de 2 g/Kg de SST, para ambos os polímeros, para as duas ETAs e para os dois períodos em que houve coleta de lodo.

5.2.1 Período de Chuvas

Começando pela estação de tratamento 3, durante as análises da fase II o teor de sólidos do lodo bruto ficou em torno de 0,9% e o valor do pH foi de 8,2. Na Tabela 5.5 estão apresentados os resultados para o melhor tempo de mistura para o lodo da ETA 3 e para os dois tipos de polímeros escolhidos.

Tabela 5.5 – Tempos de mistura para o adensamento por gravidade do lodo da ETA 3.

Polímero	Tempo de Mistura (s)	Dosagem (g/Kg)	F _e (cm/min)	F _c (cm/min)	Teor de Sólidos no Lodo (%)	Turbidez do Sobrenadante (NTU)
2	15	2,0	5,4	37,4	6,2	1,2
	30		5,8	37,4	7,0	1,1
	45		4,2	37,4	6,2	0,8
	60		2,9	12,5	6,2	0,8
	90		2,3	10,7	5,5	1,0
	120		1,8	7,5	5,7	0,8
4	15	2,0	12,5	37,4	5,3	2,1
	30			37,4	5,8	2,2
	45		12,5	37,4	5,4	2,7
	60		9,4	37,4	5,7	2,9
	90		12,5	37,4	5,8	4,8
	120		12,5	37,4	5,5	8,2

Dos ensaios realizados observou-se que os tempos de 45, 60 e 120s foram aqueles que produziram sobrenadante com menor valor de turbidez 0,8 NTU. Porém, o tempo de 30 s foi o que atingiu o maior índice no teor de sólidos no lodo adensado (7,0 %), no fator de clarificação (37,4 cm/min) e no fator de espessamento (5,8 cm/min), isto para o polímero 2.

Para o condicionador 4 o tempo de 15 s produziu sobrenadante com 2,1 NTU de turbidez. Como pôde ser observado na Tabela 5.5 este polímero apresentou resultados muito próximos entre os parâmetros verificados para todos os tempos analisados. Para o tempo de 30 s o fator de espessamento não pôde ser determinado, devido à queda muito acentuada da curva de sedimentação.

Os tempos de 90 e 120 s não foram levados em conta, pois, seus valores de turbidez no sobrenadante foram altos 4,8 e 8,2 NTU, respectivamente. Para o polímero 4 optou-se então, pelo tempo de mistura de 30 s sendo que com este tempo obteve-se um dos menores valores de turbidez após a sedimentação (2,2 NTU) e o maior teor de sólidos no lodo adensado.

Concluiu-se que, dentre os tempos analisados, 30 s de agitação eram suficientes para produzir lodo com boas características de adensamento, para os dois polímeros analisados. Este foi então, o tempo de mistura escolhido para o lodo da ETA 3 no período de chuvas.

A Figura 5.7 ilustra as curvas de adensamento por gravidade para a escolha do melhor tempo de mistura para o polímero 2 e lodo da ETA 3. As curvas para o mesmo lodo e polímero 4 estão no anexo B desta investigação experimental.

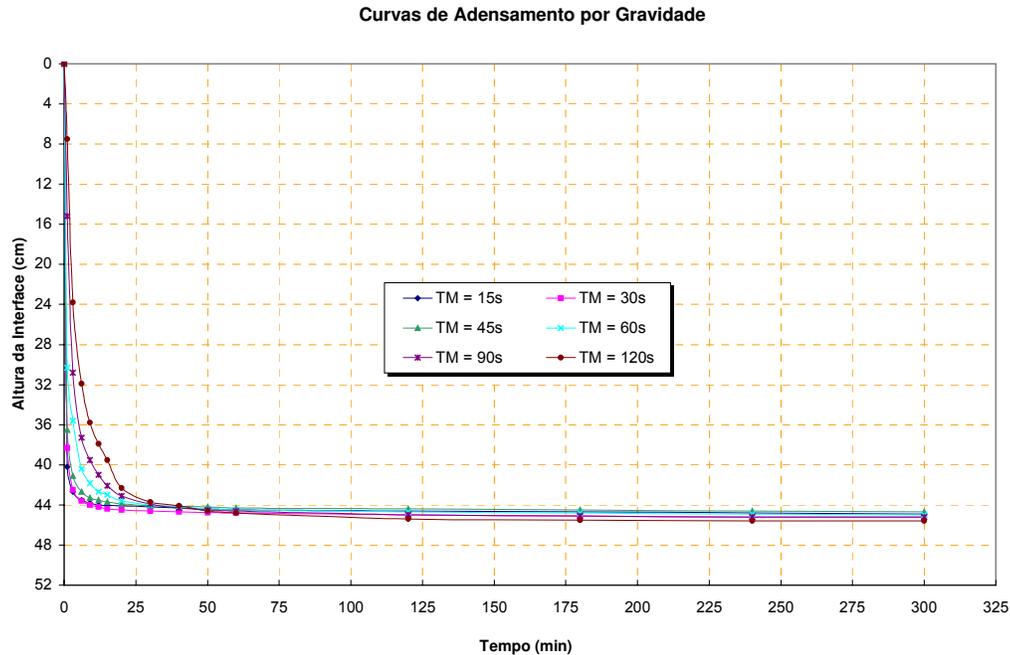


Figura 5.7 - Curvas de adensamento por gravidade associada a diferentes tempos de mistura do polímero 2 referentes a ensaio realizado com dosagem de 2 g/Kg de SST para ETA 3.

Dos ensaios realizados verificou-se que o lodo, da ETA 3, condicionado com o polímero 4 apresenta maior adensabilidade nos primeiros minutos de sedimentação se comparado ao polímero 2.

Para o lodo oriundo da ETA 4, no decorrer da fase II, o teor de sólidos do lodo bruto ficou em torno de 0,4 % e o valor do pH foi de 7,7. A Tabela 5.6 apresenta os resultados para o melhor tempo de mistura para o lodo da ETA 4 e para os dois tipos de polímeros escolhidos.

Tabela 5.6 – Tempos de mistura para o adensamento por gravidade do lodo da ETA 4.

Polímero	Tempo de Mistura (s)	Dosagem (g/Kg)	F _e (cm/min)	F _c (cm/min)	Teor de Sólidos no Lodo (%)	Turbidez do Sobrenadante (NTU)
2	15	2,0	1,3	12,5	1,5	0,4
	30		1,1	7,5	1,2	0,4
	45		1,0	5,4	0,9	0,4
	60		0,9	4,2	0,7	0,4
	90		0,8	2,9	1,4	0,4
	120		0,6	2,8	1,2	0,6
4	15	2,0	1,6	37,4	1,2	1,0
	30		1,4	12,5	0,7	0,8
	45		1,2	8,3	0,7	0,8
	60		1,1	7,5	0,8	0,9
	90		1,0	6,2	0,7	0,9
	120		0,9	6,2	0,6	1,0

Para as análises executadas foi verificado, para o polímero 2, que a maior parte dos tempos de mistura produziu sobrenadante com valor de turbidez da ordem de 0,4 NTU. Com o tempo de 15 s de agitação obtiveram-se as melhores características de adensamento: teor de sólidos de 1,5 %, F_e de 1,3 cm/min e F_c de 12,5 cm/min. Analisando o polímero 4 os valores de turbidez do sobrenadante foram bastante próximos ficando entre 0,8 e 1,0 NTU. Assim como ocorreu com outro polímero analisado, 15 s de mistura obtiveram os maiores valores para teor de sólidos no lodo adensado (1,2 %), fator de espessamento (1,6 cm/min) e fator de clarificação (37,4 cm/min).

Concluiu-se, então, que para a época de chuvas na ETA 3 o melhor tempo de mistura, para a promover e floculação do lodo bruto foi 30 s, e para a estação de tratamento 4 foi o tempo de 15 s.

Na Figura 5.8 apresentam-se as curvas de sedimentação obtida nos ensaios de adensamento, realizados para determinar o melhor tempo de mistura, para adensamento por gravidade com o polímero Duas, do lodo da ETA 4 no período das chuvas. As curvas para o mesmo lodo e polímero 4 estão no anexo B.

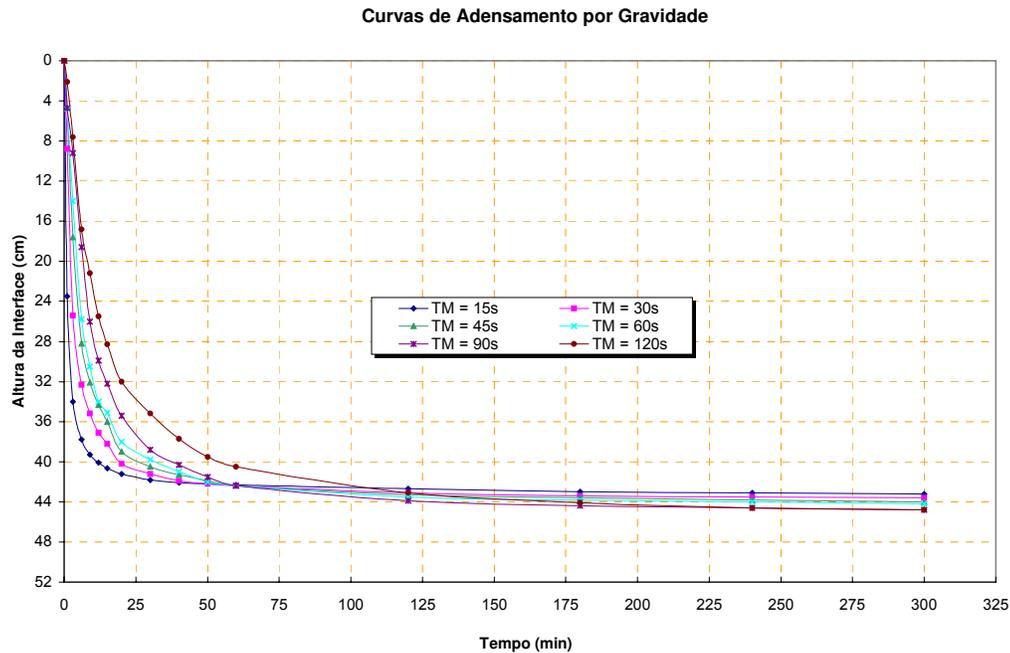


Figura 5.8 - Curvas de adensamento por gravidade associada a diferentes tempos de mistura do polímero 2 referentes a ensaio realizado com dosagem de 2 g/Kg de SST para ETA 4.

Dos ensaios pode ser notado que, para o lodo do decantador da ETA Quatro, no período de chuvas, o adensamento foi similar para ambos os polímeros, diferentemente do que ocorreu na ETA 3, onde o lodo condicionado com polímero 4 teve um rápido espessamento logo nos primeiros minutos do ensaio.

A seguir, serão apresentados os resultados encontrados nos ensaios em que se determinou a melhor dosagem para o teste de adensamento por gravidade para os dois tipos de lodo (ETAs 3 e 4), no período de chuvas, e para os dois polímeros escolhidos na fase I (polímeros 2 e 4).

Na Tabela 5.7 apresentam-se os resultados encontrados nos ensaios em que se encontrou a melhor dosagem de polímero para os lodos da ETA 3 condicionados com os dois tipos de polímeros escolhidos.

Tabela 5.7 – Melhor dosagem de polímero para o adensamento por gravidade do lodo da ETA 3.

Polímero	Tempo de Mistura (s)	Dosagem (g/Kg)	F _e (cm/min)	F _c (cm/min)	Teor de Sólidos no Lodo (%)	Turbidez do Sobrenadante (NTU)
2	30	0,0	1,3	2,3	1,5	39,6
		1,0	2,3	12,5	1,8	0,8
		3,0	9,4	37,4	3,6	1,5
		5,0	18,7	37,4	3,5	5,0
		7,0	18,7	37,4	3,1	8,9
		9,0	18,7	37,4	2,8	22,1
		11,0		37,4	2,0	25,7
		13,0	12,5	37,4	2,2	30,7
		15,0	12,5	37,4	3,0	31,0
		4	30	0,0	1,3	2,3
1,0	7,5			37,4	4,7	3,7
3,0				37,4	4,1	9,2
5,0	12,5			37,4	3,0	15,1
7,0	25,0			37,4	3,1	19,0
9,0	9,4			37,4	2,5	21,8
11,0	7,5			37,4	2,8	21,9
13,0	4,7			37,4	3,3	33,4
15,0	4,4			37,4	2,8	35,7

Como pôde ser visto na Tabela 5.7 a dosagem mais adequada para o polímero 2 foi de 3 g/Kg, com a qual obtiveram-se os maiores valores para o fator de clarificação (37,4 cm/min) e teor de sólidos no lodo adensado (3,6 %). Para o polímero 4 a dosagem de 1 g/Kg foi aquela que apresentou as melhores características de adensamento. Ambos os polímeros e suas respectivas dosagens poderiam ter sido escolhidas como as mais adequadas ao adensamento, por gravidade, do lodo da ETA 3. Contudo, optou-se por aguardar os resultados para o lodo da ETA 4, para depois decidir qual seria o melhor polímero e sua dosagem.

Na Tabela 5.8 exibem-se os resultados encontrados nos ensaios em que se determinou a melhor dosagem de polímero para os lodos da ETA 4.

Tabela 5.8 – Melhor dosagem de polímero para o adensamento por gravidade do lodo da ETA 4.

Polímero	Tempo de Mistura (s)	Dosagem (g/Kg)	F _e (cm/min)	F _c (cm/min)	Teor de Sólidos no Lodo (%)	Turbidez do Sobrenadante (NTU)
2	15	0,0	0,5	1,4	1,1	3,9
		1,0	0,8	4,1	1,3	0,7
		3,0	1,5	37,4	1,1	0,5
		5,0	1,8	37,4	1,9	0,6
		7,0	2,0	37,4	1,9	1,9
		9,0	1,9	37,4	2,0	2,5
		11,0	1,9	37,4	1,6	3,2
		13,0	1,8	37,4	1,2	4,5
		15,0	1,8	37,4	1,3	4,5
4	15	0,0	0,5	1,4	1,1	3,9
		1,0	1,1	7,5	0,9	0,6
		3,0	2,0	37,4	2,0	1,1
		5,0	1,7	37,4	1,8	2,9
		7,0	1,6	37,4	1,4	3,6
		9,0	1,9	37,4	1,4	4,3
		11,0	1,7	37,4	1,2	5,2
		13,0	1,6	37,4	0,8	5,7
		15,0	1,6	37,4	1,0	6,1

Para o polímero 2 e lodo da ETA 4 os melhores valores obtidos em cada parâmetro analisado não foram coincidentes com uma única dosagem. Como foi destacado na Tabela 5.8, o maior valor de F_e 2,0 cm/min foi alcançado com dosagem de 7 g/Kg de SST, o maior valor do fator de clarificação (37,4 cm/min) foi atingido pela maior parte das dosagens investigadas, o menor valor da turbidez do sobrenadante (0,5 NTU) foi conseguido quando o lodo foi condicionado com 3 g/Kg de SST, e o maior teor de sólidos 2,0 % foi obtido com 9 g/Kg de SST de dosagem.

Para o polímero 4 os resultados, do melhores valores para cada parâmetro investigado, foram atingidos com a dosagem de 3 g/Kg de SST. Desta maneira, este polímero e esta dosagem foram escolhidos como os mais adequados ao adensamento, por gravidade, do lodo da ETA 4 no período de chuvas.

Conforme exposto anteriormente, o polímero adequado ao lodo da ETA 3 seria escolhido depois de apresentado o resultado da ETA 4. Decidiu-se então, que para o lodo da

ETA 3, na época de chuvas, o polímero 4 seria o escolhido para o adensamento. Este foi escolhido objetivando a comparação entre as duas ETAs.

As Figuras 5.9 e 5.10 ilustram as curvas de sedimentação, para as duas ETAs, dos ensaios de adensamento realizados com o polímero 4 para determinação da melhor dosagem. As curvas referentes aos ensaios realizados com o polímero 2, para ambas as estações, estão no anexo B.

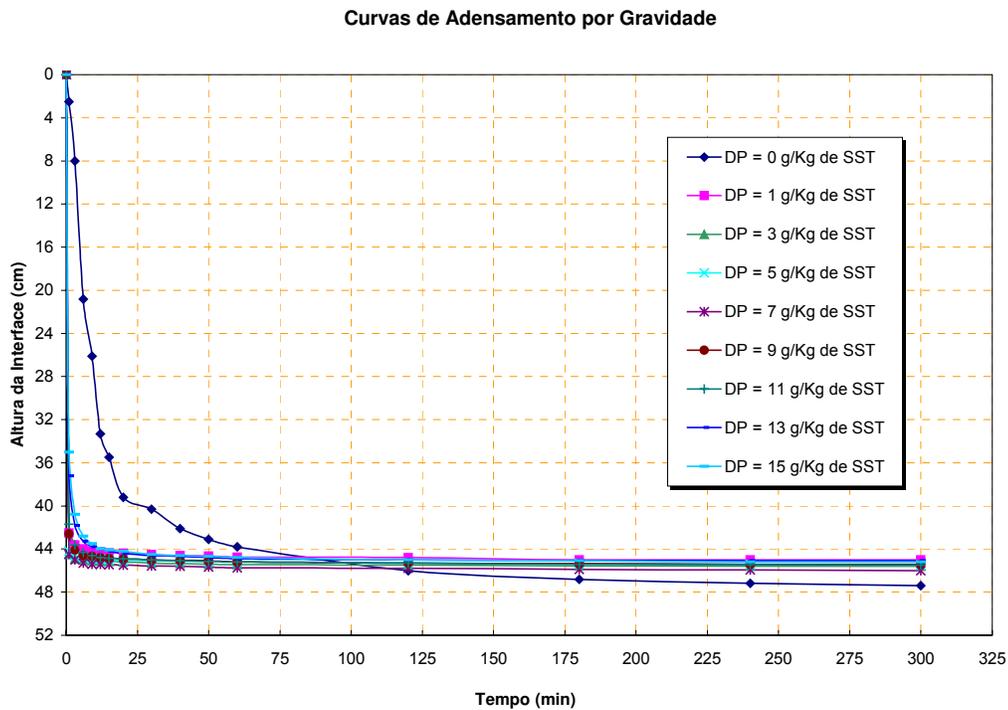


Figura 5.9 – Curvas de adensamento por gravidade associada a diferentes dosagens do polímero 4 referentes a ensaio realizado com tempo de mistura de 30 s – ETA 3.

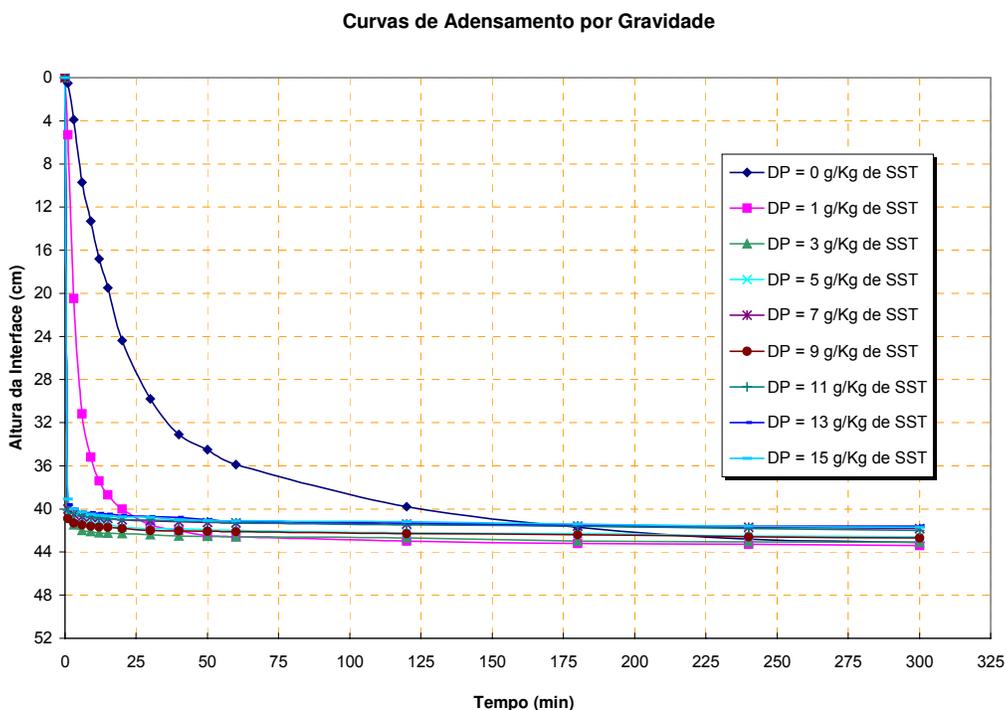


Figura 5.10 – Curvas de adensamento por gravidade associada a diferentes dosagens do polímero 4 referentes a ensaio realizado com tempo de mistura de 15 s – ETA 4.

Como resultado final da fase II na época de chuva, para a ETA 3 a condição ótima encontrada para o adensamento foi uma dosagem de 1 g/Kg de SST e 30 s de mistura; e para a ETA 4 a condição ótima é dada por 15 s de agitação e 3 g/Kg de SST. É importante ressaltar que a rotação do agitador mecânico foi fixada em 645 rpm para todos os ensaios da fase II.

5.2.2 Período de Estiagem

No decorrer dos ensaios da fase II, para ETA 3, o teor de sólidos do lodo bruto ficou entre 0,5 e 0,9 % e o valor do pH foi de 8,8. Na Tabela 5.9 estão apresentados os resultados para o melhor tempo de mistura para o lodo daquela estação e para os dois tipos de polímeros escolhidos.

Tabela 5.9 – Tempos de mistura para o adensamento por gravidade do lodo da ETA 3.

Polímero	Tempo de Mistura (s)	Dosagem (g/Kg)	F _e (cm/min)	F _c (cm/min)	Teor de Sólidos no Lodo (%)	Turbidez do Sobrenadante (NTU)
1	15	2,0	2,1	37,4	2,0	11,6
	30		2,9	37,4	1,8	10,0
	45		3,1	37,4	2,1	8,8
	60		2,7	37,4	2,2	9,7
	90		3,1	37,4	2,2	12,8
	120		3,1	37,4	2,4	10,3
5	15	2,0			3,2	1,2
	30				2,7	4,3
	45				2,6	6,0
	60				3,0	4,2
	90				2,8	8,3
	120				2,8	17,8

Executados os testes, para o polímero 1, verificou-se que: o tempo de 45 s foi aquele que produziu sobrenadante com menor valor de turbidez 8,8 NTU; com 120 s de mistura atingiu-se o maior índice de teor de sólidos no lodo adensado 2,4%; os tempos de 45, 90 e 120 s obtiveram 3,1 cm/min como valor de F_e; e todos os tempos investigados atingiram valores de F_c da ordem de 37,4 cm/min.

Optou-se pelo tempo de 45 s, para o polímero 1, pois ele apresentou os melhores resultados para a maior parte dos parâmetros analisados. Com relação ao teor de sólidos no lodo adensado, o valor atingido por aquele tempo não ficou muito distante do maior índice de sólidos encontrado.

Para o polímero 5 o tempo de mistura de 15 s deixou o sobrenadante com 1,2 NTU de turbidez e o lodo adensado com teor de sólidos de 3,2%, que foram os melhores valores encontrados para estes parâmetros, se comparado com os valores encontrados pelos demais tempos investigados.

Conforme ilustra a Figura 5.11, para o lodo condicionado com polímero 5 (catiônico), a sedimentação nos primeiros minutos foi extremamente lenta o que deixou as curvas com aspecto de retas descendentes. Este fato impossibilitou os cálculos para determinação dos

fatores de espessamento e clarificação. As curvas para o polímero 1 e lodo da ETA 3 estão no anexo B.

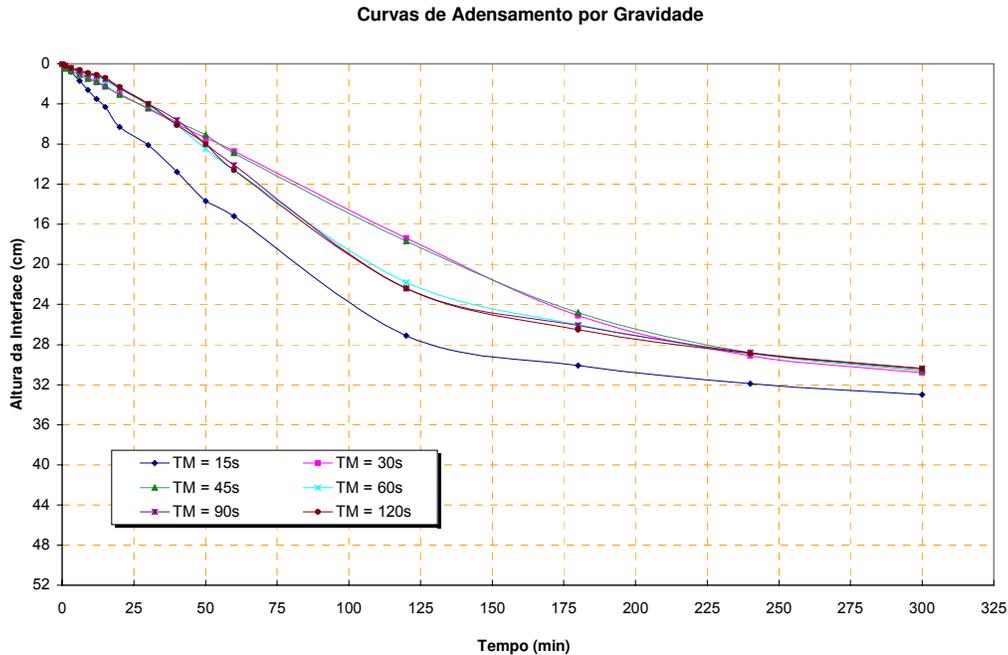


Figura 5.11 - Curvas de adensamento por gravidade associada a diferentes tempos de mistura do polímero 5 referentes a ensaio realizado com dosagem de 2 g/Kg de SST para ETA 3.

Desta maneira, entre os tempos investigados, observou-se que 45 e 15 s de mistura eram suficientes para produzir lodo com boas características de adensamento para os polímeros 1 e 5, respectivamente.

Para o lodo oriundo da ETA 4, nas análises da fase II o teor de sólidos do lodo bruto ficou entre 0,2 e 0,3% e o valor do pH variou de 8,3 a 8,6. Na Tabela 5.10 estão os resultados para o melhor tempo de mistura para o lodo daquela estação e para os dois tipos de polímeros analisados.

Tabela 5.10 – Tempos de mistura para o adensamento por gravidade do lodo da ETA 4.

Polímero	Tempo de Mistura (s)	Dosagem (g/Kg)	F _e (cm/min)	F _c (cm/min)	Teor de Sólidos no Lodo (%)	Turbidez do Sobrenadante (NTU)
1	15	2,0	3,1	37,4	1,1	3,4
	30		2,9	37,4	1,1	3,1
	45		3,1	37,4	1,1	3,9
	60		3,4	37,4	1,2	4,1
	90		3,4	37,4	1,1	6,1
	120		3,4	37,4	0,9	8,8
5	15	2,0	1,3	9,4	1,0	1,9
	30		1,2	9,4	1,0	1,9
	45		1,0	5,4	1,0	2,0
	60		0,9	5,4	1,1	1,2
	90		0,9	4,2	1,0	4,0
	120		0,8	3,4	1,1	4,0

Da tabela ora apresentada verifica-se que o polímero 1 com tempo de mistura de 60s gerou lodo com as melhores características de adensamento, exceto para o parâmetro turbidez do sobrenadante. Para o polímero 5 os teores de sólidos de todos os tempos investigados foram da ordem de 1%, e 15 s de agitação foram suficientes para gerar lodo com boas características de espessamento.

Para época de estiagem e lodo do decantador 4, o melhor tempo de mistura para o polímero 1 foi de 60 s. Para o mesmo lodo, porém condicionado como o polímero 5 o tempo de mistura ótimo foi de 15 s, este foi escolhido por apresentar os melhores resultados para os fatores de espessamento e clarificação.

As curvas de adensamento para a escolha do menor tempo de mistura, da ETA 4 para época de estiagem, estão no anexo B desta investigação experimental. Nelas pode-se observar que o lodo espessado com polímero 1, aniônico, apresentou um rápido adensamento nos primeiros minutos de ensaio, o que não ocorreu com o polímero 5, catiônico.

Concluiu-se, então, que para a época de seca na ETA 3 o melhor tempo de mistura, para a promover e floculação do lodo bruto foi 45 s para o polímero 1 e 15s para o polímero 5. Para a estação de tratamento 4 os tempos foram de 60 e 15 s para os polímeros 1 e 5 respectivamente.

A seguir, apresentam-se os resultados encontrados nos ensaios em que se determinou a melhor dosagem para o adensamento por gravidade para os dois tipos de lodo (ETAs 3 e 4), no período de estiagem, e para os dois polímeros escolhidos na fase I (polímeros 1 e 5).

Na Tabela 5.11 apresentam-se os resultados encontrados nos ensaios em que se determinou a melhor dosagem de polímero para os lodos da ETA 3.

Tabela 5.11 – Melhor dosagem de polímero para o adensamento por gravidade do lodo da ETA 3.

Polímero	Tempo de Mistura (s)	Dosagem (g/Kg)	F _e (cm/min)	F _c (cm/min)	Teor de Sólidos no Lodo (%)	Turbidez do Sobrenadante (NTU)
1	45	0,0	0,3	0,6	1,6	6,4
		1,0	1,5	18,7	1,9	4,3
		3,0	1,4	37,4	1,8	6,1
		5,0	1,2	37,4	1,5	7,0
		7,0	1,5	37,4	1,1	8,5
		9,0	1,2	37,4	1,1	9,8
		11,0	1,2	37,4	1,1	11,2
		13,0	1,3	37,4	1,2	12,3
		15,0	1,2	37,4	1,1	11,5
		5	15	0,0	0,3	0,6
1,0	0,3			0,4	1,8	1,3
3,0	1,0			9,4	2,1	1,5
5,0	1,2			37,4	2,0	4,8
7,0	1,2			37,4	2,0	10,2
9,0	1,1			37,4	2,1	13,3
11,0	1,2			37,4	2,0	16,7
13,0	1,2			37,4	2,1	17,1
15,0	1,2			37,4	2,0	18,2

Como pôde ser visto na Tabela 5.11 a dosagem mais adequada para o polímero 1 foi de 1 g/Kg, com a qual obtiveram-se os maiores valores para o fator de espessamento (1,5 cm/min), teor de sólidos no lodo adensado (1,9 %) e menor valor para a turbidez no sobrenadante (4,3 NTU). Para o polímero 5 os melhores resultados dos parâmetros investigados não foram constantes para uma mesma dosagem. Desta maneira, optou-se pelo polímero 1 (aniônico) naquela dosagem como o mais adequado ao adensamento, por gravidade, do lodo da ETA 3 no período de estiagem.

Na Tabela 5.12 exibem-se os resultados encontrados nos ensaios em que se determinou a melhor dosagem de polímero para os lodos da ETA 4 na época de seca.

Tabela 5.12 – Melhor dosagem de polímero para o adensamento por gravidade do lodo da ETA 4.

Polímero	Tempo de Mistura (s)	Dosagem (g/Kg)	F _e (cm/min)	F _c (cm/min)	Teor de Sólidos no Lodo (%)	Turbidez do Sobrenadante (NTU)
1	60	0,0	0,3	0,7	1,0	3,7
		1,0	0,5	1,4	1,2	4,1
		3,0	1,7	37,4	1,5	1,9
		5,0	1,6	37,4	1,2	2,8
		7,0	1,5	37,4	0,8	3,6
		9,0	1,6	37,4	0,9	4,5
		11,0	1,6	37,4	0,9	3,4
		13,0	1,5	37,4	1,0	3,9
		15,0	1,6	37,4	0,9	4,1
5	15	0,0	0,3	0,7	1,0	3,7
		1,0	0,5	1,3	1,2	0,4
		3,0	1,4	25,0	1,3	1,1
		5,0	1,5	37,4	1,3	1,8
		7,0	1,4	37,4	1,5	1,9
		9,0	1,3	37,4	1,5	2,6
		11,0	1,4	37,4	1,5	3,4
		13,0	1,4	37,4	1,4	3,9
		15,0	1,4	37,4	1,4	3,9

Como se observou na Tabela 5.12 a dosagem mais adequada para o polímero 1 foi de 3 g/Kg, com a qual obtiveram-se os maiores valores para o fator de espessamento (1,7 cm/min), fator de clarificação (37,4 cm/min), teor de sólidos no lodo adensado (1,5 %) e menor valor para a turbidez no sobrenadante (1,9 NTU). Para o polímero 5 os melhores valores obtidos não foram coincidentes com uma única dosagem. Assim, optou-se pelo polímero 1 (aniônico) naquela dosagem como o mais adequado ao adensamento, por gravidade, do lodo da ETA 4 no período de seca.

As Figuras 5.12 e 5.13 ilustram as curvas de sedimentação, para as duas ETAs, dos ensaios de adensamento realizados com o polímero 1 para determinação da melhor dosagem. As curvas referentes aos ensaios realizados com o polímero 5, para ambas as estações, estão no anexo B.

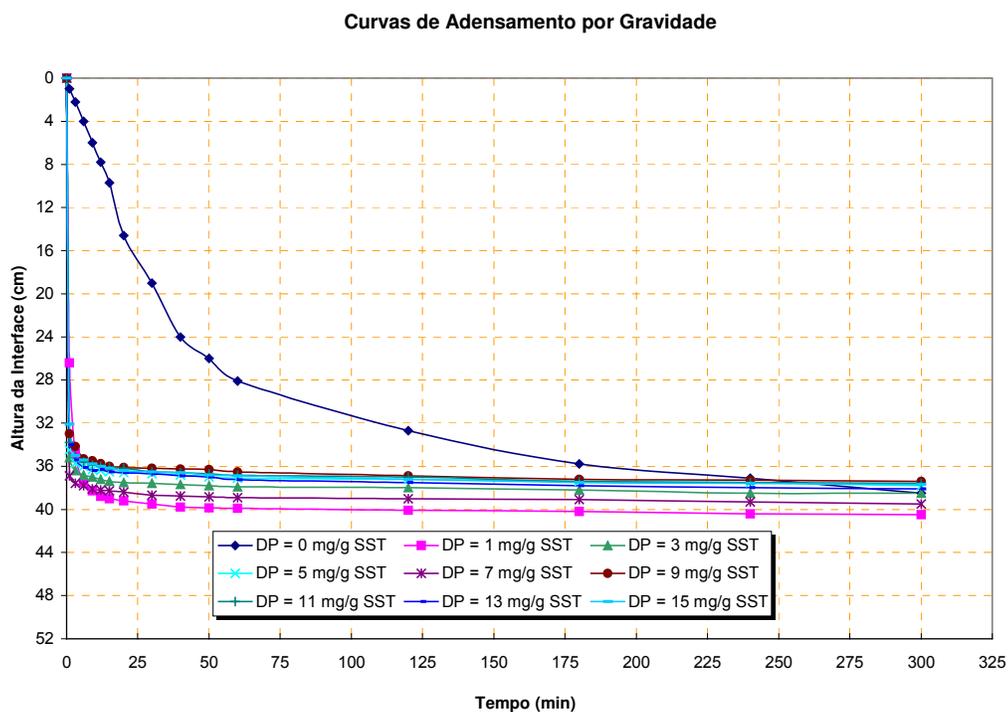


Figura 5.12 – Curvas de adensamento por gravidade associada a diferentes dosagens do polímero 1 referentes a ensaio realizado com tempo de mistura de 45 s – ETA 3.

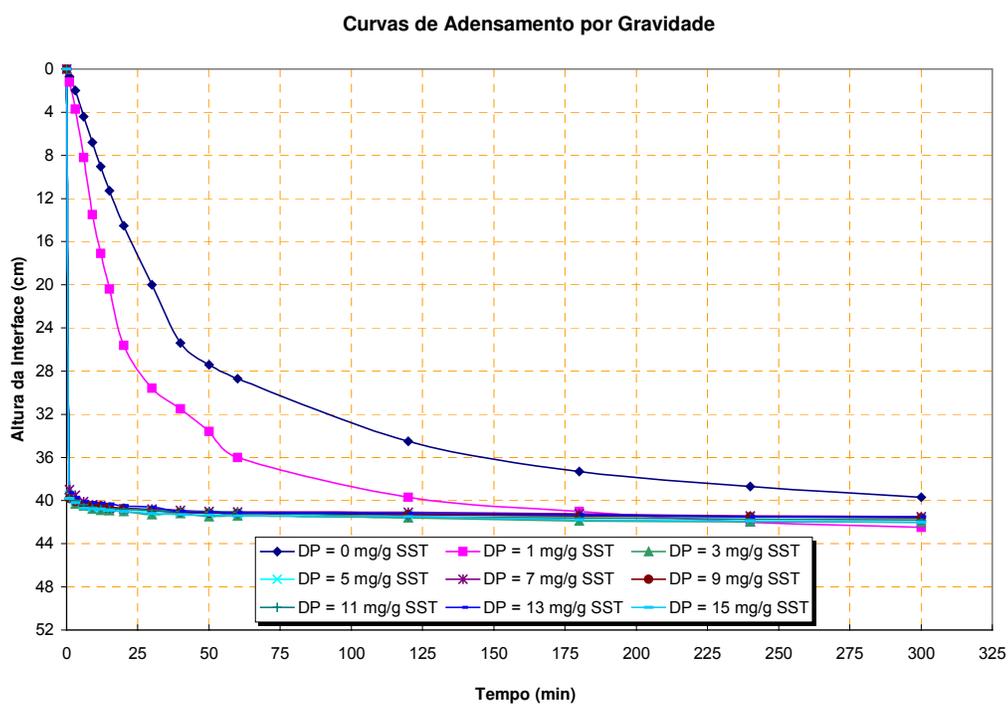


Figura 5.13 – Curvas de adensamento por gravidade associada a diferentes dosagens do polímero 1 referentes a ensaio realizado com tempo de mistura de 60 s – ETA 4.

Como resultado final da fase II, escolheu-se o polímero 1 (aniônico) como sendo o mais apropriado para o adensamento por gravidade no período de estiagem para ambas as ETAs.

Para a ETA 3 a condição ótima encontrada para o adensamento foi: dosagem de 1 g/Kg de SST e 45 s de mistura. Para a ETA 4 a condição ótima é dada por 60 s de agitação e 3 g/Kg de SST. É importante lembrar que a rotação do agitador mecânico foi fixada em 645 rpm para todos os ensaios da fase II.

5.3 Resultados dos Ensaios de Desaguamento por Centrífuga

Os ensaios de desaguamento por centrifugação, fase III, desta investigação experimental foram realizados no laboratório de saneamento da Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP, segundo metodologia apresentada no capítulo 4. Nesta etapa do trabalho foram utilizados os polímeros 1 e 2, aniônico e catiônico, respectivamente.

5.3.1 Período de Chuvas

No decorrer dos ensaios de centrifugação, fase III, para época de chuvas e para ETA 3, o lodo bruto apresentou 2,1% de teor de sólidos e valor de pH da ordem de 8,6. Após ser adensado por gravidade, o lodo atingiu valor de ST da ordem de 2,5% e o teor de sólidos em suspensão total de 1,9%.

Para os testes de centrifugação fixou-se o valor de SST, do lodo adensado, em 1,8%. Assim sendo, acrescentou-se, ao lodo espessado, água ultrapura para que o mesmo tivesse o valor do teor de sólidos em suspensão total reduzido para aquele pré-fixado.

Cabe salientar que dois dias antes da coleta de lodo o nível de água do rio Atibaia, que serve como captação de água para as ETAs 3 e 4, caiu bruscamente e foi preciso interromper a produção de água naquelas estações. Este fato, pode ter contribuído para que o lodo bruto (ETA 3) no período de chuvas tivesse teor de sólidos totais elevado (2,1%).

Os testes preliminares de pré-condicionamento do lodo adensado foram realizados com rotação da centrífuga de 700 rpm e dosagem de polímero de 1 g/Kg de SST.

A Figura 5.14 mostra as curvas de variação do teor de sólidos no lodo centrifugado, para ETA 3 e período de chuvas. Este ensaio foi realizado com polímero aniônico.

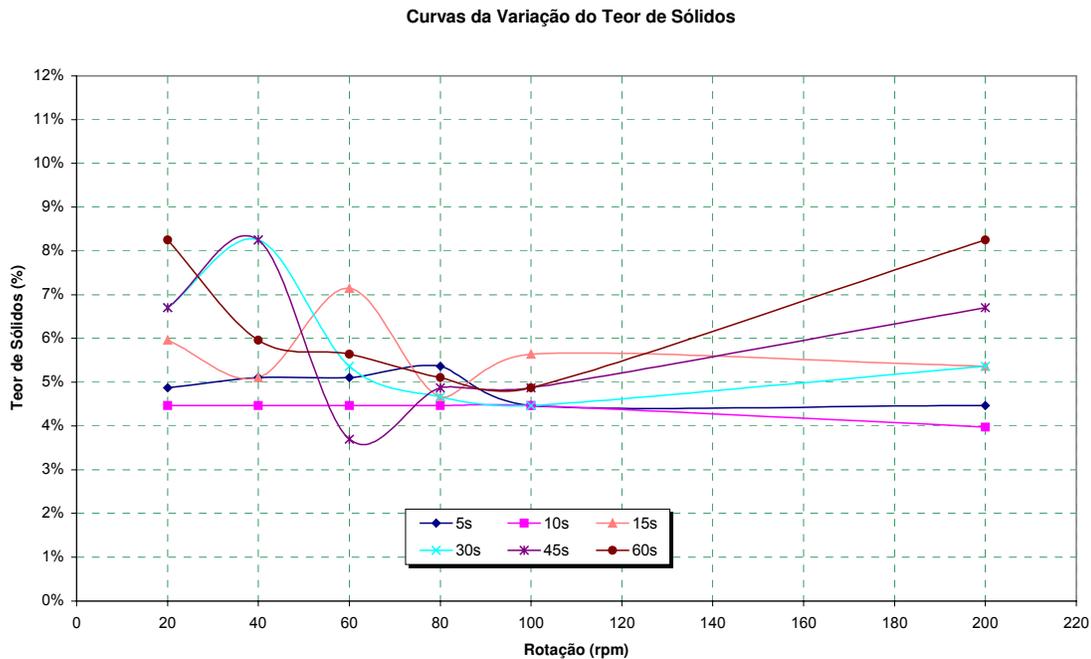


Figura 5.14 - Curvas da variação do teor de sólidos em função da rotação do agitado mecânico para diferentes tempos de mistura do polímero 1 referentes a ensaio realizado com dosagem de 1 g/Kg de SST para ETA 3 – Ensaio 1.

As curvas referentes aos ensaios 2 e 3 realizados com polímero aniônico, bem como as curvas obtidas dos ensaios executados com o polímero catiônico, para ETA 3 e período de chuvas, encontram-se no anexo C.

Finalizados os ensaios preliminares de pré-condicionamento do lodo adensado, para ETA 3 e época de chuvas, os resultados foram agrupados na Tabela 5.13.

Tabela 5.13 – Resultados dos testes preliminares de pré-condicionamento, no período de chuvas e lodo da ETA 3.

Polímero	Ensaio	Tempo de Mistura (s)	Rotação do Agitador Mecânico (rpm)	Teor de Sólidos Totais na Torta (%)
1	1	45	40	8,3
	2	45	40	7,7
	3	30	20	7,7
2	1	5	200	9,0
	2	60	200	7,2
	3	5	200	7,7

Como pode ser observado na figura 5.14, quatro tempos de mistura diferentes com rotações distintas atingiram teor de sólido total final na torta de 8,3%. Contudo, 45s de mistura a 40 rpm, atingiu tal valor em 20 minutos de centrifugação. Os demais necessitaram de tempos maiores de centrifugação para chegar ao mesmo valor de ST na torta final.

Para o terceiro ensaio realizado com o polímero 2, observa-se que os tempos de mistura de 10s e 5s alcançaram um valor para ST de 7,7%. Todavia, observou-se que o condicionamento realizado em 10s a 20 rpm não promoveu uma mistura adequada do polímero ao lodo.

Tendo por base os resultados anteriormente exibidos, escolheu-se o polímero 2 como o mais apropriado para a realização dos ensaios de centrifugação, devido à observância de uma melhor mistura do polímero ao lodo no condicionamento e a necessidade de menor tempo de mistura. Quando o lodo foi condicionado com o polímero 1 houve aderência de partículas a parede da cubeta.

Escolhido o polímero, prosseguiu-se com os testes onde foram estudadas variações na dosagem do polímero mais apropriado, neste caso, polímero 2, catiônico. Na figura 5.15

exibem-se as curvas de variação do teor de sólidos em função da dosagem de polímero para o lodo da ETA 3 e período de chuvas.

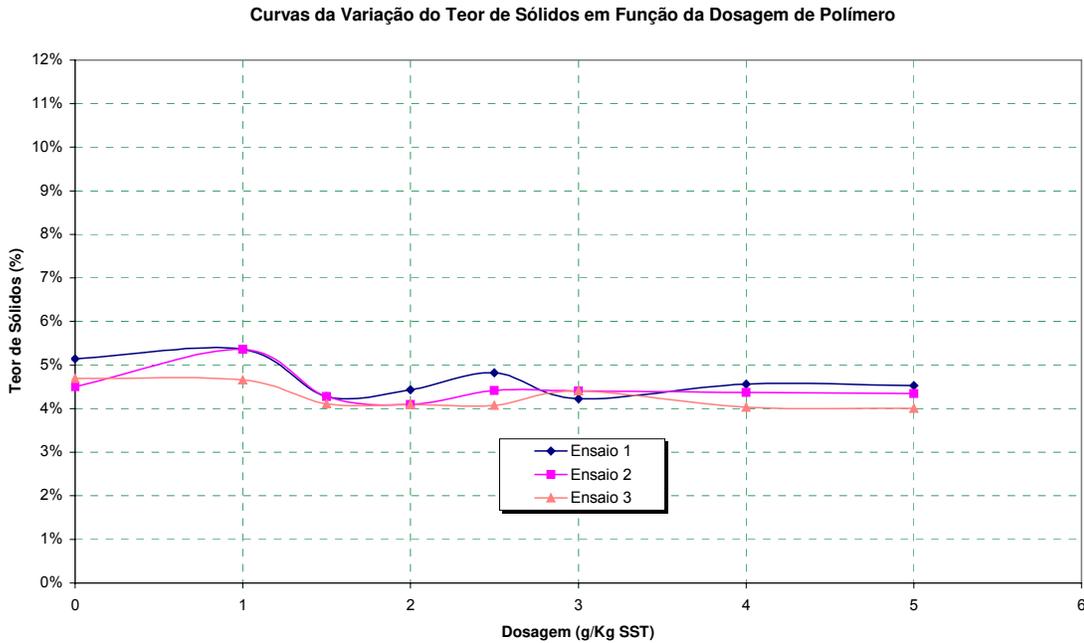


Figura 5.15 – Variação do teor de sólidos em função da dosagem de polímero catiônico para o lodo da ETA 3 no período de chuvas.

Da figura 5.15 observa-se que a dosagem ótima encontrada para os ensaios de centrifugação foi de 1 g/Kg de SST, em relação ao lodo investigado.

Determinada a condição ótima de pré-condicionamento do lodo adensado, da ETA 3 no período de chuvas, que foi: 5s de mistura, 1 g/Kg de SST de dosagem e 200 rpm de rotação, foram realizados os testes em que se alterou a rotação da centrífuga, podendo deste modo observar se ocorre a influência da força centrípeta na ação de retirada de água do lodo.

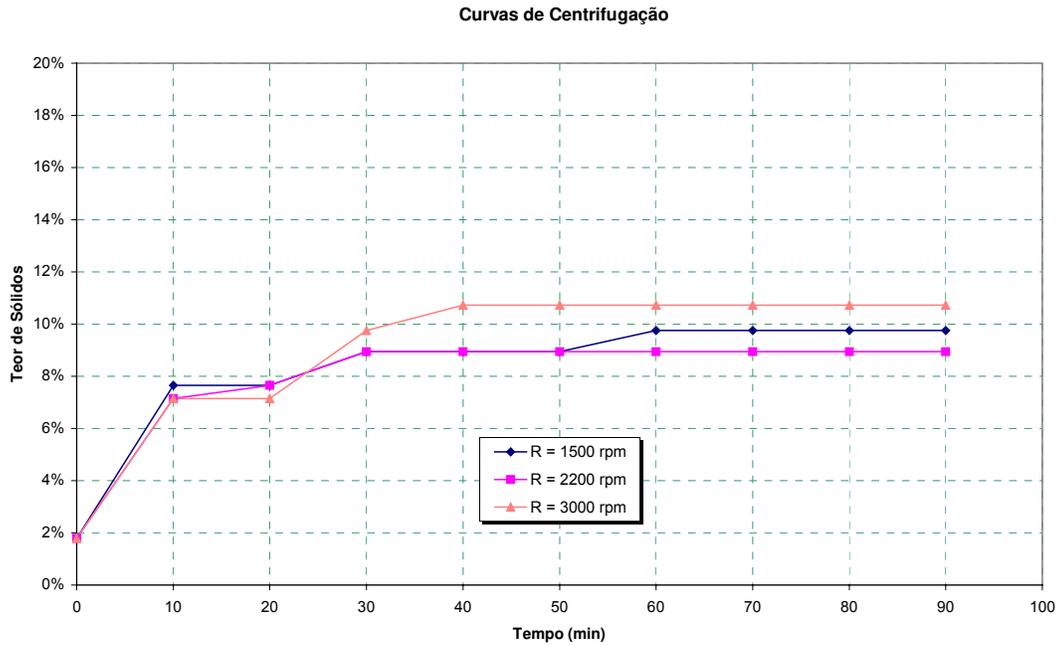


Figura 5.16 - Curvas de centrifugação obtidas em ensaios com diferentes rotações da centrífuga, para lodo adensado e pré-condicionado da ETA 3.

Como foi observado nestes ensaios, o aumento na rotação da centrífuga não ocasionou uma melhora significativa na captura de sólidos, e conseqüentemente um maior teor de sólidos totais finais na torta de lodo, como ilustrou a Figura 5.16.

Para a época de chuvas e lodo do decantador 3, a rotação de 3000 rpm gerou tortas com teor de sólidos que variaram de 8,9% a 10,7%. Na maior parte dos ensaios o teor de sólidos atingidos na torta final foi da ordem de 9,6%. Valores que não alteraram muito em relação aos ensaios preliminares.

O lodo bruto coletado no canal de descarga da ETA 4, na época de chuvas, possuía teor de sólidos totais da ordem de 0,2%. Após o espessamento por gravidade, este valor passou para 1,3% e o SST chegou a 1,2%.

Os teste de centrifugação foram realizados com valor de SST, do lodo adensado, de 1,1%. Para promover a redução deste adicionou-se água ultrapura ao lodo espessado.

O gráfico exibido na Figura 5.17 representa as curvas de variação do teor de sólidos no lodo desaguado por centrifugação, para o lodo do decantador da ETA 4 na época de chuvas. Este ensaio foi realizado com polímero aniônico.

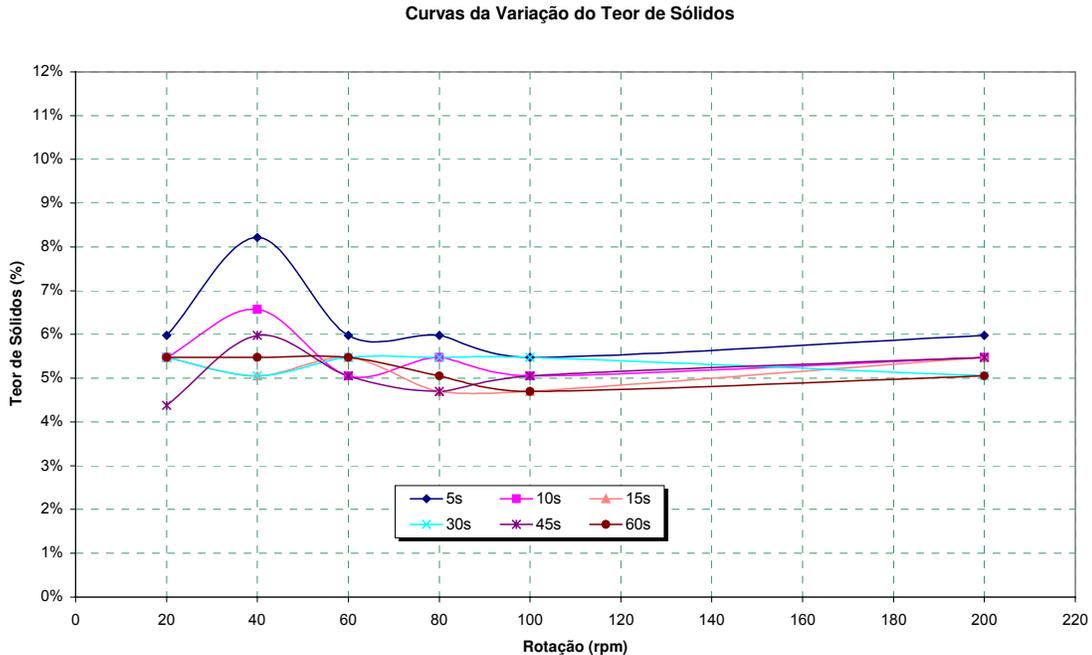


Figura 5.18 - Curvas da variação do teor de sólidos em função da rotação do agitador mecânico para diferentes tempos de mistura do polímero 1 referentes a ensaio realizado com dosagem de 1 g/Kg de SST para ETA 4 – Ensaio 2.

As curvas referentes aos ensaios 1 e 3 realizados com polímero aniônico, bem como as curvas obtidas dos ensaios executados com o polímero catiônico, para ETA 4 e período de chuvas, encontram-se no anexo C.

Os resultados encontrados nas análises preliminares para o lodo da ETA 4, não foram conclusivos para ambos os polímeros. Não houve variação significativa no valor do ST na torta final entre os tempos investigados, e aqueles, na maioria dos ensaios não ultrapassou 6%. Decidiu-se por utilizar o mesmo polímero (catiônico – 2) escolhido para ETA 3, no mesmo período, para dar seqüência as investigações.

Esta decisão foi tomada para que o resultado obtido no final da fase III, desaguamento por centrífuga, permitisse a comparação entre as duas estações de tratamento.

Prosseguiu-se a investigação experimental, e foram realizados os ensaios em que se variaram as dosagens do polímero catiônico, e também foi investigada uma amostra de lodo espessado onde não ocorreu o pré-condicionamento. Os resultados destes ensaios podem ser vistos na Figura 5.18, onde estão as curvas de variação do teor de sólidos em função da dosagem de polímero para o lodo estudado.

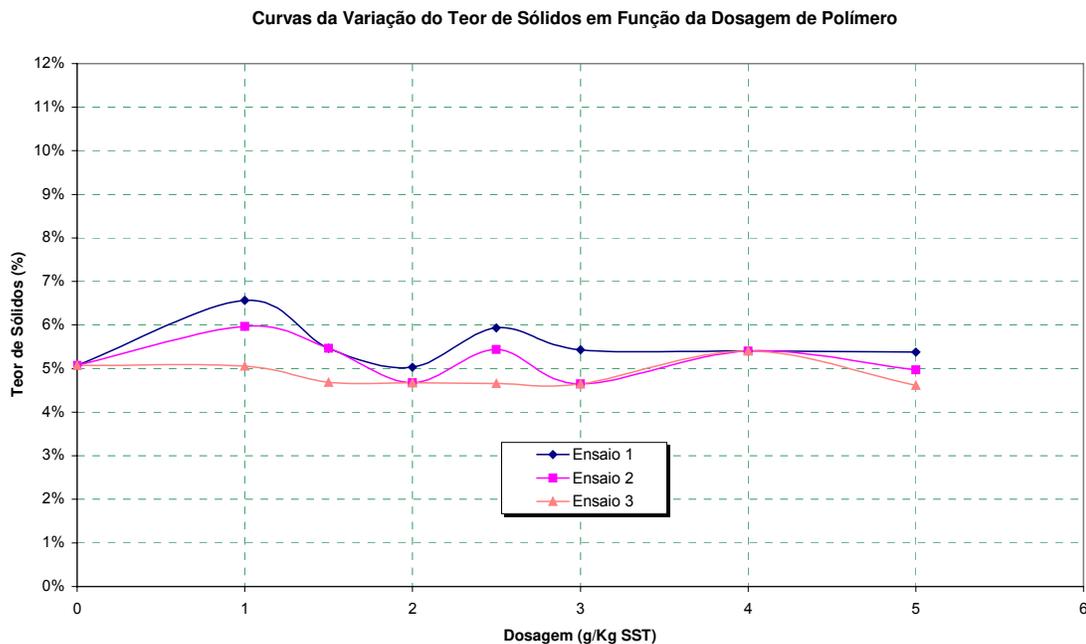


Figura 5.18 – Variação do teor de sólidos em função da dosagem de polímero catiônico para o lodo da ETA 4 no período de chuvas.

Da figura ora apresentada observa-se que a dosagem mais adequada para as análises de centrifugação foi de 1 g/Kg de SST, para o lodo em estudo. Ainda naquela figura, pode ser visto que no decorrer do terceiro ensaio houve algum erro quando se investigava a dosagem de 1 g/Kg de SST pois, este ponto na curva referente ao ensaio 3 está discordante, se comparado aos mesmos pontos das outras curvas para a mesma dosagem.

Obtida a condição ótima de pré-condicionamento do lodo adensado, para estação de tratamento 4 no período de chuvas, realizou-se os testes em que variou-se a rotação da centrífuga. Foram investigadas as seguintes rotações: 1500, 2200 e 3000 rpm.

Como pôde ser observado destas análises, o aumento na rotação da centrífuga em alguns casos gerou tortas com teor de sólidos totais superiores a 16% e também atingiu, em um dos ensaios, o valor de 20%. Estes foram casos isolados, o aumento na rotação da centrífuga não provocou mudança sensível no valor do ST da torta final, para a maioria dos ensaios. Isto está ilustrado nas Figuras 5.19 e 5.20, respectivamente.

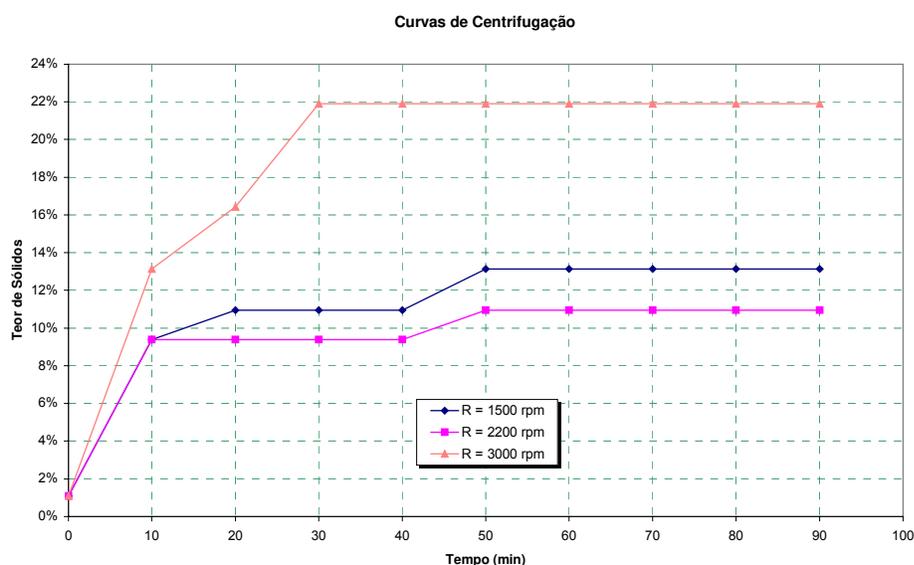


Figura 5.19 - Curvas de centrifugação obtidas em ensaios com diferentes rotações da centrífuga, para lodo adensado e pré-condicionado da ETA 4, chuvas (ST=21,9%).

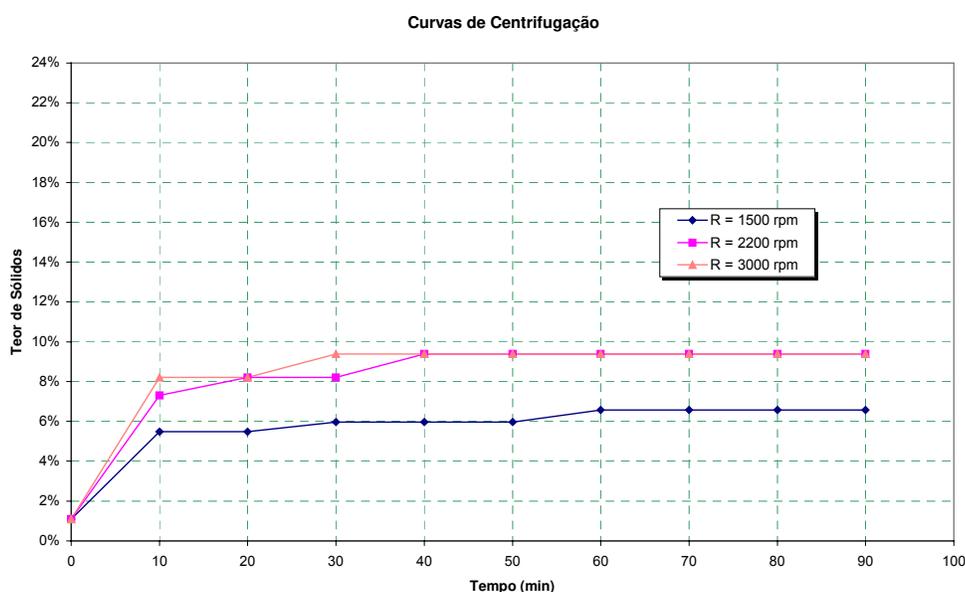


Figura 5.20 - Curvas de centrifugação obtidas em ensaios com diferentes rotações da centrífuga, para lodo adensado e pré-condicionado da ETA 4, chuvas (ST=9,4%).

Deste modo, para a época de chuvas e lodo do decantador 4, placas paralelas, a rotação de 3000 rpm gerou lodo desaguado com teor de sólidos totais que ficaram compreendidos entre 9,4% e 21,9%.

5.3.2 Período de Estiagem

Durante os ensaios da fase III para época seca, na ETA 3, o teor de sólidos no lodo bruto foi de 0,9% e o valor do pH era da ordem de 9. Depois de realizados os ensaios de adensamento por gravidade, obteve-se um lodo espessado com 1,7% de teor de sólidos. Este apresentou 1,6% de sólidos em suspensão.

Antes que fossem iniciados os teste de centrifugação decidiu-se que estes seriam realizados com teor dos sólidos em suspensão de 1,5%. Para tal adicionou-se ao lodo adensado água ultrapura para que este tivesse o valor de SST reduzido para o valor definido. Durante os ensaios preliminares a rotação da centrífuga foi de 700 rpm e a dosagem de polímero foi fixada em 1 g/Kg de SST.

A Figura 5.21 apresenta as curvas de variação do teor de sólidos no lodo desaguado por centrifugação, para o lodo da estação 3 na época seca. Neste ensaio o polímero investigado foi o de carga aniônica.

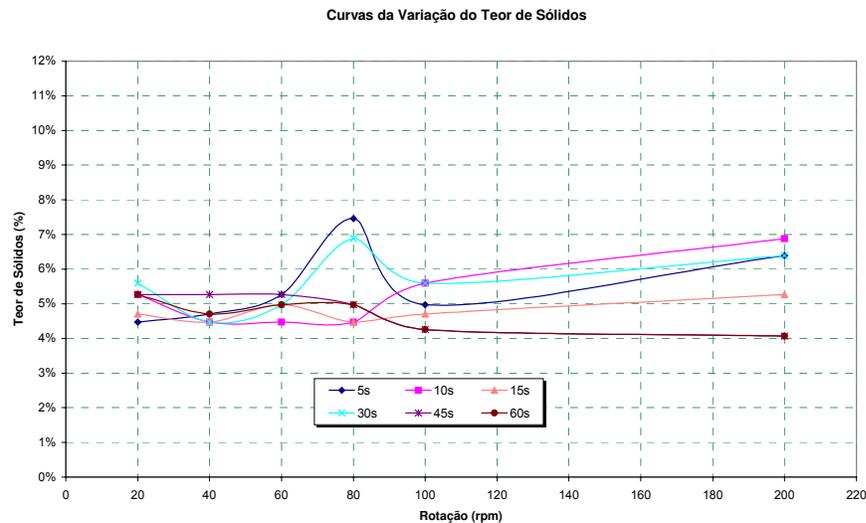


Figura 5.21 - Curvas da variação do teor de sólidos em função da rotação do agitador mecânico para diferentes tempos de mistura do polímero 1 referentes a ensaio realizado com dosagem de 1 g/Kg de SST para ETA 3 – Ensaio 1.

As curvas referentes aos ensaios 2 e 3 realizados com polímero aniônico, bem como as curvas obtidas dos ensaios executados com o polímero catiônico, para ETA 4 e período de estiagem, encontram-se no anexo C.

Encerrados os testes preliminares com o lodo oriundo da estação de tratamento 3, para o período seco, os resultados obtidos encontram-se na Tabela 5.14.

Tabela 5.14 – Resultado dos testes preliminares, no período de estiagem, para o lodo da ETA 3.

Polímero	Ensaio	Tempo de Mistura (s)	Rotação do Agitador Mecânico (rpm)	Teor de Sólidos Totais na Torta (%)
1	1	5	80	7,5
	2	45	200	6,4
	3	5	200	6,4
2	1	60	200	7,5
	2	60	200	9,0
	3	60	200	6,4

Dos resultados ora apresentados, escolheu-se o polímero 2, catiônico, como o mais adequado para o desaguamento por centrifugação, devido a constância que pode ser observada nos resultados dos testes preliminares.

Na Figura 5.22 apresentam-se as curvas de variação do teor de sólidos em função da dosagem de polímero para o lodo em questão.

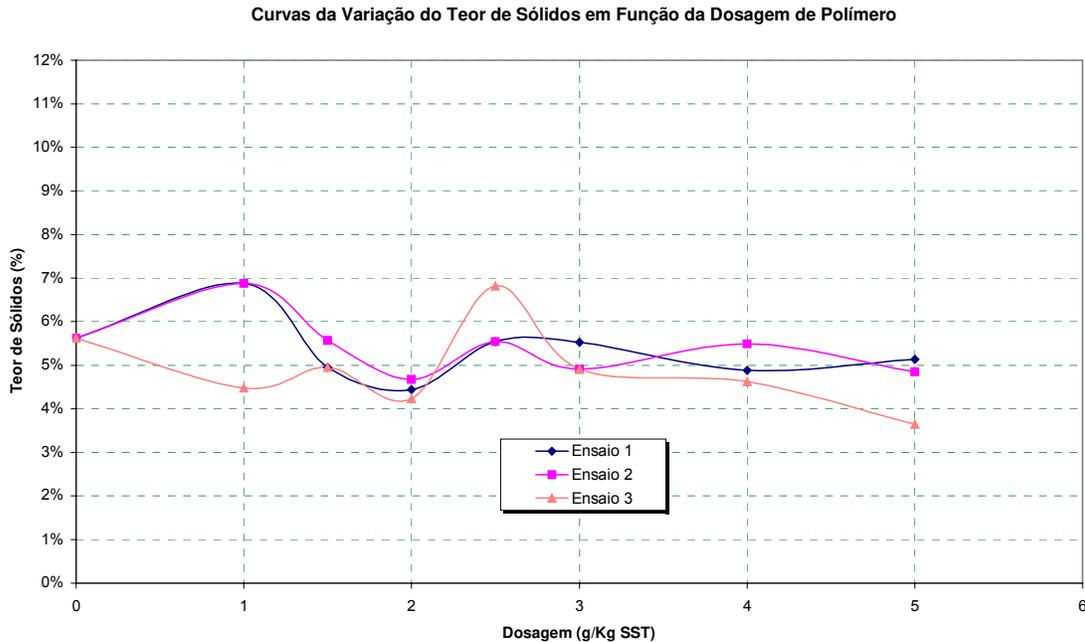


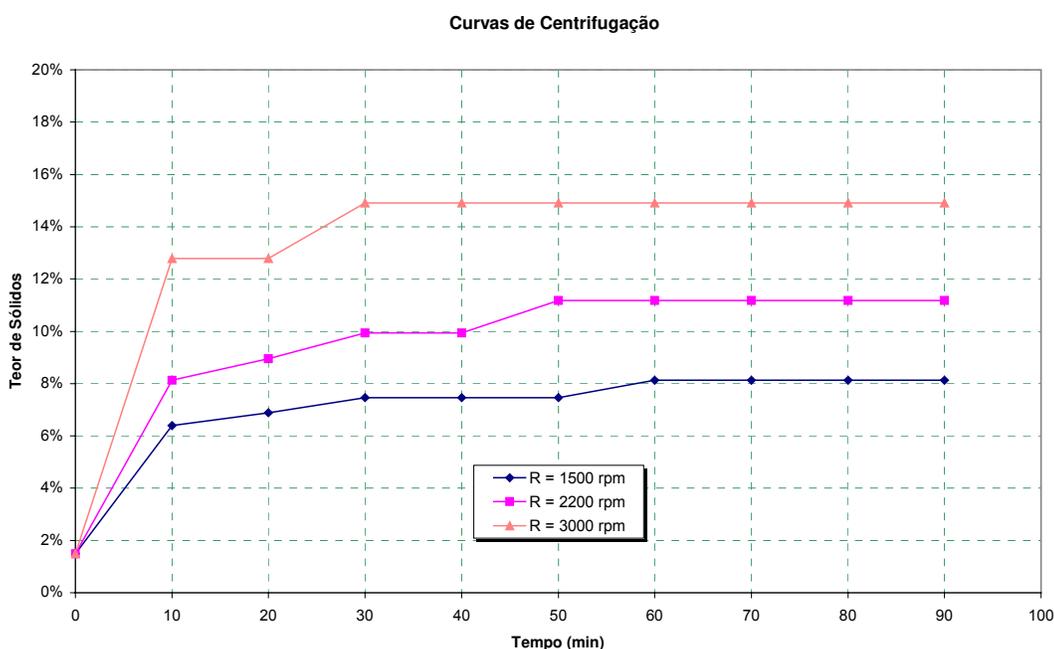
Figura 5.22 – Variação do teor de sólidos em função da dosagem de polímero catiônico para o lodo da ETA 3 no período de estiagem.

Na Figura 5.22 pôde-se observar que a melhor dosagem encontrada para as análises de centrifugação foi de 1 g/Kg de SST, com relação ao lodo em estudo. Ainda naquela figura, nota-se que durante o terceiro ensaio ocorreu algum erro quando se investigava as dosagens de 1 e 2,5 g/Kg de SST pois, estes pontos na curva 3 estão discordantes dos pontos das outras curvas para as mesmas dosagens.

Encontrada a condição ótima de pré-condicionamento do lodo adensado, para ETA 3 na época seca ($TM = 60s$; $dp = 1 \text{ g/Kg de SST}$; rotação = 200 rpm), foram executados ensaios em que foi variada a rotação da centrífuga, com o intuito de verificar a influência da força centrípeta no processo de retirada de água do floco de lodo.

Para estes ensaios, foram verificadas três velocidades de centrifugação distintas, 1500, 2200 e 3000 rpm. Como pôde ser concluído destas análises, quanto maior a rotação da centrífuga maior o teor de sólidos totais finais na torta de lodo, como apresentado na Figura 5.23.

Para o período de seca e lodo oriundo do decantador 3, do tipo convencional, a rotação de 3000 rpm produziu tortas com teor de sólidos que ficaram compreendidos na faixa de 11,2% a 14,9%. Sendo que na maioria dos ensaios o índice alcançado na torta final foi da ordem de 12,8%.



Figuras 5.23 - Curvas de centrifugação obtidas em ensaios com diferentes rotações da centrífuga, para lodo adensado e pré-condicionado da ETA 3 – período de estiagem.

A amostra de lodo bruto para o período seco, da ETA 4, apresentou teor de sólidos totais no lodo bruto de 0,4% e o valor do pH era da ordem de 8,4. Depois de feito o espessamento por gravidade, atingiu-se 2,1% de ST no lodo com 2,0% de teor de sólidos em suspensão.

Antes da realização dos testes de centrifugação fixou-se que estes seriam feitos com teor dos sólidos em suspensão de 2,0%. Para isto, adicionou-se, no lodo adensado, água ultrapura para que aquele tivesse o valor de SST reduzido para o valor fixado.

A Figura 5.24 mostra as curvas de variação do teor de sólidos no lodo desaguado por centrifugação, para a ETA 4 no período de estiagem. Neste ensaio utilizou-se polímero de carga aniônica.

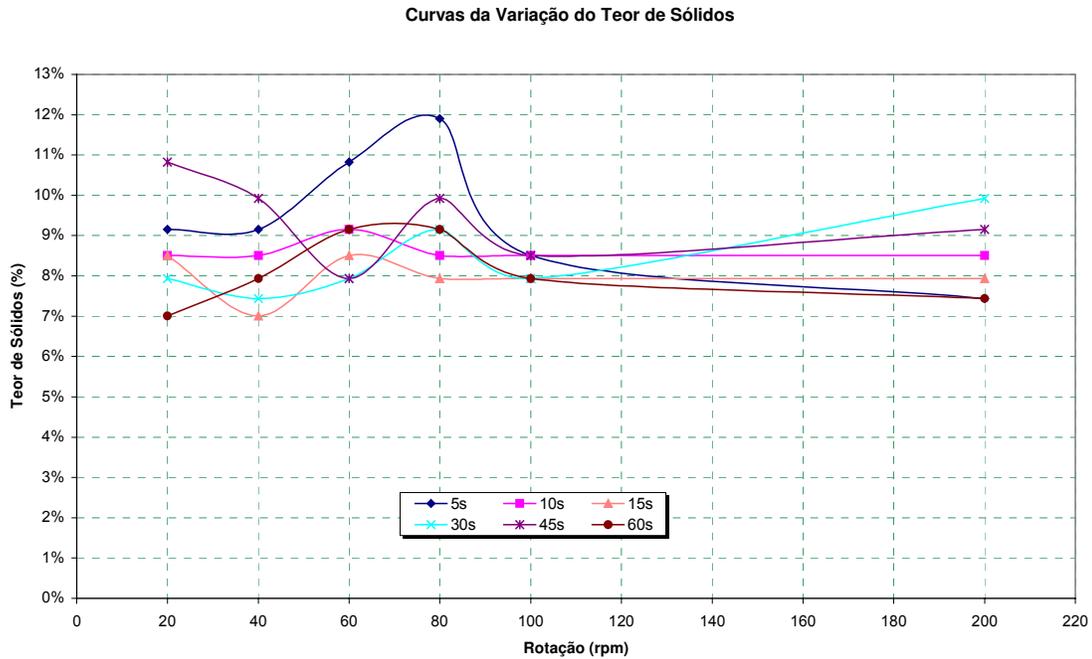


Figura 5.24 - Curvas da variação do teor de sólidos em função da rotação do agitador mecânico para diferentes tempos de mistura do polímero 1 referentes a ensaio realizado com dosagem de 1 g/Kg de SST para ETA 4 – Ensaio 1.

As curvas referentes aos ensaios 2 e 3 realizados com polímero aniônico, bem como as curvas obtidas dos ensaios executados com o polímero catiônico, para ETA 4 e período de estiagem, encontram-se no anexo C.

Encerradas as análises preliminares da fase III para ETA 4, no período seco, montou-se a Tabela 5.15 para apresentação dos resultados.

Tabela 5.15 – Resultado dos testes preliminares, no período de estiagem, para o lodo da ETA 4.

Polímero	Ensaio	Tempo de Mistura (s)	Rotação do Agitador Mecânico (rpm)	Teor de Sólidos Totais na Torta (%)
1	1	5	80	11,9
	2	5	80	9,2
	3	5	60	9,9
2	1	60	100	11,9
	2	30	60	9,9
	3	60	80	9,9

No segundo ensaio realizado com polímero catiônico dois tempos de mistura diferente com rotações distintas alcançaram teor de sólido total na torta de 9,9%. Contudo, 30s de mistura a 60 rpm, atingiu aquele valor em 10 minutos de centrifugação. Os outros tempos necessitaram de períodos maiores de centrifugação para chegar ao mesmo valor de ST na torta.

Dos resultados ora apresentados, o polímero mais adequado para o desaguamento por centrífuga foi o polímero 1, aniônico, pela constância que foi observada nos resultados. Todavia, notando-se que os valores, para o teor de sólidos na torta e para a rotação da centrífuga, foram semelhantes para ambos os polímeros, decidiu-se prosseguir os estudos como o polímero 2, para que fosse possível a comparação entre os resultados das duas estações no período de estiagem.

Assim sendo, os ensaios de variação da dosagem do polímero foram realizados com 60s de mistura e rotação de 100 rpm. Na Figura 5.25 mostram-se as curvas de variação do teor de sólidos em função da dosagem de polímero para o lodo em estudo.

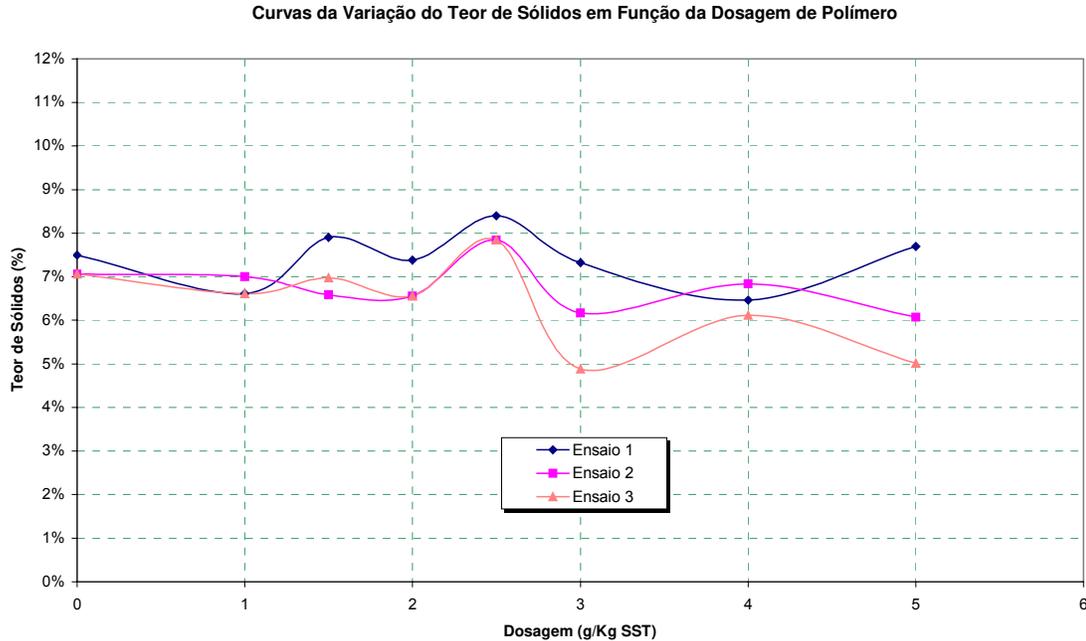


Figura 5.25 – Variação do teor de sólidos em função da dosagem de polímero catiônico para o lodo da ETA 4 no período de estiagem.

Na figura 5.25 pode-se verificar que a melhor dosagem encontrada para as análises de centrifugação foi 2,5 g/Kg de SST. Encontrada a condição ótima de pré-condicionamento do lodo espessado, para ETA 4 no período seco ($TM = 60s$; $dp = 2,5$ g/Kg de SST; rotação = 100 rpm), foram realizados testes em que foi variada a rotação da centrífuga.

Como foi verificado naqueles testes, o aumento na rotação da centrífuga em alguns casos gerou tortas com valores do teor de sólidos totais superiores a 16%, e em um dos testes chegou a mais de 28%.

Na maioria das análises o aumento da rotação da centrífuga (3000 rpm) não significou que o ST das tortas centrifugadas com esta rotação fosse maior, se comparados aos das tortas produzidas com rotação de 1500 e 2000 rpm. Isto pode ser observado nas Figuras 5.26 e 5.27.

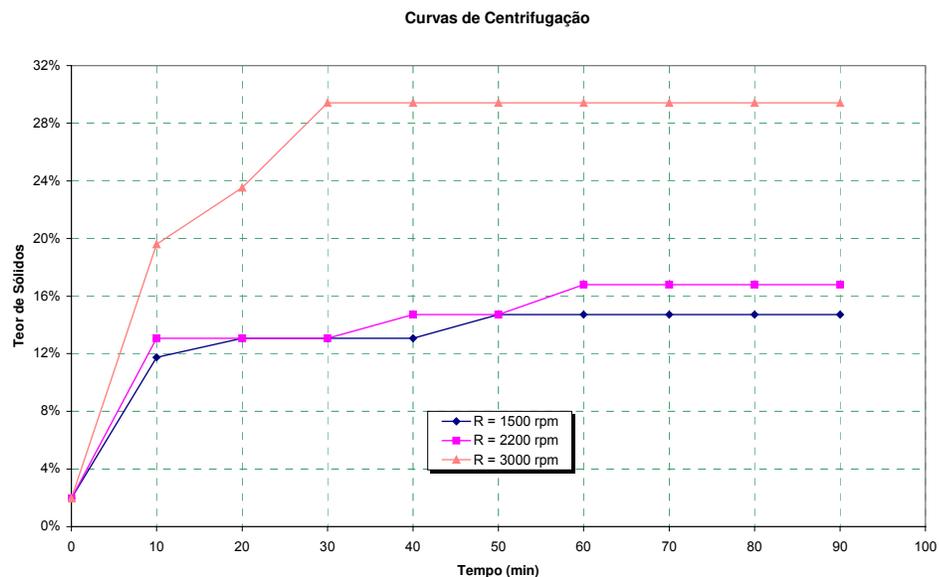


Figura 5.26 - Curvas de centrifugação obtidas em ensaios com diferentes rotações da centrífuga, para lodo adensado e pré-condicionado da ETA 4, estiagem (ST=29,4%).

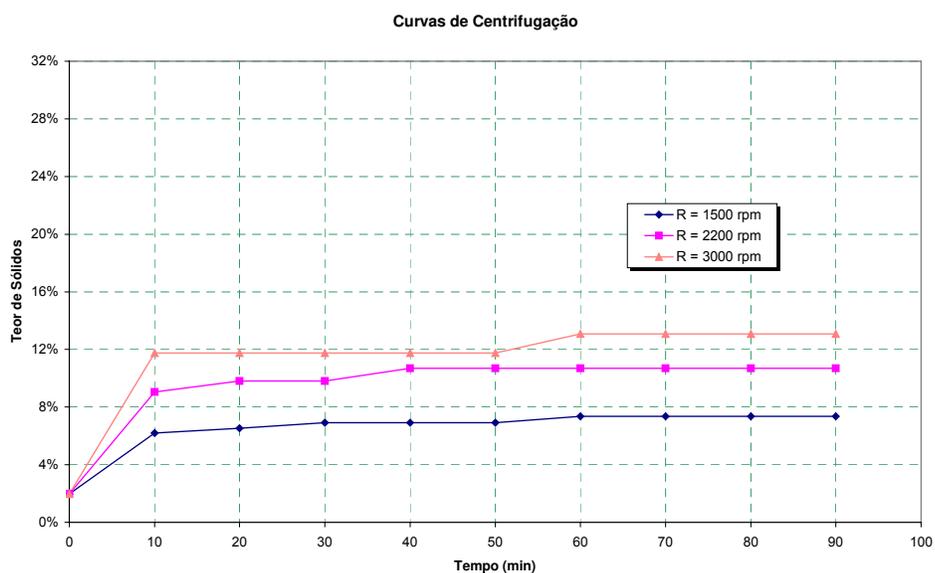


Figura 5.27 - Curvas de centrifugação obtidas em ensaios com diferentes rotações da centrífuga, para lodo adensado e pré-condicionado da ETA 4, estiagem (ST=13,1%)

Deste modo, para o período de estiagem e lodo da estação de tratamento 4, a rotação de 3000 rpm produziu torta com teor de sólidos totais que variaram de 9,9% a 29,4%.

6 CONCLUSÕES

I) Os lodos produzidos pelas ETA 3 (decantador do tipo convencional) e ETA 4 (decantador de alta taxa) da Sanasa, na cidade de Campinas/SP, são extremamente semelhantes. Mesmo o lodo da ETA 4 sendo mais diluído que o outro e, em termos volumétricos, gerado em maior quantidade, não se observou diferença significativa quanto ao tipo de decantação.

II) A diferença dos lodos produzidos pelas ETAs 3 e 4 pode ser percebida quando se comparam os dois tipos de clima que existem no decorrer do ano, época de chuvas e de seca.

III) A dificuldade no desaguamento pôde ser notada no teor de sólidos do lodo adensado por gravidade que, mesmo tendo sido condicionado com polímero orgânico sintético ficou abaixo de 3%. A mesma dificuldade foi verificada, quando do desaguamento do lodo espessado por meio de centrifugação, em que o teor de sólidos daquele foi de, aproximadamente, 13%. Isto indica que há uma independência entre o adensamento e o desaguamento mecânico.

IV) O condicionamento do lodo (com polímero) provocou uma melhora na captura de sólidos no adensamento por gravidade, também influenciou na redução dos valores da turbidez do sobrenadante e aumento do teor de sólidos do lodo espessado. Isto foi concluído quando da

comparação dos resultados dos ensaios de adensamento, por gravidade, realizados com lodo bruto condicionado quimicamente, ou não.

V) O lodo adensado antes de ser desaguado por centrifugação foi pré-condicionado com polímero orgânico sintético. Além disto, uma amostra daquele em que não houve a aplicação de polímero também foi centrifugada para posterior comparação dos resultados. Terminada a fase de centrifugação, verificou-se que para rotação de ensaio (700 rpm) o teor de sólidos na torta final, daquelas amostras, não foi muito diferente.

Uma diferença, não muito grande, pôde ser vista quando se elevou a rotação da centrífuga para 3000 rpm. Desta maneira, concluiu-se que a metodologia para desaguamento por centrifugação não foi adequada para este lodo. Ficando a recomendação para que seja usada a rotação de 3000 rpm nos ensaios de pré-condicionamento do lodo adensado

No período de chuvas o lodo pré-condicionado na dosagem ótima alcançou teor de sólidos da ordem de 6%. Enquanto que o valor deste parâmetro para o lodo desaguado, sem adição de polímero, foi de 5%. Fato semelhante ocorreu para época seca.

VI) O melhor polímero encontrado para as duas épocas do ano e para os dois tipos de lodo foi o de carga aniônica. Para o período de chuvas a condição ótima para o adensamento por gravidade na ETA 3 é dada por 1 g/Kg e 30 s de mistura e na ETA 4 têm-se 3 g/Kg e 15 s de mistura.

Para o período de estiagem a condição ótima para o espessamento por gravidade ficou assim determinada: na ETA 3 tem-se 1 g/Kg de dosagem e mistura de 45 s e na ETA 4 é dada por 3 g/Kg e 60 s de mistura.

7 ANEXOS

Neste capítulo apresentam-se os gráficos obtidos nos ensaios realizados nas fases I, II e III desta investigação experimental.

7.1 Anexo A: Fase I – Determinação do Polímero a ser Utilizado no Adensamento por Gravidade

7.1.1 Período de Estiagem

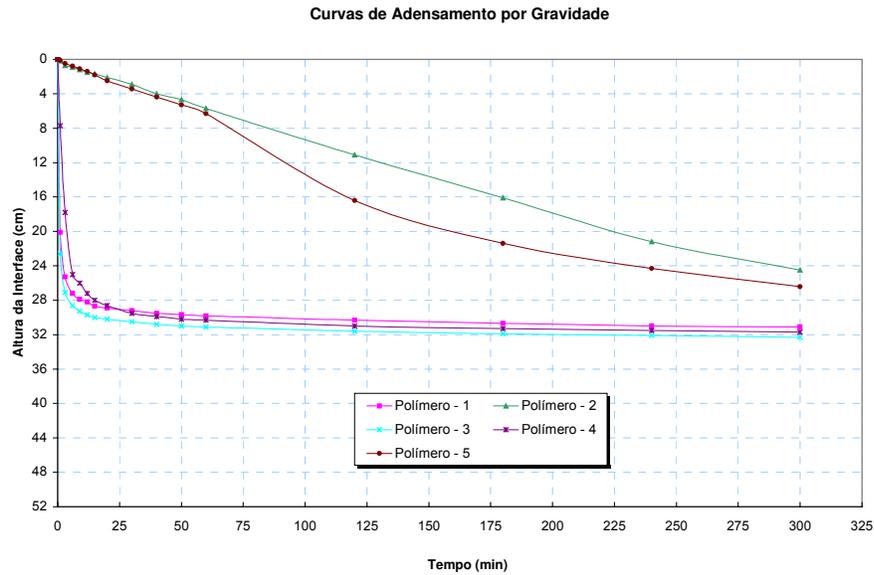


Figura 7.1 - Curvas de adensamento por gravidade associada a diferentes polímeros referentes a ensaio realizado para o lodo da ETA 3 – Ensaio 1.

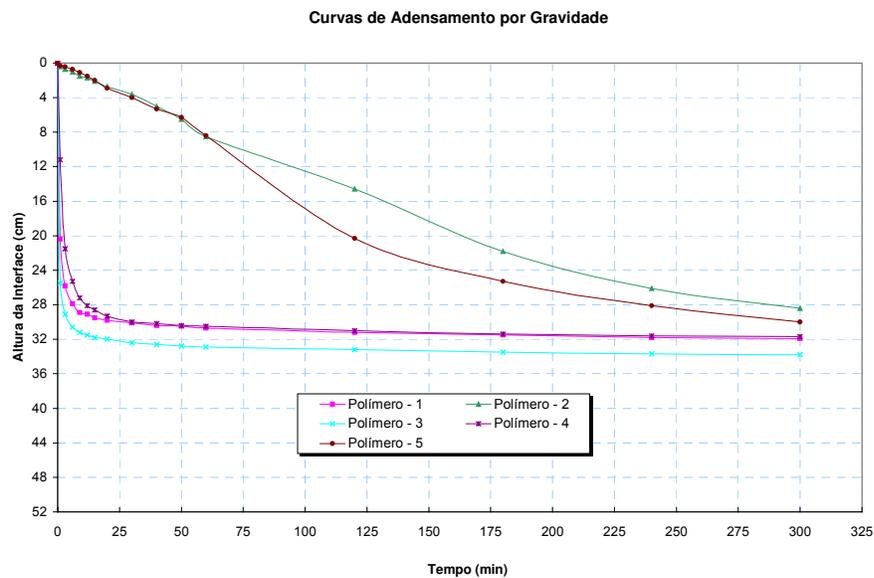


Figura 7.2 - Curvas de adensamento por gravidade associada a diferentes polímeros referentes a ensaio realizado para o lodo da ETA 3 – Ensaio 2.

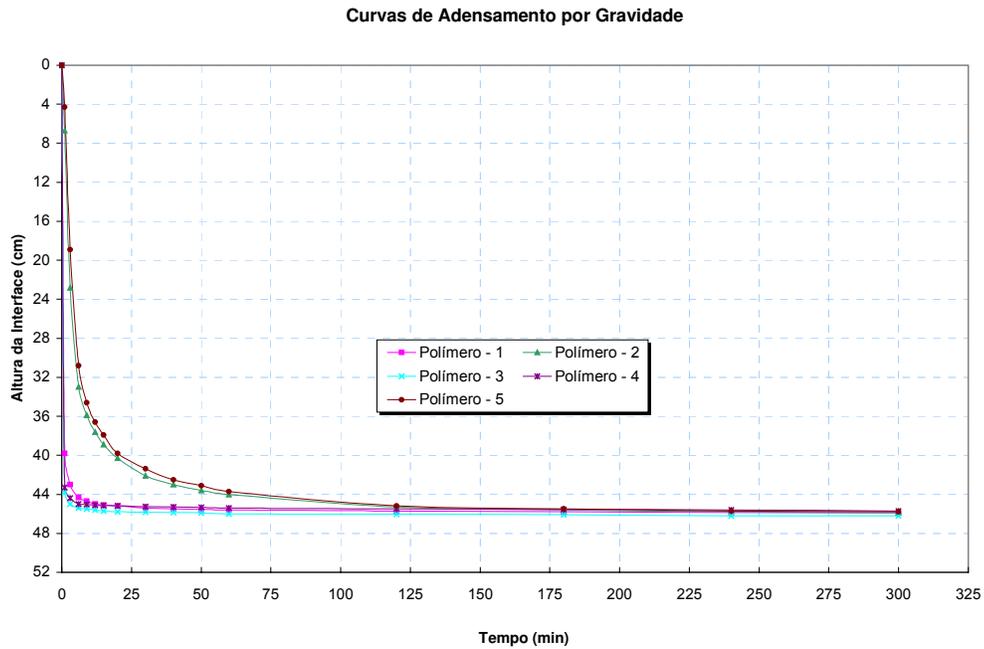


Figura 7.3 - Curvas de adensamento por gravidade associada a diferentes polímeros referentes a ensaio realizado para o lodo da ETA 4 – Ensaio 1.

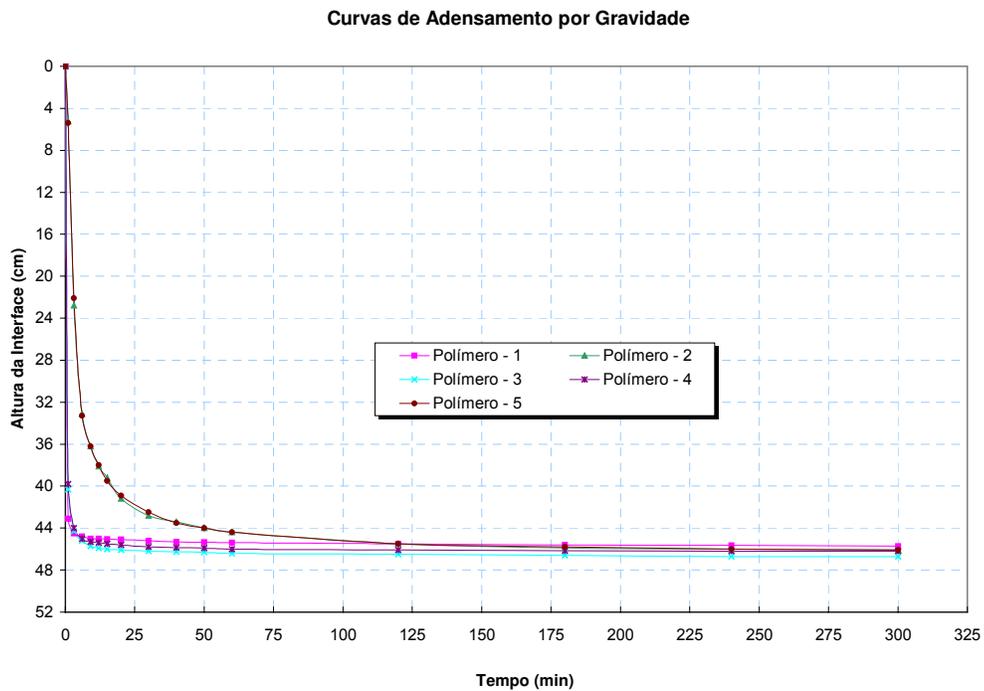


Figura 7.4 - Curvas de adensamento por gravidade associada a diferentes polímeros referentes a ensaio realizado para o lodo da ETA 4 – Ensaio 3

7.2 Anexo B: Fase II – Determinação da Condição Ótima de Adensamento do Lodo

7.2.1 Período de Chuvas

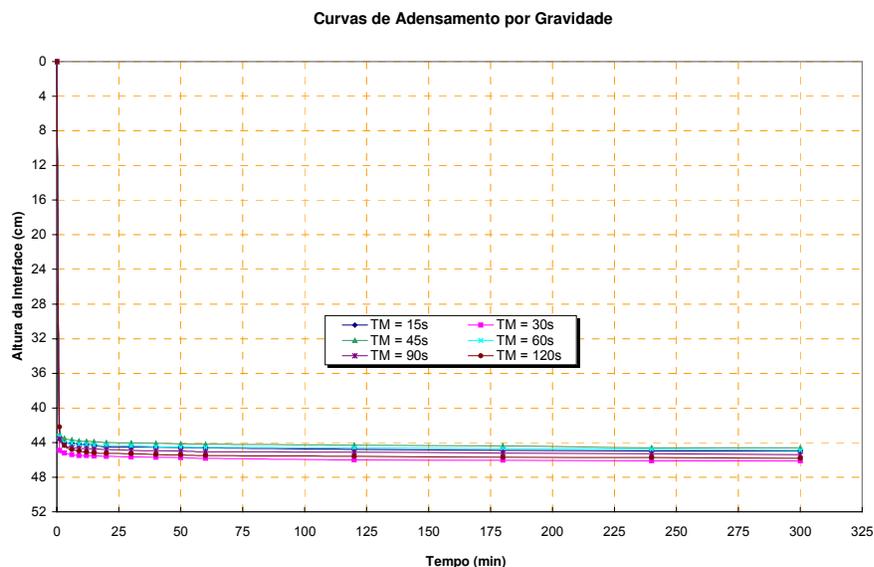


Figura 7.5 - Curvas de adensamento por gravidade associada a diferentes tempos de mistura do polímero 4 referentes a ensaio realizado com dosagem de 2 g/Kg de SST para ETA 3.

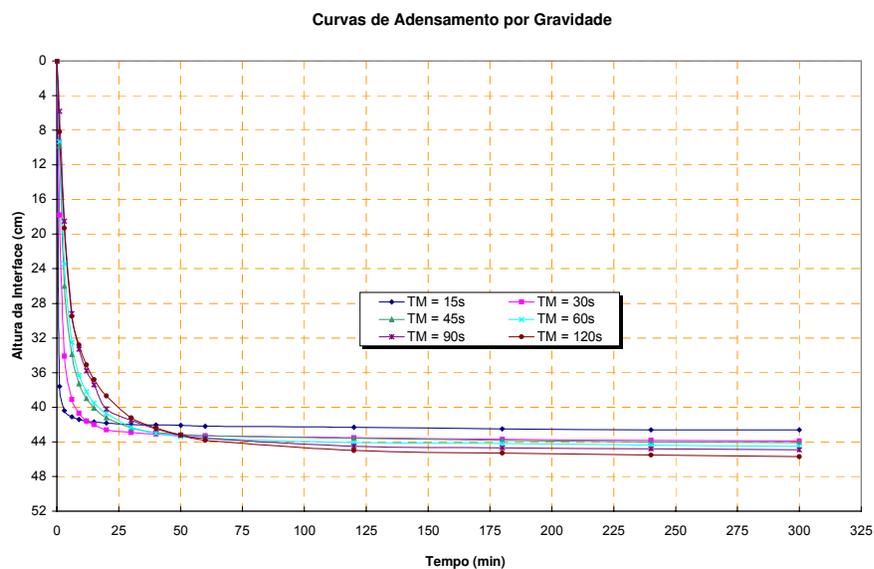


Figura 7.6 - Curvas de adensamento por gravidade associada a diferentes tempos de mistura do polímero 4 referentes a ensaio realizado com dosagem de 2 g/Kg de SST para ETA 4.

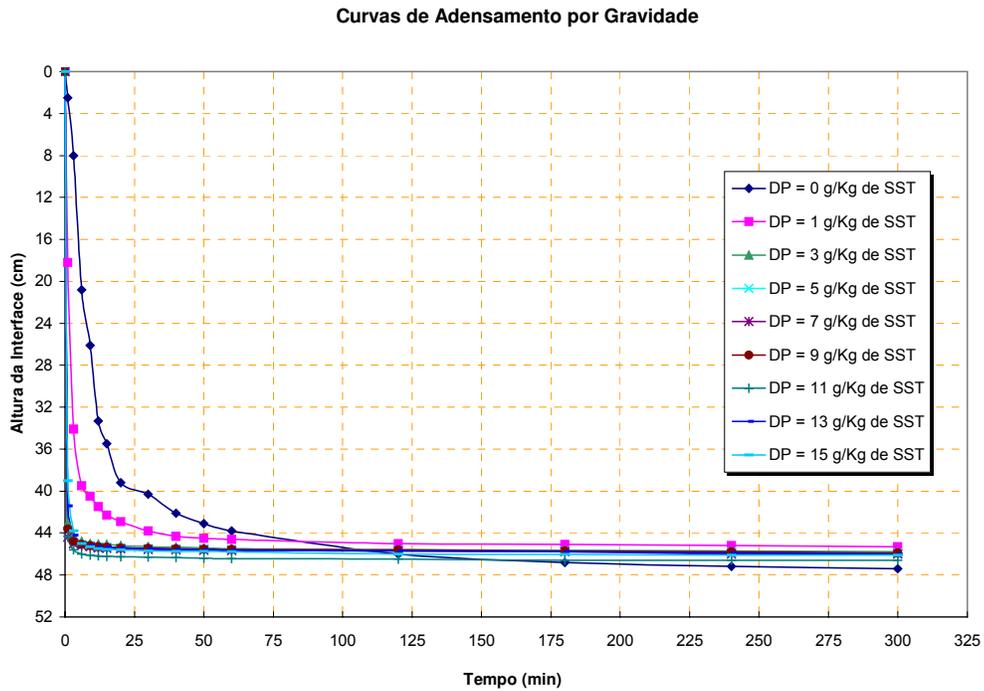


Figura 7.7 – Curvas de adensamento por gravidade associada a diferentes dosagens do polímero 2 referentes a ensaio realizado com tempo de mistura de 30 s – ETA 3.

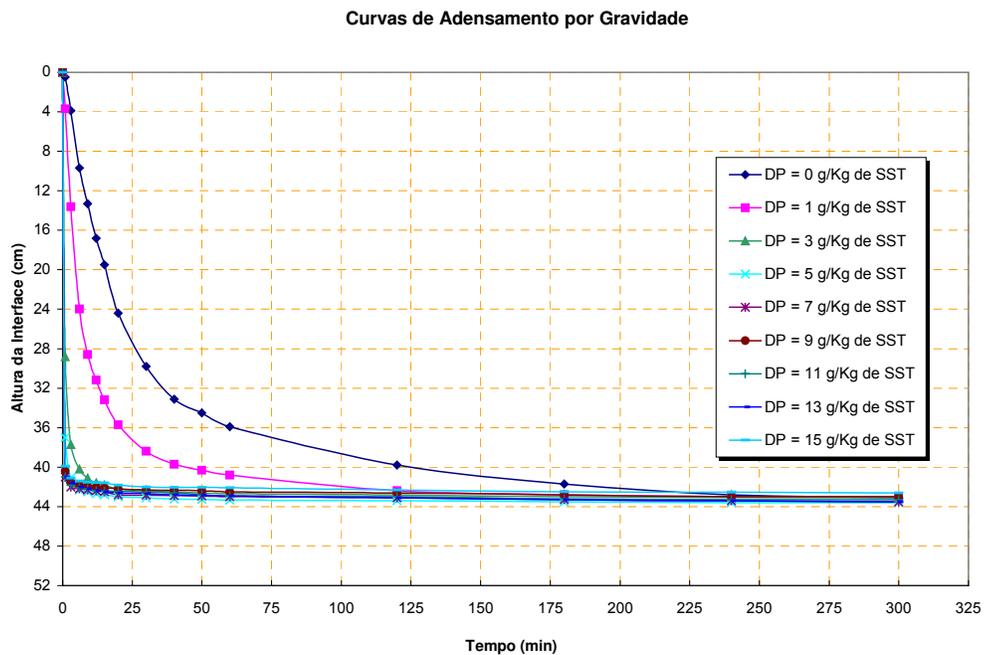


Figura 7.8 – Curvas de adensamento por gravidade associada a diferentes dosagens do polímero 2 referentes a ensaio realizado com tempo de mistura de 15 s – ETA 4.

7.2.2 Período de Estiagem

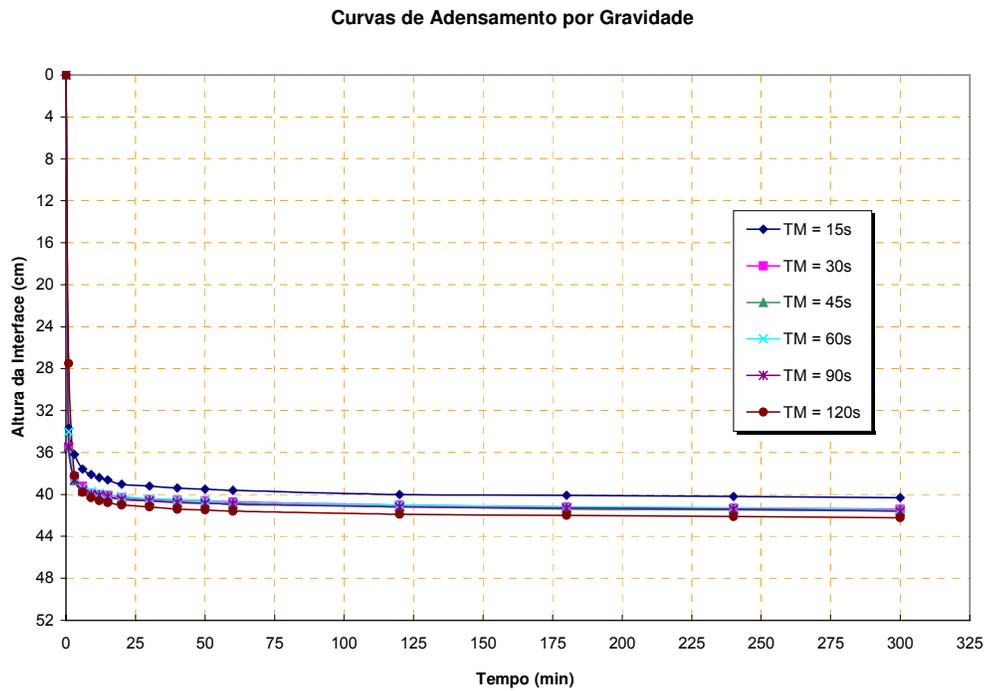


Figura 7.9 - Curvas de adensamento por gravidade associada a diferentes tempos de mistura do polímero 1 referentes a ensaio realizado com dosagem de 2 g/Kg de SST para ETA 3.

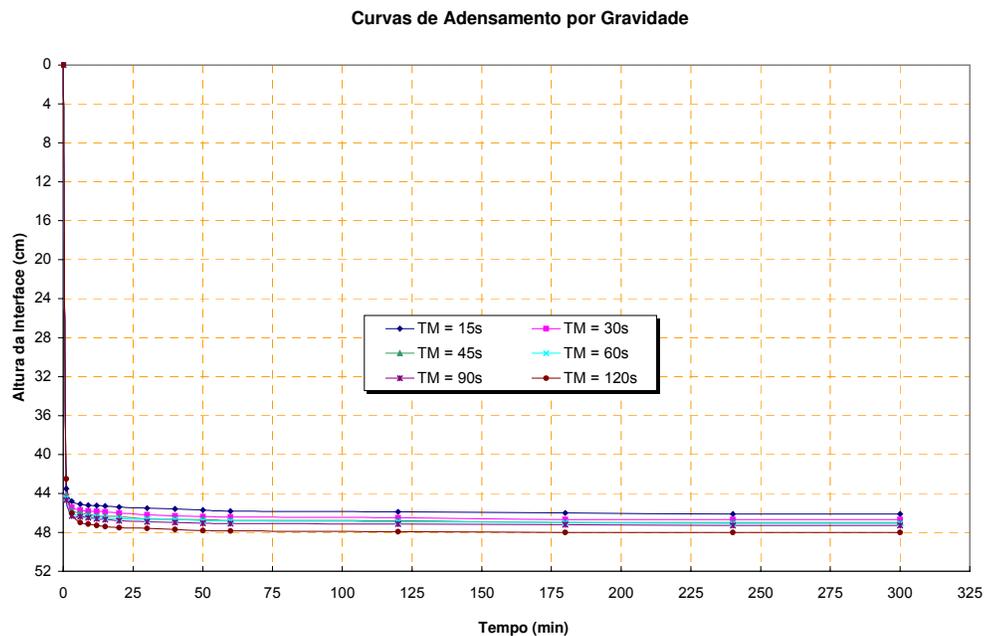


Figura 7.10 - Curvas de adensamento por gravidade associada a diferentes tempos de mistura do polímero 1 referentes a ensaio realizado com dosagem de 2 g/Kg de SST para ETA 4.

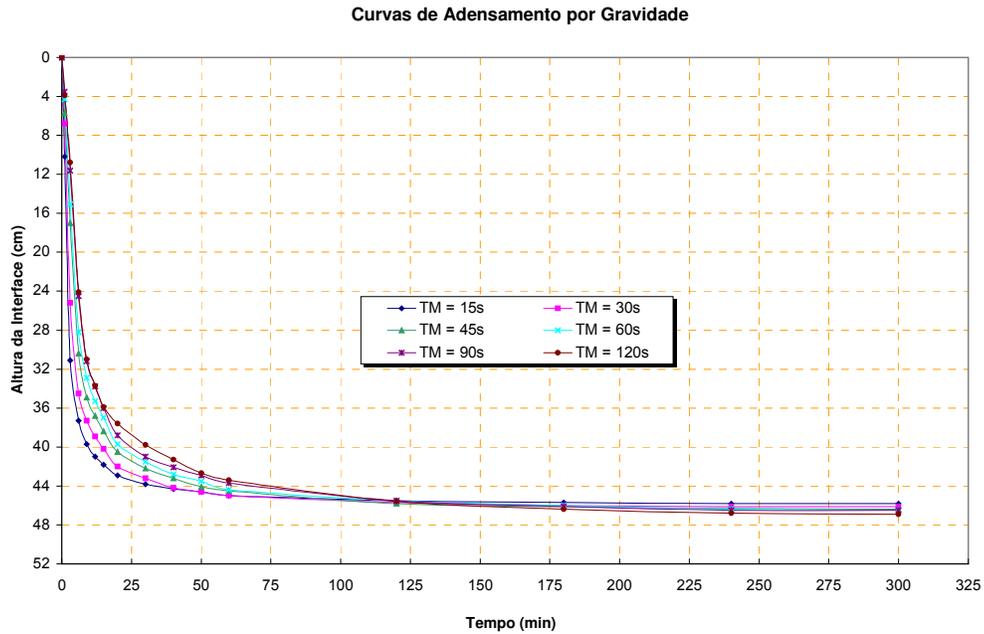


Figura 7.11 - Curvas de adensamento por gravidade associada a diferentes tempos de mistura do polímero 5 referentes a ensaio realizado com dosagem de 2 g/Kg de SST para ETA 4.

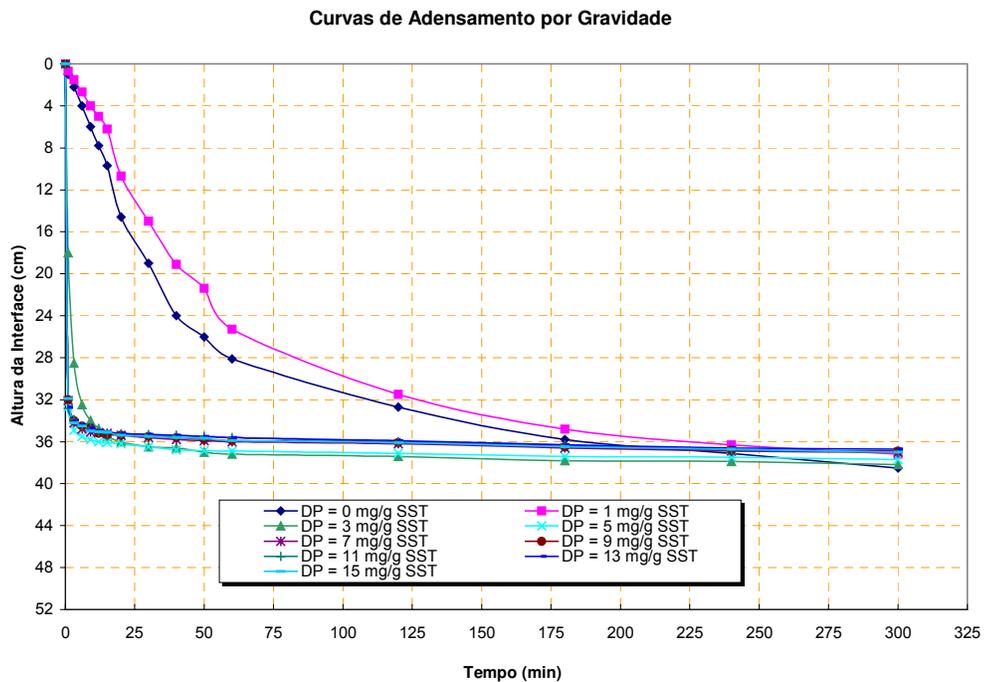


Figura 7.12 – Curvas de adensamento por gravidade associada a diferentes dosagens do polímero 5 referentes a ensaio realizado com tempo de mistura de 45 s – ETA 3.

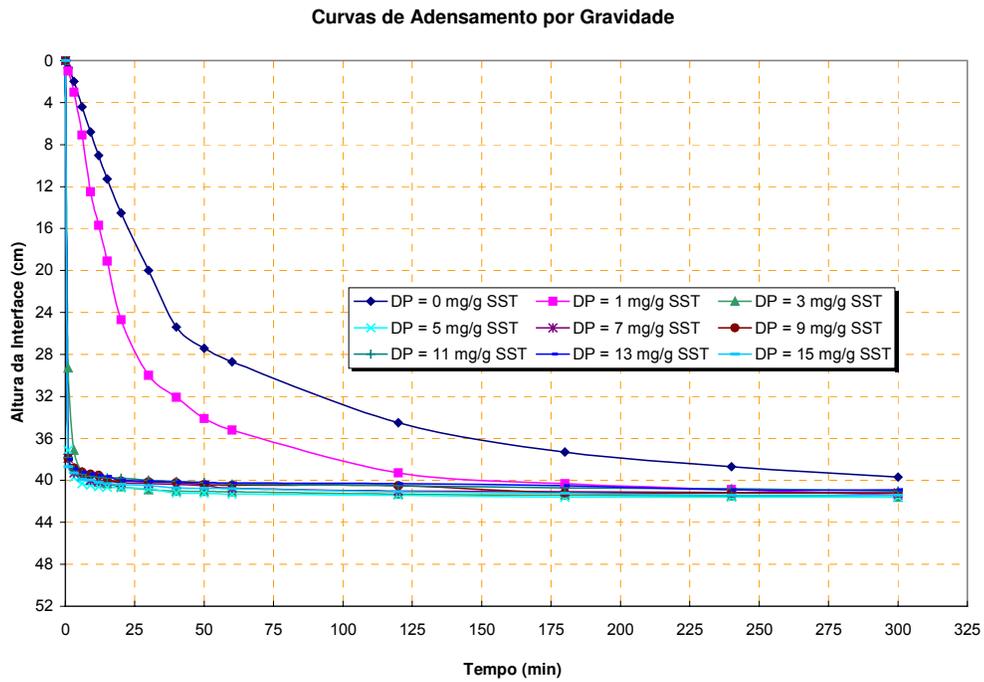


Figura 7.13 – Curvas de adensamento por gravidade associada a diferentes dosagens do polímero 5 referentes a ensaio realizado com tempo de mistura de 60 s – ETA 4.

7.3 Anexo C: Fase III – Desaguamento do Lodo por Centrifugação

7.3.1 Período de Chuvas

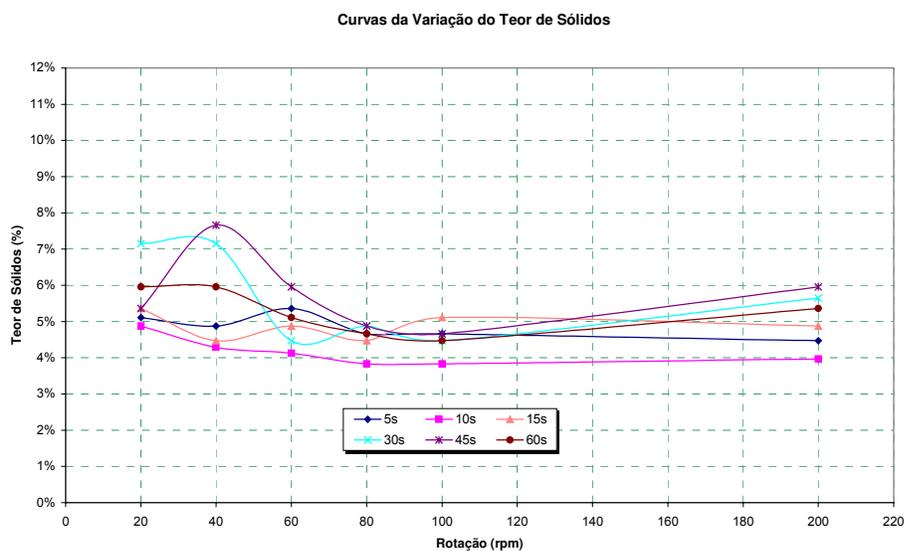


Figura 7.14 - Curvas da variação do teor de sólidos em função da rotação do agitado mecânico para diferentes tempos de mistura do polímero 1 referentes a ensaio realizado com dosagem de 1 g/Kg de SST para ETA 3 – Ensaio 2.

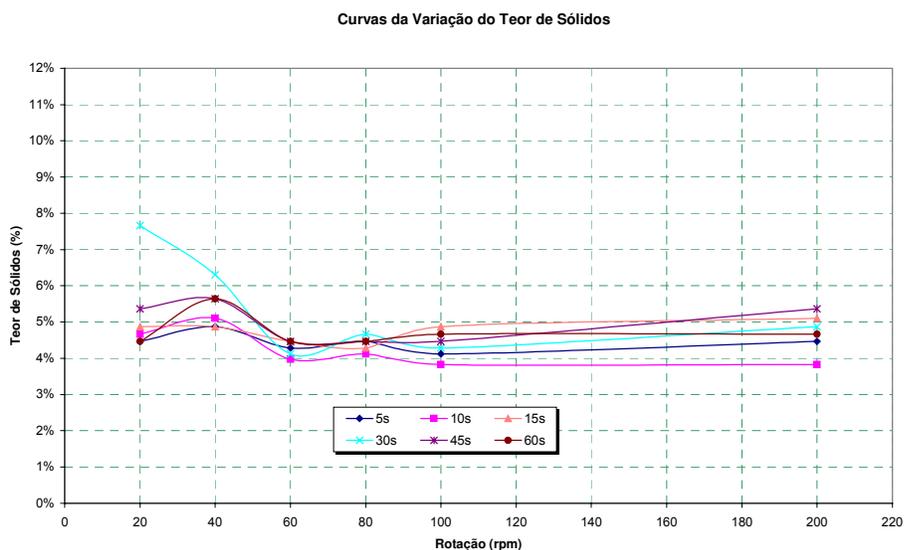


Figura 7.15 - Curvas da variação do teor de sólidos em função da rotação do agitado mecânico para diferentes tempos de mistura do polímero 1 referentes a ensaio realizado com dosagem de 1 g/Kg de SST para ETA 3 – Ensaio 3.

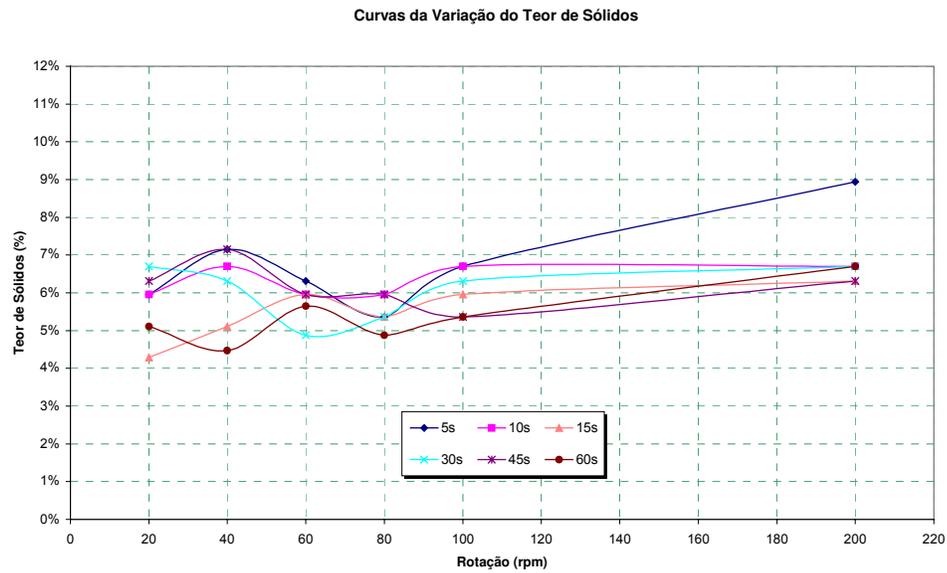


Figura 7.16 - Curvas da variação do teor de sólidos em função da rotação do agitado mecânico para diferentes tempos de mistura do polímero 2 referentes a ensaio realizado com dosagem de 1 g/Kg de SST para ETA 3 – Ensaio 1.

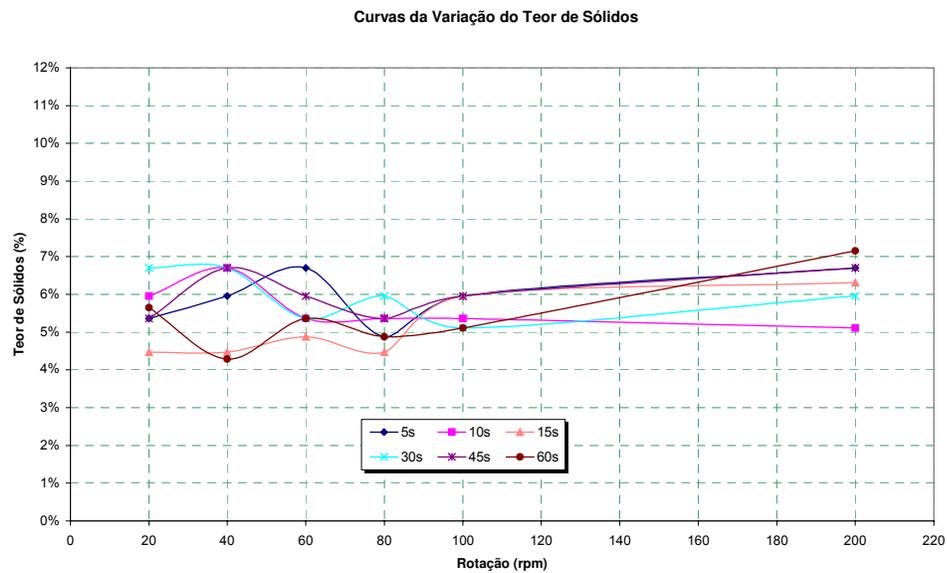


Figura 7.17 - Curvas da variação do teor de sólidos em função da rotação do agitado mecânico para diferentes tempos de mistura do polímero 2 referentes a ensaio realizado com dosagem de 1 g/Kg de SST para ETA 3 – Ensaio 2.

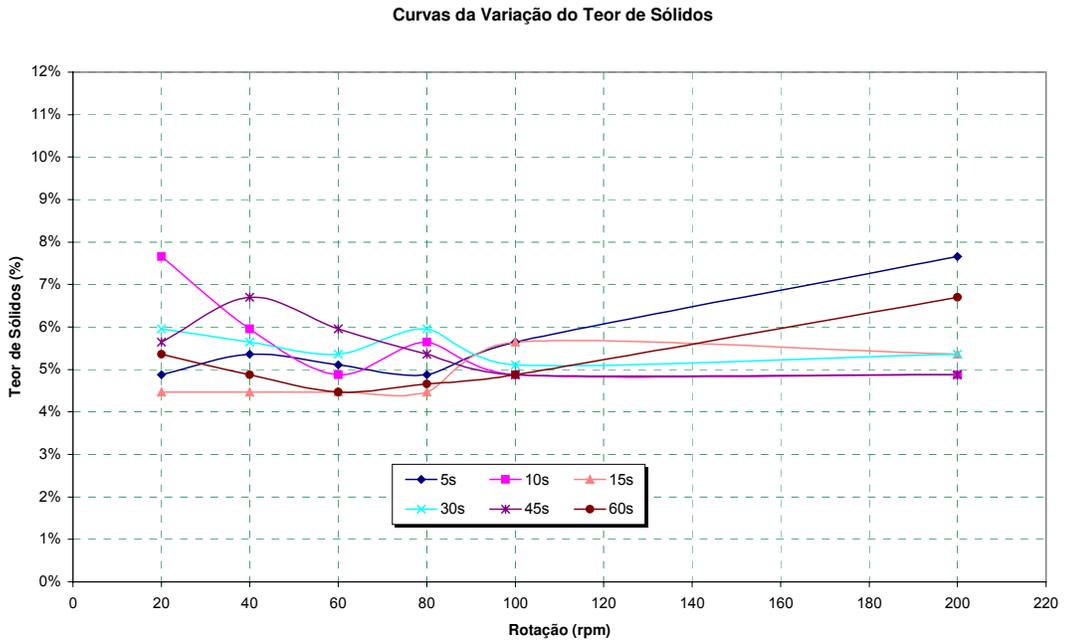


Figura 7.18 - Curvas da variação do teor de sólidos em função da rotação do agitado mecânico para diferentes tempos de mistura do polímero 2 referentes a ensaio realizado com dosagem de 1 g/Kg de SST para ETA 3 – Ensaio 3.

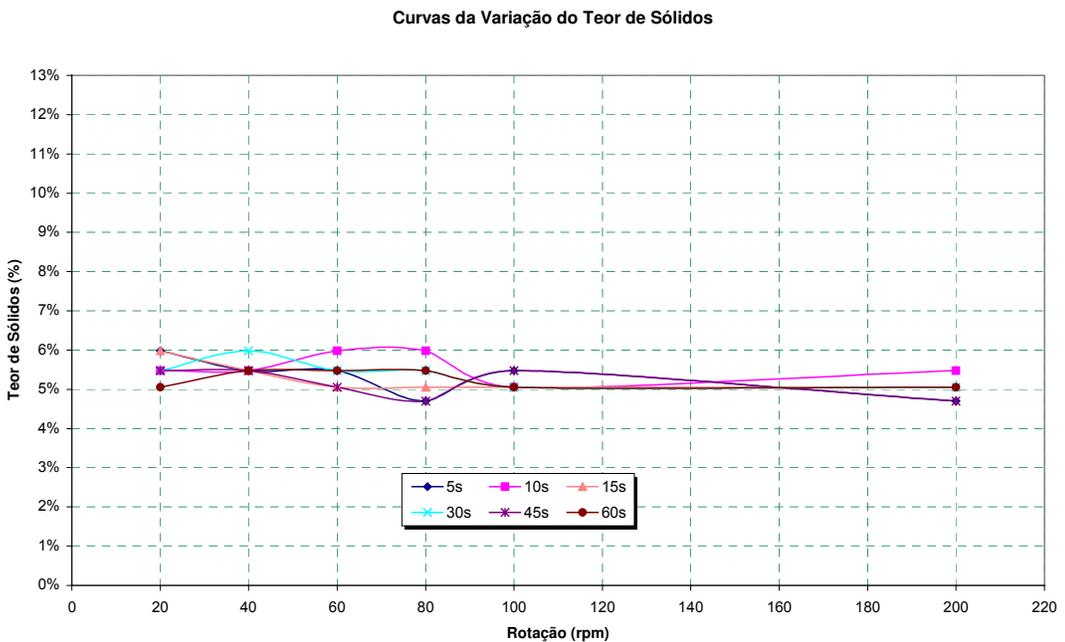


Figura 7.19 - Curvas da variação do teor de sólidos em função da rotação do agitado mecânico para diferentes tempos de mistura do polímero 1 referentes a ensaio realizado com dosagem de 1 g/Kg de SST para ETA 4 – Ensaio 1.

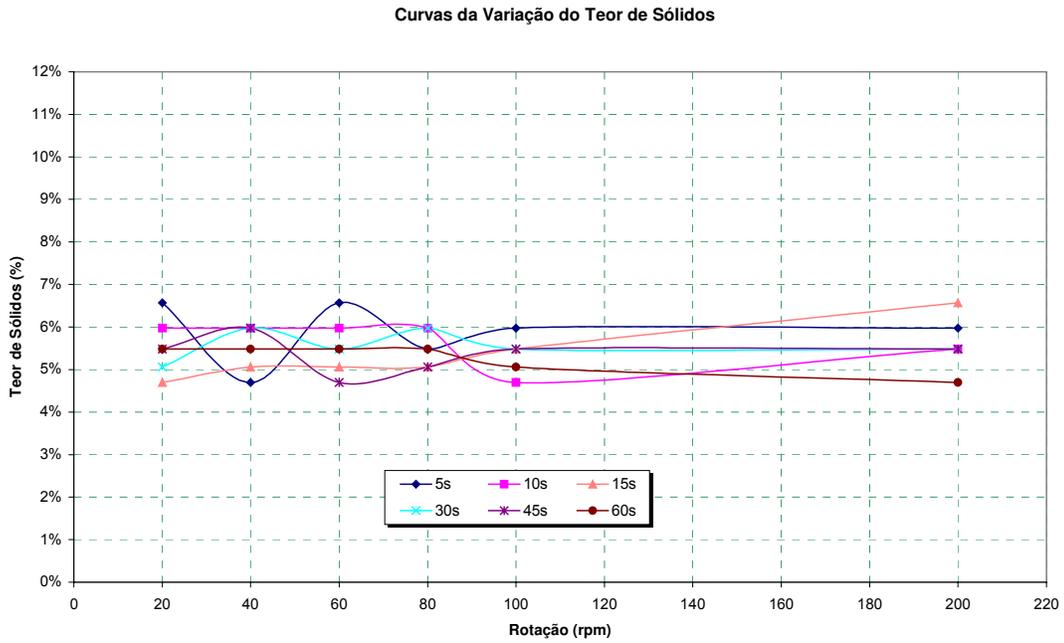


Figura 7.20 - Curvas da variação do teor de sólidos em função da rotação do agitado mecânico para diferentes tempos de mistura do polímero 1 referentes a ensaio realizado com dosagem de 1 g/Kg de SST para ETA 4 – Ensaio 3.

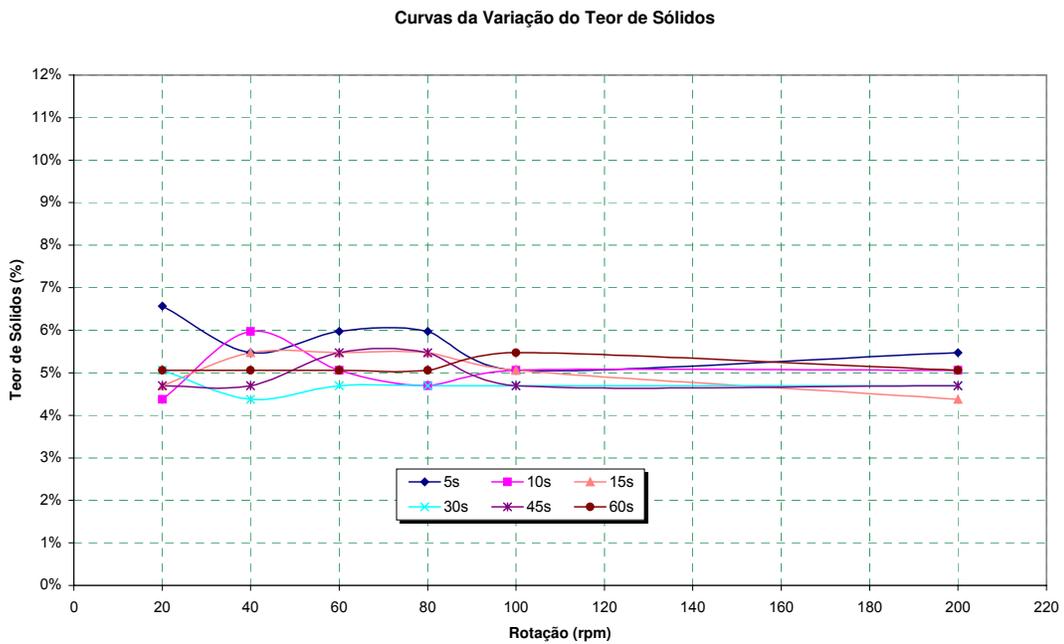


Figura 7.21 - Curvas da variação do teor de sólidos em função da rotação do agitado mecânico para diferentes tempos de mistura do polímero 2 referentes a ensaio realizado com dosagem de 1 g/Kg de SST para ETA 4 – Ensaio 1.

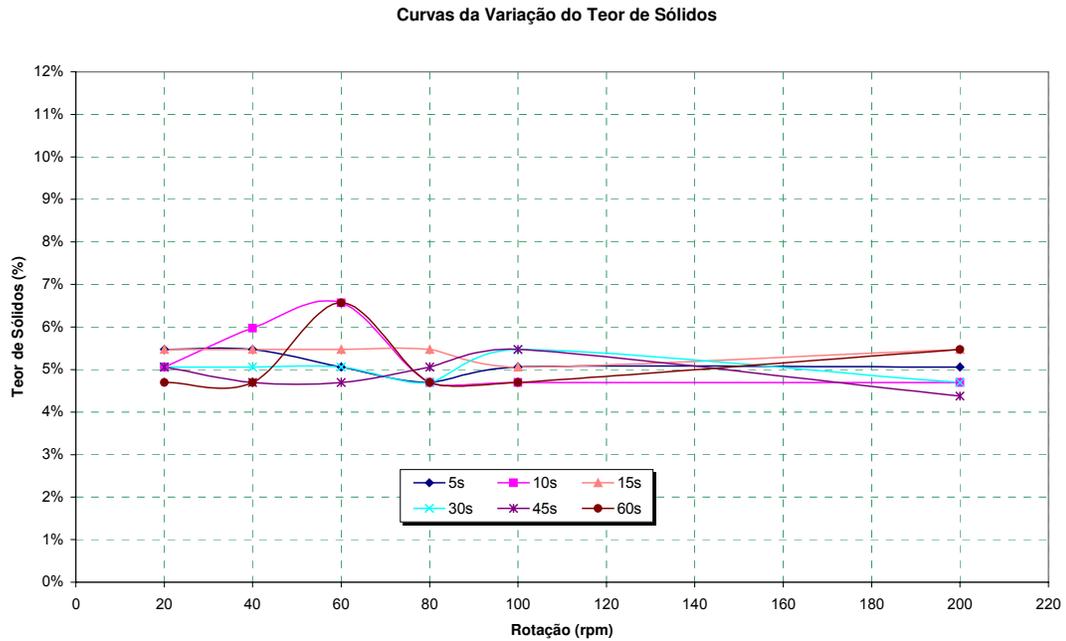


Figura 7.22 - Curvas da variação do teor de sólidos em função da rotação do agitado mecânico para diferentes tempos de mistura do polímero 2 referentes a ensaio realizado com dosagem de 1 g/Kg de SST para ETA 4 – Ensaio 2.

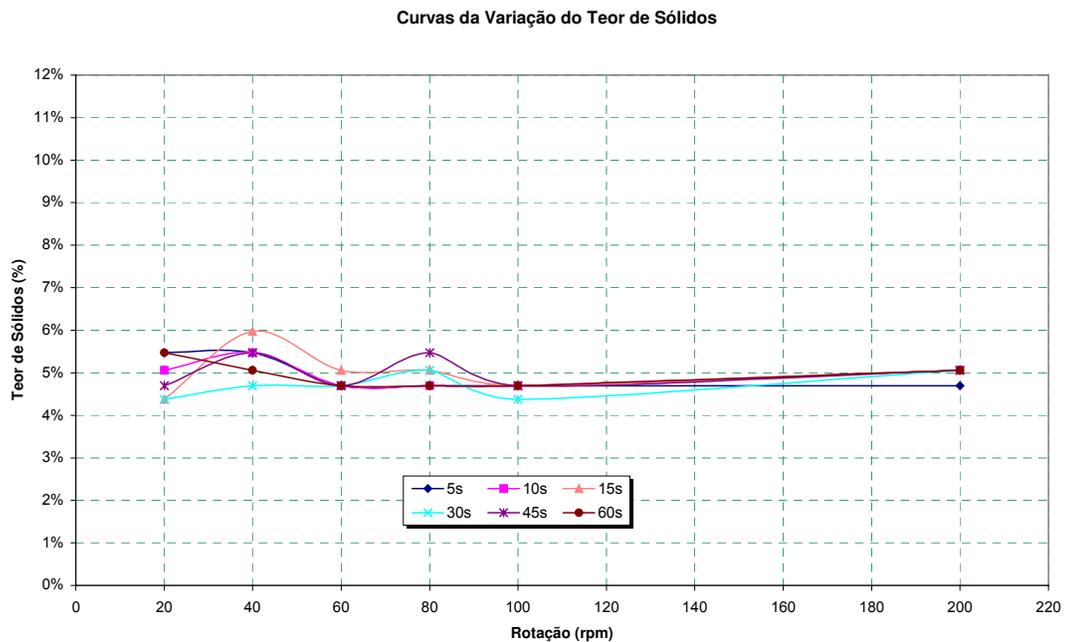


Figura 7.23 - Curvas da variação do teor de sólidos em função da rotação do agitado mecânico para diferentes tempos de mistura do polímero 2 referentes a ensaio realizado com dosagem de 1 g/Kg de SST para ETA 4 – Ensaio 3.

7.3.2 Período de Estiagem

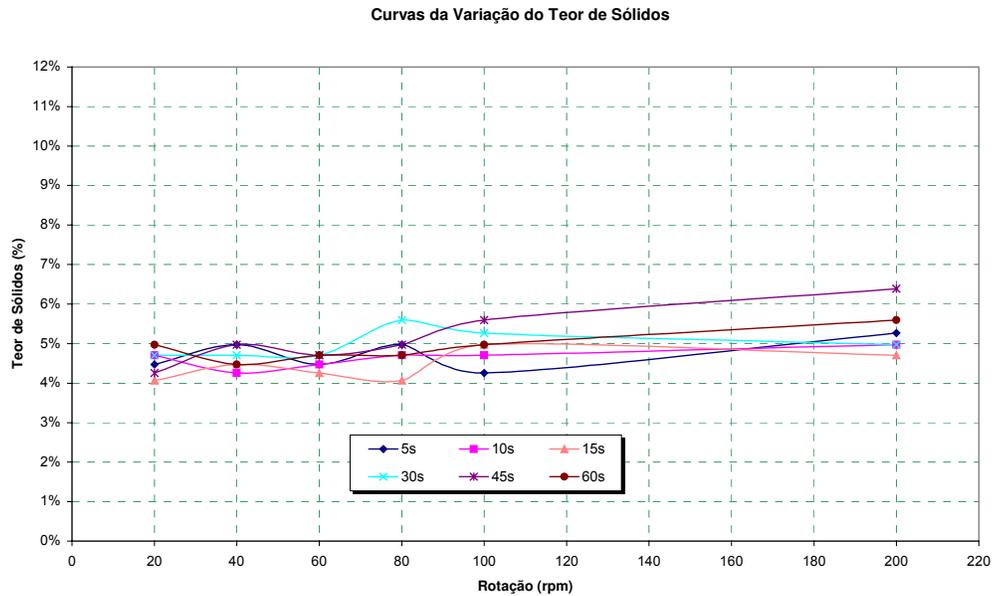


Figura 7.24 - Curvas da variação do teor de sólidos em função da rotação do agitado mecânico para diferentes tempos de mistura do polímero 1 referentes a ensaio realizado com dosagem de 1 g/Kg de SST para ETA 3 – Ensaio 2.

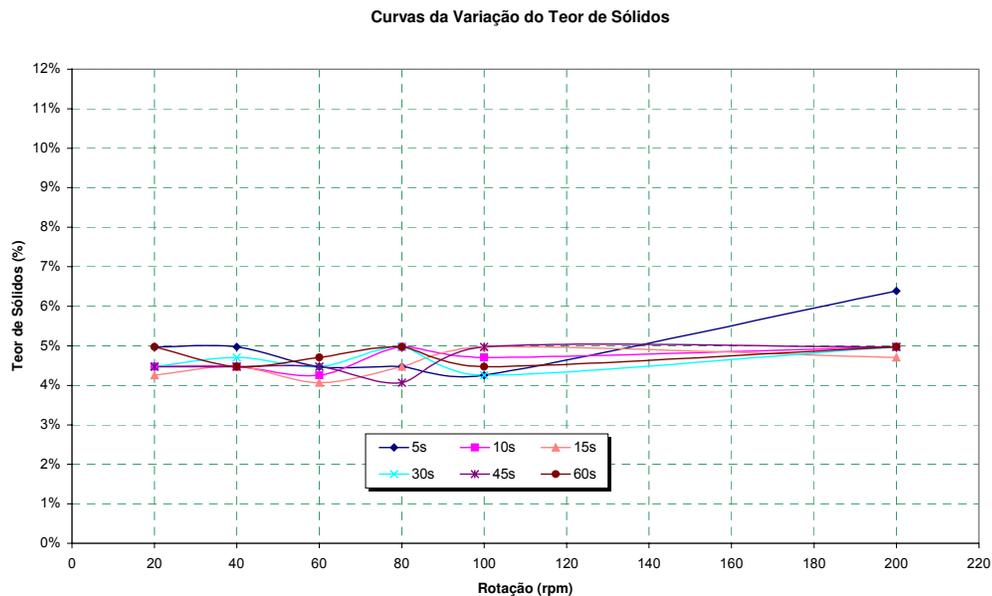


Figura 7.25 - Curvas da variação do teor de sólidos em função da rotação do agitado mecânico para diferentes tempos de mistura do polímero 1 referentes a ensaio realizado com dosagem de 1 g/Kg de SST para ETA 3 – Ensaio 3.

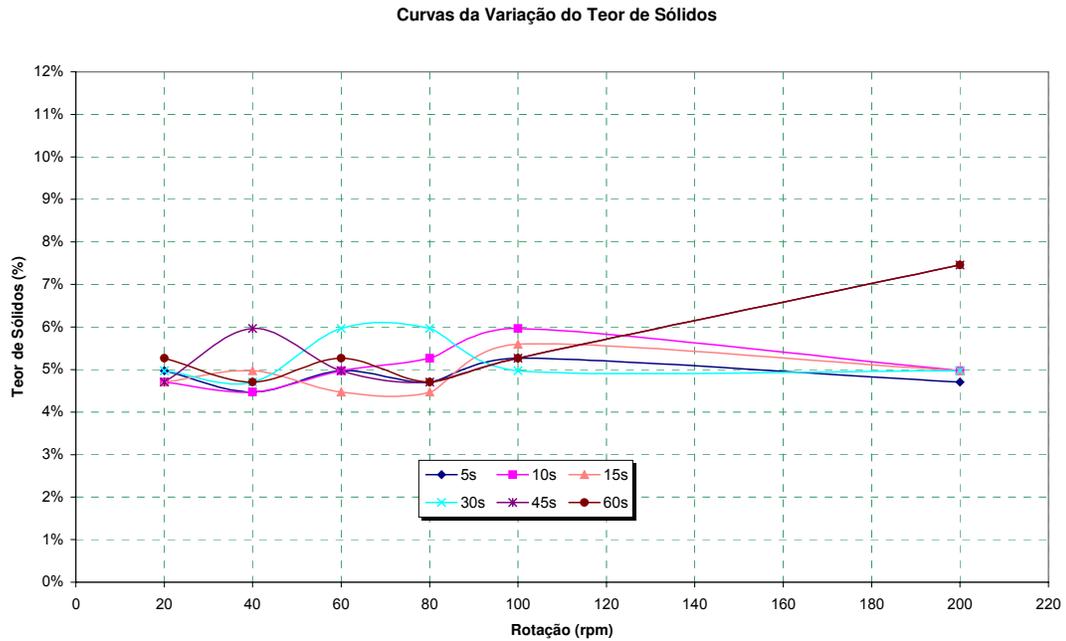


Figura 7.26 - Curvas da variação do teor de sólidos em função da rotação do agitado mecânico para diferentes tempos de mistura do polímero 2 referentes a ensaio realizado com dosagem de 1 g/Kg de SST para ETA 3 – Ensaio 1.

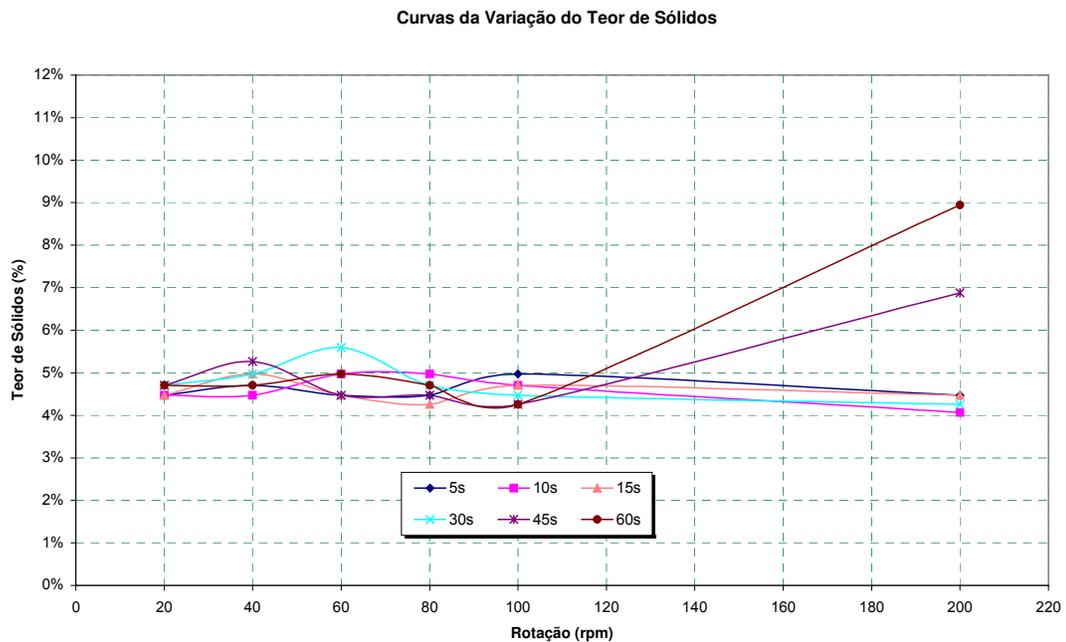


Figura 7.27 - Curvas da variação do teor de sólidos em função da rotação do agitado mecânico para diferentes tempos de mistura do polímero 2 referentes a ensaio realizado com dosagem de 1 g/Kg de SST para ETA 3 – Ensaio 2.

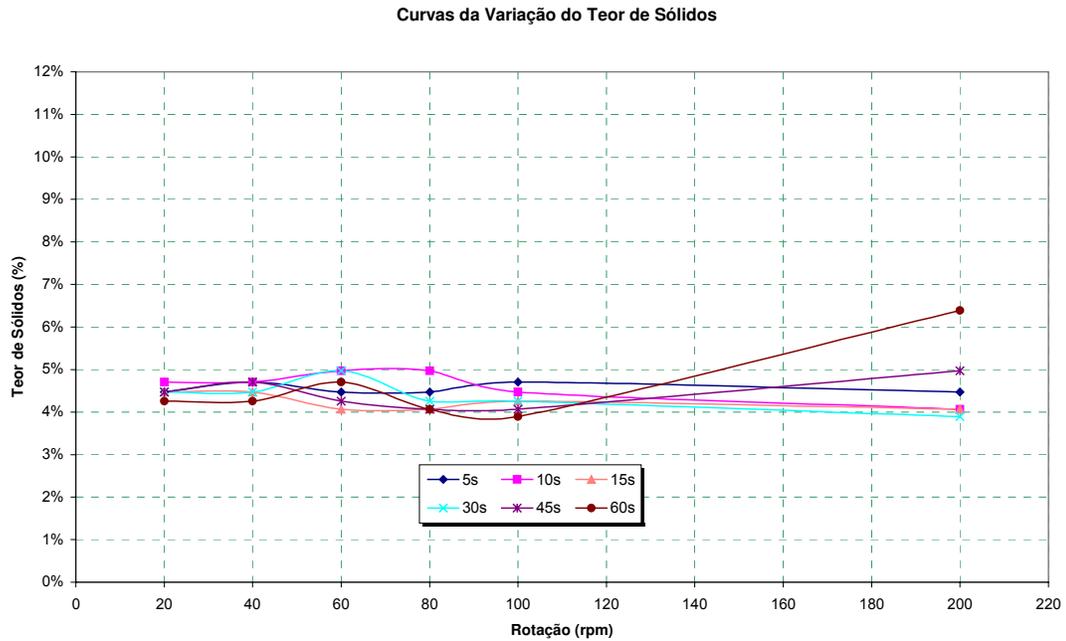


Figura 7.28 - Curvas da variação do teor de sólidos em função da rotação do agitado mecânico para diferentes tempos de mistura do polímero 2 referentes a ensaio realizado com dosagem de 1 g/Kg de SST para ETA 3 – Ensaio 3.

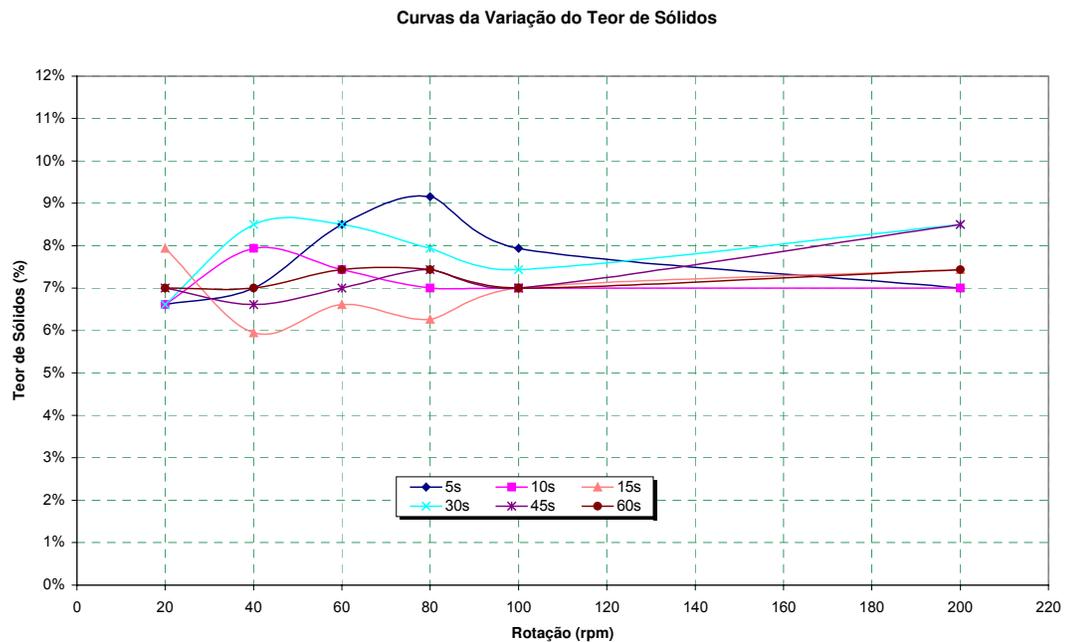


Figura 7.29 - Curvas da variação do teor de sólidos em função da rotação do agitado mecânico para diferentes tempos de mistura do polímero 1 referentes a ensaio realizado com dosagem de 1 g/Kg de SST para ETA 4 – Ensaio 2.

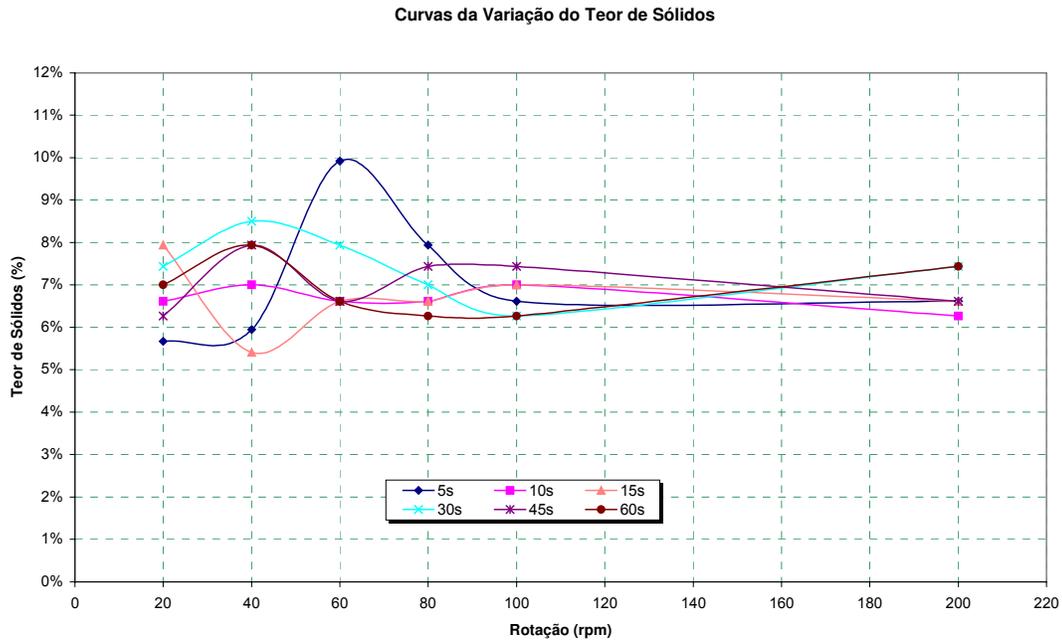


Figura 7.30 - Curvas da variação do teor de sólidos em função da rotação do agitado mecânico para diferentes tempos de mistura do polímero 1 referentes a ensaio realizado com dosagem de 1 g/Kg de SST para ETA 4 – Ensaio 3.

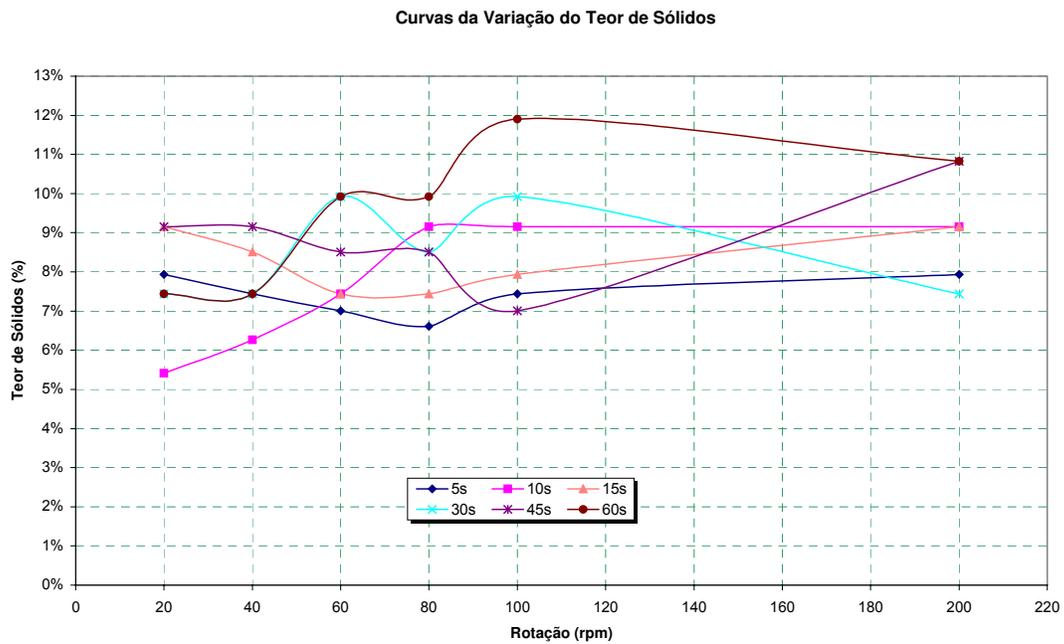


Figura 7.31 - Curvas da variação do teor de sólidos em função da rotação do agitado mecânico para diferentes tempos de mistura do polímero 2 referentes a ensaio realizado com dosagem de 1 g/Kg de SST para ETA 4 – Ensaio 1.

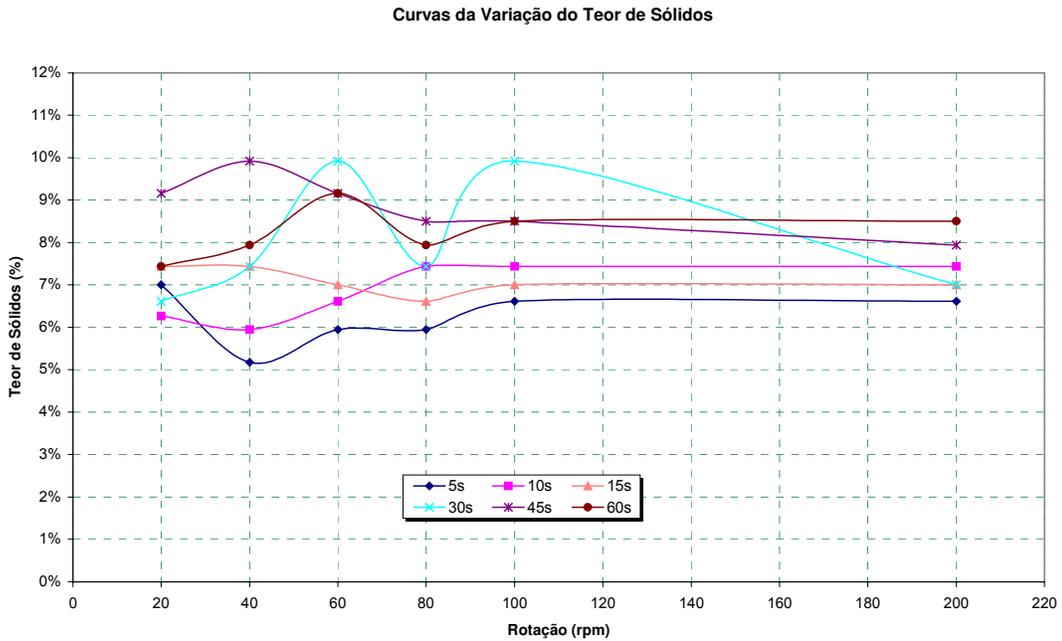


Figura 7.32 - Curvas da variação do teor de sólidos em função da rotação do agitado mecânico para diferentes tempos de mistura do polímero 2 referentes a ensaio realizado com dosagem de 1 g/Kg de SST para ETA 4 – Ensaio 2.

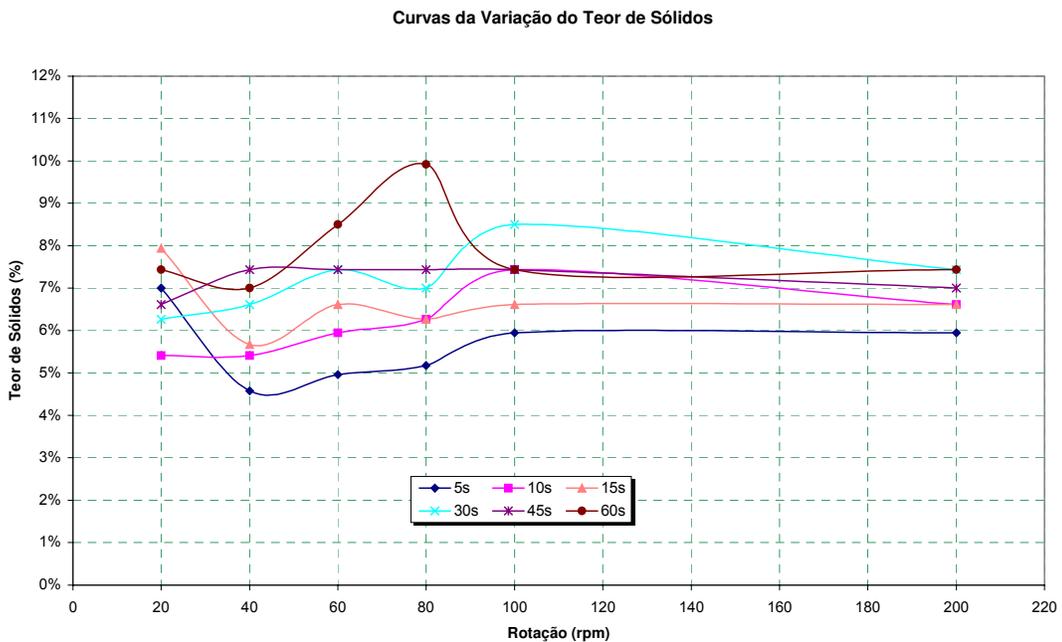


Figura 7.33 - Curvas da variação do teor de sólidos em função da rotação do agitado mecânico para diferentes tempos de mistura do polímero 2 referentes a ensaio realizado com dosagem de 1 g/Kg de SST para ETA 4 – Ensaio 3.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADLER, E. Drinking water sludge: overview in France in 2002. In: The Chartered Institution of Water and Environmental Management, 2002, London. **Proceeding of Management of wastes from drinking water treatment – International Conference**. London, sep., 2002.

ALBRECHT, A. E. Disposal of alum sludge. **Journal of American Water Works Association**. Wisconsin, 46-52, Janeiro 1972.

APHA – American Public Health Association; AWWA – American Water Works Association; WEF – Water Environment Federation. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**, Baltimore. 20 ed. United Book Press, 1998.

ASCE. **Technology Transfer Handbook: Management of water treatment plant residuals**. New York: American Society of Civil Engineers; Denver: American Water Works Association, 1996. Cap. 3 - Characterization of water treatment plant residuals; p. 17-40. (ASCE Manuals and Reports on Engineer Practice, n. 88)

BABBIT, H. E. DOLAND, J. J; CLEASBY, J. L. **Abastecimento de Água**. 6 ed., Editora: Edgard Blücher, 1962.

BARROSO, M. M. CORDEIRO, J. S. Problemática dos metais nos resíduos gerados em estações de tratamento de água. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21, 2001, João Pessoa. **Anais do 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. João Pessoa: ABES, 2001.

BIERCK, B. R.; DICK, R. I. In situ examination of effects of pressure differential on compressible cake filtration. **Water Science & Technology**, London, v. 22, n. 12, p. 125-134, 1990.

BRITO, S. A., DI BERNARDO, L. MOREIRA, A. M. R. Importância da velocidade de sedimentação dos flocos na otimização do gradiente de velocidade na floculação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 20, 1999, Rio de Janeiro. **Anais do 20º Congresso de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Rio de Janeiro: ABES, 1999.

CHRISTENSEN, J. R.; SORENSEN, P. B.; CHRISTENSEN, G. L.; HANSEN, J. A. Mechanisms for overdosing in sludge conditioning. **Journal of Environmental Engineering**, New York, v. 119, n. 1, p. 159-171, Jan. /Feb. 1993.

CORDEIRO, J. S. Importância do tratamento e disposição adequada dos lodos de ETAs. In: **Noções Gerais de Tratamento e Disposição Final de Lodos de Estações de Tratamento de Água**. Rio de Janeiro. 1999. p. 1-19.

CORNWELL, D. A.; BISHOP, M. M.; GOULD, R. G.; VANDERMEYDEN, C. Water treatment plant waste management. **Journal of American Water Works Association Research Foundation**, USA, 1987.

CORNWELL, D.; MUTTER, R. N.; VANDERMEYDEN, C. **Commercial application and marketing of water plant residuals**. AWWARF, 2000.

DI BERNARDO, L. Sedimentação e Flotação. In: **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água**. Rio de Janeiro: ABES, 1993. v 1. p. 355-481.

DI BERNARDO, L. DI BERNARDO, A; CENTURIONE FILHO, P. L. **Ensaio de Tratabilidade de Água e dos Resíduos Gerados em Estações de Tratamento de Água**. São Carlos: Rima Editora, 2002.

FERREIRA FILHO, S. S. Pré-condicionamento de lodos de estações de tratamento de água visando o seu adensamento por gravidade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19, 1997, Foz do Iguaçu. **Anais do 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Foz do Iguaçu: ABES, 1997. p. 1181-1182.

FULTON, G. P. Recover alum to reduce waste disposal costs. **Journal of American Water Works Association**. New York, p. 312-318, may 1974.

GRANDIN, S. R. **Desidratação de Lodos Produzidos nas Estações de Tratamento de Água**. 1992. 2v. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 457.

GREGORY, J. Polymer adsorption and flocculation in sheared suspensions. **Colloids and Surfaces**, v. 31, p. 231-253, 1988.

HALL, T.; CROLL, B. Particle counters as tools for managing *cryptosporidium* risk in water treatment. **Water Science & Technology**, London, v. 36, n. 4, p. 143-149, 1997.

HAWKINS, F. C.; JUDKINS Jr, J. F; MORGAN, J. M. Water treatment sludge filtration studies. **Journal of American Water Works Association**, v. 66, n. 11, p. 653-658, Nov. 1974.

KNOCKE, W. R.; WAKELAND, D. L. Fundamental characteristics of water treatment plant sludge. **Journal of American Water Works Association**, v. 75, n. 1, p. 516-53, oct. 1983.

LANGER, S. J.; KLUTE, R.; HAHN, H. H. Mechanisms of flock formation in sludge conditioning with polymers. **Water Research**, London, v. 34, n. 18, p. 4430-4436, 2000.

LEE, C. H.; LIU, J. C. Enhanced sludge dewatering by dual polyelectrolyte conditioning. **Water Science & Technology**, London, v. 30, n. 8, p. 129-138, July. 1994.

MONTGOMERY, J. M. Residual's management. In: **Water Treatment Principles and Design**. New York, 1985, p. 284-300.

NIELSEN, H. L.; CARNS, K. E.; DEBOICE, J. N. Alum sludge thickening and disposal. **Journal of American Water Works Association**, v. 65, n. 6, p. 385-394, June 1973.

NOVAK, J. T.; CALKINS, D. C. Sludge dewatering and its physical properties. **Journal of American Water Works Association**, Oklahoma, v. 67, n. 1, p. 42-45, Jan. 1975.

NOVAK, J. T.; HAUGAN, B. E. Chemical conditioning of activated sludge. **Journal of the Environmental Engineering Division**, New York, v. 105, n. 5, p. 993-1008, aug. 1979.

O'CONNOR, J. T. Management of water treatment plants residues. In: **Water Quality and Treatment**. 3 ed., 1971, p. 625-646.

PÁDUA, V. L. DI BERNARDO, L. Qualidade da água decantada em função do tempo de operação de decantadores convencionais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 20, 1999, Rio de Janeiro. **Anais do 20º Congresso de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Rio de Janeiro: ABES, 1999.

PAULSRUD, B.; STORHAUG, R.; HEM, L. J. Management of wastes from drinking water treatment in Norway. In: MANAGEMENT OF WASTES FROM DRINKING WATER TREATMENT. **The Chartered Institution of Water and Environmental Management**. London, 2002.

RASMUSSEN, M.; LARSEN, T. On-line measurements of settling characteristics in activated sludge. **Water Science & Technology**, London, v. 36, n. 4, p. 307-312, 1997.

REALI, M. A. P. Principais características quantitativas e qualitativas do lodo de ETAs. In: **Noções Gerais de Tratamento e Disposição Final de Lodos de Estações de Tratamento de Água**. Rio de Janeiro. 1999. p. 21-39.

REALI, M. A. P; PATRIZZI, L. J. Espessamento de lodos de ETAs. In: **Noções Gerais de Tratamento e Disposição Final de Lodos de Estações de Tratamento de Água**. Rio de Janeiro. 1999. p. 41-84.

REALI, M. A. P; PATRIZZI, L. J. CORDEIRO, J. S. Desidratação de lodo por centrifugação. In: **Noções Gerais de Tratamento e Disposição Final de Lodos de Estações de Tratamento de Água**. Rio de Janeiro. 1999. p. 85-106.

SIMPSON, A.; BURGESS, P.; COLEMAN, J. The management of potable water treatment sludge: present situation in the UK. In: The Chartered Institution of Water and Environmental Management, 2002, London. **Proceeding of Management of wastes from drinking water treatment – International Conference**. London, sep. 2002.

TEIXEIRA, L. C. G. M.; FERREIRA FILHO, S. S. Ensaio de pré-adensamento em batelada e semicontínuo de lodos gerados em estações de tratamento de água. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 20, 1999, Rio de Janeiro. **Anais do 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Rio de Janeiro: ABES, 1999. p. 1039-1048.

USEPA – United States Environmental Protection Agency. **Biosolids generation, use and disposal in the United States**. Office of solid waste. EPA530-R-99-009, sep. 1999.

VESILIND, P. A. The role of water in sludge dewatering. **Water Environment Research**, v. 66, n. 1, p. 4-11, Jan. /Feb. 1994.

VLASKI, A.; VAN BREEMEN, A. N.; ALAERTS, G. J. The role of particle size and density in dissolved air flotation and sedimentation. **Water Science & Technology**, London, v. 36, n. 4, p. 177-189, 1997.

WU, C. C.; HUANG, C. Effects of recycling-sludge operation on the structure and moisture content of floc in water treatment plant. **Separation Science and Technology**, New York, v. 32, n. 17, p. 2873-2882, 1997.

YUZHU, W. **Condicionamento de lodo de estação de tratamento de água: estudo de caso.** 1996. 2v. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 419.

ABSTRACT

Silva Jr., Archimedes Pereira. Handling of sludge from thickeners conventional and high-rate. Campinas, College of Civil Engineer, State University of Campinas, 2003. p. 159. Masters Degree.

The main residues of WTPs are sludge from thickener, filter backwash waters and solids from basins of chemicals products. The sludge even labeled as solid residues present very low solids content. Like the costs of transportation and ultimate disposal are very high, to reduce the sludge volume is an economical feasible alternative. The principal methods used to reduce the sludge volume are thickening, chemical conditioning and dewatering. The aim of this research was to compare the handling of both sludge from the conventional and high-rate thickener. It was checked the influence of the parameters that give particular characteristics to the sludge in its dewatering; the gravity thickening with polymers aid and the influence of the polymers in the sludge dewatering with centrifuge. The raw sludge was conditioned with synthetics polymers. Also was checked whether that polymers were efficient in the thickened sludge conditioning aiming its centrifugation. The best polymer to the gravity thickening for both sludge (WTPs 3 and 4) was the anionic polymer. The same polymer dose was required for the both seasons studied (wet and dry) and for the two WTPs. It was 1mg/g to the WTP-3 and it was 3g/Kg to the WTP-4. The mixing time for the WTP-3 was greater in the dry season (45s) than the wet season (30s) and the mixing time was the same (60s) in both seasons for the WTP-4. The thickened sludge was conditioned with organic synthetic polymer and subjected to centrifugation. After this, was concluded that in the wet season and for the two kinds of sludge the optimum conditions given to: cationic polymer, 1g/Kg of polymer dose, mixing time of 5s and 200 rpm of centrifuge rotation. In the dry season and residues from WTP-3 the optimum condition is given to: cationic polymer, 1g/Kg of polymer dose, mixing time of 60s and 200 rpm of centrifuge rotation. For residues from WTP-4 the optimum condition is given to: cationic polymer, 2,5g/Kg of polymer dose, mixing time of 60s and 100 rpm of centrifuge rotation.

Keywords: Sludge, Thickening, Centrifugation, Synthetic Polymer.