



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA



**ESTUDO DAS MICROPROPRIEDADES DE RESÍDUOS SÓLIDOS
GERADOS NOS DECANTADORES DE ESTAÇÕES DE
TRATAMENTO DE ÁGUA**

FABIO EVANDRO JACOMASSI

São Carlos
2009



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA



**ESTUDO DAS MICROPROPRIEDADES DE RESÍDUOS SÓLIDOS
GERADOS NOS DECANTADORES DE ESTAÇÕES DE
TRATAMENTO DE ÁGUA**

FABIO EVANDRO JACOMASSI

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Urbana.

Orientação: Prof. Dr. João Sérgio Cordeiro
Co-Orientação: Prof. Dr. José A. M. Agnelli

São Carlos

2009

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

J17em

Jacomassi, Fabio Evandro.

Estudo das micropropriedades de resíduos sólidos gerados nos decantadores de estações de tratamento de água / Fabio Evandro Jacomassi -- São Carlos : UFSCar, 2010.

115 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2009.

1. Engenharia urbana. 2. Saneamento ambiental. 3. Estação de tratamento de água. 4. Resíduos sólidos. 5. Lodo. 6. Decantador. I. Título.

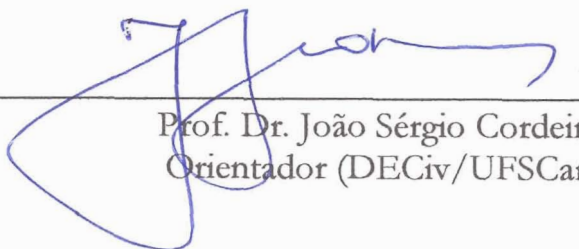
CDD: 711 (20^a)



FOLHA DE APROVAÇÃO

FÁBIO EVANDRO JACOMASSI

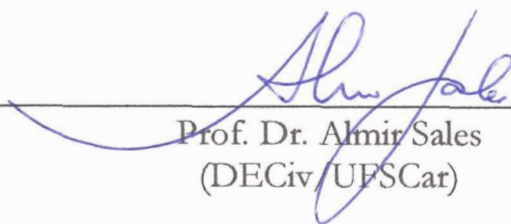
Dissertação defendida e aprovada em 27/10/2009
pela Comissão Julgadora



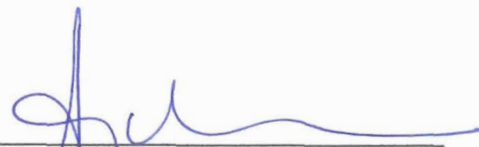
Prof. Dr. João Sérgio Cordeiro
Orientador (DECiv/UFSCar)



Prof. Dr. Valdir Schälch
(CRHEA-EESC/USP)



Prof. Dr. Almir Sales
(DECiv/UFSCar)



Prof. Dr. Arghimedes Azevedo Raia Jr.
Presidente da CPG-EU

***Aos meus pais, meus irmãos e
minha esposa, pelo incentivo,
apoio e amor. À Bia, que
acabou de chegar ao mundo, e
já alegre nossas vidas.***

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo dom da vida e possibilidade de realização de mais essa etapa profissional.

Aos meus pais, João e Helena, pelo apoio, incentivo e amor, não apenas nesta etapa profissional, mas em toda vida.

Ao meus irmãos, Denis e Charles, pelo carinho e por estarem sempre ao meu lado em todos momentos.

Ao mestre Prof^o Cordeiro, pela dedicação na orientação do trabalho, amizade, e ensinamentos sobre os estudos em Engenharia Civil e Urbana.

Ao Prof^o Agnelli, pela co-orientação e viabilização na realização de alguns ensaios, além da grande amizade nesses anos de UFSCar.

Ao chefe Donato, pela oportunidade de realização do mestrado, pela amizade, e pela viabilização na realização das algumas análises laboratoriais.

À Sônia (secretaria PPGEU), pelo auxílio e dicas na regularização dos documentos.

Ao Walter Mariano, pelo grande auxílio nas análises de Densidade e Sedigrafia, com a dedicação e amizade de sempre.

Ao amigo Diego Coimbra, pela ajuda nas análises de Difração de Raios X.

Ao Marcelo Chinelatto, pelo valioso auxílio nas análises de Termogravimetria, e demais dicas na realização do trabalho.

Aos amigos Lourival e André Catóia (DEMa/ UFSCar), pela força de sempre!

Aos demais amigos e companheiros da UFSCar, em especial do CCDM, com quem convivo em harmonia e sincera amizade há anos.

Aos funcionários das ETAs que foram objetos de estudo da dissertação, que sem exceção foram atenciosos e sempre ficaram a disposição oferecendo auxílio.

Ao sogro e a sogra (João e Lúcia), pela constante presença em nossas vidas (na minha e principalmente na vida da Dani).

Ao meu amor, que sempre foi muito mais que esposa, sempre foi uma excelente companheira, amiga e a grande incentivadora de meus estudos. Conquistou-me desde o início com seu jeitinho, carinho e amor. Te Amo Daniela! E a nossa filha, que nasceu há pouco, mas já alegre nossas vidas e nos enche de orgulho. Nós te amamos Bia!

RESUMO

O sistema de tratamento de água convencional ou de ciclo completo (coagulação química, floculação, decantação, filtração, desinfecção, fluoretação e correção de pH) utilizado na maioria das Estações de Tratamento de Água (ETAs) do Brasil, transforma água inadequada para o consumo humano (água bruta de mananciais superficiais) em um produto que esteja em acordo com o padrão de potabilidade para distribuição à população. Neste sistema, gera-se resíduos nos decantadores (através da adição de coagulante químico), que denomina-se de “lodo de ETA”. Este material é constituído de fase sólida e fase líquida (a fase líquida subdividida em diferentes frações), e a água livre pode representar quantidade apreciável, dependendo da forma de limpeza dos decantadores. A remoção natural de água livre dos resíduos de ETAs pode ser realizada por sistemas naturais de redução de volume, destacando-se neste sentido os leitos de drenagem. O presente trabalho estudou as micropartículas constituintes dos resíduos sólidos gerados nos decantadores das ETAs de 03 cidades do interior do estado de São Paulo (que utilizam diferentes tipos de coagulantes químicos), sendo que este resíduo passou pelo processo de secagem, com a realização posterior de análises laboratoriais, avaliação dos resultados obtidos e avaliação no sentido de analisar uma forma de disposição final (ou reaproveitamento) adequado para este material. Concluiu-se que os lodos 1 e 3 possuem potencial de reutilização em produtos cerâmicos, pois possuem altos teores de Al e Si. Já o lodo 2, poderá ser utilizado em cerâmica vermelha (devido ao elevado percentual de Ferro).

Palavras- Chave: Micropropriedades, Resíduos Sólidos, Estação de Tratamento de Água, Lodo e Caracterização.

ABSTRACT

The conventional or life-cycle system for water treatment (chemical coagulation, flocculation, sedimentation, filtration, disinfection, fluoridation and pH correction) employed in most water treatment plants (WTP) in Brazil turns water unfit for human consumption (spring water and surface water) into a product that is in accordance with the drinking water guidelines for distribution to the population. In this system, the waste generated in the decanters by the addition of chemical coagulants has been termed "WTP sludge". This material consists of solid phase and liquid phase (this latter divided into distinct fractions), and free water may represent a considerable portion of it, depending on the cleaning of the sedimentation tanks. The natural removal of free water from WTPs can be performed by natural systems to reduce volume, in which task the drainage beds play a key role. This work studied the microcomponents of solid waste generated in the WTP decanters of 03 cities in the state of Sao Paulo which use distinct types of chemical coagulants. The samples passed through a drying process and subsequent laboratory analysis. In light of the results, suitable strategies for either disposal or reuse of the waste were considered. It was concluded that sludge from sources 1 and 3 have potential for reuse in ceramics, because they have high contents of Al and Si. On the other hand, sludge 2 may be used in red ceramics (due to the high percentage of Iron).

Keywords: Microproperties, Solid Waste, Water Treatment Plant, Sludge and Characterization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1	Esquema ilustrativo de uma ETA convencional e locais de geração dos resíduos.....	23
Figura 3.2	Foto ilustrativa da limpeza dos decantadores de ETA.....	26
Figura 3.3	Distribuição de tamanho de partícula de lodos de ETAs de três cidades do interior de São Paulo.....	39
Figura 4.1	Fluxograma: Metodologia de trabalho.....	47
Figura 4.2	Foto do Leito de Drenagem (experimental).....	49
Figura 4.3	Foto do material em processo de secagem- Lodo proveniente de tratamento que utiliza Cloreto de Polialumínio como coagulante químico.....	50
Figura 4.4	Foto dos decantadores da ETA 1.....	51
Figura 4.5	Foto dos decantadores da ETA 2.....	52
Figura 4.6	Foto dos decantadores da ETA 3.....	53
Figura 4.7	Foto do equipamento de MEV/ EDS utilizado.....	55
Figura 4.8	Foto do equipamento de Difração de Raios X.....	56
Figura 4.9	Foto do equipamento de Picnometria de Gás Hélio.....	57
Figura 4.10	Foto do equipamento de Sedigrafia.....	59
Figura 4.11	Foto Ilustrativa do equipamento de TG.....	60
Figura 5.1	Micrografia obtida por MEV do lodo 1 (Sulfato de Alumínio)- Aumento de 250 X.....	62

Figura 5.2	Micrografia obtida por MEV do lodo 1 (Sulfato de Alumínio)- Aumento de 1000 x.....	63
Figura 5.3	Micrografia obtida por MEV do lodo 2 (Cloreto Férrico)- Aumento de 250 x.....	65
Figura 5.4	Micrografia obtida por MEV do lodo 2 (Cloreto Férrico)- Aumento de 1000 x.....	66
Figura 5.5	Micrografia obtida por MEV do lodo 3 (Cloreto de Polialumínio)- Aumento de 250 x.....	68
Figura 5.6	Micrografia obtida por MEV do lodo 3 (Cloreto de Polialumínio)- Aumento de 1000 x.....	69
Figura 5.7	Comparação entre as micrografias obtidas por MEV dos 03 lodos. Lodo 1, com aumento de 250 x (a) e 1000 x (b). Lodo 2, com aumento de 250 x (c) e 1000 x (d). Lodo 3 com aumento de 250 x (e) e 1000 x (f).....	70
Figura 5.8	Difratograma do lodo 1- Obtido de tratamento que utiliza de Sulfato de Alumínio como coagulante químico.....	74
Figura 5.9	Difratograma do lodo 2- Obtido de tratamento que utiliza de Cloreto Férrico como coagulante químico.....	76
Figura 5.10	Difratograma do lodo 3- Obtido de tratamento que utiliza Cloreto de Polialumínio como coagulante químico.....	78
Figura 5.11	Ensaio de distribuição de tamanho de partícula do lodo 1 (utiliza Sulfato de Alumínio como coagulante).....	86

Figura 5.12	Ensaio de distribuição de tamanho de partícula do lodo 2 (utiliza Cloreto Férrico como coagulante).....	87
Figura 5.13	Ensaio de distribuição de tamanho de partícula do lodo 3 (utiliza Cloreto de Polilumínio como coagulante).....	88
Figura 5.14	Comparação dos gráficos de distribuição de tamanho de partículas.....	89
Figura 5.15	Gráfico da 1ª corrida da análise de TG- Lodo 1.....	91
Figura 5.16	Gráfico da 2ª corrida da análise de TG- Lodo 1.....	92
Figura 5.17	Gráfico da 3ª corrida da análise de TG- Lodo 1.....	93
Figura 5.18	Gráfico da 1ª corrida da análise de TG- Lodo 2.....	95
Figura 5.19	Gráfico da 2ª corrida da análise de TG- Lodo 2.....	96
Figura 5.20	Gráfico da 3ª corrida da análise de TG- Lodo 2.....	97
Figura 5.21	Gráfico da 1ª corrida da análise de TG- Lodo 3.....	99
Figura 5.22	Gráfico da 2ª corrida da análise de TG- Lodo 3.....	100
Figura 5.23	Gráfico da 3ª corrida da análise de TG- Lodo 3.....	101
Figura A1	Micrografia obtida por MEV do lodo 1 (Sulfato de Alumínio)- Aumento de 100 x.....	113
Figura A2	Micrografia obtida por MEV do lodo 1- ponto 2 (Sulfato de Alumínio)- Aumento de 1000 x.....	113
Figura A3	Micrografia obtida por MEV do lodo 2 (Cloreto Férrico)- Aumento de 100 x....	114
Figura A4	Micrografia obtida por MEV do lodo 3 (Cloreto de Polialumínio)- Aumento de 50 x.....	114

Figura A5 Micrografia obtida por MEV do lodo 3- ponto 2 (Cloreto de Polialumínio)-

Aumento de 1000 x..... 115

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Principais Constituintes dos Afluentes de ETAs Convencionais.....	25
Tabela 3.2	Densidade do floco e características de filtração de resíduos de várias ETAs.....	32
Tabela 4.1	Características da manta geotêxtil utilizada nos ensaios de desaguamento.....	49
Tabela 5.1	Características pertinentes às ETAs avaliadas.....	61
Tabela 5.2	Elementos químicos identificados por EDS no lodo 1.....	64
Tabela 5.3	Elementos químicos identificados por EDS no lodo 2.....	67
Tabela 5.4	Elementos químicos identificados por EDS no lodo 3.....	71
Tabela 5.5	Resumo dos elementos químicos identificados por EDS.....	71
Tabela 5.6	Análise Química Quantitativa do lodo 1.....	80
Tabela 5.7	Análise Química Quantitativa do lodo 2.....	81
Tabela 5.8	Análise Química Quantitativa do lodo 3.....	82
Tabela 5.9	Medidas de densidade real – Lodo 1.....	83
Tabela 5.10	Medidas de densidade real - Lodo 2.....	84
Tabela 5.11	Medidas de densidade real – Lodo 3.....	84
Tabela 5.12	Resumo dos resultados de densidades dos sólidos.....	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALAF	Água de lavagem de filtro
ASCE	American Society of Civil Engineers
AWWA	American Waters Works Association
CCDM	Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais
DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial
EDS	Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios- X
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
ICP	Espectroscopia de Emissão Atômica por Plasma Indutivo
IE	Instituto de Engenharia
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MON	Matéria Orgânica Natural
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos

SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO.....	16
2- OBJETIVOS.....	19
3- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
3.1- Aspectos Gerais.....	20
3.2- Levantamento do problema do lodo de ETA no Brasil.....	22
3.3- Sistema de tratamento convencional ou de ciclo completo.....	23
3.4- Geração de Resíduos	24
3.5- Características dos Resíduos Gerados em ETAs.....	27
3.6- Alternativas de tratamento dos resíduos de ETAs.....	29
3.7- Micropropriedades de resíduos de ETAs.....	30
3.7.1- Concentração de sólidos.....	31
3.7.2- Densidade.....	32
3.7.3- Viscosidade.....	33
3.8- Caracterização das Micropropriedades.....	33
3.8.1- Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura Acoplada a Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios-X (MEV/EDS).....	34
3.8.2- Estruturas Cristalinas.....	36
3.8.3- Difração de Raios X.....	36
3.8.4- Distribuição de Tamanho de partículas.....	38

3.8.5- Termogravimetria (TG).....	39
3.8.6 - Análise Química Quantitativa.....	40
3.9- Utilização dos resíduos sólidos gerados no sistema convencional de tratamento de água.....	41
3.10 - Seminário Nacional sobre Tratamento, Disposição e Usos benéficos de Lodos de Estações de Tratamento de Água.....	43
4- MATERIAIS E MÉTODOS.....	45
4.1- Generalidades.....	45
4.2- Coleta e preparo das amostras.....	48
4.3- Caracterização das micropropriedades dos lodos de ETAs.....	54
4.3.1- Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura Acoplada a Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios-X (MEV/EDS).....	54
4.3.2- Difração de Raios X.....	55
4.3.3- Análise Química Quantitativa.....	56
4.3.4- Densidade.....	57
4.3.5- Distribuição de tamanho de partículas.....	58
4.3.6- Termogravimetria (TG).....	59
5- RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	61
5.1- Resultados obtidos por MEV/ EDS.....	61
5.2- Resultados obtidos na Difração de Raios X.....	73
5.3- Análise Química Quantitativa.....	80

5.4- Densidade.....	83
5.5- Distribuição de tamanho de partículas.....	85
5.6- Resultados de Termogravimetria (TG).....	90
6- CONCLUSÕES.....	103
7- SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	105
8- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	107
ANEXOS.....	112

1- INTRODUÇÃO

Até a metade do século XX o Brasil era um País rural, e a partir do processo de industrialização houve um aumento na migração campo-cidade, transformando-o assim, em um País urbano. Hoje, grande parte da população vive nas cidades, e no caso do estado de São Paulo este índice chega a ser próximo ao de um País desenvolvido da Europa, por exemplo.

Porém, tudo isto tem uma conseqüência: crescimento desordenado (decorrente da falta de planejamento urbano), especulação imobiliária e a devassa relação de uso e ocupação do solo, resultando em cidades insustentáveis com vazios urbanos, e uma infraestrutura cada vez mais onerosa para o poder público, principalmente no que diz respeito à manutenção dessa infra-estrutura inadequada.

Nas áreas urbanas, os sistemas de abastecimento de água, de esgotamento sanitário, de resíduos sólidos e drenagem são serviços essenciais para a melhoria da qualidade de vida da população.

O sistema de tratamento de água de ciclo completo ou convencional, é composta pelas etapas de coagulação química, floculação, decantação, filtração, desinfecção, fluoretação e correção de pH, transformam água inadequada para o consumo em um produto que esteja em acordo com o padrão de potabilidade. A introdução de produtos químicos no processo, gera resíduos, sendo esses lançados no curso d' água superficial mais próximo.

O processo de potabilização utilizado nos sistemas de tratamento de água convencional pode ser considerado como industrial, e como todo processo industrial de transformação de matéria- prima, há geração de resíduos (nos decantadores, água de

lavagem dos filtros e lavagem da casa de química), que podem ser tóxicos aos seres humanos e ao meio ambiente.

Devido ao aumento de lançamentos de carga orgânicas (crescente degradação dos cursos da água de mananciais superficiais), que associado à formação de subprodutos potencialmente prejudiciais à saúde humana pela interação de Matéria Orgânica Natural (MON), coagulantes químicos e desinfetantes tem tornado uma das principais mudanças estratégicas no tratamento de água.

Considerando o fato que a água tratada será utilizada para fins potáveis em sistemas públicos de abastecimento ou para demais aplicações (setores industrial, comercial ou de serviços), é importante salientar que o grau de tratamento e a tecnologia recomendada variam em função da sua finalidade. As ETAs são unidades fundamentais para garantir que a qualidade da água seja compatível com o seu uso.

O sistema tradicional ou de ciclo completo de tratamento de água é utilizado pela maioria das Estações de Tratamento de Água (ETAs) do Brasil. Neste sistema é realizada a remoção das partículas finas em suspensão e em solução presentes na água bruta, e com a adição de produtos químicos que desestabilizam as partículas coloidais (fase dispersante e outra dispersa), forma-se assim flocos que serão removidos posteriormente.

A ação desses sais na formação dos flocos exige operações unitárias de rápida mistura para dispersão desse coagulante e câmaras de mistura lenta para a formação final do floco. A água decantada com parte de flocos que não sedimentam é encaminhada aos filtros para clarificação final. Assim, grande parcela dos flocos fica retida nos decantadores e outra parcela, nos filtros. A parcela gerada nos decantadores é definida como ***Iodos de Estação de Tratamento de Água.***

De acordo com a norma NBR 10004: 2004, os lodos (desidratados) são enquadrados como “resíduos sólidos”, e portanto, devem ser tratados e dispostos dentro dos critérios estabelecidos por essa norma.

A NBR 10004: 2004 define resíduos sólidos como: Resíduos nos estados sólido e semi- sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

Um dos objetivos de trabalhar com o resíduo sólido seria a redução de seu volume. Os resíduos gerados possuem muita umidade, estando de maneira geral, sob forma fluida.

2- OBJETIVOS

O objetivo geral da presente pesquisa foi investigar e caracterizar micropartículas constituintes dos resíduos sólidos gerados nos decantadores do sistema convencional ou de ciclo completo de tratamento de água.

Os objetivos específicos foram:

- Estudar a influência dos coagulantes químicos mais utilizados (no sistema convencional ou de ciclo completo) nas micropartículas dos resíduos sólidos.
- Caracterização dessas micropartículas.
- Analisar à luz de suas características, uma forma adequada de destinação desse resíduo sólido.

3- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1- Aspectos Gerais

O sistema de tratamento de água, quando utiliza o tratamento completo ou convencional (coagulação química, floculação, decantação e filtração), transforma água inadequada para o consumo humano em um produto que esteja em acordo com o padrão de potabilidade, utilizando para isso, processos e operações com a introdução de produtos químicos, gerando resíduos, sendo que muitas vezes estes resíduos são lançados no corpo d'água mais próximo (REALI, 1999).

A água destinada ao consumo humano deve atender a uma série de requisitos visando a proteção da saúde pública. Segundo a AWWA- American Water Works Association (1998), a água deve preencher condições mínimas para que possa ser ingerida ou utilizada para fins higiênicos e ser livre de organismos capazes de causar doenças e substâncias minerais ou orgânicas que podem produzir efeitos fisiológicos adversos. Ela deve ser esteticamente aceitável, livre de turbidez, cor aparente e gosto, e odor não objetáveis (FONTANA, 2004).

No Brasil, o padrão de potabilidade é estabelecido pela *Portaria nº 518 do Ministério da Saúde, de 2004*- “Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências”.

Em relação ao estudo e a preocupação dos lodos de ETA, Cordeiro (1993) fez um levantamento sobre a análise crítica e evolução do problema dos lodos de ETAs no período desde a década de 30 até o início da década de 90 (século XX). Relatou que as

preocupações iniciais, a partir da década 30, tiveram resultados efetivos no final da década de 40, com a formação do Comitê E.5-8 da AWWA, gerando levantamento, nos E.U.A. sobre o enfoque do problema. O estudo mostrou que no início da década de 50, 96% das ETAs lançavam direta ou indiretamente seus resíduos nos cursos d'água.

Até o final da década de 60, quase nada havia sido divulgado a respeito das características desses resíduos, fator primordial para que se possa avaliar seu impacto no meio ambiente. Ressalta-se, no entanto, que já em Gattes e Mcdermontt (1968) inicia-se o estudo das macropropriedades dos resíduos gerados em ETAs (BARROSO, 2007).

Nos anos 70, pode-se perceber, analisando-se a evolução do problema (nessa década), que a característica principal foi a desenvolvimento de pesquisas localizadas, na tentativa de atender, principalmente, as legislações específicas de cada local. Além disso, intensificou o envolvimento das universidades, institutos de pesquisas, empresas fabricantes e órgãos oficiais, no estudo do problema do lodo (CORDEIRO, 1993).

Na década de 80, notou-se que no Brasil, tecnicamente quase nada tinha sido realizado nesse campo, e que a fase de conscientização sobre o problema, ainda não havia se iniciado, a não ser por algumas ações isoladas.

Relatos indicam que somente a partir dos anos 90, abriu-se um campo maior de pesquisas e estudos nesta área (principalmente no Brasil), destacando-se avaliações mais detalhadas sobre os efeitos tóxicos desse resíduo ao meio ambiente. Nesta década, a publicação de estudos a respeito dos resíduos de ETAs expandiu além dos EUA e Europa, com diversos trabalhos realizados nos países asiáticos, na África e em alguns países da América Latina, com destaque para o Brasil.

3.2- Levantamento do problema do lodo de ETA no Brasil

No Brasil as preocupações maiores tem sido efetivadas através de estudos que enfocam, principalmente, a qualidade do produto final da ETA, não existindo estudos específicos que analisem a quantidade dos resíduos gerados, sua caracterização, os aspectos relativos ao provável impacto ambiental e métodos de tratamento e disposição (CORDEIRO, 1993).

Trabalhos científicos realizados sobre o tema citam exemplos de problemas do lodo de Estações de Tratamento de Água do País, como alguns exemplos a seguir.

Na ETA Boa Vista- SP, a ocorrência de floração de algas no manancial, picos de cor e elevação do teor de amônia, promove a **triplicação do consumo de produtos químicos**, e conseqüente aumento da geração de resíduos (FERNANDES, 2002).

Em Cubatão- SP, os órgãos de meio ambiente exigiram soluções para o problema de resíduos de ETA que trata cerca de 4 m³/ s. Nesse caso foram projetados sistemas de filtros- prensa de esteiras. Em Campinas, Franca e Piracicaba, no estado de São Paulo, e Curitiba, no Paraná foram construídos, recentemente, sistemas de tratamento de resíduos constituídos por adensamento por gravidade e centrífugas, porém praticamente todos apresentaram dificuldades operacionais (BARROSO, 2007).

Registra- se também, que em alguns sistemas do interior de São Paulo, a degradação da qualidade dos mananciais tem provocado a adição de auxiliares ou a mudança de coagulantes, tais como, a substituição de sulfato de alumínio por cloreto de polialumínio.

3.3- Sistema de tratamento convencional ou de ciclo completo

As estações de ciclo completo são definidas pela clássica seqüência dos processos de coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção, e apresentam um bom grau de eficiência na remoção de cor, turbidez e possíveis contaminantes (FONTANA, 2004).

A Figura 3.1 a seguir mostra o esquema de uma ETA convencional:

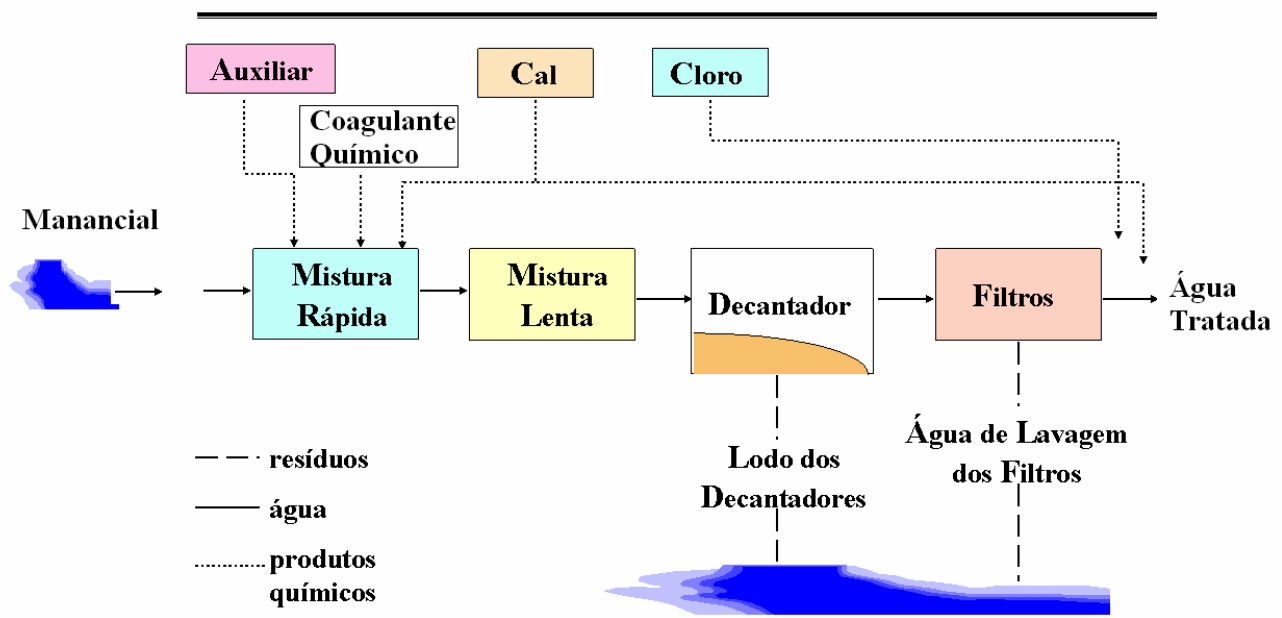


Figura 3.1 – Esquema ilustrativo de uma ETA convencional e locais de geração dos resíduos.

Fonte: Cordeiro (2001) adaptada.

Neste processo, a água bruta é captada em mananciais superficiais e são adicionados produtos químicos, tais como Sulfato de Alumínio ($Al_2(SO_4)_3$), Cloreto Férrico ($FeCl_3$) ou Cloreto de Polialumínio (PACl), com o objetivo de alterar sua qualidade para adequação ao consumo humano.

A utilização de coagulantes químicos provoca a desestabilização das partículas, sendo que para ocorrer essa reação são necessárias unidades de mistura rápida para dispersão do coagulante (coagulação) e câmaras de mistura lenta para a formação de flocos (floculação).

Por meio de operação realizada nos decantadores, é realizada a remoção dos flocos que foram formados na etapa anterior, ocorrendo assim a separação das fases sólido- líquido.

A água decantada com parte dos flocos que não sedimentam é encaminhada aos filtros para clarificação final. Assim, grande parcela dos flocos fica retida nos decantadores e outra parcela, nos filtros. Por meio dessas operações, a estação de tratamento de água produz água para abastecimento e gera resíduos: lodos acumulados nos decantadores e água de lavagem dos filtros (REALI, 1999).

3.4- Geração de Resíduos

Segundo Di Bernardo (1995), a coagulação química, entre os processos e operações unitárias de tratamento de água, merece destaque, pois influencia no desempenho dos processos subseqüentes (floculação- decantação- filtração), assim como nas características quantitativas e qualitativas dos resíduos gerados.

Considerando o sistema convencional de tratamento de água, através do esquema da Figura 3.1, pode- se conhecer os afluentes e efluentes de uma ETA. Na Tabela 3.1, apresenta- se uma discriminação dos principais materiais afluentes que participam do processo e os prováveis constituintes dos mesmos.

Tabela 3.1- Principais Constituintes dos Afluentes de ETAs Convencionais

Afluentes	Principais Constituintes
Água Bruta	Água, partículas em suspensão e solução (argilo- minerais, substâncias húmicas), algas, matéria orgânica, possíveis contaminates (defensivos agrícolas, fertilizantes), etc
Coagulante Primário- Sulfato de Alumínio	$Al_2(SO_4)_3 + 18 H_2O$, possíveis contaminantes (metais)
Cal	$Ca(OH)_2$, impurezas
Auxiliares de floculação ou de filtração (polímeros, sílica ativada, etc)	Polímeros Naturais ou sintéticos, monômeros não sintetizados no processo de produção, sílica, alumínio, etc

Fonte: CORDEIRO (1993)

Os resíduos gerados nas Estações de Tratamento de Água são resultantes dos processos e operações realizados nas mesmas, e são compostos por parte das impurezas contidas na água bruta, e nos produtos químicos utilizados e sub- produtos de reações ocorridas (CORDEIRO, 1993).

As ETAs convencionais de ciclo completo removem partículas finas, em suspensão e em solução, presentes na água. Durante o tratamento aplicam-se produtos químicos que desestabilizam as partículas coloidais e auxiliam na formação de flocos (hidróxidos metálicos) com tamanho suficiente para sua posterior remoção.

A remoção desses flocos é realizada nos decantadores (convencionais ou de alta taxa) com descarte em regime de batelada e semicontínuo, respectivamente. Parcela dos flocos que não sedimentam passam aos filtros para clarificação final. Assim, a estação de tratamento de água produz água para abastecimento e gera resíduos na forma de lodos acumulados nos decantadores e água de lavagem dos filtros. Como mencionado, a Figura 3.1 ilustra uma ETA convencional de ciclo completo típico e os respectivos locais de geração de resíduos (BARROSO 2007).

A Figura 3.2 mostra (de forma ilustrativa), a limpeza dos decantadores de uma Estação de Tratamento de Água, de ciclo completo ou convencional.



Figura 3.2 – Foto ilustrativa da limpeza dos decantadores de ETA

Fonte: Achon e Cordeiro (2003)

Um aspecto importante em relação as ETAs, e em especial à geração de resíduos, é a visão de gerenciamento. Achon (2008) menciona que a sistematização dos dados e conhecimento dos aspectos operacionais possibilitam a identificação dos intervenientes e dos impactos ambientais preponderantes em uma Estação de Tratamento de Água de ciclo de completo.

Algumas ferramentas gerenciais podem (e devem) ser utilizadas no sistema como um todo. No entanto, em relação a geração de resíduos, é relevante analisar a

possibilidade de utilização do conceito dos 3R's (redução, reuso e reciclagem) no controle dos rejeitos.

3.5- Características dos Resíduos Gerados em ETAs

Os lodos das ETAs têm características que dependem de vários fatores, e o estudo desse material deve incluir determinações de macropropriedades e micropropriedades, as quais possibilitarão que se definam possíveis impactos ambientais, métodos e equipamentos para tratamento e disposição final (CORDEIRO, 1993).

Os resíduos gerados em ETAs consistem em uma combinação entre fase sólida e líquida, sendo que a maior parcela destes resíduos corresponde à fase líquida. Assim, as características dos resíduos influenciam a remoção de água e conseqüentemente são essenciais para definir os sistemas de redução de volume e viabilizar seu gerenciamento.

Há diversos modelos que procuram definir as frações de água presentes nos lodos. Vesilind e Hsu (1997); Smollen e Kafaar (1994) apresentam um modelo geral, no qual definem os diferentes estados físicos da água, conforme pode ser verificado a seguir:

- **Água Livre:** Água não associada aos sólidos que pode ser facilmente separada por sedimentação gravitacional simples;
- **Água Intersticial ou capilar:** Água presente no interior ou intimamente ligada aos flocos. Esta água pode ser liberada quando há quebra do floco, mediante aplicação de força mecânica, tais como centrífugas;
- **Água Vicinal:** Associada às partículas sólidas por virtudes da estrutura molecular da água, pontes de hidrogênio;
- **Água de hidratação:** Água quimicamente ligada às partículas sólidas e pode ser liberada somente por destruição termoquímica das partículas;

Os colóides (partículas presentes na água a ser tratada) possuem tamanhos que variam de 1nm ($1\text{nm}=10^{-6}$ mm) e $1\mu\text{m}$ ($1\mu\text{m}=10^{-3}$ mm) e são incorporados aos flocos.

Essa característica faz com que os lodos tenham dificuldade de remoção da água livre (mediante espessamento e desaguamento).

Os metais, em especial o alumínio, exercem papel de destaque face às suas potenciais ações tóxicas. Ressalta-se a ausência de estudos que relacionem a ocorrência dos metais na fase líquida do lodo com as características de desaguamento. Encontram-se metais, sais diversos, plâncton e microrganismos, entre outras substâncias orgânicas e inorgânicas no resíduos gerados em ETAs.

Dentre as características dos lodos, algumas delas merecem maiores destaques, sendo:

- Forma, tamanho e distribuição das partículas;
- Resistência Específica;
- Filtrabilidade;
- Compressibilidade;

O conhecimento da forma e do tamanho das partículas do lodo e sua distribuição, é de fundamental importância para os estudos de redução do volume através da remoção de água (desidratação e secagem).

Em relação a resistência específica, considera-se que é a maior ou a menor resistência que um líquido pode enfrentar (dependendo de certas condições), para passar através de uma massa sólida.

Já a filtrabilidade representa a capacidade em permitir a passagem de água através de sua massa. Fisicamente, a filtrabilidade representa que quanto maior a resistência à passagem de água, através do lodo, menor é o fluxo d'água através do mesmo.

Segundo Novac e Langgdorf (1997), a compressibilidade é a variação da resistência específica do lodo com a pressão. A relação empírica que exprime a compressibilidade é dada pela Equação 3.1:

Equação 3.1:

$$\frac{\tau_2}{\tau_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{Sc} \quad (3.1)$$

τ_2 = Resistência específica à pressão P2 (m/ Kg);

τ_1 = Resistência específica a pressão P1 (m/ Kg);

Sc= Compressibilidade

3.6- Alternativas de tratamento dos resíduos de ETAs

Os resíduos de Estações de Tratamento de Água apresentam elevadas quantidades de água, e a escolha do tipo de unidade ou equipamento depende das características qualitativas e quantitativas do lodo, e da condição climática da ETA.

O desaguamento dos resíduos de ETA, de acordo com Grandin (1992), é uma operação física, mecânica ou natural, executada para reduzir o teor de umidade com conseqüente redução de volume refletindo na redução de custo de transporte para a destinação final e, principalmente, quando disposto em aterro, reduzir a quantidade de percolato (chorume).

Segundo Kawamura (2000), os métodos de desaguamento para permitir um manuseio adequado e tratamento dos resíduos para disposição final devem, ainda, considerar os controles ambientais exigidos pelas normas e regulamentos.

Os métodos utilizados para a redução de volume de resíduos mais conhecidos podem ser classificados como (PATRIZZI, 1998):

- **Naturais:** leitos de secagem e lagoas de lodo;
- **Mecânicos:** filtros à vácuo, filtros prensa de placas, centrífugas, filtros prensa de esteira (belt press);
- **Outros métodos pouco usuais:** congelamento e incineração;

Pode-se também salientar a remoção de água pelo método **térmico**.

Atualmente, existem outros métodos que visam reduzir o volume de resíduos, sendo eles: Tubo de Geotêxtil Tecido (Bag's), Sistema de Desaguamento Contínuo (tipo "Contipress") e o **Leito de Drenagem**.

O Leito de Drenagem pode ser considerado como a evolução dos leitos de secagem tradicionais, utilizados já há alguns anos para a remoção natural de água livre dos lodos gerados em ETAs e ETEs.

Esta evolução deve-se ao fato dos novos modelos dos leitos indicarem a diminuição do tempo de drenagem e melhoria na qualidade do drenado. Estas características foram pesquisadas por Cordeiro (1993, 2000), e as modificações feitas no modelo de leito de secagem tradicional, levaram o pesquisador a denominar este novo modelo como: **Leito de Drenagem**.

3.7- Micropropriedades de resíduos de ETAs

As variáveis conhecidas como **não tradicionais** permitem a visão mais abrangente das características dos resíduos de ETAs. Estas variáveis estão contidas nas micropropriedades e macropropriedades propostas por (DHARMAPPA et al. 1997). Outro aspecto importante reside na reologia dos lodos, importante como subsídio ao transporte de lodo.

As micropropriedades definem as características intrínsecas do lodo, e podem ser tratadas como características de suspensão. Por outro lado, as macropropriedades descrevem as características relativas à tratabilidade dos resíduos e são dependentes das micropropriedades. Dharmappa et al. (1997) relatam as principais micropropriedades consideradas na caracterização de resíduos de ETAs, conforme listado a seguir:

- Distribuição e tamanho dos flocos;
- Estrutura/ forma dos flocos;
- Tensão de cisalhamento do floco;

- Densidade;
- Concentração de sólidos;
- Viscosidade e temperatura;
- Tensão superficial;
- “Frações” de água;
- Composição Química*;
- Concentração de matéria orgânica*;
- pH e Alcalinidade*;
- Carga de partículas;

* *Caracterização de avaliação do potencial poluidor de resíduos de ETAs.*

As micropropriedades e macropropriedades devem ser determinadas e avaliadas para permitir a tomada de decisões quanto ao processo de remoção de água e possíveis reutilizações *dos resíduos de ETAs*, sendo que neste presente trabalho, serão estudadas as principais micropropriedades.

Deve-se salientar que as propriedades importantes para estudos de remoção de água por sistemas naturais podem diferir, enormemente, daquelas usadas em estudos por sistemas mecânicos ou térmicos de remoção. Acrescentam-se ainda, diferenças substanciais entre as diversas tecnologias de tratamento que compõem os sistemas mecânicos ou naturais de desaguamento (BARROSO, 2007).

3.7.1- Concentração de sólidos

Valores de concentração de sólidos relatados na literatura mostram que os resíduos de decantadores apresentam concentração de sólidos, com remoção não “contínua”, entre 6.000 e 30.000 mg/L, enquanto que a água de lavagem dos filtros apresenta valores na faixa de 300 mg/L segundo Di Bernardo (2005). A variação dos valores de concentrações de sólidos depende de inúmeros fatores, tais como:

- características da água bruta e adequação de tecnologia adotada para tratamento;
- tipo e dosagem de produtos químicos utilizados,
- concepção da ETA, tipo de decantadores e filtros e respectivos mecanismos de limpeza,
- eficiência dos processos e operações envolvidas,
- duração e intervalo de lavagens dos decantadores e filtros,
- problemas operacionais e deficiência de recursos humanos.

3.7.2- Densidade

A densidade é a relação entre sua massa de igual volume de água (e varia com o tamanho do floco). Quando a densidade decresce o tamanho do floco aumenta. Geralmente, os resíduos de ETAs apresentam valores de densidades entre 1,03 e 1,19 (g/cm³). ASCE e AWWA (1996) e Knocke e Wakeland (1983) demonstraram que o peso específico ou a densidade aparente podem ser determinantes à concentração de sólidos, obtidos após desaguamento, conforme pode-se observar na Tabela 3.2. Os autores citam ainda que o uso de polímeros como condicionantes não interferem significativamente na densidade do floco.

Tabela 3.2 – Densidade do floco e características de filtração de resíduos de várias ETAs

Tipo de lodo	Densidade da partícula		Teor de sólidos de torta (%)
	Valor médio (g/cm ³)	Faixa de variação (g/cm ³)	
Alúmen (baixa densidade)	1,005	1,002 – 1,008	7-9
Alúmen (alta densidade)	1,013	1,008 – 1,018	20-34
Lodo condicionado com alúmen	1,002	-	8

Fonte: Barroso (2007)

A densidade dos resíduos pode ser determinada pela Equação 3.2 sendo uma função inversa do teor de umidade do resíduo, válido, segundo Reali (1999) para concentrações de sólidos totais menores que 50% (em massa).

$$D = \frac{100}{\left[(ST\% / D_{\text{sólidos}}) + ((100 - ST\%) / D_{\text{água}}) \right]} \quad (3.2)$$

Em que:

$D_{\text{resíduo}}$ = densidade úmida do resíduo em kg/m^3 ;

$D_{\text{sólidos}}$ = densidade dos sólidos determinada experimentalmente ou adotada igual a 2500 kg/m^3

$D_{\text{água}}$ = densidade da água igual a 1000 kg/m^3 .

3.7.3- Viscosidade

Gates e McDermott (1968) mencionam que o lodo de ETA, a partir de uma determinada concentração, é um fluido não-Newtoniano, e sendo assim, sua viscosidade é referida como “viscosidade aparente”, pois varia com a concentração de sólidos.

O entendimento dessa característica indica subsídios para avaliação de perdas de cargas em tubulações (SLATTER, 2001) e assume importância fundamental nos estudos reológicos a serem apresentados posteriormente. Dessa forma, pode auxiliar na definição das possibilidades de coleta, transporte e bombeamento do resíduo a ser tratado (ASCE e AWWA, 1996).

3.8- Caracterização das Micropropriedades

Para a caracterização das micropropriedades dos resíduos sólidos gerados em decantadores de ETAs, pode-se utilizar de ferramentas para tal finalidade: as Análises Laboratoriais. A seguir serão apresentadas algumas técnicas pertinentes para a caracterização em questão.

3.8.1- Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura Acoplada a Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios-X (MEV/EDS)

Esta análise morfológica e qualitativa das partículas constituintes do lodo, é uma análise da superfície, arranjo físico e/ou morfologia das partículas constituintes de lodos de ETAs, sendo que a Microscopia Eletrônica de Varredura é responsável por estas características, bem como a Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios-X (EDS) analisa qualitativamente os elementos que compõem o lodo.

Gonçalves (2004), menciona que as várias técnicas de microscopia eletrônica são hoje as principais ferramentas disponíveis para o estudo da microestrutura fina e da morfologia de materiais. Suas principais versões são: microscopia eletrônica de transmissão (TEM), de varredura (SEM) e de transmissão com varredura (STEM).

As principais características dos microscópios eletrônicos de varredura são: *Resolução: 10 nm; Ampliação: 20-100.000 vezes; Observação: Superfície; Meio: Alto Vácuo ou baixo vácuo.*

Esse equipamento é geralmente utilizado para o estudo de estruturas superficiais ou subsuperficiais de amostras com dimensões relativamente grandes. As imagens têm alta profundidade de foco, o que significa obter diferentes relevos da superfície da amostra simultaneamente em foco. São imagens tridimensionais e, portanto, mais fáceis de interpretar que as imagens de projeção de microscopia de transmissão. O SEM também produz imagens de alta resolução, o que garante obter alta ampliação de detalhes próximos sem perda de nitidez. A preparação de amostras e a obtenção de imagens são relativamente simples. A combinação destas características justifica o fato do microscópio eletrônico de varredura ser hoje um dos equipamentos mais utilizados na pesquisa de materiais.

A coluna do microscópio consiste de uma fonte de elétrons, lentes eletromagnéticas e bobinas de varredura, operando sob vácuo. A fonte de elétrons, normalmente um tipo de filamento de tungstênio, produz elétrons que são acelerados a uma energia na faixa de 1 a 40 Ke V, com correntes entre 10^{-6} e 10^{-12} A. O diâmetro do feixe produzido diretamente pela fonte de elétrons convencional é muito grande para gerar uma imagem definida em alta ampliação. As lentes eletromagnéticas, em conjunto com os diagramas, são usados para reduzir o diâmetro do feixe e focalizá-lo sobre a superfície para formar uma imagem definida. As bobinas de varredura têm a função de defletir o feixe e controlar sua varredura sobre a superfície da amostra (GONÇALVEZ, 2004).

A imagem é formada coletando-se um sinal particular em função da posição do feixe sobre a amostra. No caso da detecção de elétrons secundários, que são os formadores mais comuns de imagens, é produzido um sinal elétrico a cada ponto varrido na superfície da amostra. Ao mesmo tempo, este sinal é varrido através da tela de um tubo de raios catódicos (CRT), enquanto o brilho deste sinal é modulado por um amplificador de corrente do detector. A varredura do feixe de elétrons sobre a amostra é, portanto, sincronizada com a varredura do sinal intensificado no CRT, preservando assim a correspondência espacial entre a amostra e a imagem.

Para a formação da imagem, a irradiação da amostra com elétrons provoca a emissão de elétrons secundários, elétrons retroespehados e de Raio X, além de outros sinais já mencionados. Os microscópios eletrônicos de varredura normalmente possuem detectores de elétrons secundários e retroespehados para obtenção de imagens, que são os sinais rotineiramente usados no estudo de materiais. Já os detectores de raios X são usados mais especificamente para análise química. As imagens de SEM são relativamente fáceis de interpretar.

3.8.2- Estruturas Cristalinas

A determinação das estruturas cristalinas dos resíduos está relacionada com a disponibilidade e mobilidade dos metais presentes. O uso de Difração de Raios X indica como os metais pesados encontram-se complexados (VAN VLACK, 1984) e geralmente podem complementar a análise qualitativa de um material obtido via MEV/ EDS.

Sólidos e líquidos podem apresentar-se estruturados, espacialmente organizados, sendo capazes de difratar um feixe de raios X. A esta regularidade estrutural denominamos cristais, comuns em substâncias/ produtos sólidos. Líquidos cristalinos também apresentam esta característica, como os cristais líquidos, e, mesmo substâncias não cristalinas podem apresentar algum grau de estruturação dando origem a bandas de difração não tão bem definidas (NETO, 2004).

Cristais podem atingir dimensões macroscópicas, visíveis sem o auxílio de lentes, mas apresentam uma identidade básica, a qual caracteriza o mesmo: uma célula unitária, a menor subcomponente de uma estrutura (rede) cristalina. Existem seis sistemas cristalinos básicos, cúbico, monoclinico, triclínico, hexagonal, ortorrômbico e tetragonal. Alguns destes sistemas apresentam pontos de rede adicionais (cúbico de corpo centrado, cúbico de face centrada).

3.8.3- Difração de Raios X

A Difração de Raios X utiliza o espalhamento coerente de radiação X, por estruturas organizadas (cristais), permitindo realizar estudos morfológicos em materiais, determinando sua estrutura cristalina e sua fração (percentual) cristalina. Quando estas ondas eletromagnéticas de alta frequência são selecionadas para alcançar um comprimento de onda menor que o espaçamento interpolar dos cristais, elas são difratadas de acordo com leis físicas. Os ângulos de difração nos permitem descrever a

estrutura dos cristais com alto grau de precisão e segurança. Podemos determinar espaçamentos interplanares e raios atômicos em metais com a precisão necessária.

A geração de raios X ocorre pelo bombardeamento de um alvo (fonte) com elétrons de alta energia. Ao incidir sobre o alvo, estes elétrons provocam a emissão de fótons de radiação X, com características (intensidade e comprimento de onda) dependentes do alvo que está sendo bombardeado. Como o feixe de elétrons que atinge o alvo emissor de raios X é de alta energia, elétrons próximos ao núcleo (camada K) são ejetados para regiões afastadas do mesmo, seguindo-se um reordenamento eletrônico a partir do espaço gerado pela ejeção daquele elétron. Assim, um elétron da camada L passa a ocupar a posição anteriormente ocupada pelo elétron da camada K, e ao fazer isto libera energia na forma de um fóton de radiação X (NETO, 2004).

A principal contribuição da técnica de Difração de Raios X será em fornecer uma análise mineralógica qualitativa, ou seja, qualifica os minerais que compõem um dado material.

Barroso (2007) apresenta os principais argilominerais potencialmente encontrados nos lodos de ETAs.

Caulinita – Silicato de alumínio hidratado, cuja fórmula é $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Quando puras, possuem baixa plasticidade e baixa resistência mecânica, e é um dos argilominerais mais comumente encontrados.

Gibbsita – mineral secundário formado de hidróxido de alumínio, com grande concentração de alumínio.

Montmorilinita – silicato de alumínio e/ou magnésio hidratado, com teores variáveis de óxidos de ferro, cálcio e magnésio. Potencialmente absorve água em quantidade considerável, o que o caracteriza pela elevada expansão e plasticidade.

Ilmenita - indica em sua composição a presença de titânio livre TiO_2 , o que confere resistência mecânica.

3.8.4- Distribuição de Tamanho de partículas

Essa característica pode ser avaliada sob dois aspectos. O primeiro refere-se ao citado por Lawler (1997), em que no tratamento de água, as unidades de coagulação e floculação são projetadas para promover mudanças na distribuição do tamanho de partículas e assim favorecer a remoção por sedimentação/flotação e filtração, e estão mais relacionadas com tamanho de partículas floculentas. Num segundo momento estão as partículas floculentas depositadas na forma de lodo de decantadores/flotadores e água de lavagem de filtro (ALAF) em que o tamanho dos flocos, mas principalmente das partículas “sólidas” é preponderante ao gerenciamento dos resíduos de ETA, (SANTOS et al., 2004).

As partículas em suspensão constituintes dos lodos de ETAs são estruturas tridimensionais, irregulares, polidispersas (de vários tamanhos) e com diferentes propriedades físico-químicas (SANTOS et al. 2004).

Barroso (2007), menciona que dentre as principais propriedades das partículas, a forma surge como uma importante fonte de interferência na determinação de tamanho de partículas. Dependendo da propriedade analisada, partículas de formas distintas podem ser representadas por um mesmo valor de diâmetro (mesma esfera equivalente) ou por diâmetros diferentes (diferentes esferas equivalentes).

Cordeiro (2001) também apresentou a distribuição de tamanho de partículas de resíduos de ETAs de três cidades e observou que entre 45% e 70% das partículas são menores que $10 \mu m$, conforme poderá ser observado na Figura 3.3.

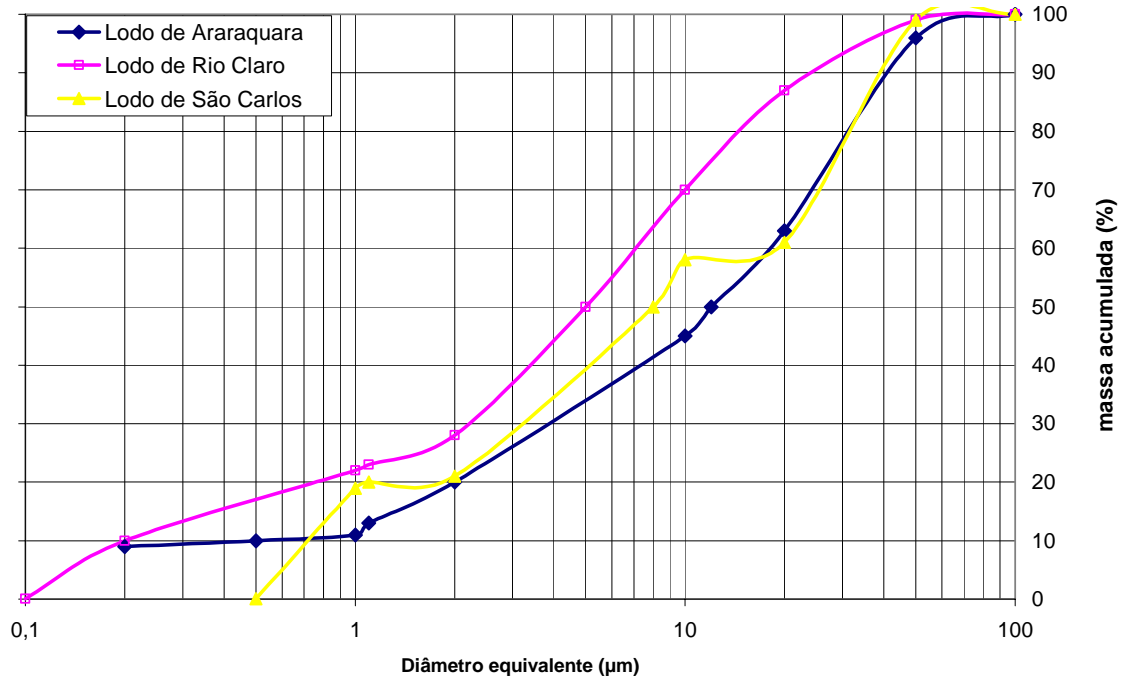


Figura 3.3- Distribuição de tamanho de partícula de lodos de ETAs de três cidades do interior de São Paulo.

Fonte: Cordeiro 2001

3.8.5- Termogravimetria (TG)

A Termogravimetria (TG) é definida como uma técnica termoanalítica na qual a variação da massa (perda ou ganho) de uma substância é medida em função da temperatura/ e ou tempo, enquanto a substância é submetida a uma programação controlada de temperatura. Uma pequena quantidade de amostra é colocada em um suporte de amostra, onde sua massa é constantemente monitorada por uma termobalança.

Segundo Matos e Machado (2004), esta técnica possibilita conhecer as alterações que o aquecimento pode provocar na massa das substâncias, permitindo estabelecer a faixa de temperatura em que elas adquirem composição química, fixa, definida e constante, a temperatura em que se começam a se decompor, acompanhar o andamento de reações de desidratação, oxidação, combustão, decomposição, etc.

Há três modos de TG que são comumente usados, sendo eles:

- **TG Isotérmico**, em que a massa da amostra é registrada em função do tempo a temperatura constante (por um certo intervalo de tempo);
- **TG quasi- isotérmico**, em que a amostra é aquecida a uma razão de aquecimento linear enquanto não ocorre variação de massa, a partir do momento em que a balança detecta a variação de massa, a temperatura é mantida constante até se obter um novo patamar, característico de massa constante para a amostra, e assim sucessivamente;
- **TG dinâmica ou convencional**, em que a amostra é aquecida ou resfriada num ambiente cuja temperatura varia de maneira pré-determinada, de preferência, à razão de aquecimento ou resfriamento linear.

O resultado da análise é mostrado sob a forma de um gráfico cuja abscissa contém os registros de temperatura (ou tempo) e a ordenada a massa residual, determinando assim a quantidade de materiais orgânicos e inorgânicos presente na amostra analisada.

3.8.6 - Análise Química Quantitativa

Após a identificação da natureza dos constituintes de um material, normalmente, é solicitado a determinação da quantidade de cada componente, ou de certos componentes presentes na amostra. Estas determinações estão no domínio da análise química, e dispõe-se de várias técnicas para conseguir a informação desejada.

Segundo Jeffery e colaboradores (1992), tomando em conta as informações que fornecem, os diferentes tipos de análises químicas podem ser classificados como segue:

- **Análise Elementar**, na qual se determina a quantidade de cada elemento na amostra, sem preocupação com os compostos realmente presentes.

- **Análise parcial**, que trata da determinação de certos constituintes da amostra.
- **Análise de constituintes- traço**, que é um caso especializado de análise parcial, na qual se procura determinar componentes especificados que estão presentes em quantidade muito pequena.
- **Análise completa**, quando se determina a proporção de cada componente da amostra.

As principais técnicas empregadas na análise quantitativa estão baseadas no desempenho quantitativo das reações químicas apropriadas, em medições elétricas apropriadas e na medição de certas propriedades ópticas.

Dentre as técnicas mais comuns de análise química quantitativa, destaca-se a Espectroscopia de Absorção Atômica, que envolve a atomização da amostra, e os métodos de emissão. Os métodos de emissão mais usuais são: Espectroscopia de Emissão, Fotometria de Chama e Fluorimetria.

3.9- Utilização dos resíduos sólidos gerados no sistema convencional de tratamento de água

De acordo com Hoppen e colaboradores (2005), resultados de experimentos realizados com concreto confeccionado a partir da incorporação do lodo de ETA centrifugado, permitem concluir que doses inferiores a 7% de lodo podem ser usadas em aplicações normais, ou seja, em situações que vão desde a fabricação de artefatos e estruturas pré- moldadas até a construção de pavimento em concreto, devido às resistências superiores a 20 MPa, porém toda as dosagens deverão se refeitas e estudadas caso a caso, para a aplicação prevista.

Sales e Cordeiro (2001), estudaram a imobilização da fase sólida de Lodos de Estações de Tratamento de Água em matrizes de argamassas e concreto, além de

verificarem a possibilidade da utilização conjunta de agregados artificiais advindos da reciclagem dos resíduos de construção e demolição.

Em relação à aplicação da imobilização dos resíduos sólidos de ETAs, Sales e Cordeiro (2001) verificaram que os valores obtidos para a resistência à compressão axial e para a absorção nos diversos traços estudados com adição de lodo sugerem a possibilidade de utilização desses concretos e argamassas para diversas aplicações não-estruturais na construção civil (produção de contrapisos, produção de argamassas para assentamento de componentes, confecção de blocos de concreto não-estrutural, guias, sarjetas, entre outros), permitindo o atendimento dos requisitos mínimos inerentes ao desempenho mecânico e à durabilidade. Chamaram atenção também sobre a importância da avaliação da viabilidade financeira para aplicação dos materiais.

Teixeira et al. (2006) verificaram a adição de lodo em massa cerâmica para produzir tijolos e telhas, utilizando lodo de coletados em 02 épocas distintas, sendo os floculantes utilizados em cada época o Sulfato de Alumínio e o Cloreto Férrico. Concluíram que é possível adicionar 10% do lodo onde utilizou o Sulfato de Alumínio como coagulante e 20% do lodo que utilizou o Cloreto Férrico, para temperaturas de queima a partir de 950 °C.

Morita e colegas (2008), estudaram o uso de lodo de ETA em cerâmica vermelha. Neste trabalho, mencionaram que a utilização deste resíduo sólido na indústria cerâmica traz benefícios:

- Aos ceramistas, uma vez que possibilita o aumento da vida útil da jazida e a redução dos custos de recomposição de áreas com vegetação nativa;
- À concessionária de serviços de saneamento, por esta ser uma solução que não transfere apenas o problema, como por exemplo, o lançamento nas ETEs;

- Ao meio ambiente, pela redução da supressão da vegetação, devido à atividade extrativa; pela minimização da emissão de fluoretos e pela redução da poluição aquática causada pelo lançamento de lodos e ETAs nos corpos d' água.

Também, existe a possibilidade de encaminhar este material à estação de tratamento de esgoto (ETE), sendo que essa não é a situação mais indicada. É importante salientar, que essa não é uma forma de disposição final, pois ocorre apenas a transferência desse material, uma vez que o lodo é predominantemente inorgânico, ou seja, não degrada na ETE.

3.10 - Seminário Nacional sobre Tratamento, Disposição e Usos benéficos de Lodos de Estações de Tratamento de Água

Um fato importante e pioneiro para o setor ocorreu no período de 17 a 19 de Setembro de 2008. O Instituto de Engenharia (IE) de São Paulo/ SP, demais Associações e Sindicatos ligados diretamente à área, realizaram na cidade de São Paulo o "*Seminário Nacional sobre Tratamento, Disposição e Usos Benéficos de Lodos de Estações de Tratamento de Água*". Estiveram presentes palestrantes reconhecidos nacionalmente como referências nas áreas de tratamento de água e de esgoto; concreto; geotecnia e tecnologia cerâmica, além de jovens cientistas de diversas universidades do País, e profissionais que trabalham nas empresas projetistas e concessionárias de serviços de saneamento.

Entre algumas das conclusões do Seminário, em linhas gerais é possível verificar que o setor de saneamento ambiental precisa ter uma visão mais abrangente do sistema, ou seja, não é possível priorizar somente a produção de água potável, sem entender o sistema com uma indústria. Ainda, em linhas gerais, foi concluído também que há uma

tendência internacional em se reduzir a quantidade de lodo produzido nas ETA's, utilizando-se de ferramentas como a reciclagem e o reuso.

Já em relação ao tratamento de lodo, foi possível concluir no referido Seminário, que é necessário conhecer melhor suas características (**micro** e macropropriedades), para projetar as unidades de adensamento, condicionamento e desaguamento. É necessário também mudar a antiga concepção dos projetos, de tal forma a priorizar a remoção mecanizada do lodo dos decantadores, em detrimento da manual. Para ETA's de pequeno e médio portes, é importante salientar uma tecnologia totalmente nacional, que são os leitos de drenagem.

Discutiu-se também sobre o lançamento de lodos em ETE's, e as possibilidades de uso do lodo na cerâmica, a disposição em aterro, a regeneração de coagulantes e a possibilidade de utilização desse material no concreto.

No Seminário Nacional sobre Tratamento, Disposição e Usos Benéficos de Lodos de Estações de Tratamento de Água, levantou-se o fato que o lançamento de lodo de ETA em sistema de coleta de esgoto deve ser diluído antes de ser descartado na rede de esgoto, de tal forma a atender o limite de 20 mL/ L de sólidos sedimentáveis, estabelecido pela norma Brasileira NBR 9.800/ 87.

4- MATERIAIS E MÉTODOS

4.1- Generalidades

Os materiais e os procedimentos metodológicos utilizados no desenvolvimento da pesquisa, foram definidos a partir da identificação das necessidades, estudo do tema, do problema, e na avaliação da solução desse problema.

Para estudar as micropropriedades dos lodos de ETAs, foram coletadas amostras de lodos (diretamente nos decantadores das ETAs), que utilizam distintos coagulantes químicos.

As etapas definidas para a realização do trabalho foram:

- A- Revisão bibliográfica: Consistem em verificar a síntese da bibliografia fundamental pertinente ao estudo;
- B- Definição das ETAs: As estações de tratamento de água definidas para o trabalho foram: ETA 1, ETA 2 e ETA 3, todas localizadas no interior do estado de São Paulo;
- C- Caracterização das ETAs: Levantamento do manancial onde a água bruta é captada, do produto químico utilizado e do destino final do lodo;
- D- Coletas das Amostras: As amostras foram coletadas diretamente nos decantadores das 03 ETAs que são objetos de estudo do presente trabalho. Devido ao fato de tratar-se de matéria praticamente inorgânico (lodo após a secagem), não houve necessidade de preservar as amostras;

- E- Análises laboratoriais: Foram definidas as seguintes análises: Microscopia Eletrônica de Varredura Acoplada a Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios-X (MEV/EDS), Difração de Raio- X, Análise Química Quantitativa, Sedigrafia (distribuição de tamanho de partículas), Densidade e Termogravimetria (TG). As micropropriedades a serem avaliadas podem ser comparadas com o que foi mencionado por Dharmappa et al. (1997) no item 3.7.
- F- Suficiente?: Caso seja detectado que a caracterização é suficiente para dar continuidade ao trabalho, será realizada então a etapa G do fluxograma. Em caso negativo, o trabalho será novamente avaliado, e retornará para a etapa de coleta de amostras.
- G- Disposição: Será verificada possibilidades de disposição final adequada do lodo.

O fluxograma apresentado na Figura 4.1, indica a metodologia utilizada no trabalho.

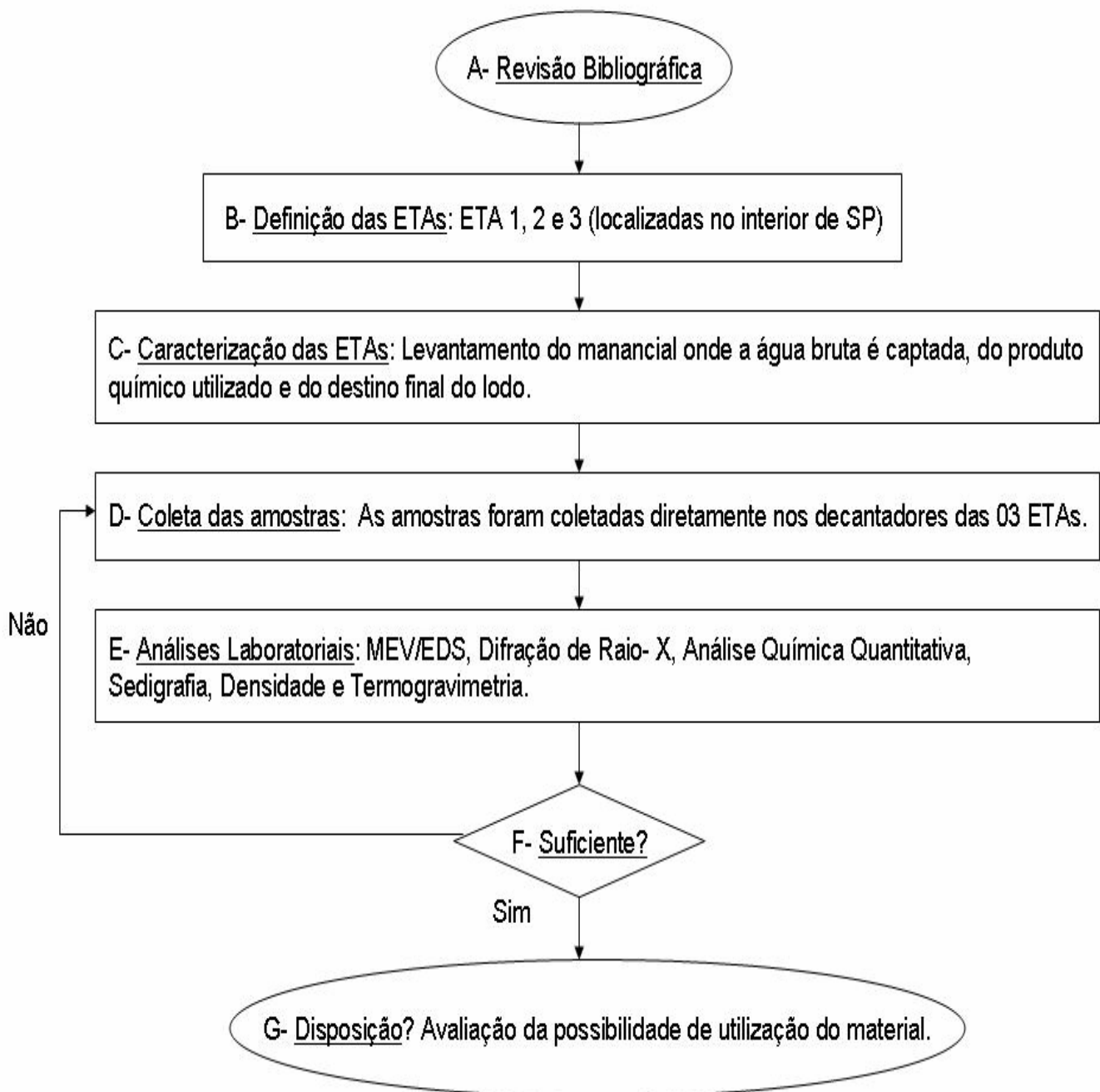


Figura 4.1- Fluxograma: Metodologia do trabalho

4.2- Coleta e preparo das amostras

Foram coletadas as amostras de lodos diretamente nos **decantadores** das 03 ETAs, objetos de estudos desse trabalho, e os lodos foram identificados da seguinte forma:

- **Lodo 1:** Corresponde ao resíduo sólido gerado e coletado diretamente no decantador da ETA 1, que utiliza Sulfato de Alumínio como coagulante químico;
- **Lodo 2:** Corresponde ao resíduo sólido coletado na “descarga” dos decantadores da ETA 2. Neste tratamento utiliza-se o Cloreto Férrico como coagulante químico;
- **Lodo 3:** Corresponde ao resíduo sólido gerado e coletado diretamente no decantador da ETA 3, sendo este lodo é oriundo de tratamento que utiliza Cloreto de Polialumínio como coagulante químico;

Para a coleta das amostras, foram utilizados recipientes de 18 litros, e as amostras retiradas diretamente dos decantadores (ETAs 1 e 3), coletando-se dessa forma aproximadamente 36 litros de cada amostra. Para a ETA 2, utilizou-se também recipientes de 18 litros, mas o material foi coletado diretamente na “descarga” que é realizada periodicamente nos decantadores dessa ETA.

Após a coleta, realizou-se um processo visando a remoção de água de forma natural, ou seja, utilizando-se um “Leito de Drenagem” (experimental).

No presente trabalho, as amostras ficaram expostas diretamente às ações de intempéries (Leito de Drenagem) no espaço existente entre o Departamento de Engenharia Civil e o AT5 da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), conforme poderá ser observado na Figura 4.2.



Figura 4.2- Foto do Leito de Drenagem (experimental)

A manta geotêxtil (Figura 4.2) utilizada para a realização do processo de remoção de água das amostras de lodos, tem densidade superficial de 600 g/ m^2 , e apresentou melhor desempenho de drenagem nos experimentos realizados por Cordeiro (2001), Achon e Cordeiro (2003), e Fontana (2004). As características da manta são apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1- Características da manta geotêxtil utilizada nos ensaios de desaguamento

Características da manta	Unidades	600 g/ m^2
Espessura	mm	4,5
Porosidade	%	< 90
Permeabilidade normal	cm/s	3×10^{-4}
Abertura	μm	60

A Figura 4.3 mostra o lodo (que é oriundo de tratamento que utiliza o Cloreto de Polialumínio), e que ficou retido na manta geotêxtil.



Figura 4.3- Foto do material em processo de secagem- Lodo proveniente de tratamento que utiliza Cloreto de Polialumínio como coagulante químico

A estação de tratamento de água, denominada de ETA 1, é do tipo convencional e utiliza o Sulfato de Alumínio como coagulante químico, além de cal para a “correção” da alcalinidade. Em relação ao tratamento do lodo, esta ETA não possui este tipo de processo.

As etapas presentes na ETA 1 são: coagulação química (com adição de cal após a coagulação), floculação, decantação convencional e filtração.

A Figura 4.4 mostra de forma ilustrativa os decantadores da ETA 1.



Figura 4.4 – Foto dos decantadores da ETA 1.

A ETA 2 também é do tipo convencional, e utiliza Cloreto Férrico como coagulante primário, além de cal micropulverizada para “correção” da alcalinidade. A referida ETA encaminha o lodo para a rede de Esgoto.

As etapas presentes na ETA 2 são: coagulação química (com adição de cal micropulverizada após a coagulação), floculação, decantação convencional e filtração.

A Figura 4.5 indica de forma ilustrativa os decantadores da ETA 2



Figura 4.5 – Foto dos decantadores da ETA 2.

Já a ETA 3, é do tipo convencional também, utiliza Cloreto de Polialumínio como coagulante químico, mas faz um processo de pré-oxidação (com adição de cloro antes da adição do coagulante químico). Após a adição do Cloreto de Polialumínio no sistema, é utilizado ainda o carvão ativado (em suspensão), sendo esta etapa realizada antes da floculação. A ETA 3 também não possui processo para tratamento do lodo.

As etapas presentes na ETA 3 são: pré-oxidação (cloro), coagulação química (com adição de carvão ativado após a coagulação), floculação, decantação convencional e filtração.

A Figura 4.6 mostra os decantadores da ETA 3.



Figura 4.6 – Foto dos decantadores da ETA 3.

A caracterização das micropartículas constituintes dos lodos foi realizada por meio de técnicas laboratoriais, conforme descrito na etapa E da Figura 4.1. As amostras foram separadas (após secagem), sendo que o material utilizado foi aquele que ficou **retido** na manta geotêxtil. As amostras foram separadas nas quantidades adequadas para realização de cada uma das análises laboratoriais.

Após a caracterização das amostras, verificou a possibilidade de incorporação deste material em produtos industrializados, sendo que o principal foco é a avaliação da possibilidade de incorporação do lodo em matriz de concreto e massas cerâmicas.

4.3- Caracterização das micropropriedades dos lodos de ETAs

A caracterização das micropropriedades das amostras de lodos foram realizadas a partir das análises laboratoriais, sendo elas:

- Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura Acoplada a Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios-X (MEV/EDS);
- Difração de Raios X;
- Análise Química Quantitativa;
- Densidade;
- Distribuição de tamanho de partículas via sedigrafia;
- Termogravimetria (TG);

4.3.1- Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura Acoplada a Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios-X (MEV/EDS)

O equipamento utilizado foi um Microscópio Eletrônico de Varredura- MEV, modelo LEO Stereoscan 440. A identificação semi- quantitativa das amostras foram realizadas via detector de Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raio- X (EDS), modelo Oxford eXL, sendo este acoplado ao MEV. Os ensaios foram realizados no Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais da Universidade Federal de São Carlos- CCDM/ UFSCar.

A Figura 4.7 mostra a foto do equipamento de MEV/ EDS utilizado.



Figura 4.7- Foto do equipamento de MEV/ EDS utilizado.

4.3.2- Difração de Raios X

A amostra utilizada em pó, após secagem natural, é colocada e fixada no equipamento. O aparelho é acionado com potência de 40 KV e 25 mA, e o difratograma é registrado no contador de Geiger.

Utilizou-se o Difratorômetro de Raios X- RIGAKU, modelo Geigerflex equipado com tubo de alvo de cobre, sendo que a radiação $K\alpha$ do cobre tem comprimento de onda de $1,54056 \text{ \AA}$. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE) do Departamento de Engenharia de Materiais, da Universidade Federal de São Carlos- DEMa/ UFSCar.

A Figura 4.8 mostra o equipamento de Difração de Raios X utilizado.



Figura 4.8 - Foto do equipamento de Difração de Raios X.

4.3.3- Análise Química Quantitativa

Foi realizada a técnica de Espectroscopia de Emissão Atômica por Plasma Indutivamente Acoplado e Fotometria de Chama. Pela centelha de uma bobina Tesla, o plasma é disparado, e depois é auto-sustentável. O plasma tem uma forma característica toroidal e a amostra é introduzida na parte central do toro.

Para a realização das análises de emissão atômica por plasma, as amostras foram preparadas da seguinte forma: Realizou nas amostras a digestão nítrico-fluorídrica em frasco fechado pressurizado, com aquecimento por Microondas.

O equipamento utilizado foi o IRIS- AP- Thermo Jarrell Ash- Digmed. Os ensaios foram feitos no Laboratório Biominerais, localizado na cidade de Campinas.

4.3.4- Densidade

Esta análise foi realizada no equipamento Accupyc 1330, nº de série 2010, da marca micromeritics, para conhecer a densidade real das amostras. A medida foi realizada através da técnica de picnometria de gás hélio, que utiliza o princípio de Arquimedes de deslocamento de fluidos.

A determinação da densidade real foi feita também para proporcionar condições de realizar o ensaio de distribuição de tamanho de partículas (Sedigraph). Os ensaios foram realizados no laboratório de cerâmica, DEMa- Universidade Federal de São Carlos.

A Figura 4.9 mostra a foto do equipamento de Picnometria de Gás Hélio utilizado no trabalho.



Figura 4.9- Foto do equipamento de Picnometria de Gás Hélio.

4.3.5- Distribuição de tamanho de partículas

A análise via sedigrafia foi feita no equipamento Sedigraph- modelo 5000 D, marca micromeritics (particle size analyzer) localizado no laboratório de cerâmica do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos.

A técnica exige que o material esteja em suspensão diluída (1% de sólidos por volume). Para isso, as amostras foram secas naturalmente, e após a determinação da densidade das partículas, pesam-se aproximadamente 3 g de resíduo e adiciona-se 20 mL de água. Utiliza-se o equipamento de ultra-som para desagregação de possíveis formações de aglomerados. A suspensão é então inserida no equipamento Sedigraph, que reúne um béquer, agitador magnético, uma cela onde as partículas se sedimentam e uma fonte de Raios X.

O equipamento determina partículas com tamanhos entre 100 μm e 0,2 μm , mas como a técnica baseia-se na lei de Stokes, o ensaio não é então capaz de determinar adequadamente a sedimentação de partículas abaixo de 1 μm .

A Figura 4.10 mostra a foto do equipamento de Sedigrafia utilizado.



Figura 4.10- Foto do equipamento de Sedigrafia.

4.3.6- Termogravimetria (TG)

A termogravimetria foi feita para medir a perda de massa em função da temperatura, e assim verificar os percentuais de componentes inorgânicos e orgânicos presentes nos lodos. Foram obtidas curvas termogravimétricas (TG) e sua derivada em função da temperatura (DTG) dos lodos de ETA, sendo que devido à quantidade de amostra utilizada em cada ensaio (aproximadamente 10 mg), as análises de Termogravimetria foram realizadas em duplicata. Utilizou-se as seguintes condições nos ensaios:

- Temperatura Inicial: 30 °C;
- Temperatura Final: 900 °C;
- Taxa de Aquecimento: 20 °C/ minuto;
- Atmosfera utilizada: Nitrogênio (N₂);
- Vazão do Nitrogênio: Na ordem de 50 mL/ min;
- Suporte da amostra: Alumina;

Os ensaios de Termogravimetria foram realizados no analisador térmico TGA Q 500 (TA Instruments) do Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais da Universidade Federal de São Carlos- CCDM/ UFSCar.

A Figura 4.11 ilustra a foto do equipamento de Termogravimetria.



Figura 4.11- Foto ilustrativa do equipamento de TG.

5- RESULTADOS E DISCUSSÕES

As características pertinentes as ETAs analisadas serão reportadas conforme descrito na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Características pertinentes às ETAs avaliadas

ETA	Manancial(is)	Coagulante Químico	Destino Lodo	Vazão (L/s)
ETA 1	02 mananciais superficiais com captação à montante.	Sulfato de Alumínio- $Al_2(SO_4)_3$	Manancial superficial à jusante da ETA	500
ETA 2	02 mananciais superficiais com captação à montante	Cloreto Férrico- $FeCl_3$	Encaminhado à rede de Esgoto	500
ETA 3	03 mananciais superficiais com captação à montante	Cloreto de Polialumínio- PACl	Manancial superficial à jusante da ETA	240

5.1- Resultados obtidos por MEV/ EDS

A análise de Microscopia Eletrônica de Varredura Acoplada a Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios-X (MEV/ EDS) proporcionou a geração de micrografias das amostras de lodo após a secagem e a identificação semi- qualitativa dos elementos químicos presentes. Nas Figuras 5.1 a 5.6 e nas Tabelas 5.2 a 5.5, serão apresentados os resultados obtidos por esta técnica.

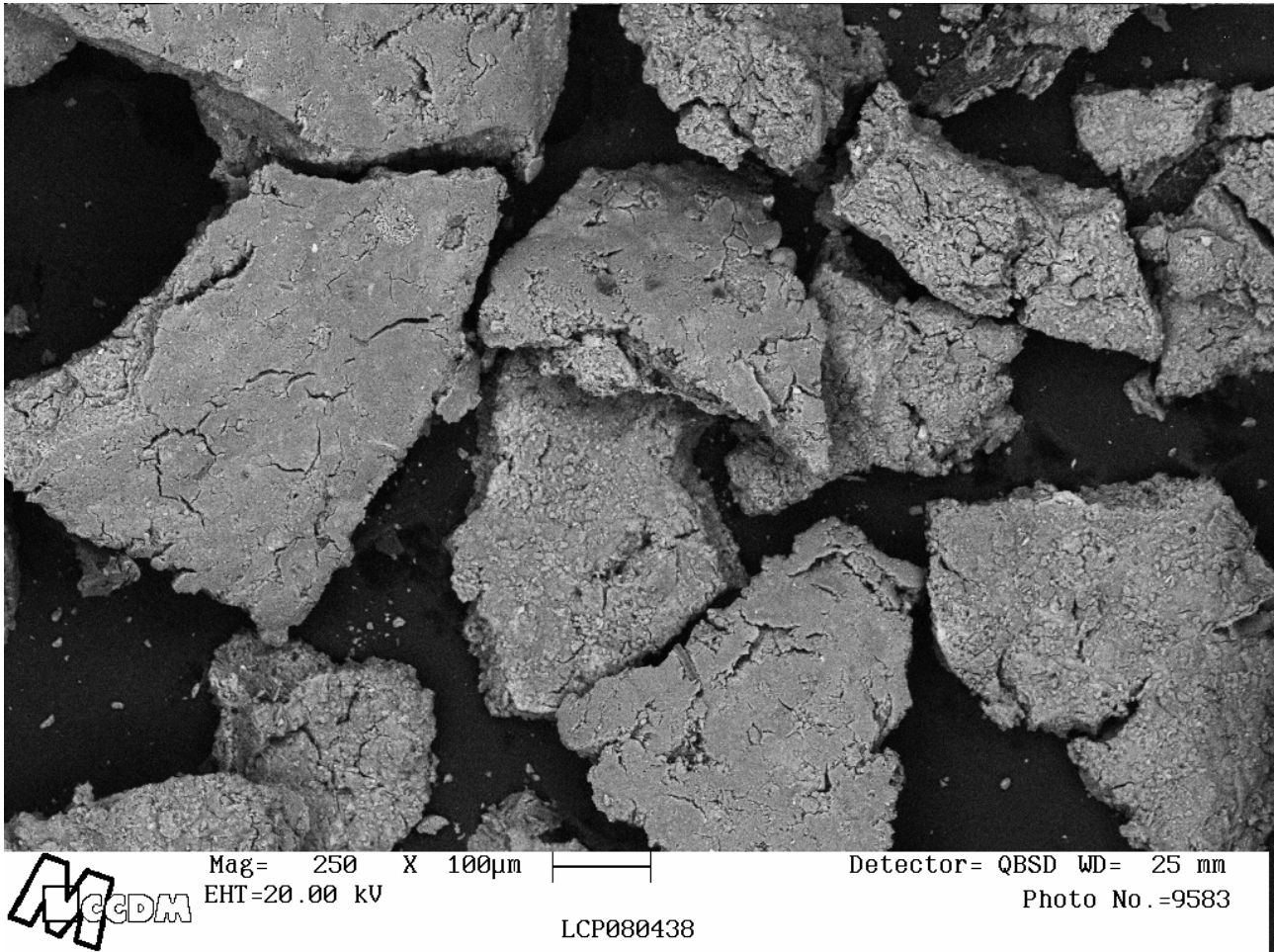


Figura 5.1- Micrografia obtida por MEV do lodo 1 (Sulfato de Alumínio)- Aumento de 250 x

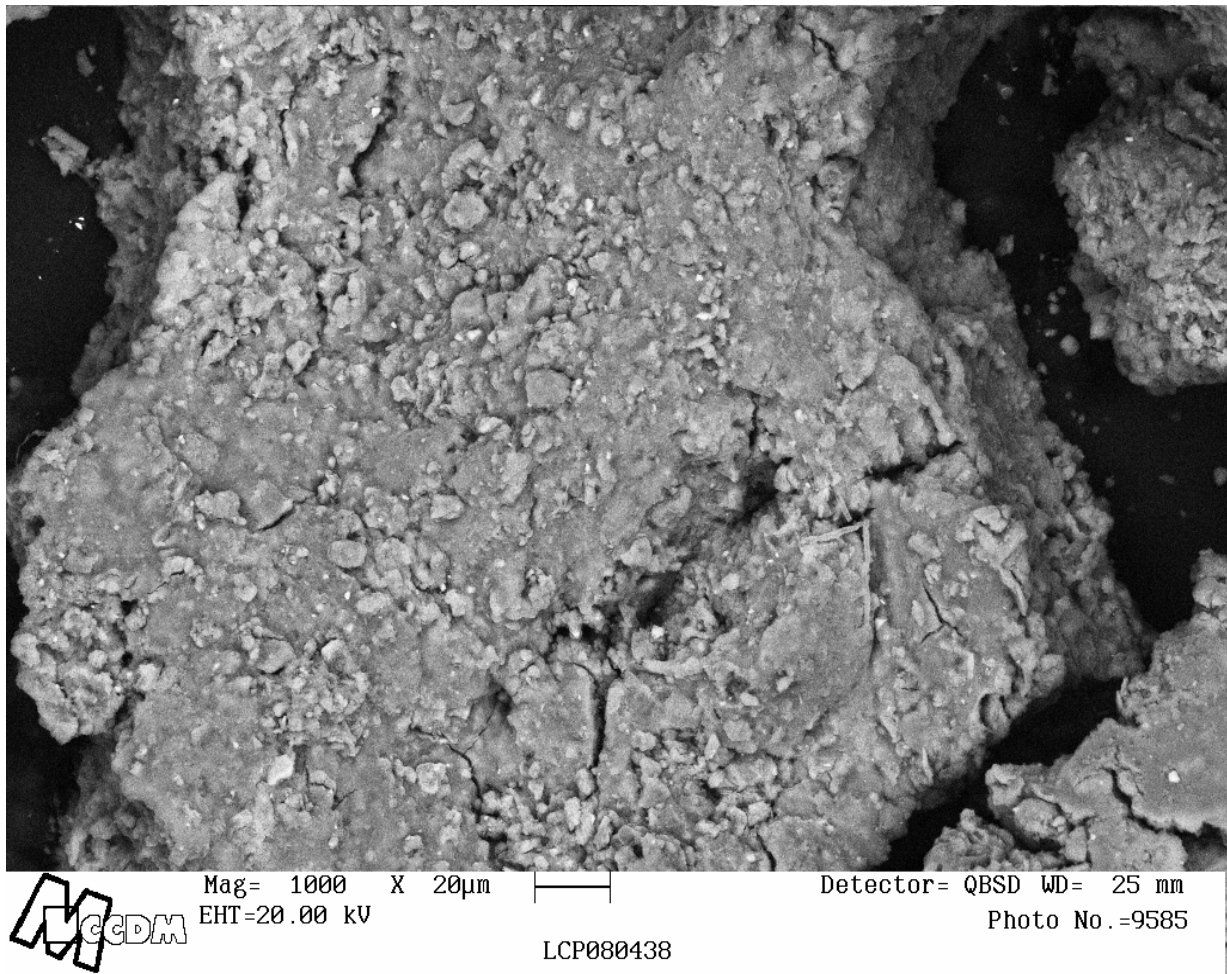


Figura 5.2- Micrografia obtida por MEV do lodo 1 (Sulfato de Alumínio)- Aumento de 1000 x

A partir das Figuras 5.1 e 5.2, observa-se que a morfologia do lodo 1 possui superfície com aspecto irregular, com vazios e aberturas. Não há presença evidente e em grande quantidade de partículas com diâmetros definidos, e portanto, as dimensões variam.

A análise semi-quantitativa via EDS do lodo 1 está apresentado na Tabela 5.2, apresentada a seguir.

Tabela 5.2: Elementos químicos identificados por EDS no lodo 1

Região da Amostra	Elementos Químicos		
	Majoritários	Minoritários	Traços
*Geral	Al, Si, Fe	C, O, Ca, Ti	Mn, K, Mg

* Não foi identificada uma partícula em específico, ou seja, o EDS foi realizado nas Figuras 5.1 e 5.2 como um todo.

Na Tabela 5.2 pode-se observar que os elementos Al, Si e Fe estão presentes de forma predominante no lodo 1. A composição majoritária do Alumínio concorda com o que foi relatado por alguns autores, como Dias (2002) e Barroso (2007), que citam predominância de argilominerais, tais como a caulinita e gibsita (compostos de Al) e quartzo (compostos de Si), sendo que o referido lodo é oriundo de tratamento que utiliza como coagulante o Sulfato de Alumínio.

Obs.: Nas análises via EDS (Tabelas 5.2, 5.3 e 5.4), estão sendo considerados no presente trabalho como elementos “majoritários” aqueles que foram detectados acima de 10%. Os elementos “minoritários” são aqueles presentes na faixa de 1,0 % a aproximadamente 9,9%. Os elementos “traços” são considerados os detectados na faixa de 0,1% a aproximadamente 0,9%.

As Figuras 5.3 e 5.4 apresentam as micrografias obtidas via MEV para o lodo 2.

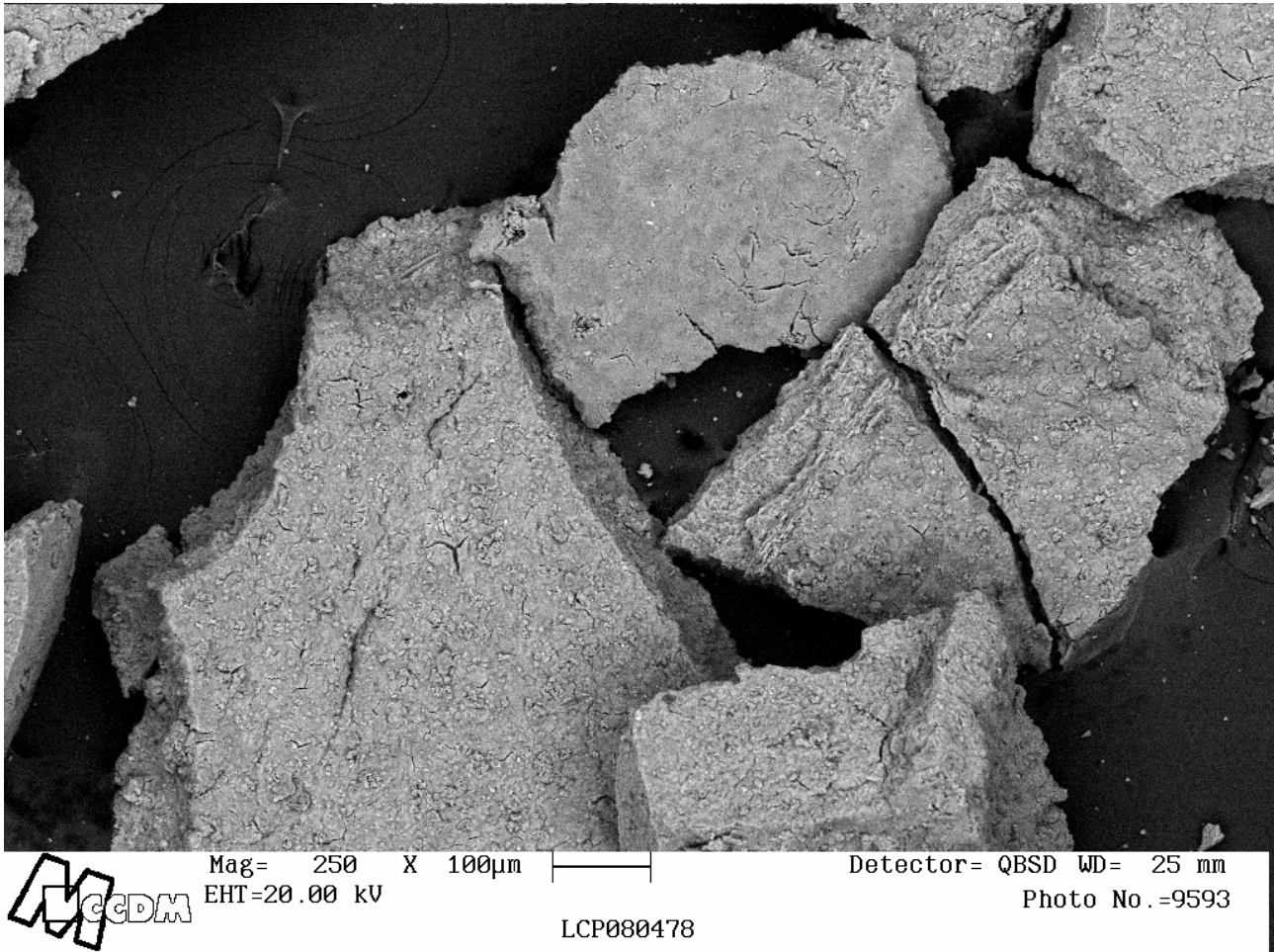


Figura 5.3- Micrografia obtida por MEV do lodo 2 (Cloroeto Férrico)- Aumento de 250 x

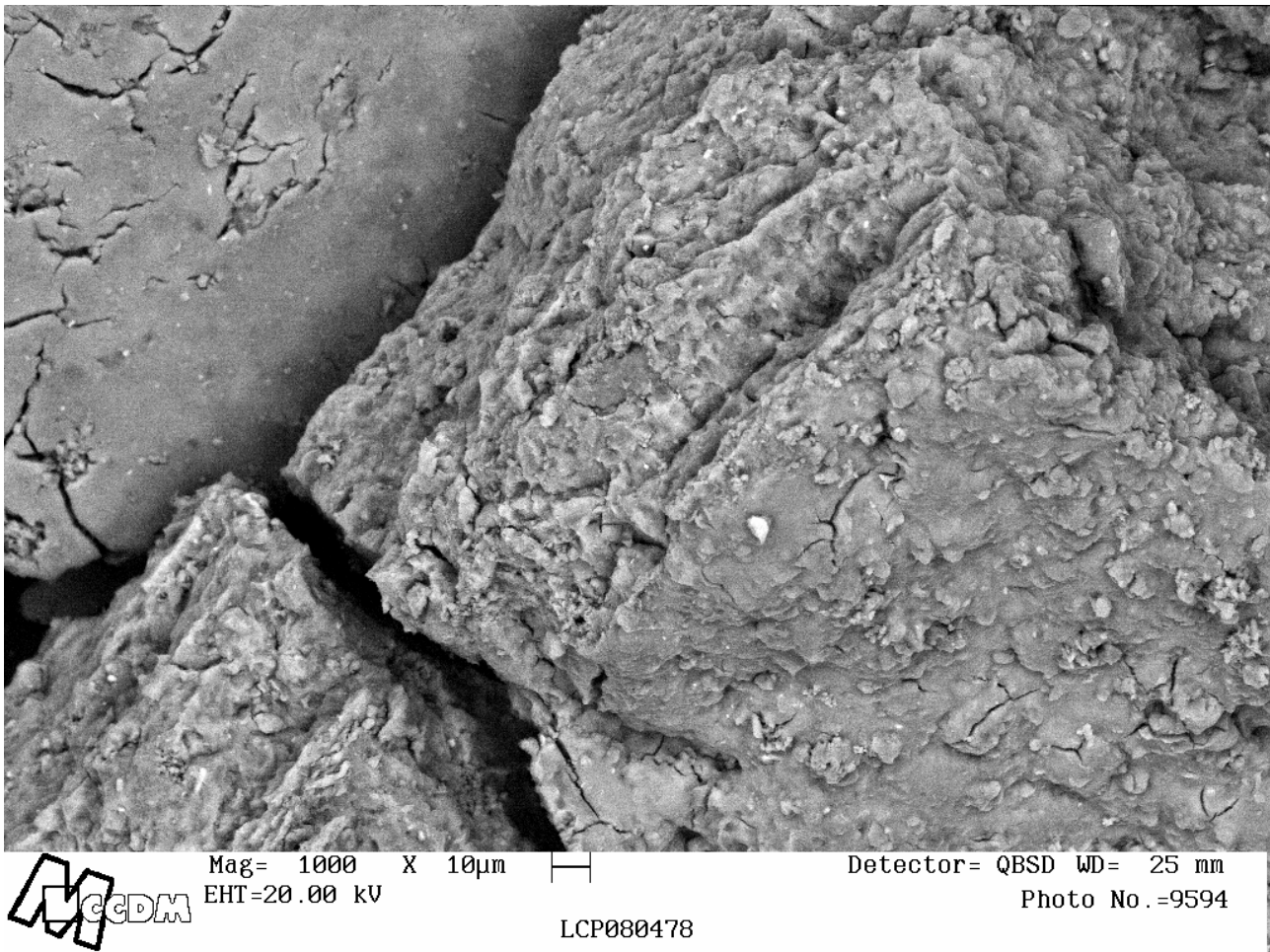


Figura 5.4- Micrografia obtida por MEV do lodo 2 (Cloroato Férrico)- Aumento de 1000 x

A partir das Figuras 5.3 e 5.4 observa-se que a morfologia do lodo 2 também possui superfície com aspecto irregular, apresentando vazios e aberturas. Assim como o lodo 1, no lodo 2 não há presença evidente e em grande quantidade de partículas com diâmetros bem definidos, e portanto, as dimensões variam.

A análise semi-quantitativa via EDS do lodo 2 está apresentada na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Elementos químicos identificados por EDS no lodo 2

Região da Amostra	Elementos Químicos		
	Majoritários	Minoritários	Traços
*Geral	Al, Si, Fe, C, Ca	O, Ti	Mn, K, Mg

* Não foi identificada uma partícula em específico, ou seja, o EDS foi realizado nas Figuras 5.3 e 5.4 como um todo.

Na Tabela 5.3 pode-se observar que os elementos Al, Si, Fe, C e Ca estão presentes de forma predominante no lodo 2. Em relação ao lodo 1, o lodo 2 apresentou aumento percentual dos elementos C e Ca.

As Figuras 5.5 e 5.6 apresentam as imagens obtidas via MEV do lodo 3.

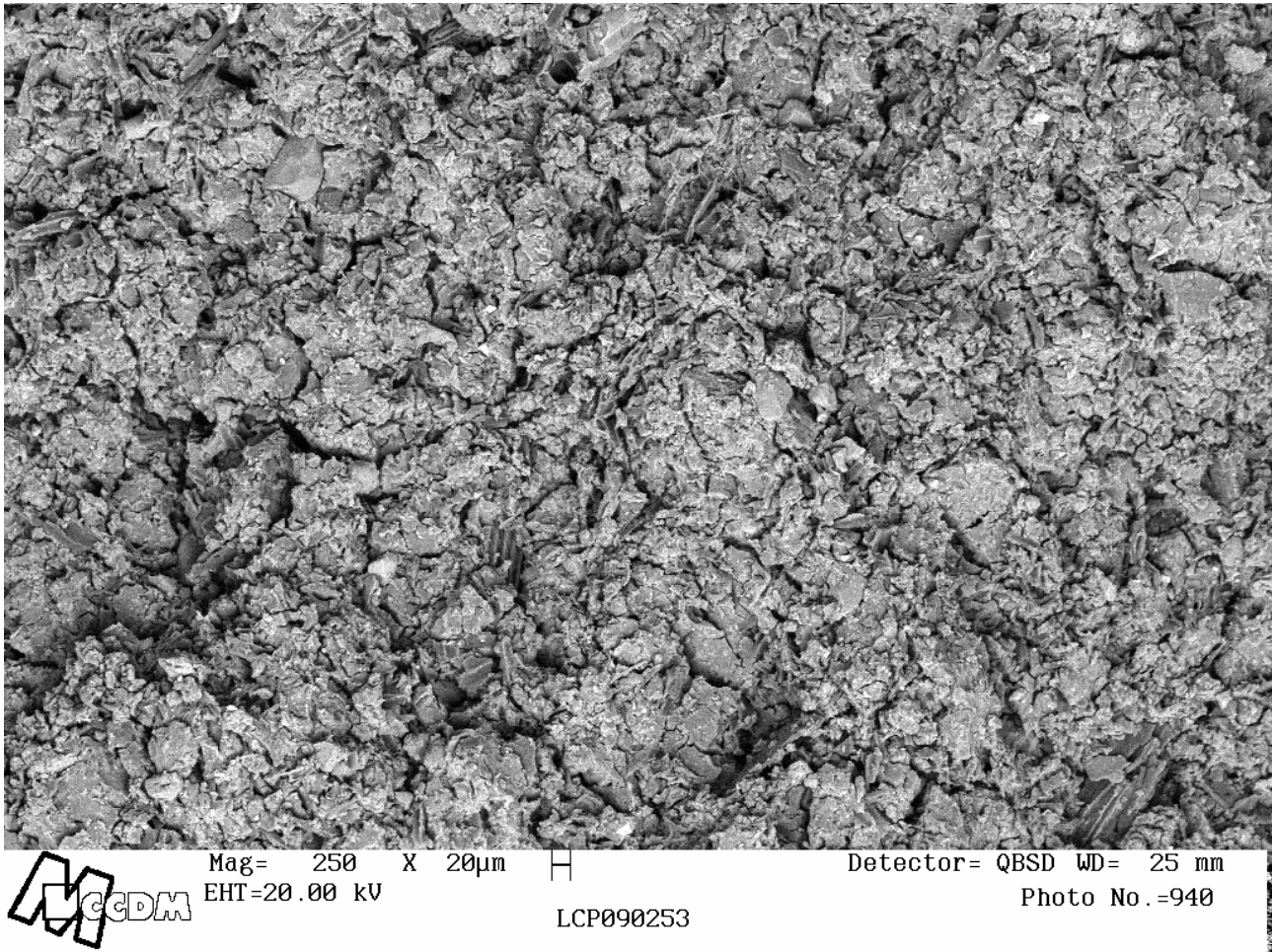


Figura 5.5- Micrografia obtida por MEV do lodo 3 (Cloreto de Polialumínio)- Aumento de 250 x.

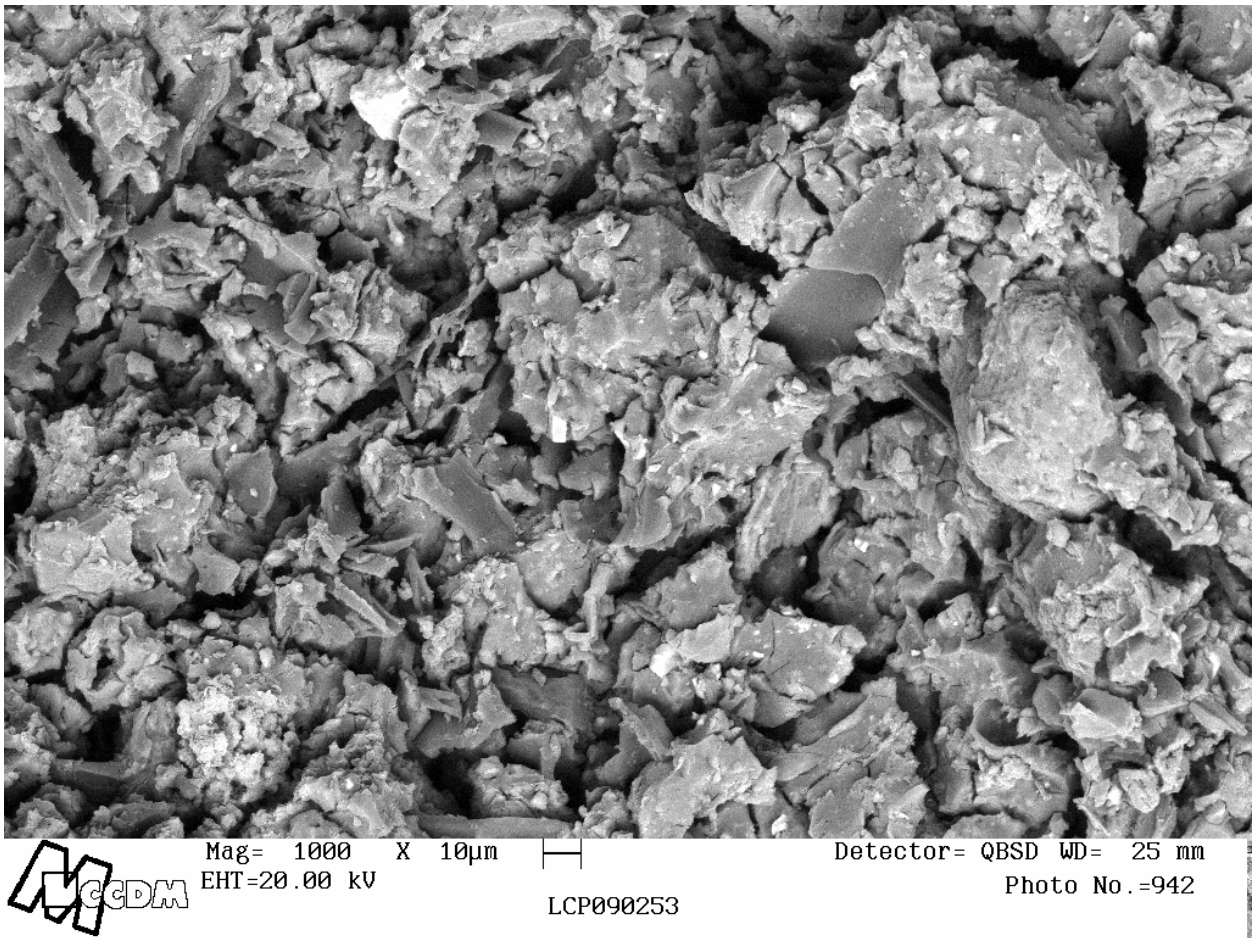


Figura 5.6- Micrografia obtida por MEV do lodo 3 (Cloreto de Polialumínio)- Aumento de 1000 x

A partir das Figuras 5.5 e 5.6 observa-se que a morfologia do lodo 3 também possui superfície com aspecto irregular, com vazios e aberturas. Assim como os lodos 1 e 2, não há presença evidente e em grande quantidade de partículas com diâmetros bem definidos, e portanto as dimensões variam.

A Figura 5.7 mostra as imagens obtidas via MEV, para facilitar, dessa forma, a visualização das fotos dos 03 lodos, e a comparação dessas.

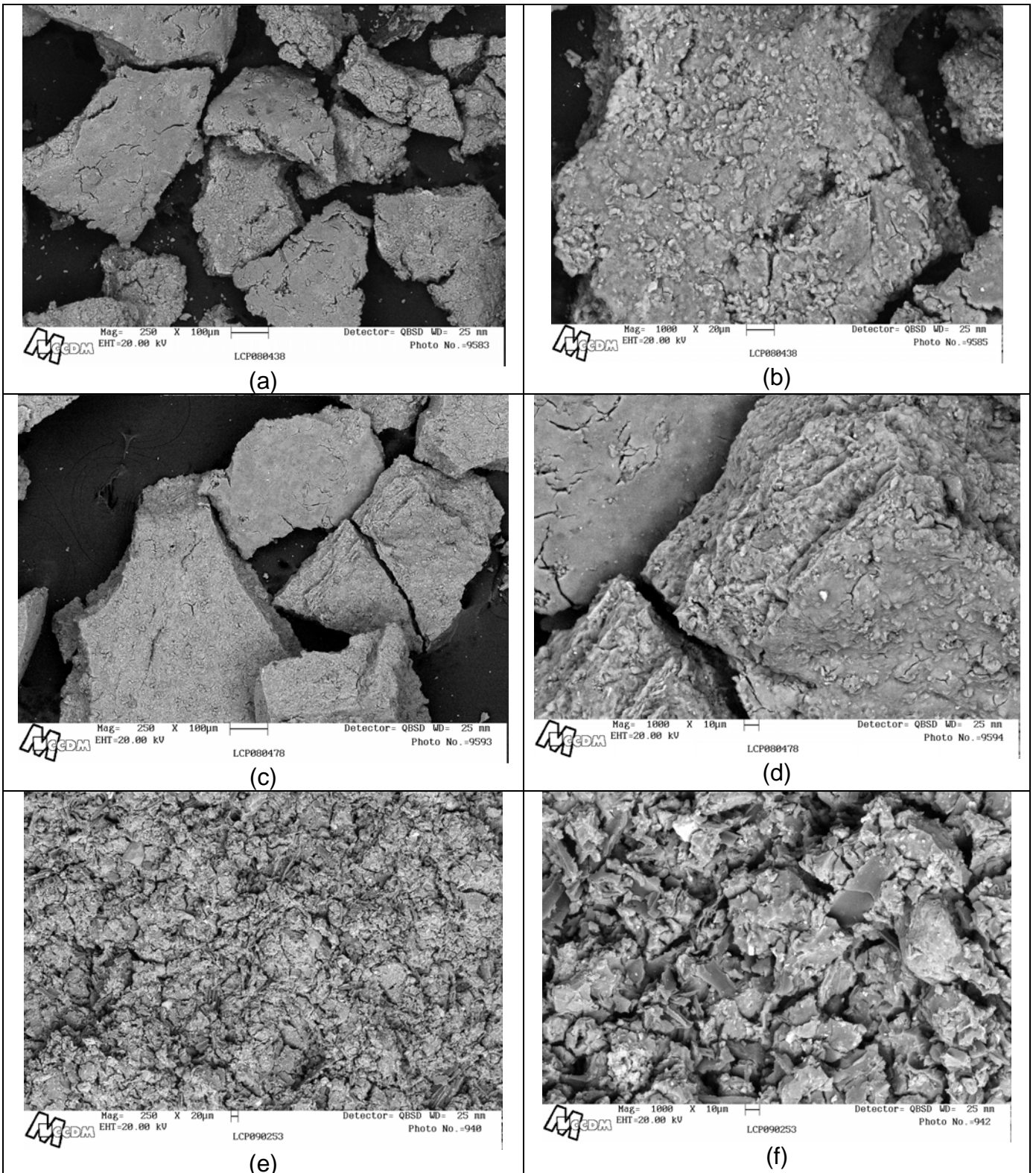


Figura 5.7- Comparação entre as micrografias obtidas por MEV dos 03 lodos. Lodo 1, com aumentos de 250 x (a) e 1000 x (b). Lodo 2, com aumentos de 250 x (c) e 1000 x (d). Lodo 3 com aumentos de 250 x (e) e 1000 x (f).

A análise semi- quantitativa via EDS do lodo 3 está apresentada na Tabela 5.4, apresentada a seguir.

Tabela 5.4: Elementos químicos identificados por EDS no lodo 3

Região da Amostra	Elementos Químicos		
	Majoritários	Minoritários	Traços
*Geral	Al, Si, Fe, C	O, Ca, Ti	Mg, Mn, K, Na

* Não foi identificada uma partícula em específico, ou seja, o EDS foi realizado nas Figuras 5.5 e 5.6 como um todo.

Na Tabela 5.4 pode- se observar que os elementos Al, Si, Fe e C estão presentes de forma predominante no lodo 3. A Tabela 5.5 compara as análises de EDS entre os 03 lodos.

Em relação ao lodo 1, a análise de EDS do lodo 3 mostrou aumento percentual do elemento C. Já em relação ao lodo 2, que é proveniente de tratamento que utiliza o Cloreto Férrico, o lodo 3 apresenta diminuição no percentual de Ca.

A composição majoritária do Alumínio e Silício mostra novamente o potencial do lodo 3 (obtido de tratamento que utiliza o PACl) no aproveitamento e reuso, tais como na produção cerâmica.

Tabela 5.5: Resumo dos elementos químicos identificados por EDS

Amostras	Elementos Químicos		
	Majoritários	Minoritários	Traços
1	Al, Si, Fe	C , O, Ca , Ti	Mn, K, Mg
2	Al, Si, Fe, C , Ca	O, Ti	Mn, K, Mg
3	Al, Si, Fe, C	O, Ca , Ti	Mg, Mn, K, Na

Comparando- se as análises de EDS dos 03 lodos, é possível verificar que os resíduos sólidos são semelhantes quanto às suas composições químicas, variando **neste tipo de análise elementar** somente os percentuais (semi- quantitativos) de alguns elementos químicos encontrados.

Observa- se também, que o lodo 3 apresentou um elemento que as demais amostras não apresentaram, ou seja, o **Na**, sendo que este elemento está presente apenas na forma de “traço” (elementos detectados na faixa de 0,1% a aproximadamente 0,9%).

5.2- Resultados obtidos na Difração de Raios X

A análise via Difração de Raios X proporcionou o conhecimento das estruturas cristalinas dos lodos de ETAs estudados, e a análise mineralógica dessas amostras.

A Figura 5.8 apresenta o Difratoograma de Raios X do lodo 1.

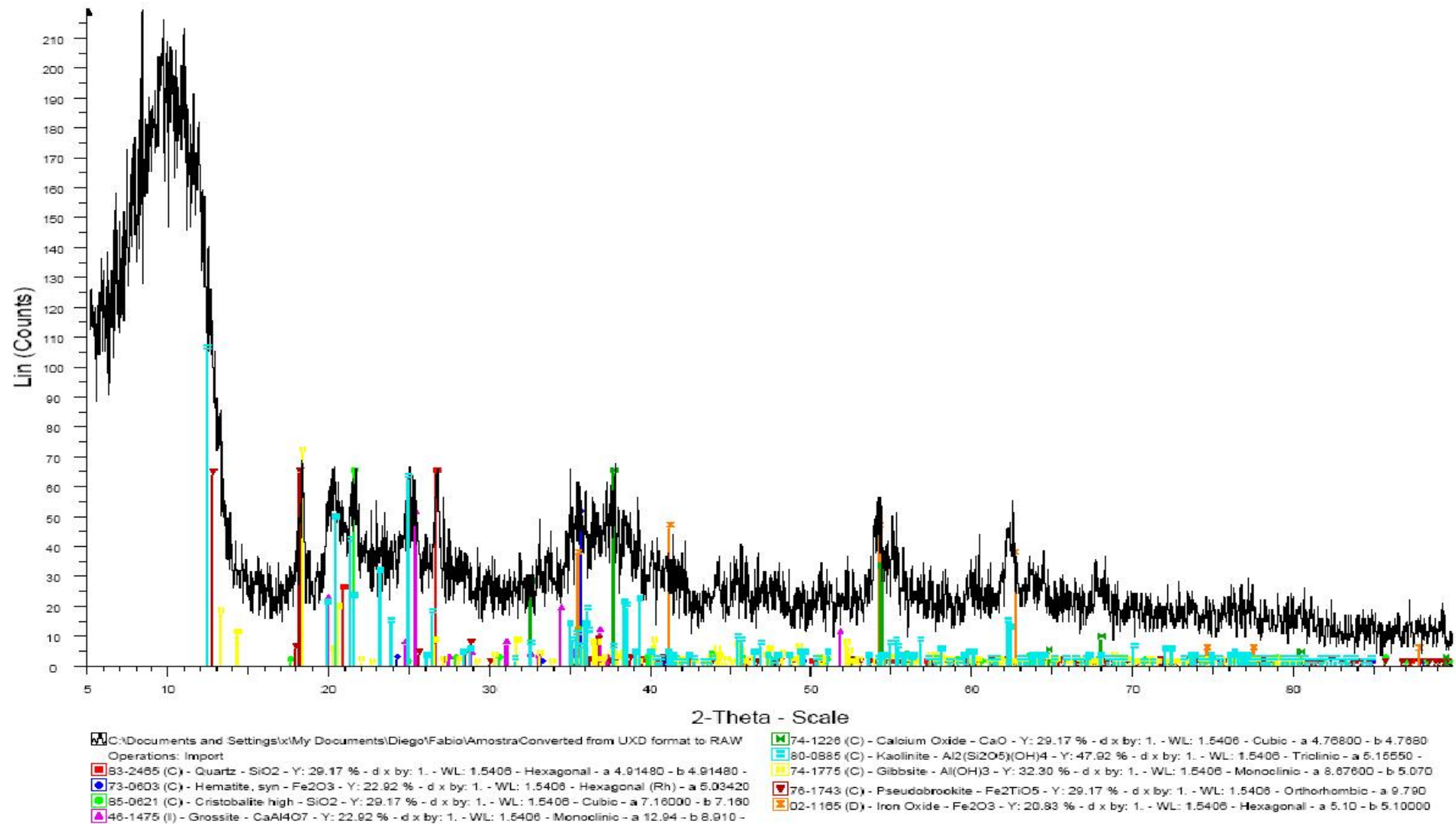


Figura 5.8- Difratoograma do lodo 1- Obtido de tratamento que utiliza de Sulfato de Alumínio como coagulante químico.

A análise de Difração de Raios X do lodo 1, mostra que trata-se de um material com composição relativamente complexa. Foram obtidas as seguintes identificações mineralógicas qualitativas:

- Óxido de Cálcio – CaO ;
- Quartzo- SiO_2 (estrutura cristalina Hexagonal);
- Hematita- Fe_2O_3 ;
- Aluminato de Cálcio- CaAl_4O_7 ;
- Pseudobrookita- Fe_2TiO_5 ;
- Cristobalita- SiO_2 (estrutura cristalina Cúbica);
- **Caulinita- $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_3(\text{OH})_4$;**
- Gipsita- $\text{Al}(\text{OH})_3$;
- Óxido de Ferro- Fe_2O_3 ;

A Figura 5.9 apresenta o Difratoograma de Raios X do lodo 2.

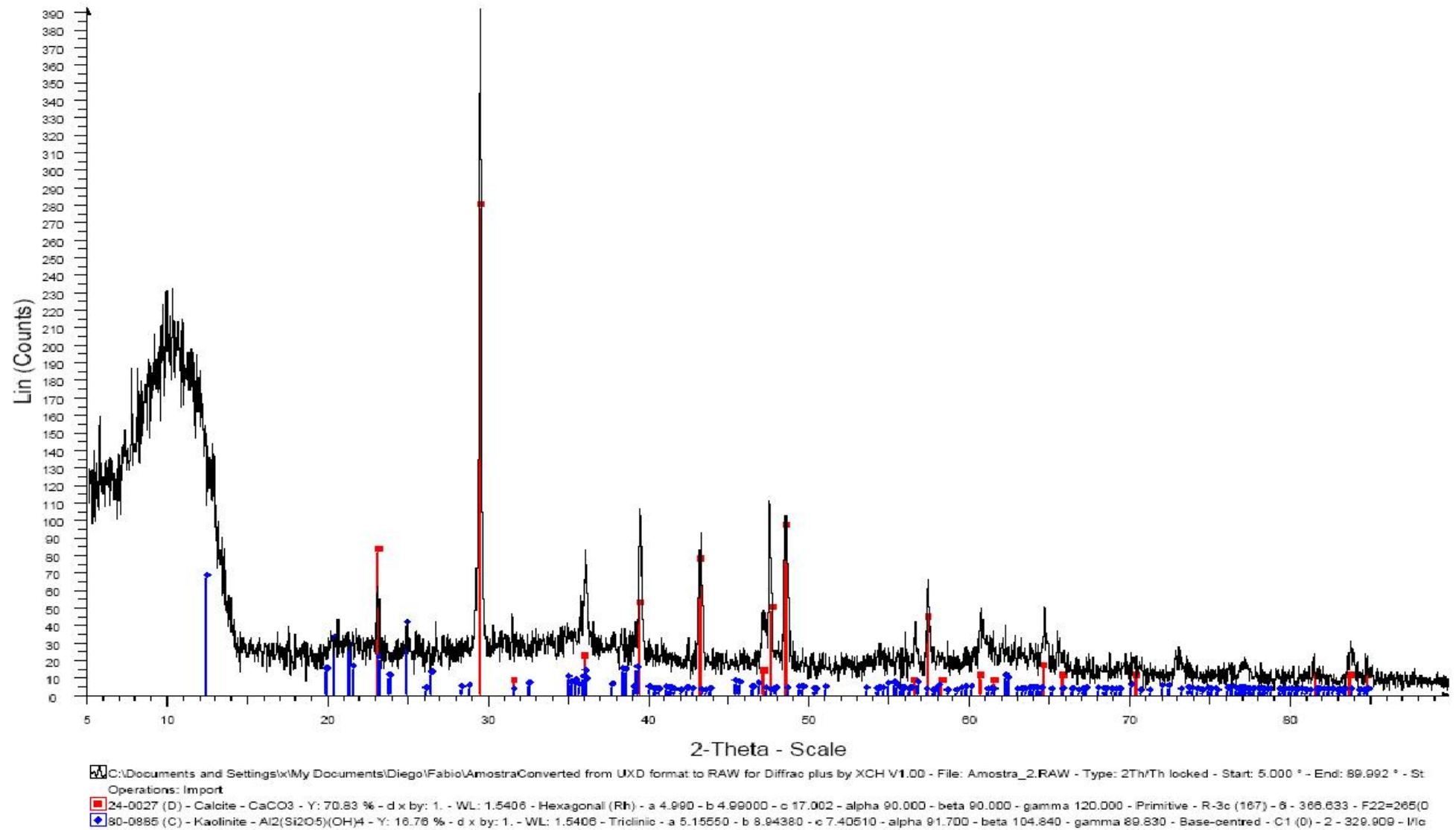


Figura 5.9- Difratoograma do lodo 2- Oriundo de tratamento que utiliza Cloreto Férrico como coagulante químico

A análise de Difração de Raios X do lodo 2, mostra que trata-se de um material com composição menos complexa, comparando-se com o resultado do lodo 1. Foram obtidas as seguintes identificações mineralógicas qualitativas do lodo 2:

- Calcita- CaCO_3 ;
- **Caulinita- $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_3(\text{OH})_4$;**

A Figura 5.10 apresenta o Difratoograma de Raios X do lodo 3.

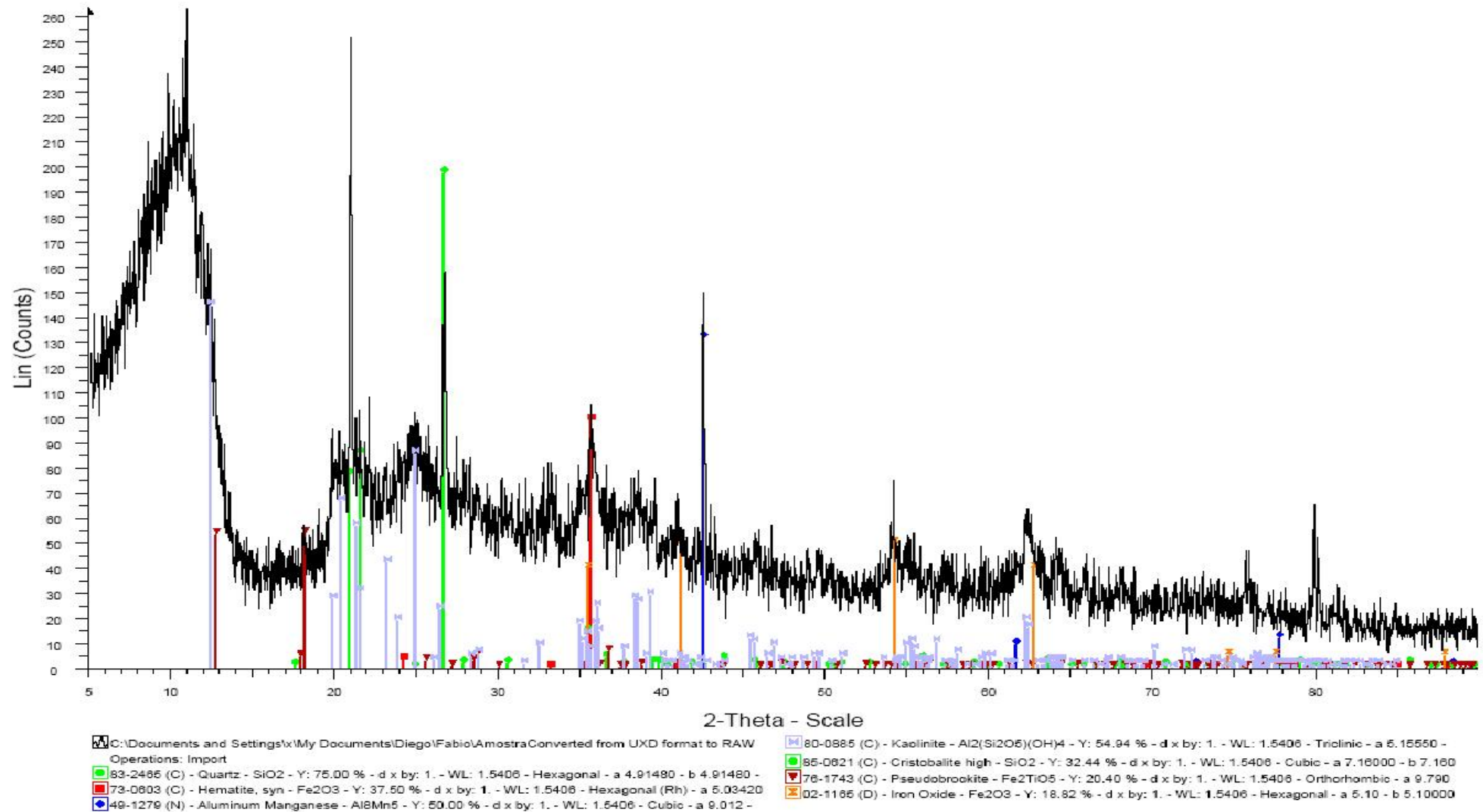


Figura 5.10- Difratoograma do lodo 3- Oriundo de tratamento que utiliza Cloreto de Polialumínio como coagulante químico.

A análise de Difração de Raios X do lodo 3, mostra que trata-se de um material considerado com composição um pouco menos complexa que o lodo 1, e considerado mais complexo do que o identificado no lodo 2. Foram obtidas as seguintes identificações mineralógicas qualitativas do lodo 3:

- Quartzo- SiO_2 (estrutura cristalina Hexagonal);
- Hematita- Fe_2O_3 ;
- Pseudobrookita- Fe_2TiO_5 ;
- Cristobalita- SiO_2 (estrutura cristalina Cúbica);
- **Caulinita- $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_3(\text{OH})_4$** ;
- Óxido de Ferro- Fe_2O_3 ;
- Alumínio Manganês- Al_3Mn_5 ;

As Figuras 5.8 e 5.10 mostram picos de Difração de Raios X característicos das fases cristalinas referentes aos argilominerais Caulinita, Gibsita (este só no lodo 1) e Quartzo, sendo que estes resultados estão de acordo com as avaliações encontradas em algumas literaturas publicadas no Brasil, e também confirmam as análises de MEV/ EDS (presença predominante de argilominerais).

Já a Figura 5.9, indica os picos referente somente ao argilomineral Caulinita, e também a Calcita. Saliencia-se a presença de **Caulinita** nos 03 lodos de ETAs avaliados.

Os argilosminerais encontrados nos lodos, geralmente apresentam tamanho de partículas $< 2,0 \mu\text{m}$ (OLIVEIRA, 2004). Este autor reporta ainda, que quanto maior a fração de partículas com tamanho menor que $2,0 \mu\text{m}$, mais rico é o lodo do ponto de vista de reuso e aproveitamento cerâmico.

As distribuições de tamanhos das partículas dos 03 lodos, foram confirmadas através dos ensaios de Sedigrafia, apresentados no item 5.5 deste trabalho.

5.3- Análise Química Quantitativa

A análise via Espectroscopia de Emissão Atômica por Plasma Indutivo (ICP), identificou *Quantitativamente* os elementos químicos presentes nos lodos. A seguir serão apresentados os resultados obtidos, nas Tabelas 5.6 a 5.8.

Tabela 5.6: Análise Química Quantitativa do lodo 1

Parâmetro	Unidade	Limite de Detecção	Lodo 1
Alumínio (Al)	%	0,1 ppm	11,9
Silício (Si)	%	0,3 ppm	1,3
Ferro (Fe)	%	0,1 ppm	12,7
Cálcio (Ca)	ppm	0,1 ppm	2538
Titânio (Ti)	%	0,5 ppm	1,1
Magnésio (Mg)	ppm	0,5 ppm	892
Manganês (Mn)	ppm	0,05 ppm	2367
Potássio (K)	ppm	0,5 ppm	1031

Na Tabela 5.6 pode-se observar que os elementos Al, Si e Fe estão presentes de forma majoritária no lodo 1 (Sulfato de Alumínio), comprovando dessa forma a análise realizada via EDS (ver Tabela 5.2). Os demais elementos estão presentes em menor quantidade, e também comprovam o que havia sido verificado na análise semi-quantitativa via EDS.

É importante observar mais uma vez, que em função do reuso, como aproveitamento em produtos cerâmicos, deseja-se resíduos sólidos com alto teor de Al e Si, conforme pode ser encontrado no lodo 1.

Tabela 5.7: Análise Química Quantitativa do lodo 2

Parâmetro	Unidade	Limite de Detecção	Lodo 2
Alumínio (Al)	%	0,1 ppm	1,5
Silício (Si)	%	0,3 ppm	8,2
Ferro (Fe)	%	0,1 ppm	22,1
Cálcio (Ca)	%	0,1 ppm	10,2
Titânio (Ti)	ppm	0,5 ppm	3692
Magnésio (Mg)	ppm	0,5 ppm	3671
Manganês (Mn)	ppm	0,05 ppm	1851
Potássio (K)	ppm	0,5 ppm	617

É possível verificar na Tabela 5.7, que os elementos Al, Si, Fe e Ca estão presentes de forma majoritária no lodo 2 (Cloreto Férrico), comprovando também o que foi detectado na análise realizada via EDS (ver Tabela 5.3). Os demais elementos estão presentes em menor quantidade, e confirmam também o que havia sido verificado na análise semi- quantitativa de EDS para o referido lodo.

Tabela 5.8: Análise Química Quantitativa do lodo 3

Parâmetro	Unidade	Limite de Detecção	Lodo 3
Alumínio (Al)	%	0,1 ppm	9,5
Silício (Si)	%	0,3 ppm	5,8
Ferro (Fe)	%	0,1 ppm	7,9
Cálcio (Ca)	ppm	0,1 ppm	2861
Titânio (Ti)	ppm	0,1 ppm	6111
Magnésio (Mg)	ppm	0,5 ppm	1320
Manganês (Mn)	ppm	0,05 ppm	2303
Sódio (Na)	ppm	0,5 ppm	735
Potássio (K)	ppm	0,5 ppm	1523

Na Tabela 5.8 observa-se que os elementos Al, Si e Fe predominam no lodo 3 (Cloreto de Polialumínio), comprovando novamente os resultados da análise realizada via EDS (ver Tabela 5.4). Os demais elementos estão presentes de forma minoritária, e também confirmam o que havia sido analisado via EDS.

Observou-se nas análises químicas quantitativas dos 03 lodos, que o elemento Ferro está presente de forma majoritária, principalmente no lodo 2 (que apresenta 22,1% de Fe), sendo que segundo Barroso (2007), este elemento (Fe) pode indicar potencial de aproveitamento para uso na cerâmica vermelha.

Por outro lado, Morita e colaboradores (2008), indicam que resíduos que apresentam teores significativos de cal não admitidos para produção de peças cerâmicas, sendo necessário então verificar o percentual de cal dos lodos.

5.4- Densidade

A densidade real foi medida através de picnometria de gás hélio, e para cada amostra foram realizadas 05 medidas com o intuito de obter a média dessas medidas. Segue resultados obtidos, nas Tabelas 5.9 a 5.12.

Tabela 5.9- Medidas de densidade real dos sólidos- Lodo 1

Medidas	Volume (cm³)	Desvio (cm³)	Densidade (g/ cm³)	Desvio (g/cm³)	Tempo (h:m:s)
1	3,0857	-0,0033	2,3524	0,0025	0:07:27
2	3,0884	-0,0006	2,3503	0,0005	0:09:49
3	3,0898	0,0008	2,3493	-0,006	0:12:17
4	3,0902	0,0011	2,3490	-0,008	0:14:45
5	3,0911	0,0021	2,3483	-0,0016	0:17:12
Média	3,0891	-	2,3498	-	-
Desvio Padrão	0,0021	-	0,0002	-	-

- Densidade real dos sólidos do Lodo 1: 2,3498 g/ cm³.

Tabela 5.10- Medidas de densidade real dos sólidos- Lodo 2

Medidas	Volume (cm³)	Desvio (cm³)	Densidade (g/ cm³)	Desvio (g/cm³)	Tempo (h:m:s)
1	0,9346	0,0002	2,7433	-0,0007	0:09:00
2	0,9349	0,0005	2,7424	-0,0016	0:12:11
3	0,9340	-0,0003	2,7449	0,0009	0:15:27
4	0,9339	-0,0004	2,7453	0,0013	0:18:32
5	0,9343	0,0000	2,7441	0,0001	0:21:36
Média	0,9343	-	2,7440	-	-
Desvio Padrão	0,0004	-	0,0012	-	-

- Densidade real dos sólidos do Lodo 2: 2,7440 g/ cm³.

Tabela 5.11- Medidas de densidade real dos sólidos- Lodo 3

Medidas	Volume (cm³)	Desvio (cm³)	Densidade (g/ cm³)	Desvio (g/cm³)	Tempo (h:m:s)
1	2,0621	-0,0019	2,0567	0,0019	0:09:03
2	2,0640	0,0000	2,0548	-0,0000	0:11:51
3	2,0643	0,0004	2,0545	-0,0003	0:14:34
4	2,0648	0,0009	2,0450	-0,0009	0:17:34
5	2,0646	0,0006	2,0452	-0,0006	0:20:09
Média	2,0640	-	2,0548	-	-
Desvio Padrão	0,0011	-	0,0011	-	-

- Densidade real dos sólidos do Lodo 3: 2,0548 g/ cm³.

Tabela 5.12- Resumo dos resultados de densidades dos sólidos

Lodo	Densidade (g/ cm³)
1	2,3498
2	2,7440
3	2,0548

As densidades dos lodos foram medidas principalmente para proporcionar condições de realizar os ensaios de distribuição de tamanho de partículas, que serão apresentados no sub- item 5.5.

No entanto, os valores médios encontrados neste trabalho, concordam com os valores considerados normalmente para as densidades de Caulinita (2,58 g/ cm³), Quartzo (2,70 g/ cm³) e Gipsita (2,42 g/ cm³).

5.5- Distribuição de tamanho de partículas

A distribuição de tamanho de partículas foi determinada através da técnica Sedigrafia, e possibilitou também o conhecimento do diâmetro médio dos lodos das 03 ETAs estudadas. Para a determinação, foi necessário medir a densidade dos sólidos presentes nos lodos, conforme indicado no item 5.4. Os resultados obtidos serão apresentados a seguir (nas Figuras 5.11 a 5.14).

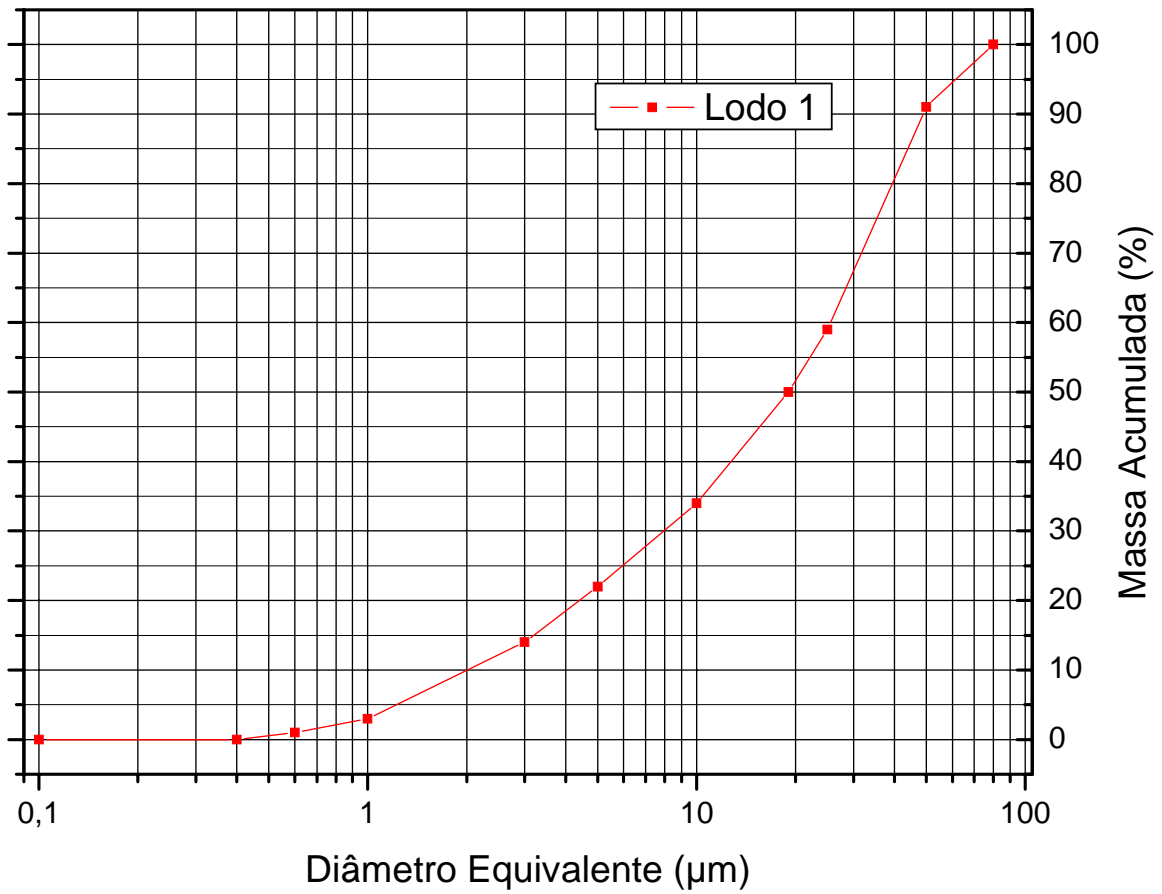


Figura 5.11- Ensaio de distribuição de tamanho de partícula do lodo 1 (utiliza Sulfato de Alumínio como coagulante)

- Diâmetro médio do lodo 1: 19,0 μm .

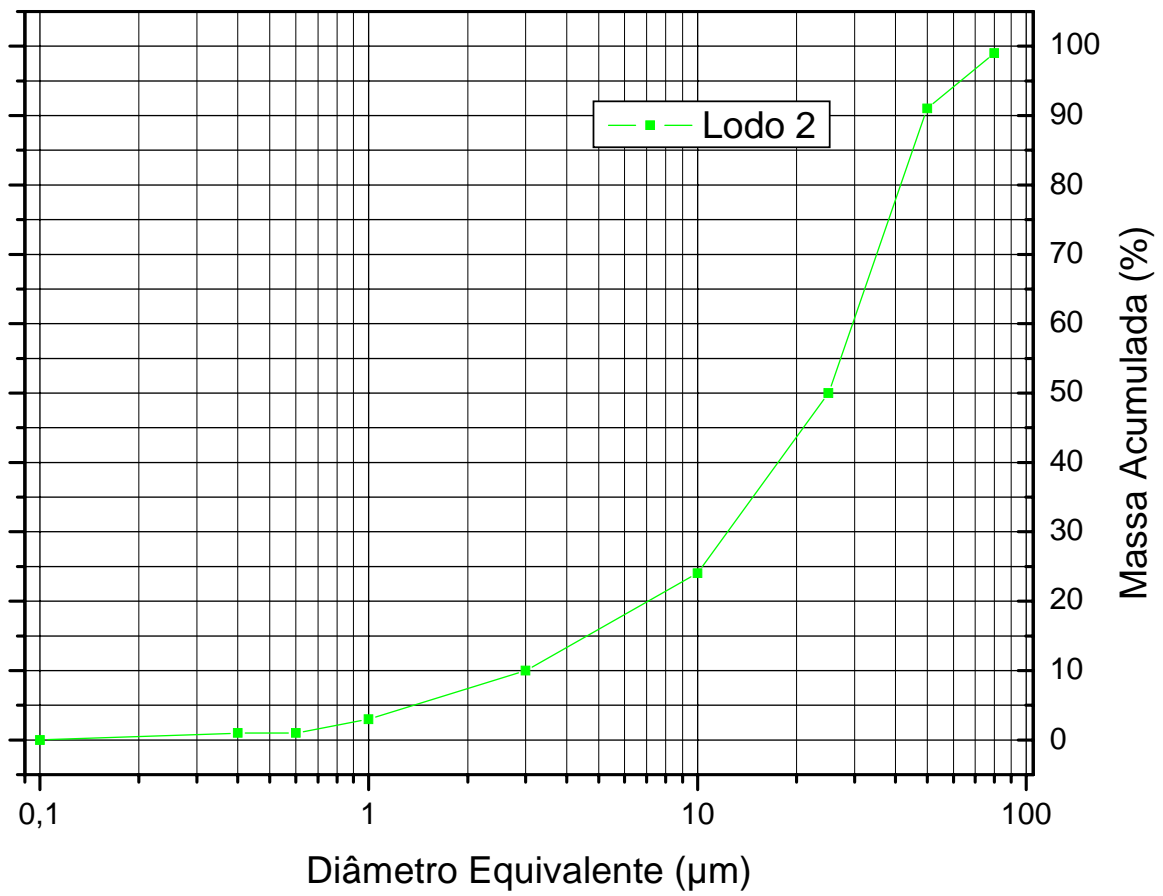


Figura 5.12- Ensaio de distribuição de tamanho de partícula do lodo 2 (utiliza Cloreto Férrico como coagulante)

- Diâmetro médio do lodo 2: 25,0 μm

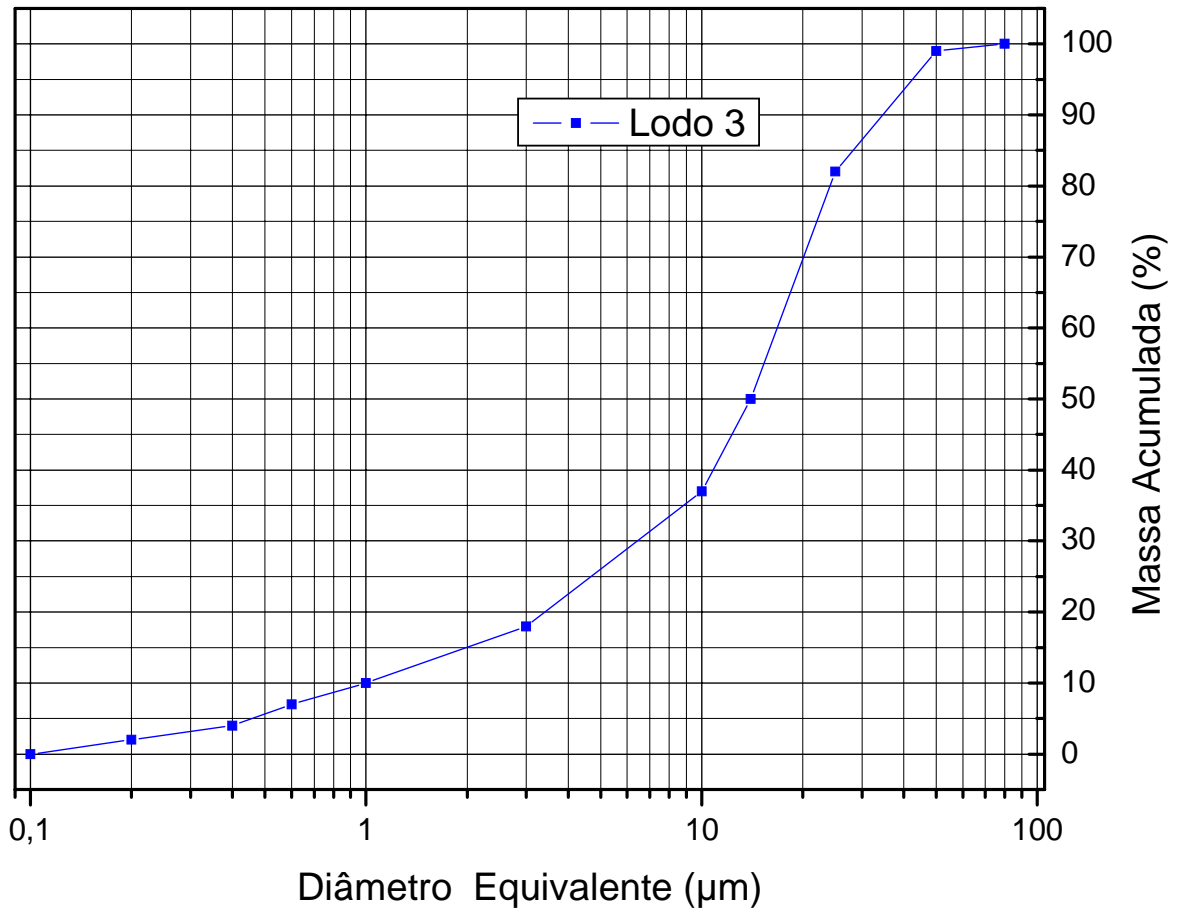


Figura 5.13- Ensaio de distribuição de tamanho de partícula do lodo 3 (utiliza Cloreto de Polialumínio como coagulante)

- **Diâmetro médio do lodo 3:** 14,0 μm .

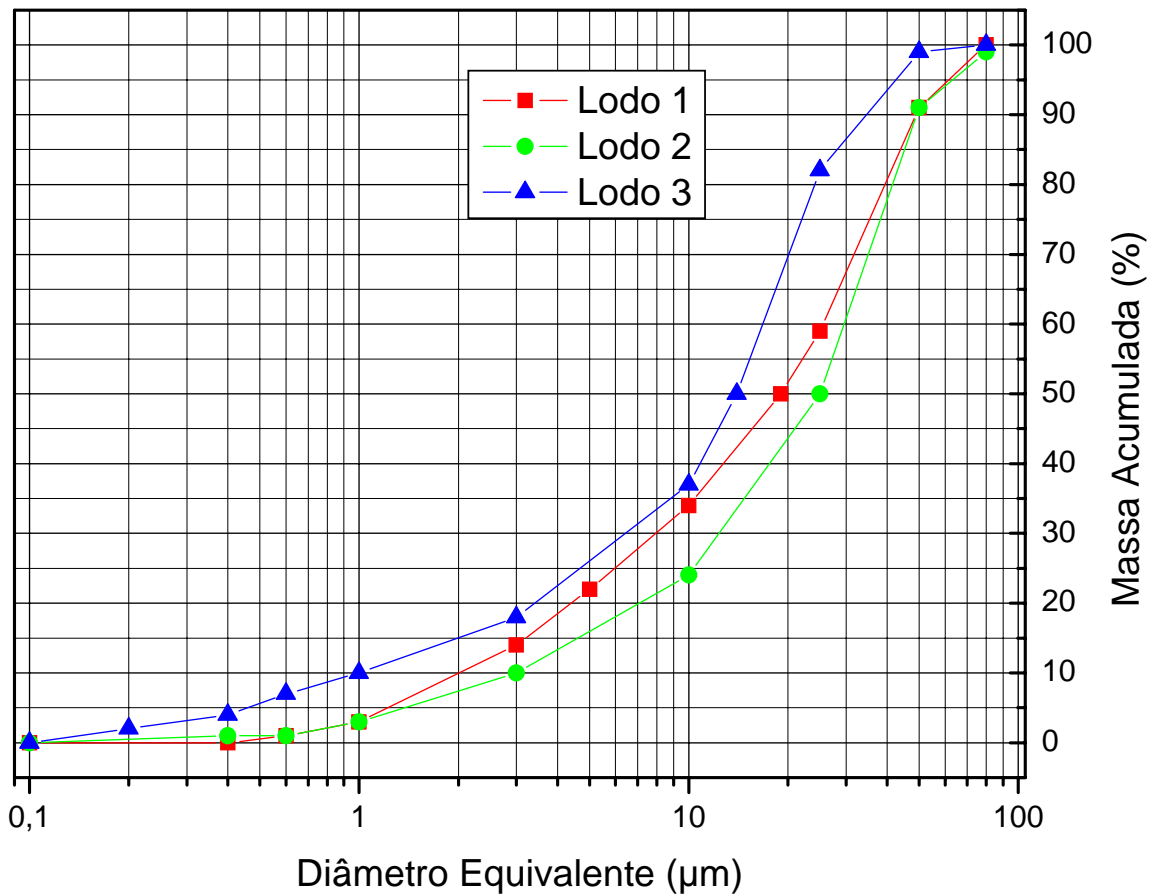


Figura 5.14- Comparação dos gráficos de distribuição de tamanho de partículas.

É possível verificar na Figura 5.14, que os lodos 1 e 3 apresentaram uma larga distribuição de tamanho de partícula, compreendida entre 0,4 a 100 µm para o lodo 1, e entre 0,2 a 100 µm para o lodo 3. Inclusive o diâmetro médio encontrado para esses 02 lodos estão mais próximos (19,0 e 14 µm, respectivamente), do que o diâmetro médio encontrado no lodo 2 (25,0 µm).

Já o lodo 2, apresentou a distribuição de tamanho de partícula um pouco mais estreito (quando comparada aos demais lodos), compreendendo a faixa total entre 0,3 e 100 µm, e concentração um pouco maior entre 3 a 50 µm, abrangendo aproximadamente 80% das partículas.

As frações de materiais obtidos abaixo de 2 μm , são características de argila-argilominerais, sendo que estes componentes haviam sido identificados indiretamente através das análises de MEV/ EDS e Difração de Raios X.

Cordeiro (2001), identificou que os lodos de ETA que utilizam Sulfato de Alumínio e Cloreto Férrico como coagulantes químicos, apresentaram partículas predominantemente abaixo de 20 μm , com parcela considerável entre 2,0 a 20 μm .

Comparando-se os resultados obtidos com Cordeiro (2001), é possível verificar que esses são semelhantes, já que boa parcela do lodo 1 (Sulfato de Alumínio) e do lodo 2 (Cloreto Férrico), também encontram-se entre 2,0 a 20 μm .

Barroso (2007), avaliou a curva de distribuição de partículas para amostra bruta de lodo de PACI, e encontrou partículas predominantemente entre 1,0 a 20 μm . Comparando-se os resultados obtidos, verifica-se que o lodo 3 (de PACI), também apresenta boa parcela de material entre 1,0 a 20 μm .

5.6- Resultados de Termogravimetria (TG)

As análises de Termogravimetria (TG) mostraram a perda de massa em função da temperatura, e assim determinou-se principalmente os percentuais de materiais inorgânicos presentes nos lodos. Nas Figuras 5.15 a 5.23 são mostrados os resultados das análises realizadas (em triplicata para cada lodo).

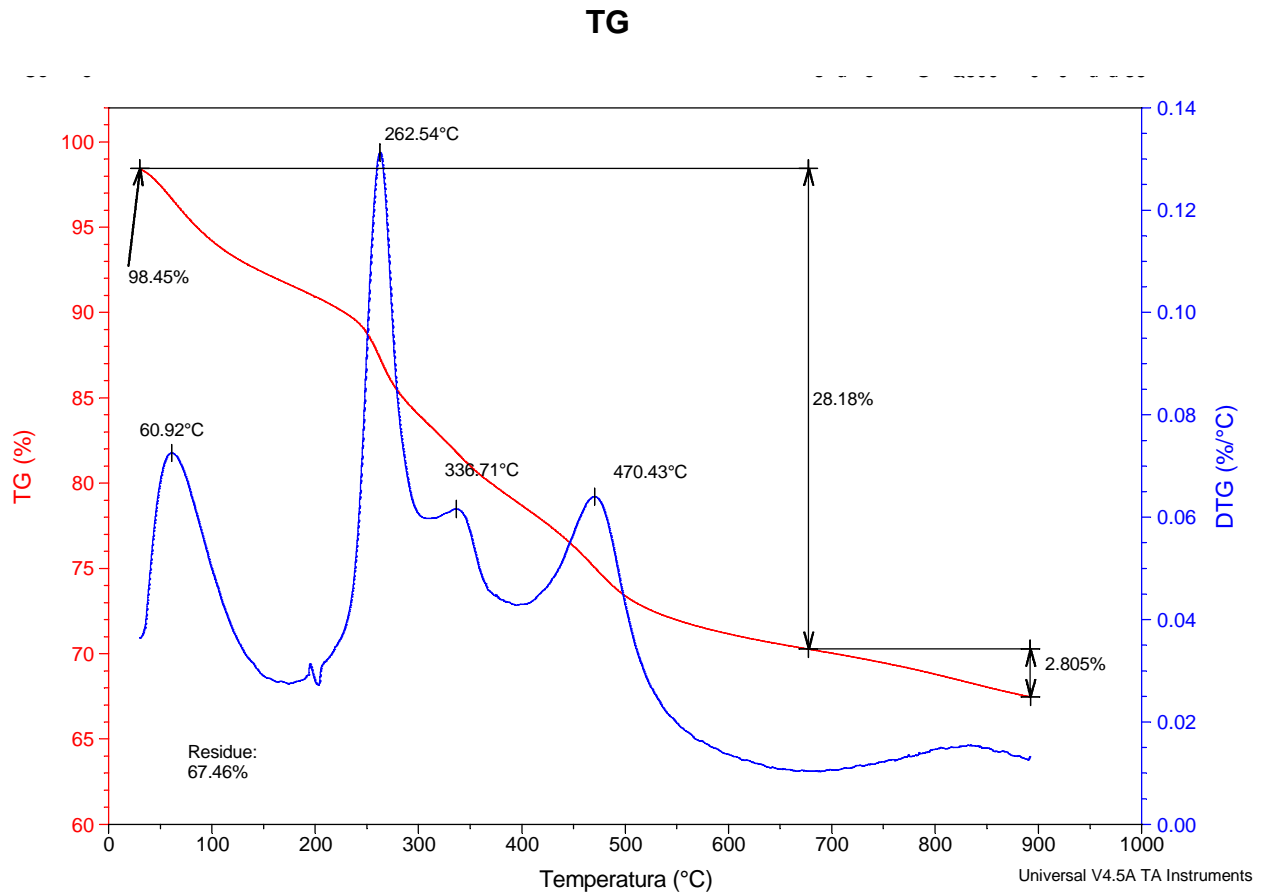


Figura 5.15- Gráfico da 1ª corrida da análise de TG- Lodo 1.

As condições utilizadas na 1ª corrida da Termogravimetria do Lodo 1 (Figura 5.15) foram:

- Quantidade de material: 10,3180 mg;
- Temperatura Inicial: 30 °C;
- Temperatura Final: 900 °C;
- Taxa de Aquecimento: 20°C/ min;
- Atmosfera utilizada: Nitrogênio;

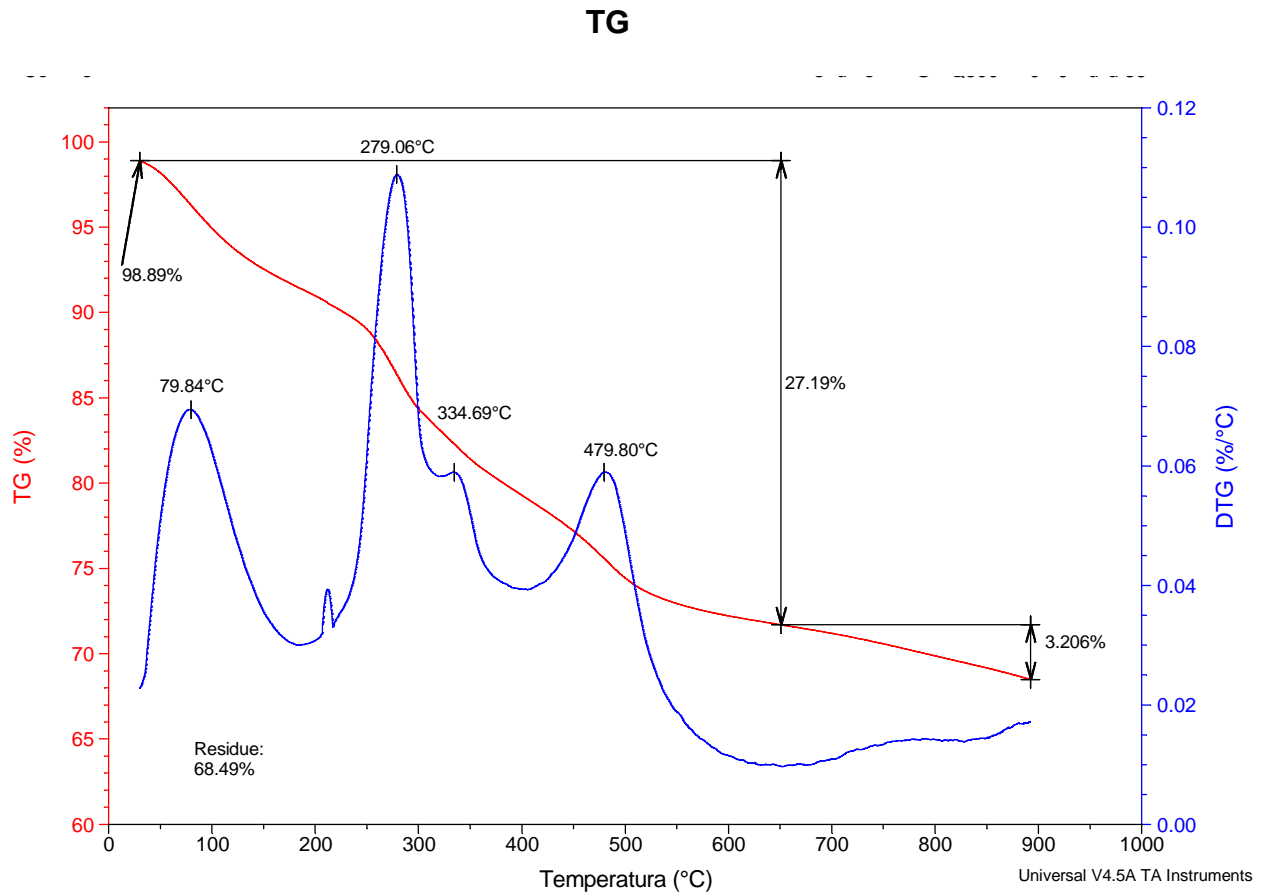


Figura 5.16- Gráfico da 2ª corrida da análise de TG- Lodo 1.

As condições utilizadas na 2ª corrida de Termogravimetria do Lodo 1 (Figura 5.16) foram:

- Quantidade de material: 9,1070 mg;
- Temperatura Inicial: 30 °C;
- Temperatura Final: 900 °C;
- Taxa de Aquecimento: 20°C/ min;
- Atmosfera Utilizada: Nitrogênio;

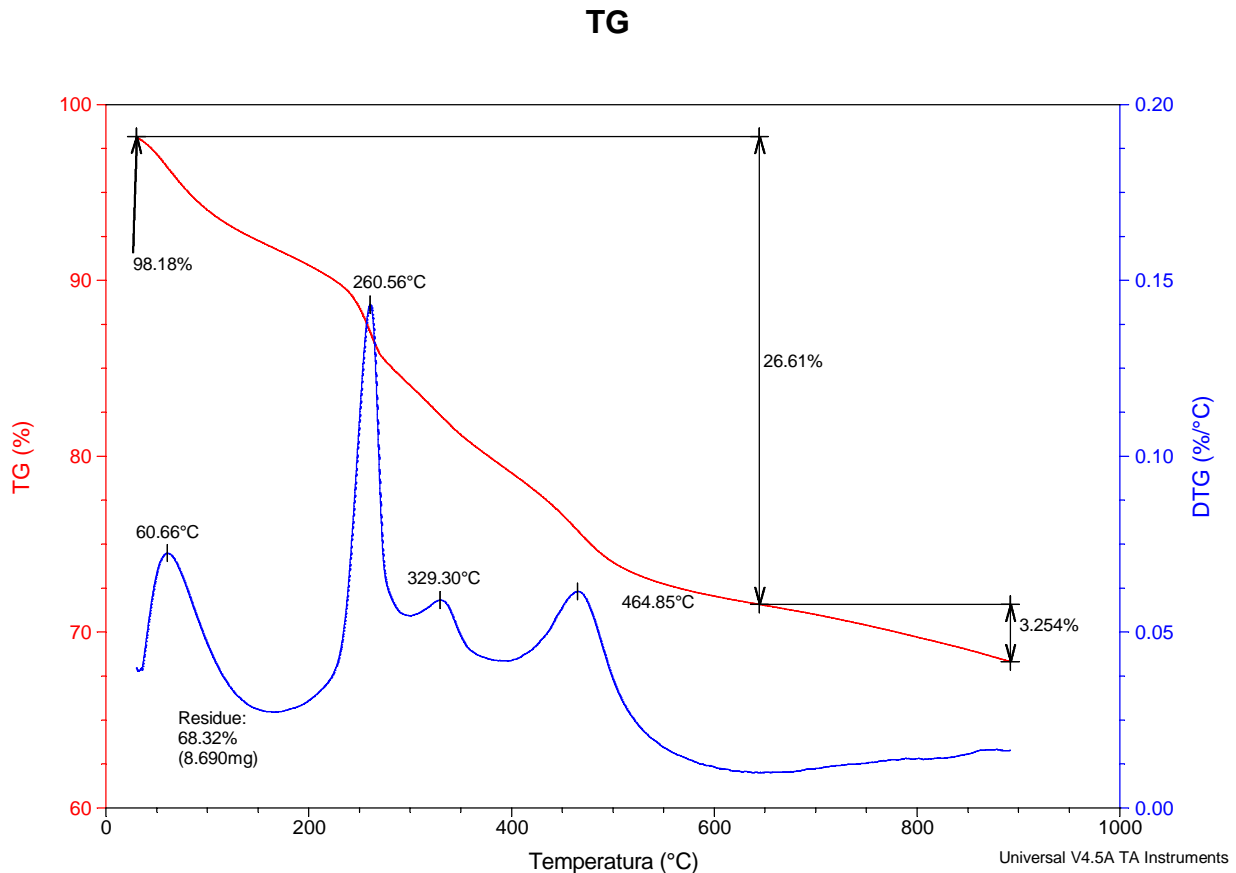


Figura 5.17- Gráfico da 3ª corrida da análise de TG- Lodo 1.

As condições utilizadas na 3ª corrida de Termogravimetria do Lodo 1 (Figura 5.17) foram:

- Quantidade de material: 12,7200 mg;
- Temperatura Inicial: 30 °C;
- Temperatura Final: 900 °C;
- Taxa de Aquecimento: 20°C/ min;
- Atmosfera da Utilizada: Nitrogênio;

As análises de TG do lodo 1, mostraram que o comportamento das 03 curvas obtidas são bastante semelhantes, determinando dessa forma que o resíduo do referido lodo é de aproximadamente 68%.

Avaliando-se em particular a 2ª corrida de TG (Figura 5.16), observa-se que o lodo 1 apresentou perda de material já à temperatura ambiente (pouco mais de 1%). Fato esse que pode ser explicado pelo “arraste” de material volátil pelo Nitrogênio (que é utilizado na análise), sendo que este material volátil possivelmente seja oriundo de umidade, já que o material foi seco somente de forma natural.

É possível verificar também na 2ª corrida (Figura 5.16), que a curva termogravimétrica (em vermelho) mostrou que ocorreram 04 eventos térmicos, sendo eles à aproximadamente 80°C, 279 °C, 335 °C e 480 °C, eventos esses que foram identificados pela derivada da curva, a DTG (em azul).

Esses eventos térmicos representam a perda de massa provavelmente de materiais orgânicos e CO₂ (talvez umidade também). Percebe-se que a maior parcela dessa perda ocorre até pouco mais de 660 °C (28 % de material), e após essa temperatura a perda de massa é de apenas 3,2 %.

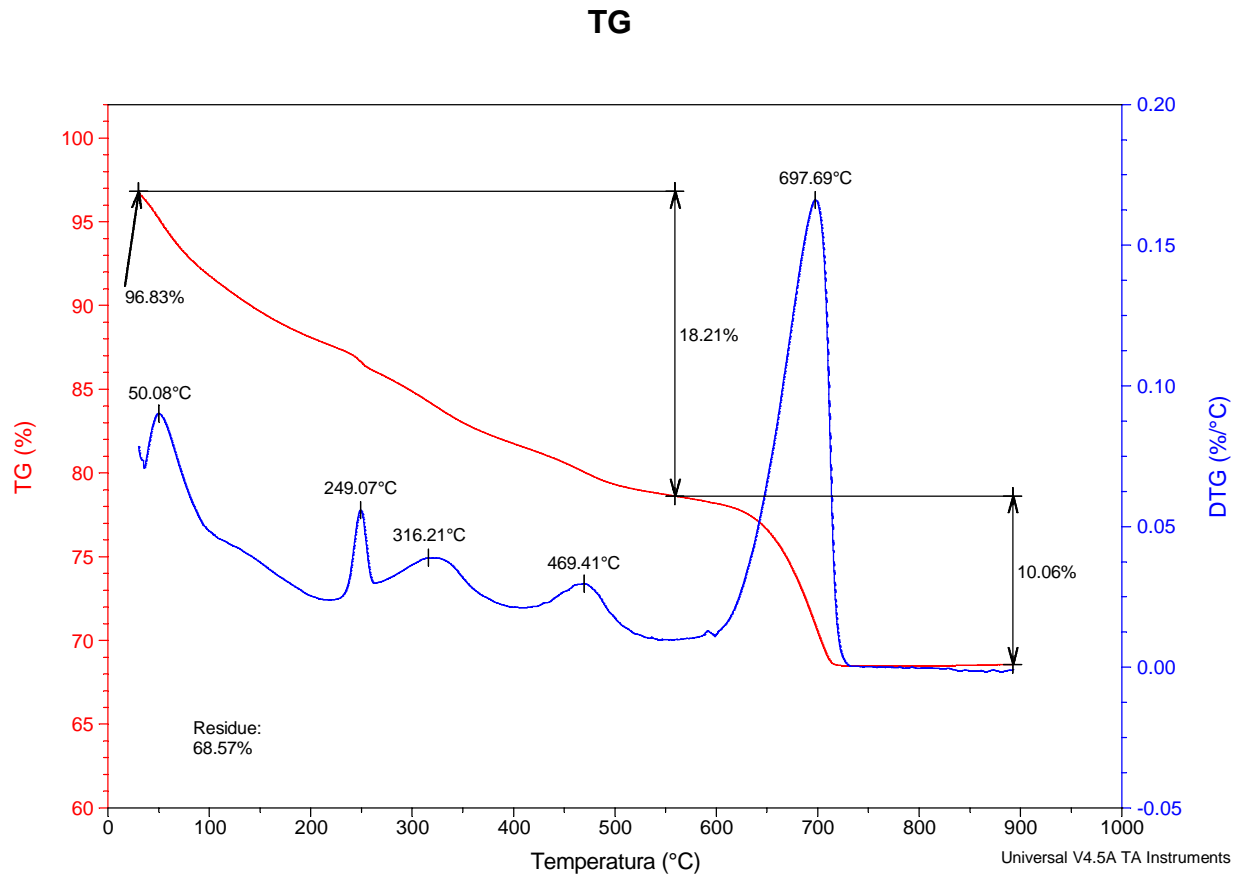


Figura 5.18- Gráfico da 1ª corrida da análise de TG- Lodo 2.

As condições utilizadas na 1ª corrida de Termogravimetria do Lodo 2 (Figura 5.18) foram:

- Quantidade de material: 9,9770 mg;
- Temperatura Inicial: 30 °C;
- Temperatura Final: 900 °C;
- Taxa de Aquecimento: 20°C/ min;
- Atmosfera Utilizada: Nitrogênio;

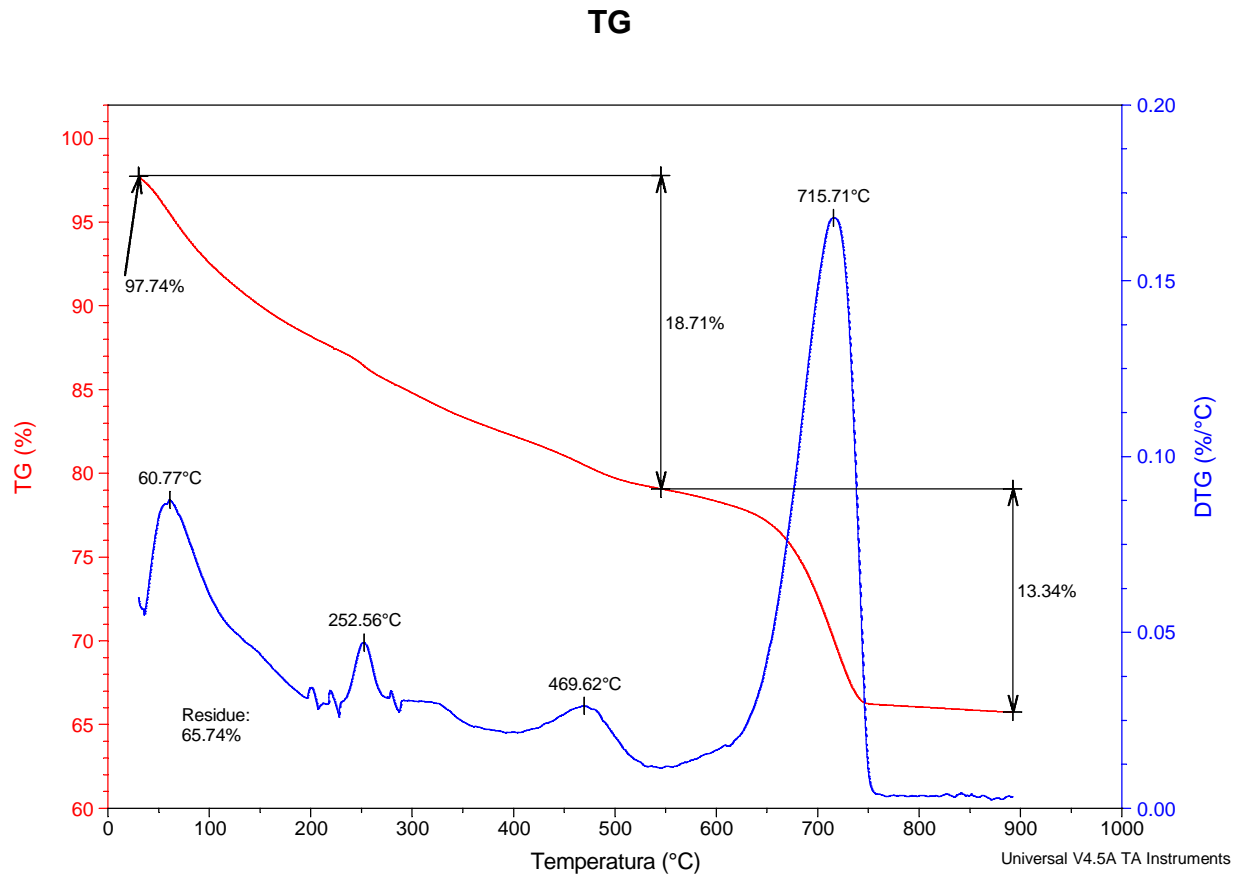


Figura 5.19- Gráfico da 2ª corrida da análise de TG- Lodo 2.

As condições utilizadas na 2ª corrida de Termogravimetria do Lodo 2 (Figura

5.19) foram:

- Quantidade de material: 9,2780 mg;
- Temperatura Inicial: 30 °C;
- Temperatura Final: 900 °C;
- Taxa de Aquecimento: 20°C/ min;
- Atmosfera Utilizada: Nitrogênio;

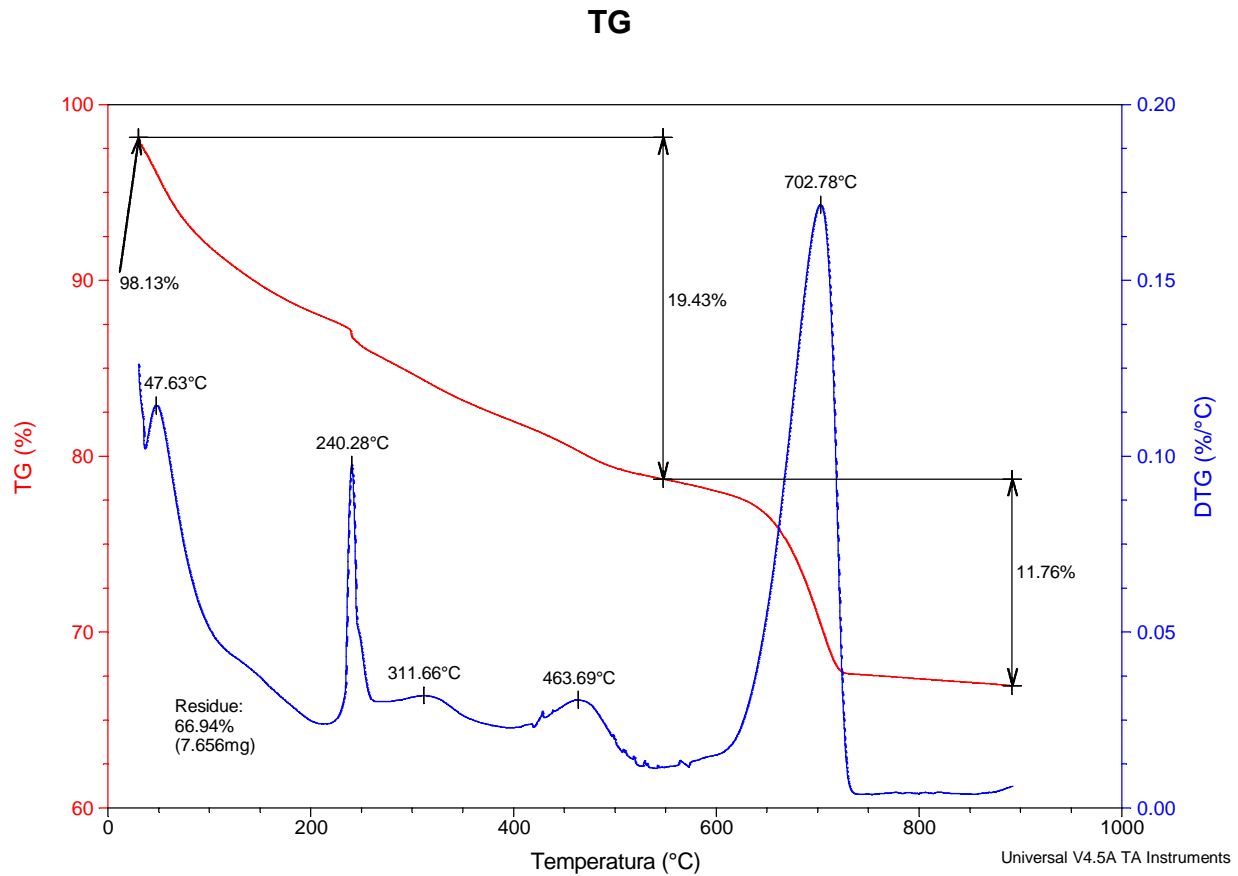


Figura 5.20- Gráfico da 3ª corrida da análise de TG- Lodo 2.

As condições utilizadas na 3ª corrida de Termogravimetria do Lodo 2 (Figura 5.20) foram:

- Quantidade de material: 11,4370 mg;
- Temperatura Inicial: 30 °C;
- Temperatura Final: 900 °C;
- Taxa de Aquecimento: 20°C/ min;
- Atmosfera Utilizada: Nitrogênio;

As curvas Termogravimétricas do lodo 2 indicaram que o comportamento das 03 curvas obtidas são semelhantes também, determinando dessa forma que em média o resíduo lodo 2 é de aproximadamente 67%

Na 2ª corrida de TG da referida amostra (Figura 5.19), observou-se que a mesma apresentou perda de material já a temperatura ambiente (pouco mais de 2%). Novamente há indícios de existência de umidade no lodo.

É possível verificar também na Figura 5.19, que a curva termogravimétrica (em vermelho) mostrou que ocorreram 04 eventos térmicos, sendo eles à aproximadamente 60°C, 252 °C, 470 °C e 716 °C. Esses eventos foram identificados pela derivada da curva, a DTG (em azul).

Os eventos térmicos representam a perda de massa provavelmente de materiais orgânicos (e provavelmente umidade). Percebe-se que uma parcela dessa perda ocorre até pouco mais de 550 °C (18 % de material), e após essa temperatura a perda de massa é de 13%.

Pinheiro e colaboradores (2007), indicam que a 697,7°C há uma perda de massa na Termogravimetria e um evento endotérmico na Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC), correspondente à decomposição do CaCO_3 . Na primeira corrida de TG do lodo 2 (Figura 5.18), é possível observar evento térmico nesta temperatura, sendo que na 2ª corrida (Figura 5.19) este evento está um pouco acima, ou seja, a 716 °C.

Assim, a análise via Termogravimetria do lodo 2, está concordando com o que foi identificado também na análise de Difração de Raios X deste lodo (Cloreto Férrico e adição de cal micropulverizada), ou seja, identificação de CaCO_3 em sua composição.

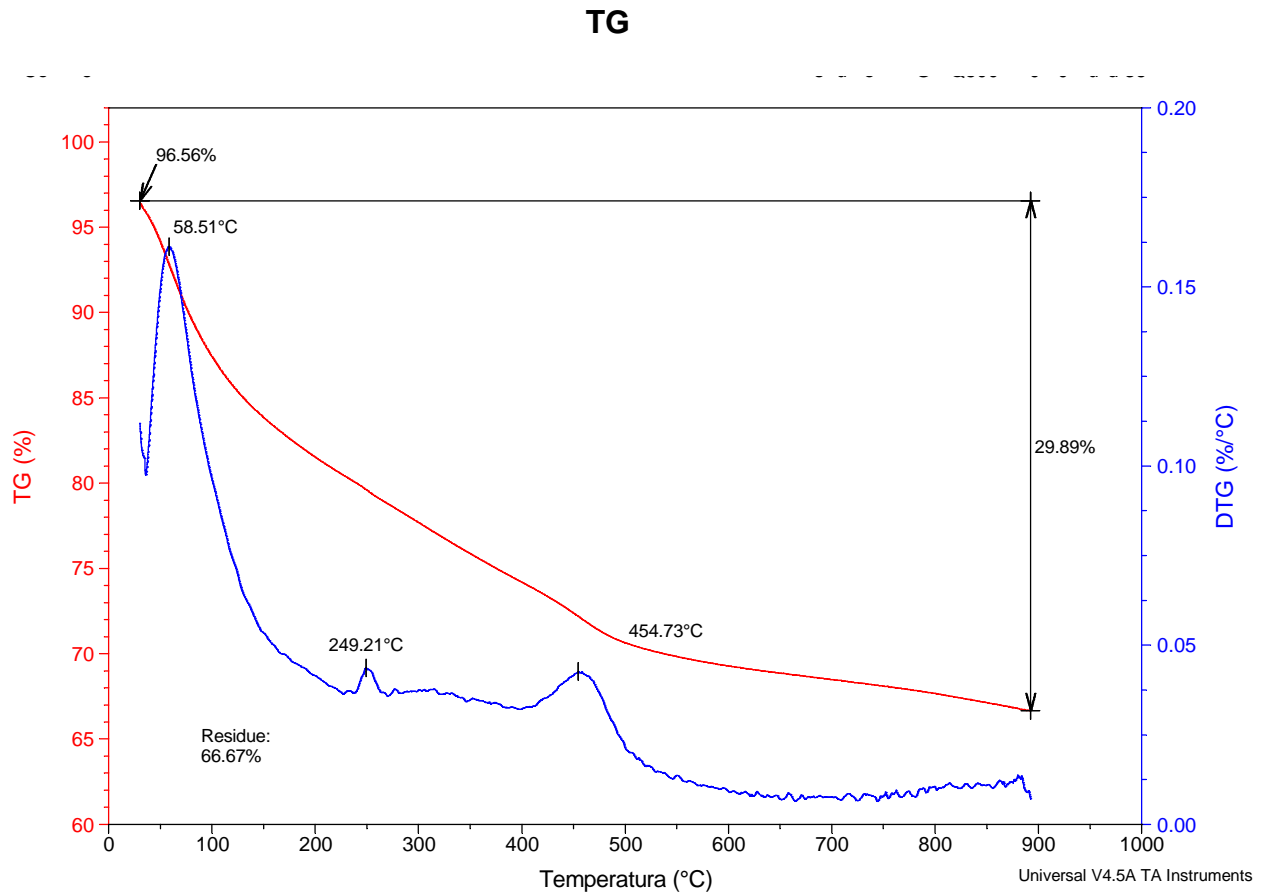


Figura 5.21- Gráfico da 1ª corrida da análise de TG- Lodo 3.

As condições utilizadas na 1ª corrida de Termogravimetria do Lodo 3 (Figura 5.21) foram:

- Quantidade de material: 8,7480 mg;
- Temperatura Inicial: 30 °C;
- Temperatura Final: 900 °C;
- Taxa de Aquecimento: 20°C/ min;
- Atmosfera Utilizada: Nitrogênio;

TG

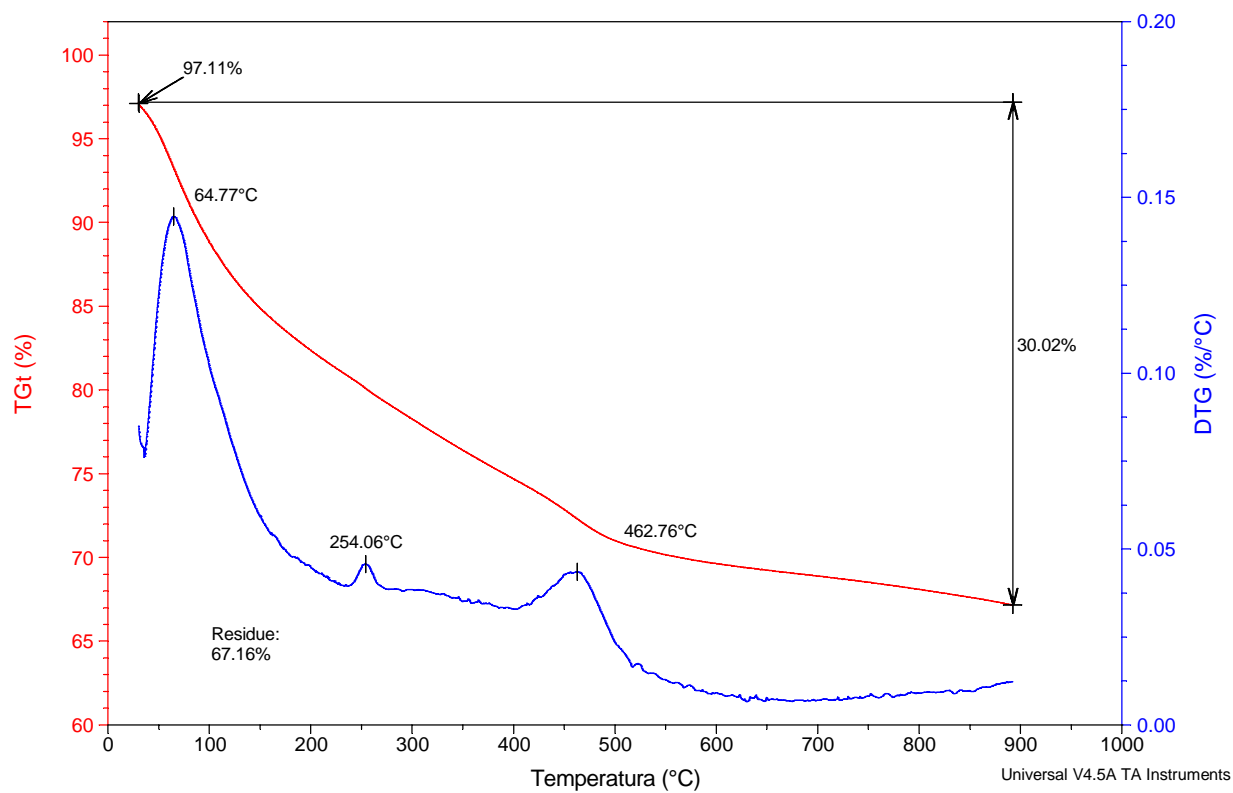


Figura 5.22- Gráfico da 2ª corrida da análise de TG- Lodo 3.

As condições utilizadas na 2ª corrida de Termogravimetria do Lodo 3 (Figura 5.22) foram:

- Quantidade de material: 8,1260 mg;
- Temperatura Inicial: 30 °C;
- Temperatura Final: 900 °C;
- Taxa de Aquecimento: 20°C/ min;
- Atmosfera Utilizada: Nitrogênio;

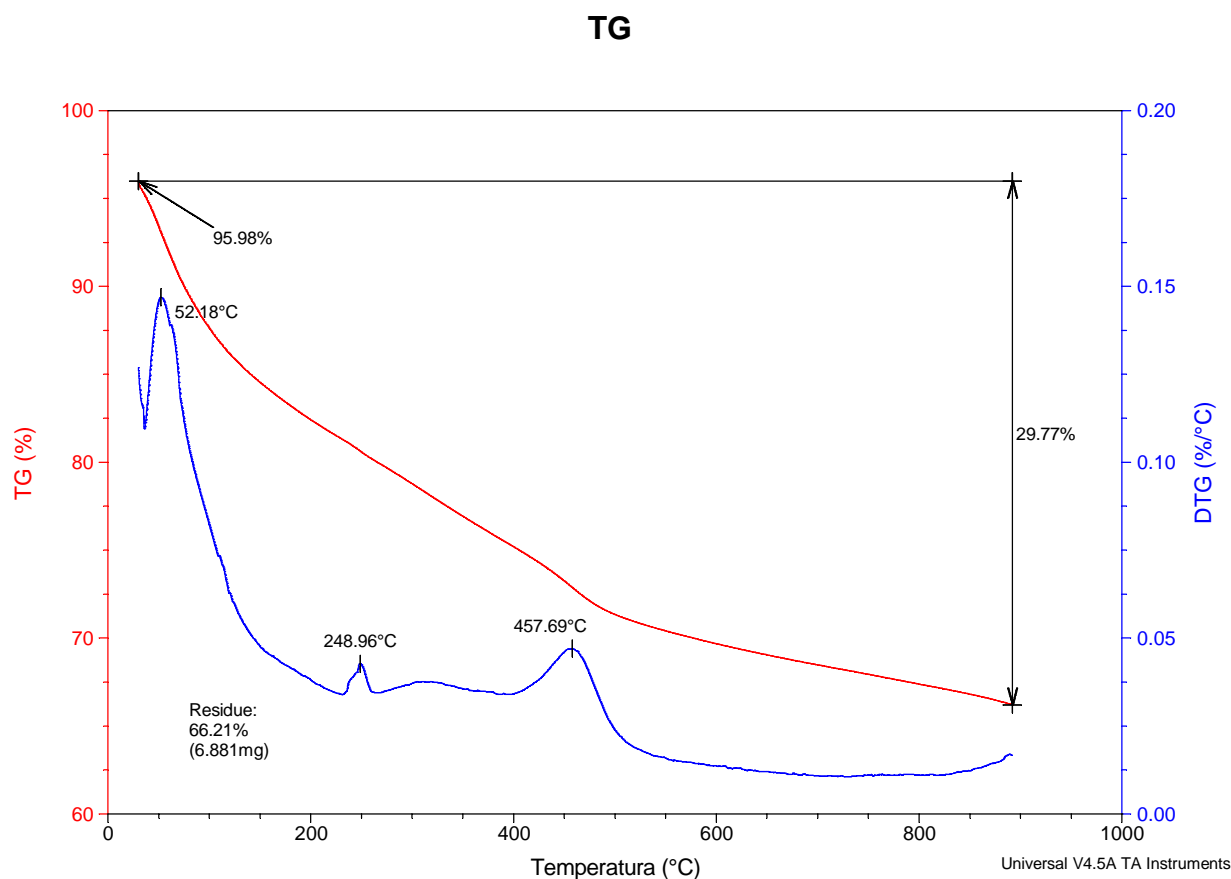


Figura 5.23- Gráfico da 3ª corrida da análise de TG- Lodo 3.

As condições utilizadas na 3ª corrida de Termogravimetria do Lodo 3 (Figura 5.23) foram:

- Quantidade de material: 10,3930 mg;
- Temperatura Inicial: 30 °C;
- Temperatura Final: 900 °C;
- Taxa de Aquecimento: 20°C/ min;
- Atmosfera Utilizada: Nitrogênio;

As análises de TG do lodo 3 mostraram que o comportamento das curvas obtidas são bastante semelhantes também, determinando dessa forma que o resíduo do lodo, que é obtido após o ensaio, é de aproximadamente 67%.

Avaliando-se em particular a 1ª corrida de TG (Figura 5.21), observa-se que o lodo também apresentou perda de material já a temperatura ambiente (pouco mais de 3%). Fato esse que pode ser explicado também pela possível presença de umidade no lodo 3.

É possível verificar na Figura 5.21, que a curva termogravimétrica (em vermelho) mostrou que ocorreram 03 eventos térmicos, sendo eles à aproximadamente 58°C, 249 °C e a 455 °C, eventos esses que foram identificados pela derivada da curva, a DTG (em azul).

Percebe-se que a perda de massa do lodo 3 ocorre de forma distinta dos outros 02 lodos, ou seja, perda total de aproximadamente 30%, até a temperatura de 900 °C.

Segundo Gardolinski e colaboradores (2003), desconsiderando-se que a amostra tenha moléculas de água de adsorção/ absorção, a Caulinita hidratada seca ao ar, apresenta uma perda de massa contínua até cerca de 300 °C, associado na Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) a um pico endotérmico em 60 °C, e um pico largo entre 100 °C e 300 °C.

Os 03 lodos analisados via Termogravimetria, apresentaram perdas de massa contínua até cerca de 300 °C, e evento térmico a aproximadamente 60 °C (pico endotérmico no DSC da referência bibliográfica), sendo estas características térmicas típicas da Caulinita. Este fato concorda também com a identificação realizada por Difração de Raios X, que identificou a Caulinita nos 03 lodos avaliados.

6- CONCLUSÕES

A utilização de análises laboratoriais e métodos avançados de caracterização de materiais, especialmente de outros setores industriais e áreas de pesquisas, mostraram-se úteis no estudo dos lodos de ETAs. A interação com esses setores pode contribuir para soluções com maiores eficiências no gerenciamento dos resíduos sólidos gerados no Tratamento de Água.

A partir dos resultados obtidos, avaliação e discussão desses, é possível concluir que:

- O ensaio de MEV/ EDS e a Análise Química Quantitativa mostraram a predominância dos teores de elementos como o Al, Fe e Si, para os 03 lodos avaliados.
- Em função do reuso, como aproveitamento em produtos cerâmicos, deseja-se resíduos sólidos com alto teores de Al e Si, conforme pode ser encontrado principalmente nos lodos 1 e 3, ou seja, do ponto de vista da composição, existe o potencial de reutilização destes materiais.
- A predominância do elemento Ferro (Fe) nos 03 lodos, em especial na lodo 2 (Cloreto Férrico), evidencia a possibilidade de utilização desses resíduos sólidos na cerâmica vermelha.
- As caracterizações via de Difração de Raios X, indicam a incidência de Caulinita nos 03 lodos analisados, além de demais argilominerais. Como considera-se que os resíduos com grande quantidade de argila são ideais para produzir peças cerâmicas, destaca-se neste sentido o lodo 1 (Sulfato de Alumínio) e o lodo 3 (Cloreto de Polialumínio).

- Em relação às análises para avaliar a distribuição de tamanho das partículas, verificou que há uma fração de partículas abaixo de 2,0 μm , características das argilominerais.
- Considerando o fato que quanto maior a fração de partículas menores que 2,0 μm , mais rico é o lodo referente ao reuso e aproveitamento cerâmico, o lodo 3 (Cloreto de Polialumínio) foi o que apresentou maior potencial, com massa acumulada de aproximadamente 20% de partículas que possuem dimensões abaixo de 2,0 μm .
- Para incorporação do lodo de ETA em produtos industrializados (cerâmica vermelha, blocos cerâmicos e demais produtos), é necessária a *avaliação dos impactos ambientais* causados na confecção e utilização desses produtos, além da avaliação do custo/ benefício.

7- SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Avaliando- se os resultados obtidos e as discussões presentes na dissertação, sugere- se:

- Explorar as análises de Difração de Raios X de amostras de lodos de ETAs, com o objetivo de identificar *quantitativamente* as argilominearais, ou seja, estudar procedimentos específicos de preparação de amostras e avaliação mais detalhada dos resultados;
- Verificar possibilidade de incorporação dos resíduos sólidos de ETAs em *compostos poliméricos* (avaliando custo/ benefício), sendo que os resíduos seriam utilizados como “carga de enchimento”, pois normalmente utiliza-se de cargas minerais com este propósito;
- Incorporar o lodo de ETA em blocos e cerâmica vermelha, e assim verificar se a resistência mecânica, térmica e demais propriedades estão de acordo com as Normas Brasileiras;
- Verificar se há indícios de contaminação em peças industrializadas que foram incorporadas com resíduo sólido de ETA.
- Desenvolver estudos aprofundados sobre propriedades reológicas do lodo, já que essas propriedades são importantes no estudo da secagem deste material;
- Comenta- se também que os lodos produzidos nas ETAs deverão ser reutilizados, e somente deverá ser disposto o que não puder ser utilizado. Um exemplo que pode- se citar é a transferência desse material para ETE, uma vez que o lodo é predominantemente inorgânico, ou seja, não

degrada, e conseqüentemente aumenta o volume de resíduos gerados na ETE.

8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHON, C.L. Ecoeficiência de sistemas de tratamento de água à luz dos conceitos da ISO 14.001. 2008. 227 f. Tese (Doutorado no programa de pós- graduação em Hidráulica e Saneamento da EESC)- Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

ACHON, C.L.; CORDEIRO, J.S. (2003). Gerenciamento de lodo de ETAs- Remoção de água livre através de Leitões de Secagem e Lagoas. In: 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Anais. Joinville- SC, ABES, cd, I- 047.

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATIONS; AMERICAN WATER SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS; U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Management of Water Treatment Plant Residuals. American Society of Civil Engineers, New York, 1996.

ANDREOLI, C.V. (coordenador). Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final. Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT. NBR 10.004- Resíduos sólidos- Classificação, São Paulo, 2004.

BARROSO, M.M. Influência das micro e macropropriedades dos lodos de estações de tratamento de águas no desaguamento por leito de drenagem. 2007. 249 f. Tese (Doutorado no programa de pós- graduação em Hidráulica e Saneamento da EESC)- Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

BAUMHARDT NETO, R. Raios X. In: CANEVAROLO JR, S.V. (Ed.) Técnicas de caracterização de polímeros. São Paulo: Artliber, 2004. p.41-60.

CORDEIRO, J.S. O problema dos lodos gerados nos decantadores em estações de tratamento de água. 1993. 342f. Tese (Doutorado na Escola de Engenharia)- Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.

_____. Processamento de Lodos de Estações de Tratamento de água (ETA)
In: FINEP, CNPq, CEF. (Org.). Resíduos Sólidos do Saneamento: Processamento, Reciclagem e Disposição Final. Rio de Janeiro: RIMA-ABES, v.1, pp. 119- 142, 2001.

DHARMAPPA, H.B.; HASIA, A.; HAGARE, P. Water treatment plant residuals management . Water Science and Technology, vol 35 n.8, pp 45-46, 1997.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A.D.B. Métodos e Técnicas de tratamento de Água. 2. ed. São Carlos: Rima Editora, v.2, 2005.

DIAS, L.M.; BATOLIONE, G.; MORAIS, F.U.; FERNANDES, J.; RIBEIRO, M.C.; LISBOA, M.S. Alternativa de destinação final de lodo de Estação de Tratamento de água- Fabricação de Blocos Cerâmicos. In: XXVIII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária y Ambiental, 2002, Cancun. XXVIII Congresso. México: AIDIS, 2002.

FERNANDES, A. N. Balanço de massa e produção de lodo da estação de tratamento de água Alto da Boa Vista- SABESP, São Paulo. Dissertação (Mestrado)- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 203 p, São Paulo, 2002.

FONTANA, A.O. Sistema de leito de drenagem e sedimentador como solução para redução de volume de lodo de decantadores e reuso de água de lavagem de filtros- Estudo de Caso- ETA Cardoso. 2004. 161f. Dissertação (Mestrado no programa de pós-graduação em engenharia Urbana)- Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.

GARDOLINSKI, J.E.; MARTINS FILHO, H.P.; WYPYCH, F. Comportamento térmico da caulinita hidratada. Química Nova, v.26, n.1, p.30-35, 2003.

GATTES, C.D., MCDERMOTT, R.P. Characterization and conditioning of water treatment plant sludge. Journal AWWA. Denver, v. 60, n. 3, pp. 33144, mar, 1968.

GONÇALVES, M., C. Microscopia eletrônica de varredura. In CANEVAROLO JR, S.V. (ED.) Técnicas de caracterização de polímeros. São Paulo: Artliber, pp. 165- 175, 2004.

GRANDIN, S. Desidratação de lodos produzidos nas estações de tratamento de água. 1992. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Sanitária)- Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 1992

HOPPEN, C.; PORTELLA, K. F.; ANDREOLI, C. V.; SALES, A.; JOUKOSKI, A. Estudo de dosagem para incorporação do lodo de ETA em matriz de concreto, como forma de disposição final. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 23., 2005, Campo Grande. ANAIS... Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005.

JEFFERY, G.H.; BASSETT, J.; MENDHAM, J.; DENNEY, R.C. Vogel- Análise química quantitativa. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1992.

KAWAMURA, S. Integrated design and operation of Water Treatment Facilities. New York, NY, John Willy & Sons Inc, 2ª ed. 2000.

LAWLER, D.F. Particle size distribution in treatment processes:theory and practice. Water Science and Technology. v.36, n.04, pp. 15-23, 1997.

MATOS, J.R.; MACHADO, B. Análise Térmica- Termogravimetria. In CANEVAROLO JR, S.V. (ED.) Técnicas de caracterização de polímeros. São Paulo: Artliber, pp. 165- 175, 2003

MINISTÉRIO DA SAÚDE. Portaria MS nº 518/ 2004. Disponível em: <http://www.saude.gov.br/editora>. Aceso em 31 Jul. 2007.

MORITA, D.M.; ANDRADE, P.S.; NOVAES, R.M. Uso de lodo de estação de tratamento de água em cerâmica vermelha. In: Seminário Nacional sobre tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água, 2008, São Paulo, Brasil.

NETO, R.B. Raio X. In CANEVAROLO JR, S.V. (ED.) Técnicas de caracterização de polímeros. São Paulo: Artliber, pp. 165- 175, 2003.

OLIVEIRA, E. M. S.; MACHADO, S.Q.; HOLANDA, J.N.F. Caracterização de resíduo (lodo) proveniente de estação de tratamento de águas visando sua utilização em cerâmica vermelha. *Cerâmica*, v. 50, pp. 324- 330. Rio de Janeiro, 2004.

PATRIZZI, L.J. Redução de lodo gerado em decantadores de estações de tratamento de água (ETAs) tradicionais, utilizando espessamento por flotação e por gravidade seguidos de centrifugação. 1998. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento)- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 1998.

PINHEIRO, R.M.; VIEIRA, C.M.F.; SÁNCHEZ, R.; MONTEIRO, S.N. Caracterização de resíduo de papel. In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 51., 2007, Salvador, Brasil.

REALI, M. A. P. (coordenador). Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água. Rio de Janeiro: ABES, 1999.

RICHTER, C. A.; AZEVEDO NETTO, J.M. Tratamento de água. Tecnologia atualizada. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1995.

SALES, A.; CORDEIRO, J.S. Imobilização da fase sólida de lodos de estações de tratamento de água (ETAs). In: ANDREOLI, C.V. (Coordenador). Resíduos sólidos do saneamento: Processamento, reciclagem e disposição final. Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 2001.

SANTOS, H. R.; PRADO, G. S.; VIDAL, C. M. S.; MORUZZI, R. B.; CAMPOS, J. R. Aplicabilidade das Técnicas de Determinação de Tamanho de Partículas em Sistemas de Tratamento de Água e Esgoto Sanitário. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental. V.9, n.4, pp. 291-300. Out/ Dez, 2004.

SLATTER, P.T. Sludge pipeline design. Water Science and Technology. v. 44, n. 10, pp. 9- 18, 2001.

SMOLLEN, M. KAFAR, A. Electroosmotically enhanced sludge dewatering: Pilot- Plant Study. Water Science Tecnology. V 30, n.8, pp. 159-168, 1994.

TEIXEIRA, S.R.; SOUZA, S.A.; SOUZA, N.R.; ALÉSSIO, P.; SANTOS, G.T.A. Efeito da adição de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades de material cerâmico estrutural, v. 52, pp. 215-220. São Paulo, 2006.

VAN VLACK, L.H. Princípios de Ciência e Tecnologia dos Materiais. 4. ed. Rio de Janeiro: Campus, 1984.

VESILIND, P.A.; HSU, C.C. Limits of sludge dewaterability. Water Science Technology. v. 36, n. 11, pp. 87-91, 1997.

ANEXOS

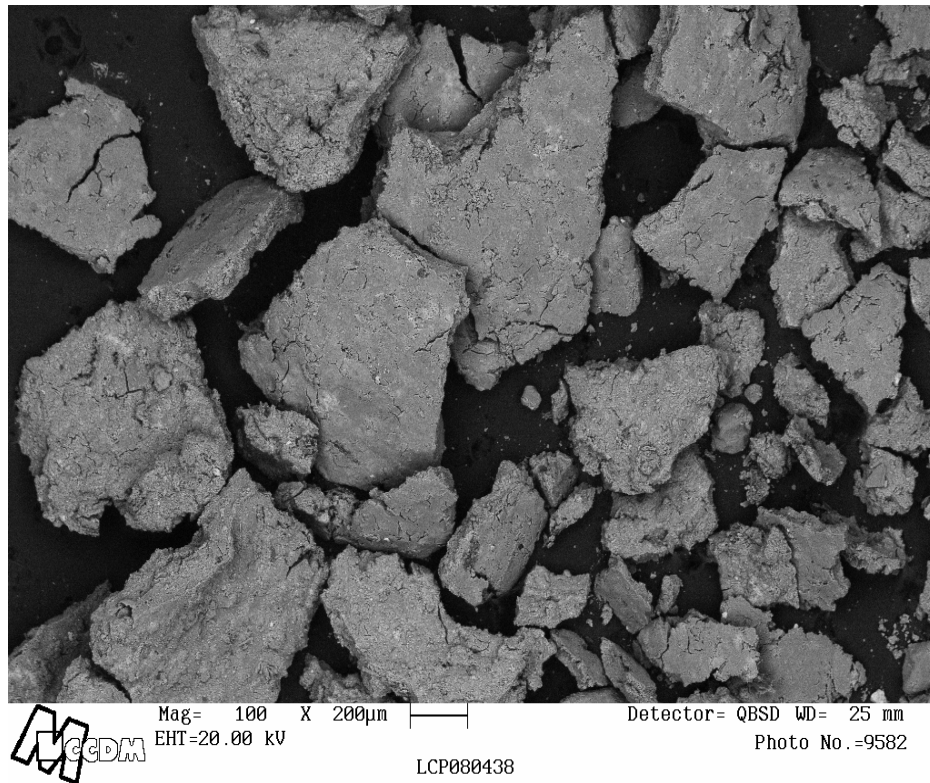


Figura A1- Micrografia obtida por MEV do lodo 1 (Sulfato de Alumínio)- Aumento de 100 x

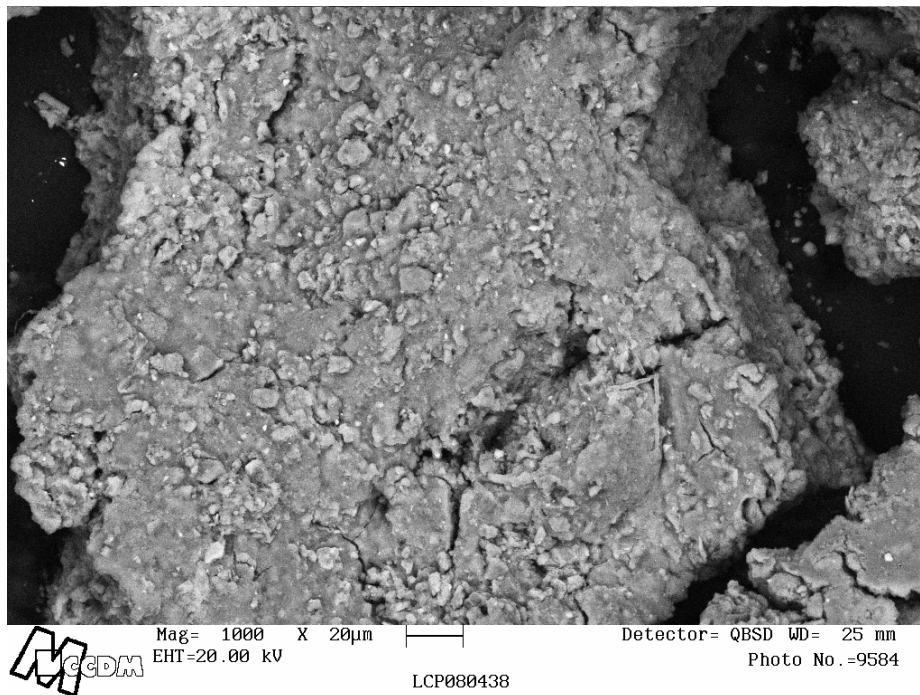


Figura A2- Micrografia obtida por MEV do lodo 1- ponto 2 (Sulfato de Alumínio)- Aumento de 1000 x

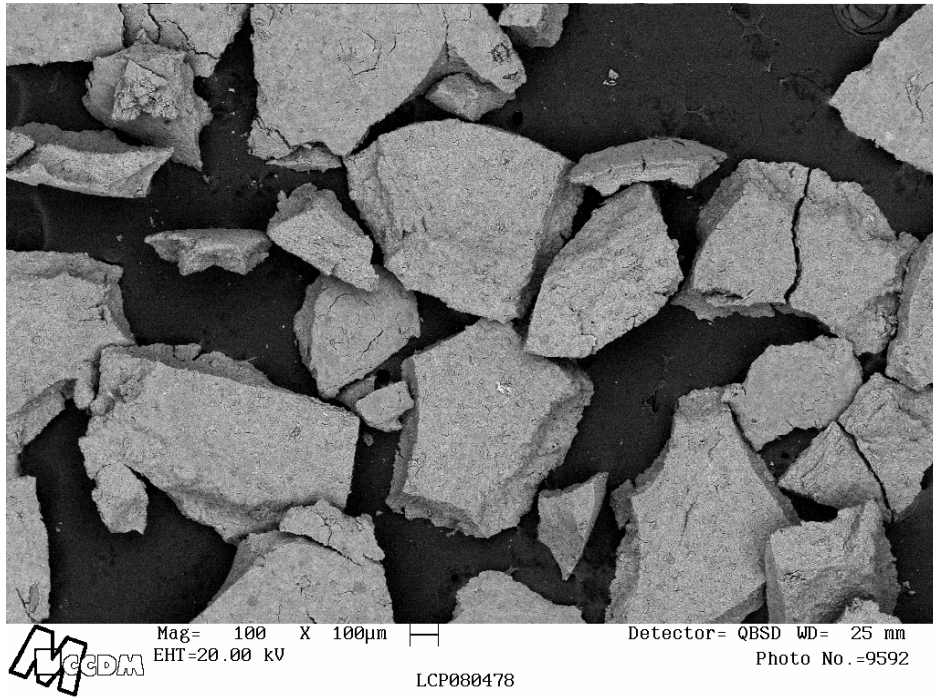


Figura A3- Micrografia obtida por MEV do lodo 2 (Cloreto Férrico)- Aumento de 100 x

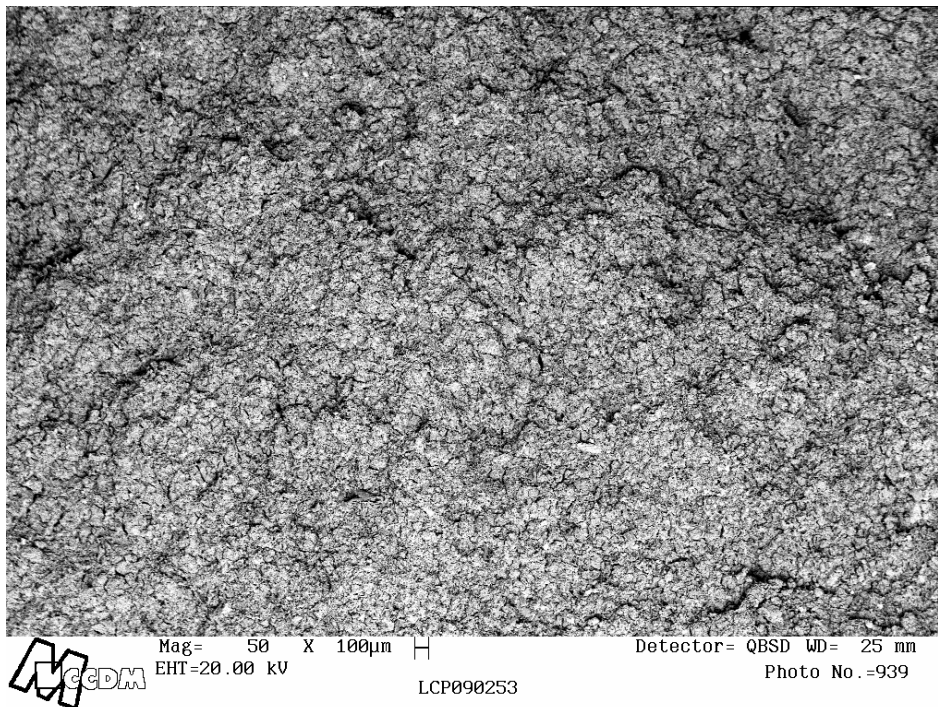


Figura A4- Micrografia obtida por MEV do lodo 3 (Cloreto de Polialumínio)- Aumento de 50 x

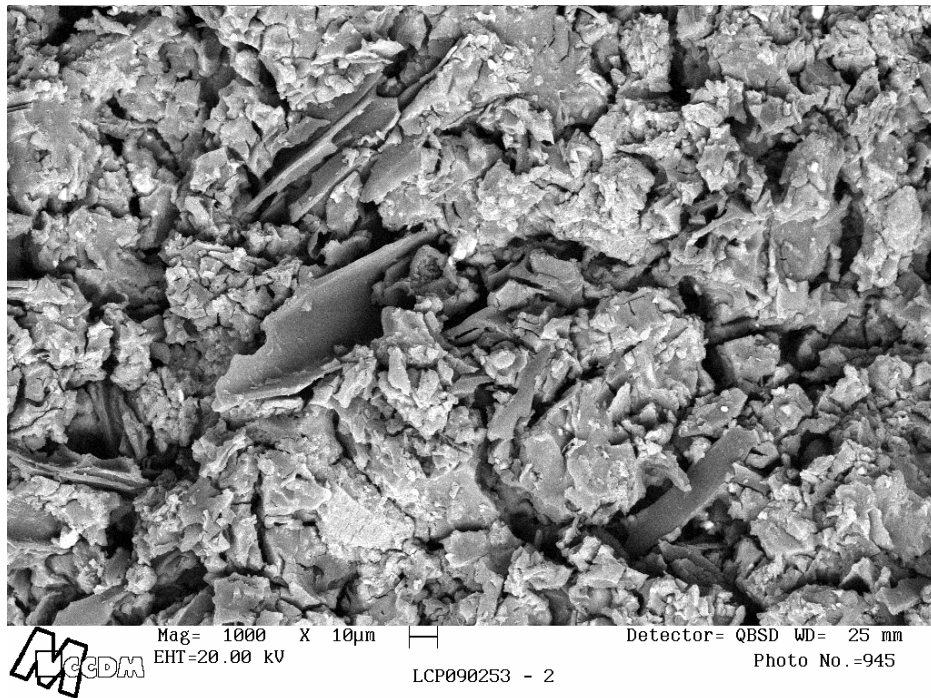


Figura A5- Micrografia obtida por MEV do lodo 3- ponto 2 (Cloreto de Polialumínio)- Aumento de 1000 x