

INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
ÁGUA DE CAMPOS DOS GOYTACAZES EM CORPOS CIMENTÍCIOS
PARA USO EM TIJOLO SOLO-CIMENTO

LARA PESSIN RODRIGUES

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY
RIBEIRO - UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ
AGOSTO - 2012

INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
ÁGUA DE CAMPOS DOS GOYTACAZES EM CORPOS CIMENTÍCIOS
PARA USO EM TIJOLO SOLO-CIMENTO

LARA PESSIN RODRIGUES

"Dissertação de Mestrado apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção de título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais".

Orientador: Prof. José Nilson França de Holanda

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

AGOSTO – 2012

FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do CCT / UENF

68/2012

Rodrigues, Lara Pessin

Incorporação de resíduo de estação de tratamento de água de Campos dos Goytacazes em corpos cimentícios para uso em tijolo solo-cimento / Lara Pessin Rodrigues. – Campos dos Goytacazes, 2012.

xvii, 89 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) -- Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Materiais Avançados. Campos dos Goytacazes, 2012.

Orientador: José Nilson França de Holanda.

Área de concentração: Materiais e meio ambiente.

Bibliografia: f. 80-89.

1. RESÍDUO DE ETA 2. TIJOLO SOLO-CIMENTO 3. VALORIZAÇÃO 4. PROPRIEDADES I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Materiais Avançados II. Título.

CDD 363.728

INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
ÁGUA DE CAMPOS DOS GOYTACAZES EM CORPOS CIMENTÍCIOS
PARA USO EM TIJOLO SOLO-CIMENTO

LARA PESSIN RODRIGUES

"Dissertação de Mestrado apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção de título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais".

Aprovada em 09 de agosto de 2012.

Comissão Examinadora:

Prof. Eduardo Atem de Carvalho (Ph.D., Engenharia Mecânica) – UENF

Prof. Roberto da Trindade Faria Júnior (D.Sc., Física) – UENF

Prof. Sidnei José Gomes Sousa (D.Sc., Engenharia e Ciência dos Materiais) – FAETEC

Prof. José Nilson França de Holanda (D.Sc., Engenharia de Materiais) – UENF

Orientador

*Dedico este trabalho aos meus queridos pais Eloir e Zenaide, ao meu irmão Breno e
ao meu professor José Nilson.*

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Zenaide e Eloir, por sempre estarem ao meu lado em todos os momentos, sempre com muita dedicação amor, carinho, preocupação e esforço por mim. Á vocês meu eterno carinho e gratidão!

A Deus que juntamente com meus pais me proporciona lindas oportunidades e por nunca se esquecerem de mim.

Ao Prof. José Nilson França de Holanda, pela orientação, confiança, dedicação e oportunidade de realizar este trabalho.

A Cerâmica Sardinha e a Empresa Águas do Paraíba pelo fornecimento das matérias-primas utilizadas neste trabalho.

Aos professores Guilherme Cordeiro e Gustavo Xavier, por suas colaborações e conhecimento.

Aos professores Eduardo Atem, Roberto Trindade e Sidnei Sousa por aceitarem em fazer parte desta banca.

A todos os professores que passaram pela minha formação e dividiram seus conhecimentos comigo.

A todos da minha família, por terem me dado muitos votos de felicidade.

Aos meus amigos do LAMAV: Perissé e Fabrício, pela grande ajuda, Mariane e Mário Lucas, por sempre me fazerem rir, Aline, pelas suas ricas explicações, André, pelo apoio nas etapas deste trabalho, Thaís, Kátia e Laís, pelo carinho e ajuda em todos os momentos que precisei e os demais colegas da pós-graduação, pelo apoio e amizade.

Aos secretários e técnicos do LAMAV e LECIV: Luciana, Carlan, Rômulo, Elaine, Shirlene, Milton, Vanússia e André, que me ajudaram na realização dos ensaios para este trabalho.

A todos que me ajudaram direta e indiretamente no desenvolvimento desse trabalho.

Muito Obrigada.

Sumário

Lista de Figuras.....	IX
Lista de Tabelas.....	XIII
Resumo.....	XVI
Abstract.....	XVII
Capítulo 1. Introdução.....	1
Capítulo 2. Revisão Bibliográfica.....	3
2.1. Solo.....	3
2.2. Cimento.....	4
2.2.1. Cura.....	6
2.2.2. Tipos de cimento Portland.....	6
2.2.2.1. Cimentos Portland comuns e compostos.....	7
2.2.2.2. Cimentos Portland de alto-forno e pozolânicos.....	8
2.2.2.3. Cimento Portland de alta resistência inicial.....	9
2.2.2.4. Cimentos Portland resistentes aos sulfatos.....	10
2.2.2.4.1. Cimento Portland com escória de alto forno.....	10
2.2.2.5. Cimentos Portland de baixo calor de hidratação.....	11
2.2.2.6. Cimento Portland branco (CPB).....	11
2.2.2.7. Cimento para poços petrolíferos.....	11
2.3. Processo de tratamento de água.....	14
2.3.1. Estação de tratamento de água (ETA).....	14
2.3.2. ETA de Campos dos Goytacazes.....	17

2.4. Resíduos sólidos.....	17
2.5. Resíduo de estação de tratamento de água.....	18
2.5.1. Destino final do resíduo de estação de tratamento de água.....	19
2.6. Solo-cimento.....	21
2.6.1. Tijolo solo-cimento.....	21
2.6.2. Processo de fabricação do tijolo solo-cimento.....	24
2.7. Incorporação de resíduo de ETA em materiais cerâmicos.....	26
2.7.1. Incorporação em cerâmica vermelha.....	26
2.7.2. Incorporação de resíduo de ETA em tijolo solo-cimento.....	29
Capítulo 3. Materiais e Métodos.....	39
3.1. Matérias-primas.....	39
3.2. Metodologia.....	40
3.2.1. Beneficiamento das matérias-primas.....	40
3.2.2. Caracterização das matérias-primas.....	40
3.2.2.1. Análise mineralógica.....	42
3.2.2.2. Composição química.....	42
3.2.2.3 Determinação do carbono total, matéria orgânica, pH, capacidade de troca catiônica e sais solúveis.....	43
3.2.2.4. Análises térmicas (ATD/TG).....	43
3.2.2.5. Análise granulométrica.....	43
3.2.2.6. Análise morfológica.....	43
3.2.2.7. Plasticidade.....	44
3.2.2.8. Avaliação ambiental do resíduo de ETA.....	44

3.2.2.9. Caracterização do cimento.....	44
3.2.3. Formulação e preparação dos traços com adição de resíduo de ETA	45
3.2.4. Preparação dos corpos cimentícios.....	46
3.2.5. Etapa de cura dos corpos cimentícios.....	47
3.2.6. Caracterização física e mecânica dos corpos cimentícios e tijolos.....	48
3.2.6.1. Massa específica bulk.....	48
3.2.6.2. Resistência à compressão simples.....	49
3.2.6.3. Absorção de água.....	49
3.2.7. Caracterização microestrutural e de fases dos corpos cimentícios.....	50
Capítulo 4. Resultados e Discussão.....	51
4.1. Caracterização das Matérias-Primas Utilizadas.....	51
4.1.1. Análise mineralógica.....	51
4.1.2. Análise química.....	53
4.1.3. Avaliação do carbono total, matéria orgânica, pH, capacidade de troca catiônica e sais solúveis.....	56
4.1.4. Análise granulométrica.....	57
4.1.5. Plasticidade.....	60
4.1.6. Análises térmicas.....	62
4.1.7. Morfologia.....	65
4.1.8. Avaliação ambiental do resíduo de ETA.....	67
4.2. Análise de fases e microestrutural dos corpos cimentícios curados.....	69
4.2.1. Análise microestrutural.....	69
4.2.2. Análise de fases.....	72

4.3. Efeitos do resíduo de ETA nas propriedades tecnológicas de solo-cimento....	73
4.3.1. Avaliação das propriedades tecnológicas dos corpos cimentícios curados..	73
5. Conclusões e sugestões.....	77
5.1. Conclusões.....	77
5.2. Sugestões para trabalhos futuros.....	79
Referências Bibliográficas.....	80

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Perfil de solo com os horizontes A, B e C (Silva, 2009).....	3
Figura 2.2 – Evolução média de resistência à compressão dos distintos tipos de cimento Portland (ABCP, 1999).....	13
Figura 2.3 – Lodo do decantador (Cordeiro, 1999).....	16
Figura 2.4 – Pontos de geração de resíduos em ETAs (Cordeiro, 1993).....	16
Figura 2.5 – Difratoograma de raios-X do resíduo de ETA. (Oliveira <i>et al.</i> , 2004)...	19
Figura 2.6 – Despejo de lodo de ETA no Córrego Monjolinho (Souza, 2006).....	20
Figura 2.7 – (a) Tijolos de solo-cimento e (b) Construção civil em solo-cimento (Lima, 2006; Destefani, 2009).....	22
Figura 2.8 – (a) Rasgo em alvenaria convencional e (b) Passagem de tubulações pelos furos (Destefani, 2009).....	23
Figura 2.9 – Organograma do processo para fabricação de solo-cimento (Pedroti, 2007).....	25
Figura 2.10 – Tijolo solo-cimento com suas respectivas dimensões (FUNTAC, 1999).....	25
Figura 2.11 – Absorção de água da massa de cerâmica vermelha queimada em função do teor de lodo de ETA incorporado (Margem <i>et. al.</i> , 2006).....	28
Figura 2.12 – Tensão de Ruptura à Flexão da massa de cerâmica vermelha queimada em função do teor de lodo de ETA incorporado (Margem <i>et. al.</i> , 2006).....	29
Figura 2.13 – Difração de raios-X do lodo (Silva, 2009).....	30
Figura 2.14 – Difração de raios-X do solo (Silva, 2009).....	31
Figura 2.15 – Absorção de água e resistência à compressão dos tijolos com 3 % de lodo (Silva, 2009).....	31

Figura 2.16 – Absorção de água e resistência à compressão dos tijolos com 5 % de lodo (Silva, 2009).....	32
Figura 2.17 – Absorção de água e resistência à compressão dos tijolos com 8 % de lodo (Silva, 2009).....	32
Figura 2.18 – Absorção de água e resistência à compressão dos tijolos com 10 % de lodo (Silva, 2009).....	33
Figura 2.19 – Variação das médias de absorção de água e resistência à compressão com teores de lodo nos tijolos aos 28 dias de cura (Silva, 2009).....	33
Figura 3.1 – Fluxograma das etapas envolvidas neste trabalho.....	39
Figura 3.2 – Vista parcial da estação de tratamento de água de Campos dos Goytacazes.....	40
Figura 3.3 – (a) Tanques de decantação da ETA de Campos dos Goytacazes e (b) Lodo de ETA em processo de decantação.....	41
Figura 3.4. – Solo in natura.....	41
Figura 3.5 – (a) Resíduo de ETA beneficiado e (b) Solo destorroado e peneirado.....	41
Figura 3.6 – (a) Prensa hidráulica e (b) molde cilíndrico utilizado na confecção dos corpos cimentícios.....	47
Figura 3.7 – Câmara úmida para processo de cura.....	48
Figura 4.1. – Difratoograma de raios-X do resíduo de ETA: C - Caulinita; G - Gibsita; I/M = Ilita/Mica; Q - Quartzo; Go - Goetita.....	51
Figura 4.2. – Difratoograma de raios-X do solo arenoso: C = Caulinita; G = Gibsita; Go = Goetita; I/M = Ilita/Mica; Q = Quartzo.....	52
Figura 4.3. – Difratoograma de raios-X do cimento Portland CPIII-40RS: 1 = Ferroaluminato tetracálcico (C ₄ AF); 2 = Alita (C ₂ S); 3 = Carbonato de cálcio; 4 = Belita (C ₂ S); 5 = Aluminato tricálcio (C ₃ A); 6 = Óxido de cálcio; 7 = Gipsita (CaSO ₄).....	53

Figura 4.4. – Distribuição de tamanho de partícula do resíduo de ETA.....	58
Figura 4.5. – Distribuição de tamanho de partícula do solo arenoso.....	59
Figura 4.6. – Distribuição de tamanho de partícula das massas cimentícias incorporadas com resíduo de ETA.....	60
Figura 4.7. – Curvas de análises térmica diferencial e termogravimétrica (ATD e ATG) para o resíduo de ETA.....	63
Figura 4.8. – Curvas de análises térmica diferencial e termogravimétrica (ATD e ATG) para o solo arenoso.....	65
Figura 4.9. – Morfologia das partículas do resíduo de ETA: (a) 200X; (b) 500X; (c) 1000X.....	66
Figura 4.10. – Mapeamento por EDS para o resíduo de ETA.....	67
Figura 4.11. – Microestrutura da superfície de fratura para a composição de 0,00 % de resíduo de ETA: (a) 108X; (b) 216X; (c) 430X.....	70
Figura 4.12. – Microestrutura da superfície de fratura para a composição de 1,25 % de resíduo de ETA: (a) 108X; (b) 216X; (c) 430X.....	71
Figura 4.13. – Difração de raios-X dos corpos cimentícios com incorporação de 0,00, 1,25 e 5,00 % de resíduo de ETA: C = Caulinita; G = Gibbsita; I/M = Illita/Mica; Q = Quartzo; Go = Goetita; B = Belita (C ₂ S); P = Portlandita (CH); Sc = Silicato de cálcio hidratado (C-S-H); E = Etringita; At = Aluminato tricálcico.....	72
Figura 4.14. – Massa específica bulk dos corpos cimentícios incorporados com resíduo de ETA após 28 dias de cura.....	73
Figura 4.15. – Resistência à compressão (NBR 10834/94) dos corpos cimentícios incorporados com resíduo de ETA após 28 dias de cura.....	74
Figura 4.16. – Absorção de água (NBR 10834/94) dos corpos cimentícios incorporados com resíduo de ETA após 28 dias de cura.....	75
Figura 4.17. – Corpos cimentícios com 28 dias de cura após ensaio de	76

resistência a compressão: (a) 0,00 % de resíduo de ETA; (b) 1, 25 %; (c) 2,50 %;
(d) 5,00 %.....

Figura 4.18. – Corpos cimentícios com 28 dias de cura após ensaio de absorção
de água: (a) 0,00 % de resíduo de ETA; (b) 1, 25 %; (c) 2,50 %; (d) 5,00 %.....

76

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Compostos principais do cimento Portland (Neville, 1997).....	5
Tabela 2.2 – Classificação dos cimentos Portland segundo a ABNT.....	7
Tabela 2.3 – Composição dos cimentos Portland comuns e compostos (ABCP, 2002).....	8
Tabela 2.4 – Composição dos cimentos Portland de alto-forno e pozolânicos (ABCP, 2002).....	9
Tabela 2.5 – Composição do cimento Portland de alta resistência inicial (ABCP, 2002).....	10
Tabela 2.6 – Composição dos cimentos Portland branco (ABCP, 2002).....	11
Tabela 2.7 – Exigências físicas e mecânicas para os diversos tipos de cimento Portland (ABCP, 2002).....	12
Tabela 2.8 – Exigências químicas para os diversos tipos de cimento Portland (ABCP, 2002).....	13
Tabela 2.9 – Composição química de resíduo de ETA (Oliveira <i>et al.</i> , 2004).....	19
Tabela 2.10 – Limites de atterberg do resíduo de ETA (Oliveira <i>et al.</i> , 2004).....	19
Tabela 2.11 – Valores de resistência à compressão e absorção de água para tijolo de solo-cimento (ABNT, 1994).....	24
Tabela 2.12 – Características de solos para fabricação de tijolos de solo-cimento (ABCP, 1985).....	24
Tabela 2.13 – Caracterização física dos blocos (Ramires <i>et al.</i> , 2005).....	27
Tabela 2.14 – Composição química do lodo de ETA (% em peso) (Margem <i>et al.</i> , 2006).....	28
Tabela 2.15 – Resultados obtidos na produção de tijolos com lodo desaguado contendo teor de umidade de 75 a 80 % (Porras <i>et al.</i> , 2008).....	34

Tabela 2.16 – Resultados obtidos na produção de tijolos com lodo desaguado contendo teor de umidade de 70 a 74 % (Porras <i>et. al.</i> , 2008).....	35
Tabela 2.17 – Resultados obtidos na produção de tijolos com o lodo desaguado no leito de secagem (Porras <i>et. al.</i> , 2008).....	35
Tabela 2.18 – Resultados obtidos na produção de tijolos com o lodo desidratado na estufa (Porras <i>et. al.</i> , 2008).....	36
Tabela 2.19 – Absorção de água dos tijolos confeccionados com o lodo em leito de secagem e totalmente seco (Porras <i>et. al.</i> , 2008).....	37
Tabela 2.20 – Resistência à compressão dos tijolos confeccionados com lodo totalmente seco que atenderam os limites estipulados de absorção de água (Porras <i>et. al.</i> , 2008).....	37
Tabela 3.1. – Caracterização física do cimento Portland CPIII-40RS.....	45
Tabela 3.2 – Composição dos traços (em partes).....	46
Tabela 3.3 – Composição das massas cimentícias (g).....	46
Tabela 3.4 – Composição das massas cimentícias (% em peso).....	46
Tabela 4.1. – Composição química da escória de alto forno do cimento Portland CPIII-40RS (Pinto, 2010).....	53
Tabela 4.2. – Composição química do resíduo de ETA, solo arenoso e cimento Portland CPIII-40RS (%).....	54
Tabela 4.3. – Composição química do clínquer (ABCP, 2002).....	56
Tabela 4.4. – Análise do carbono total, matéria orgânica, pH, capacidade de troca catiônica e sais solúveis do resíduo de ETA e do solo arenoso.....	57
Tabela 4.5. – Limites de consistência de Atterberg do resíduo de ETA (%).....	61
Tabela 4.6. – Limites de consistência de Atterberg do solo arenoso (%).....	61
Tabela 4.7. – Limites de consistência de Atterberg das massas cimentícias (%)..	62

Tabela 4.8. – Densidade real dos grãos das massas cimentícias (g/cm ³).....	62
Tabela 4.9. – Variação da massa em função da temperatura na análise termogravimétrica do resíduo de ETA.....	64
Tabela 4.10 – Variação da massa em função da temperatura na análise termogravimétrica do solo arenoso.....	65
Tabela 4.11. – Ensaio de lixiviação do resíduo de ETA (mg/L).....	68
Tabela 4.12 – Ensaio de solubilização do resíduo de ETA (mg/L).....	68

Resumo da dissertação apresentada ao CCT-UENF como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais.

INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA DE CAMPOS DOS GOYTACAZES EM CORPOS CIMENTÍCIOS PARA USO EM TIJOLO SOLO-CIMENTO

Lara Pessin Rodrigues

09 de Agosto de 2012

Orientador: Prof. José Nilson França de Holanda

As estações de tratamento de água são unidades industriais usadas para tratamento de água doce bruta principalmente para o consumo humano. Como uma consequência dos processos de tratamento, são gerados enormes volumes de lodo geralmente denominado de resíduo de estação de tratamento de água (resíduo de ETA). No Brasil este resíduo tem sido na maioria das vezes disposto no meio ambiente de forma inadequada causando impacto ambiental. Este trabalho tem por objetivo avaliar a incorporação de resíduo de estação de tratamento de água em corpos cimentícios para produção de tijolo solo-cimento. As matérias-primas utilizadas foram: solo arenoso, cimento Portland comercial e resíduo de ETA proveniente da região de Campos dos Goytacazes-RJ. As matérias-primas foram caracterizadas quanto a difração de raios-X, composição química, análise térmica, análise granulométrica, análise morfológica e plasticidade. A classificação ambiental do resíduo de ETA também foi determinada. Quatro misturas de solo-cimento contendo 0,00, 1,25, 2,50 e 5,00 % em peso de resíduo de ETA em substituição ao solo arenoso foram preparadas. Os corpos cimentícios foram confeccionados por prensagem uniaxial numa prensa hidráulica a 18 MPa e com teor de umidade de 16 %. Em seguida os corpos cimentícios foram depositados em uma câmara úmida para um período de cura de 28 dias. Os corpos cimentícios curados foram caracterizados em termos de absorção de água, massa específica bulk e resistência à compressão simples. Os resultados experimentais indicaram que para as condições estudadas, foi constatado que é possível incorporar até 1,25 % em peso de resíduo de ETA em corpos cimentícios para uso em tijolo solo-cimento.

Palavras-chave: Resíduo de ETA, tijolo solo-cimento, valorização, propriedades.

Abstract of dissertation presented to CCT-UENF as part of the requirements for obtaining the Master Degree in Materials Engineering and Science.

INCORPORATION OF WASTE WATER TREATMENT PLANT OF CAMPOS DOS GOYTACAZES IN CEMENT BODIES FOR USE IN SOIL-CEMENT BRICK

Lara Pessin Rodrigues

August 9th, 2012

Advisor: Prof. José Nilson França de Holanda

The water treatment plants are plants used for treating raw fresh water mainly for human consumption. As a consequence of the treatment processes are generated large volumes of sludge generally called waste water treatment plant (WTP waste). In Brazil, this waste has been most often prepared in the environment improperly causing environmental impact. This work aims to evaluate the feasibility of incorporation waste water treatment plant in cement bodies to produce soil-cement brick. The raw materials used were: sandy soil, Portland cement and WTP waste from the region of Campos dos Goytacazes-RJ. The raw materials were characterized as to X-ray diffraction, chemical analysis, thermal analysis, particle size analysis, morphological analysis and plasticity. The environmental classification of WTP waste was also determined. Four different types of soil-cement moisture were prepared. The addition of 0,00, 1,25, 2,50 and 5,00 wt.% of WTP waste substituted the sandy soil. The cement bodies were manufactured by means of the axial pressing under an 18 MPa pressure and 16 % humidity. The next step was to place the pressed bodies in a humid chamber for 28 days for curing. The cured bodies were submitted to the water absorption assay, bulk density and compression strength test.

The experimental results indicated that, for the conditions studied, it was found that it is possible to incorporate up to 1,25 wt.% of WTP waste in soil-cement brick.

Key words: Waste water treatment plant, soil-cement brick, valorization and properties.

Capítulo 1. Introdução

O rápido crescimento da população urbana implica indiscutivelmente, em aumento da demanda de produtos, bens e serviços. Isto leva à necessidade de expansão industrial e ao conseqüente incremento na geração de resíduos (Porras *et. al.*, 2008). Neste contexto, a busca de alternativas tecnológicas para aproveitamento destes resíduos pode trazer benefícios ambientais e econômicos à sociedade. Uma das alternativas existentes é a reciclagem secundária, ou seja, reciclagem do resíduo em outro processo produtivo (Carvalho, 2005). As vantagens do reaproveitamento de resíduos poluentes provenientes do setor produtivo podem ser analisadas pela redução do consumo de matéria-prima natural e de poluição ambiental. Portanto, a reciclagem destes materiais denominados resíduos sólidos, vincula o crescimento industrial à problemática ambiental, tendo como consequência o desenvolvimento sustentável.

O setor da construção civil tem se tornado nos últimos anos uma alternativa promissora, para o destino de resíduos sólidos poluentes de diversos tipos e origens, quando comparado aos métodos tradicionais (Dondi, *et. al.* 1997; Chies, *et. al.* 2000; Saboya *et. al.*, 2007; Teixeira *et. al.*, 2008).

Anualmente o setor produtivo do estado do Rio de Janeiro gera enormes quantidades de resíduos sólidos poluentes. Em especial, as estações de tratamento de água (ETAs) para consumo humano produzem um grande volume de lodo de ETA, que tem sido ao longo dos anos, dispostos inadequadamente nos recursos hídricos (Oliveira e Holanda, 2008). Um dos grandes desafios na atualidade é o reaproveitamento e valorização destes resíduos de forma ambientalmente correta.

O presente trabalho de dissertação de mestrado teve como objetivo principal o estudo da influência da adição do resíduo de estação de tratamento de água nas propriedades tecnológicas e na microestrutura do corpo cimentício para produção de tijolo solo-cimento. Além disso, como objetivos específicos foram realizados a caracterização física, química e mineralógica das matérias-primas, preparação das massas cimentícias incorporadas com resíduo de ETA, caracterização física e mecânica dos corpos cimentícios e análise microestrutural e de fases dos corpos cimentícios.

Neste contexto, como justificativa da metodologia proposta na presente dissertação de mestrado, têm-se: economia de recurso natural não renovável,

contribuição para o destino final correto deste abundante resíduo poluente. Sendo produzido anualmente 2.800 toneladas do resíduo na estação de tratamento de água de Campos dos Goytacazes-RJ (Águas do Paraíba, 2011), que varia em função dos períodos chuvoso ou seco, arraste de sólidos e adição de produtos ao tratamento de água. E, além disso, como os tijolos de solo-cimento apresentam excelentes características físicas e mecânicas, facilidade de fabricação e baixo custo, tornam-se altamente atrativo para fabricação de casas para a população de baixa renda.

No capítulo 2 é apresentada a revisão da literatura com ênfase sobre as características de solos, tipos de cimento, geração de resíduo de estação de tratamento de águas, tijolos solo-cimento e incorporação de resíduo de estação de tratamento de águas em materiais cerâmicos. No capítulo 3 são apresentados os materiais e metodologia empregada no desenvolvimento da presente dissertação de mestrado. No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados experimentais. E finalmente no capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões da presente dissertação de mestrado, bem como as perspectivas para trabalhos futuros.

Capítulo 2. Revisão Bibliográfica

Neste capítulo serão abordados diversos tópicos relacionados ao solo, cimento, solo-cimento e resíduo de ETA, bem como sua incorporação em tijolo solo-cimento.

2.1. Solo

O solo é um corpo de material inconsolidado, constituído por três fases, sendo estas: sólida, líquida e gasosa, de natureza mineral e orgânica resultante da ação dos intemperismos físico, químico e biológico sobre as rochas (Reichardt, 1987). Ele pode ser coberto por vegetação e conter matérias vivas, e também ser modificado pela ação humana (Embrapa, 1999).

O solo possui diversas definições. Para a Geologia, o solo é produto do intemperismo. Para a agronomia o solo é a camada que pode desenvolver vida vegetal, e para a Engenharia Civil, o solo é uma mistura de diversos minerais passível de ser escavado, sendo suporte para as construções civis (Bueno e Vilar, 1980).

A estrutura do solo nada mais é do que a união de partículas unitárias de areia, silte e argila em partículas compostas ou grumos (Tomé Jr, 1997).

A Figura 2.1 ilustra um perfil de solo em corte, mostrando a distinção entre os horizontes.

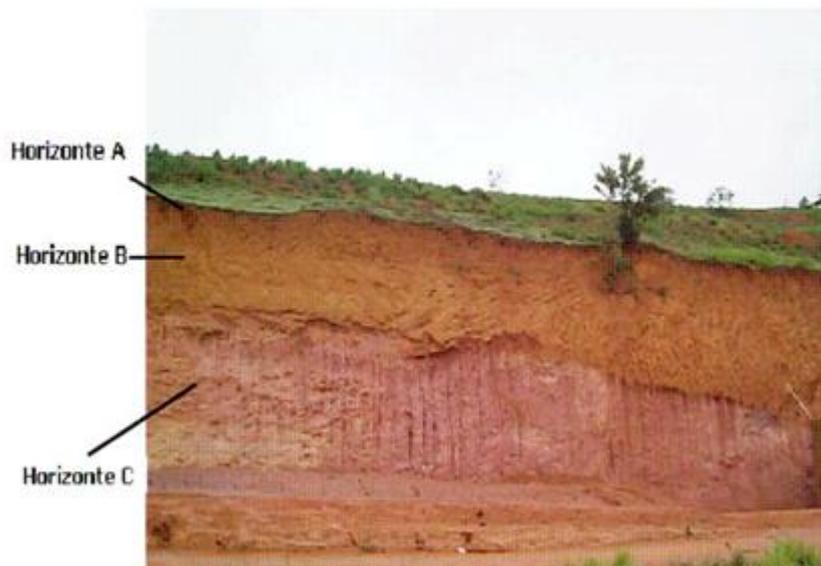


Figura 2.1. – Perfil de solo com os horizontes A, B e C (Silva, 2009).

O perfil A possui pequena espessura, de 20 cm a 30 cm, podendo encontrar celulose e húmus. A celulose é inerte, mas o húmus é um ácido orgânico que tem afinidade química com a cal livre (CaO), esta sendo liberada na hidratação do cimento, e mesmo em baixas concentrações, pode afetar a resistência do material. Os solos do horizonte B são geralmente argilosos, predominando a argila caulinita, que apresenta difícil destorroamento, assim causa um grande problema na homogeneização da mistura solo-cimento. No horizonte C os solos são arenosos e de fácil destorroamento, o que indica preferência no seu emprego em tijolos de solo-cimento (Grande, 2003).

Segundo Ferraz *et. al* (2000) a utilização do solo para construção civil pode ser tanto na forma em que ele é encontrado ou, após correção de algumas propriedades. Podem ser empregados diversos métodos para correção, sendo um deles a correção granulométrica.

2.2. Cimento

De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (2002), o cimento Portland é um pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, composto basicamente de silicatos de cálcio e aluminatos de cálcio que misturados à água se hidratam e, após seu endurecimento, mesmo que seja novamente submetido ao contato com água, o cimento Portland não se decompõe mais.

Segundo Taylor (1992), o cimento é um sólido fino resultante de uma mistura de clínquer e aditivos em proporções definidas que apresenta propriedades adesivas, que em contacto com a água, produz uma reação exotérmica de cristalização de produtos hidratados, ganhando assim, resistência mecânica (Taylor, 1992).

Para a fabricação do cimento são empregados materiais calcáreos, como gesso, alumina e sílica. O processo de fabricação do cimento Portland consiste em moer as matérias-primas, misturá-las nas proporções adequadas e queimar essa mistura em um forno rotativo até uma temperatura de cerca de 1450° C. Nessa temperatura, o material sofre uma fusão desenvolvendo pelotas, conhecidas com clínquer. Após formação do clínquer, este é resfriado e moído, até um pó bem fino, geralmente menor que 75 µm, com adição de um pouco de gesso, resultando o

cimento Portland largamente usado em todo mundo (Neville, 1997). A mistura e moagem das matérias-primas podem ser feitas tanto em via úmida quanto em via seca, ou seja, podem ser feitas em água ou a seco.

Durante a queima ocorrem inúmeras reações de estado sólido entre as fases constituintes, reações envolvendo essas fases e a parte fundida do material e, ainda, a ocorrência de transformações mineralógicas devido ao resfriamento, gerando os principais componentes do cimento (Tabela 2.1), que quando hidratados fornecem as principais propriedades deste material (Zampieri, 1989).

Tabela 2.1. – Compostos principais do cimento Portland (Neville, 1997).

Nome do composto	Composição em óxidos	Abreviação	Composição
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S	42 – 60 %
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S	14 – 35 %
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	6 – 13 %
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	5 – 10 %
Gipsita	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	CSH_2	1 – 4 %

Notação: CaO: C; SiO_2 : S; Al_2O_3 : A; Fe_2O_3 : F; SO_3 : S; H_2O : H.

As reações químicas entre os silicatos e aluminatos relacionados na Tabela 2.1 com a água são denominadas de reações de hidratação do cimento e geram uma massa firme e resistente. De acordo com Mehta e Monteiro (1994), o cimento Portland não aglomera os agregados, ele só adquire propriedade adesiva quando misturado à água. Dessa forma a hidratação é importante para adesão e para gerar produtos que possuam características de pega e endurecimento. Além disso, o C_3S apresenta rápida hidratação, desprendendo uma quantidade média de calor, gerando um gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e cristais de hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (C-H), também conhecido como portlandita. Este composto contribui para elevar a resistência inicial da pasta endurecida e aumentar sua resistência final. Já o C_2S , que desprende uma quantidade pequena de calor durante sua lenta hidratação, também é responsável pelo aumento de resistência nas idades avançadas e produz um volume menor de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, em comparação com o C_3S . Responsável pelas primeiras reações de hidratação, o C_3A libera uma grande quantidade de calor para formar aluminatos hidratados. O C_4AF também se hidrata

rapidamente, semelhante ao C_3A , mas exerce pouca influência sobre a resistência mecânica da pasta.

O cimento é a segunda substância mais utilizada no mundo, porém sua produção gera grande impacto ao meio ambiente. A fabricação do cimento Portland é responsável por cerca de 5 % das emissões mundiais de gases estufa (Pereira, 2008). Além disso, o impacto ambiental é gerado pela queima de combustível para a realização do processo de clínquerização e, também, pela liberação de CO_2 através da decomposição da calcita contida no calcário, durante a etapa de queima. No total, cada tonelada de cimento produzida, libera de (0,85 a 1,1) toneladas de CO_2 dependendo do combustível e da eficiência do processo, e consome cerca de (0,30 a 0,35) toneladas de argila (solo).

2.2.1. Cura

A cura, em condições adequadas, tem como objetivos: impedir a perda da água de hidratação do cimento; controlar a temperatura do material, até que se alcance o nível de resistência desejado; e suprir água extra para as reações de hidratação (Castro, 2008). A cura é essencial para garantir a durabilidade adequada de superfícies expostas e desenvolvimento das resistências mecânicas. Sabe-se que a falta de uma cura adequada pode influir na qualidade final do produto, independente dos cuidados como preparo e transporte.

2.2.2. Tipos de cimento Portland

A princípio o cimento Portland pode ser constituído unicamente de clínquer e de uma substância reguladora de pega, caracterizando o que se convencionou denominar “cimento Portland comum”. Entretanto, ao longo do tempo, outros materiais começaram a ser utilizados em conjunto com o clínquer, constituindo os “cimentos com adições”. Desta forma, a ABNT define o cimento Portland em tipos e classes de acordo com os seus componentes e propriedades. A classe do cimento caracteriza sua resistência mínima potencial aos 28 dias, sendo dividida em três níveis: 25 MPa, 32 MPa e 40 MPa.

A ABCP (2002) relata que no Brasil existem diferentes tipos de cimento Portland. Sendo os mais empregados na construção civil:

- cimento Portland comum;
- cimento Portland composto;
- cimento Portland de alto-forno;
- cimento Portland pozolânico.

Existem outros tipos de cimento no mercado, porém em menor escala comercial, devido a sua menor oferta, ou alto custo, ou pelas características especiais de aplicação, os quais são: cimento Portland de alta resistência inicial; cimento Portland resistente aos sulfatos; cimento Portland branco; cimento Portland de baixo calor de hidratação e cimento para poços petrolíferos. A Tabela 2.2 mostra a classificação dos cimentos Portland de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Tabela 2.2. – Classificação dos cimentos Portland segundo a ABNT.

Nome técnico	Sigla
Cimento Portland comum	CP I
Cimento Portland comum com adição	CP I-S
Cimento Portland com escória	CP II-E
Cimento Portland com pozolana	CP II-Z
Cimento Portland com fíler	CP II-F
Cimento Portland de alto-forno	CP III
Cimento Portland pozolânico	CP IV
Cimento Portland de alta resistência inicial	CP V
Cimento Portland resistentes a sulfatos	Sigla e classe dos tipos originais acrescidos do sufixo RS
Cimento Portland de baixo calor de hidratação	Sigla e classe dos tipos originais acrescidos do sufixo BC
Cimento Portland branco estrutural	CPB
Cimento Portland para poços de petróleo	CPP

2.2.2.1. Cimentos Portland comuns e compostos

Segundo a ABCP (2002), o primeiro cimento Portland incorporado no mercado brasileiro foi o CP, atualmente conhecido como CP I, sendo um tipo de cimento Portland comum sem quaisquer adições além de gesso, utilizado como

retardador de pega. A partir de estudos científicos e tecnológicos sobre o cimento Portland comum outros tipos de cimento foram desenvolvidos. Em 1991 surgiu no mercado brasileiro um novo tipo de cimento denominado de cimento Portland composto, cuja composição é intermediária entre os cimentos Portland comuns e os cimentos Portland com adições (alto-forno e pozolânico) (ABCP, 2002). A Tabela 2.3 apresenta a composição dos cimentos Portland comuns e compostos.

Tabela 2.3. - Composição dos cimentos Portland comuns e compostos (ABCP, 2002).

Tipo de cimento portland	Sigla	Composição (% em massa)				Norma Brasileira
		Clínquer + gesso	Escória granulada de alto-forno (sigla E)	Material pozolânico (sigla Z)	Material carbonático (sigla F)	
Comum	CP I	100		-		NBR 5732
	CP I S	99-95		1-5		
Composto	CP II-E	94-56	6-34	-	0-10	NBR 11578
	CP II-Z	94-76	-	6-14	0-10	
	CP II-F	94-90	-	-	6-10	

Os cimentos Portland compostos são os mais encontrados atualmente no mercado, respondendo por aproximadamente 75 % da produção industrial brasileira. Eles são utilizados na maioria das aplicações usuais, em substituição ao antigo CP.

2.2.2.2. Cimentos Portland de alto-forno e pozolânicos

O grande consumo de energia durante o processo de fabricação de cimento motivou a busca de medidas para diminuição do consumo energético. Sendo uma alternativa o uso de escórias granuladas de alto-forno, que são resíduos de siderúrgicas que funcionam como ligante hidráulico, ao qual proporciona o aumento da impermeabilidade e da resistência final, e materiais pozolânicos derivados de compostos vulcânicos, certas argilas queimadas, resíduos de carvoarias, o que proporciona também uma maior impermeabilidade (ABCP, 2002).

As escórias granuladas de alto-forno apresentam propriedades hidráulicas latentes, ou seja, da maneira como são obtidas endurecem quando misturadas com

água. Porém, as reações de hidratação das escórias são lentas, o que limitam sua aplicação prática. Entretanto, agentes ativadores, químicos e físicos, podem acelerar o processo de hidratação. Como por exemplo, a cal liberada durante a hidratação do clínquer, sendo o principal ativador químico da escória quando esta é adicionada ao cimento, já a ativação física é conseguida pelo aumento da finura quando a escória é moída separada ou com o clínquer. Os materiais pozolânicos, ao contrário das escórias granuladas de alto-forno, não reagem com a água da forma como são adquiridas. Mas, quando finamente divididos, reagem com o hidróxido de cálcio em presença de água e na temperatura ambiente, dando origem a compostos com propriedades aglomerantes. Por essa razão, os materiais pozolânicos são utilizados conjuntamente com o clínquer, pois o hidróxido de cálcio é um produto normalmente resultante da hidratação deste. A Tabela 2.4 mostra a composição dos cimentos Portland de alto-forno e pozolânicos.

Tabela 2.4. - Composição dos cimentos Portland de alto-forno e pozolânicos (ABCP, 2002).

Tipo de cimento portland	Sigla	Composição (% em massa)				Norma Brasileira
		Clínquer + gesso	Escória Granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático	
Alto-Forno	CP III	65-25	35-70	-	0-5	NBR 5735
Pozolânico	CP IV	85-45	-	15-50	0-5	NBR 5736

2.2.2.3. Cimento Portland de alta resistência inicial

De acordo com a ABCP (2002), o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI) caracteriza-se por atingir altas resistências já nos primeiros dias da aplicação. O desenvolvimento da alta resistência inicial é obtido através da utilização de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer (Tabela 2.5), bem como pela moagem mais fina do cimento, de modo que, ao reagir com a água, ele adquira elevadas resistências, em maior velocidade.

Tabela 2.5. - Composição do cimento Portland de alta resistência inicial (ABCP, 2002).

Tipo de cimento portland	Sigla	Composição (% em massa)		Norma Brasileira
		Clínquer + Gesso	Material carbonático	
Alta Resistência Inicial	CP V-ARI	100-95	0-5	NBR 5733

2.2.2.4. Cimentos Portland resistentes aos sulfatos

Os cimentos Portland resistentes aos sulfatos são aqueles, que têm a propriedade de oferecer resistência aos meios agressivos sulfatados, tais como os encontrados nas redes de esgotos de águas servidas ou industriais, na água do mar e em alguns tipos de solos. De acordo com a norma NBR 5737 (ABNT, 1992), quaisquer uns dos cinco tipos básicos (CP I, CP II, CP III, CP IV e CP V-ARI) podem ser considerados resistentes aos sulfatos, desde que obedçam a pelo menos uma das seguintes condições: teor de aluminato tricálcico (C_3A) do clínquer e teor de adições carbonáticas de, no máximo, 8 % e 5 % em massa, respectivamente; cimentos do tipo alto-forno que contiverem entre 60 % e 70 % de escória granulada de alto-forno, em massa; cimentos do tipo pozolânico que contiverem entre 25 % e 40 % de material pozolânico, em massa e cimentos que tiverem antecedentes de resultados de ensaios de longa duração ou de obras que comprovem resistência aos sulfatos.

2.2.2.4.1. Cimento Portland com escória de alto forno

As escórias de alto-forno são obtidas durante a produção de ferro-gusa nas indústrias siderúrgicas e se assemelham aos grãos de areia. Antigamente, as escórias de alto-forno eram consideradas como um material sem maior utilidade, até ser descoberto que elas também tinham a propriedade de ligante hidráulico muito resistente, ou seja, que reagem em presença de água, desenvolvendo características aglomerantes de forma muito semelhante à do clínquer. Essa descoberta tornou possível adicionar a escória de alto-forno à moagem do clínquer com gesso, guardadas certas proporções, e obter como resultado um tipo de cimento que, além de atender plenamente aos usos mais comuns, apresenta

melhoria de algumas propriedades, como maior durabilidade e maior resistência final. A escória de alto-forno é composta basicamente por CaO, SiO₂, Al₂O₃, MgO, TiO, FeO (Pinto, 2010).

2.2.2.5. Cimentos Portland de baixo calor de hidratação

O aumento da temperatura no interior de grandes estruturas de concreto devido ao calor desenvolvido durante a hidratação do cimento pode levar ao aparecimento de fissuras de origem térmica, que podem ser evitadas se forem usados cimentos com taxas lentas de evolução de calor, os chamados cimentos Portland de baixo calor de hidratação (ABCP, 2002).

2.2.2.6. Cimento Portland branco (CPB)

O cimento Portland branco possui coloração branca, que é conseguida a partir de matérias-primas com baixos teores de óxidos de ferro e manganês e por condições especiais durante a fabricação. O cimento Portland branco é regulamentado pela norma NBR 12989 (ABNT, 1993), sendo classificado em dois subtipos: cimento Portland branco estrutural e cimento Portland branco não estrutural, cujas composições são mostradas na Tabela 2.6.

Tabela 2.6. - Composição dos cimentos Portland branco (ABCP, 2002).

Tipo de cimento portland	Código de identificação (sigla + classe)	Composição (% em massa)		Norma Brasileira
		Clínquer branco + gesso	Material carbonático	
Branco estrutural	CPB-25	100-75	0-25	NBR 12989
	CPB-32			
	CPB-40			
Branco não estrutural	CPB	74-50	26-50	

2.2.2.7. Cimento para poços petrolíferos

O cimento para poços petrolíferos (CPP) é um tipo de cimento Portland de aplicação bastante específica, qual seja a cimentação de poços petrolíferos. Este

tipo de cimento Portland é regulamentado pela NBR 9831(ABNT, 2006) e na sua composição observa-se apenas clínquer e gesso para retardar o tempo de pega. Durante o processo de fabricação do cimento para poços petrolíferos são tomadas precauções para garantir que o produto conserve as propriedades de plasticidade necessárias na condição de pressão elevada presente a grandes profundidades, durante a aplicação nos poços petrolíferos.

De acordo com a ABCP (2002), as Tabelas 2.7 e 2.8 apresentam os limites estabelecidos de exigências químicas, físicas e mecânicas para os diferentes tipos de cimento em suas aplicações. As exigências químicas visam a limitar o teor de adições, a pré-hidratação e falhas no processo de fabricação, enquanto que as exigências físico-mecânicas garantem o desempenho mecânico e de plasticidade quando da aplicação em pastas, argamassas e concretos.

Tabela 2.7. - Exigências físicas e mecânicas para os diversos tipos de cimento Portland (ABCP, 2002).

Tipo de cimento portland	Classe	Finura		Tempos de pega		Expansibilidade		Resistência à compressão				
		Resíduo na peneira 75 mm (%)	Área específica (m ² /Kg)	Início (h)	Fim (h)	A frio (mm)	A quente (mm)	1 dia (MPa)	3 dias (MPa)	7 dias (MPa)	28 dias (MPa)	91 dias (MPa)
CP I CP I-S	25		≥ 240						≥ 8	≥ 15	≥ 25	
	32	≤ 12	≥ 260	≥ 1	≤ 10 ⁽¹⁾	≤ 5 ⁽¹⁾	≤ 5	-	≥ 10	≥ 20	≥ 32	-
	40	≤ 10	≥ 280						≥ 15	≥ 25	≥ 40	
CP II- E CP II- Z CP II- F	25		≥ 240						≥ 8	≥ 15	≥ 25	
	32	≤ 12	≥ 260	≥ 1	≤ 10 ⁽¹⁾	≤ 5 ⁽¹⁾	≤ 5	-	≥ 10	≥ 20	≥ 32	-
	40	≤ 10	≥ 280						≥ 15	≥ 25	≥ 40	
CP III ⁽²⁾	25		-	≥ 1		≤ 5 ⁽¹⁾	≤ 5		≥ 8	≥ 15	≥ 25	≥ 32 ⁽¹⁾
	32	≤ 8	-	≥ 1	≤ 12 ⁽¹⁾	≤ 5 ⁽¹⁾	≤ 5	-	≥ 10	≥ 20	≥ 32	≥ 40 ⁽¹⁾
	40								≥ 12	≥ 23	≥ 40	≥ 48 ⁽¹⁾
CP IV ⁽²⁾	25		-	≥ 1		≤ 5 ⁽¹⁾	≤ 5		≥ 8	≥ 15	≥ 25	≥ 32
	32	≤ 8	-	≥ 1	≤ 12 ⁽¹⁾	≤ 5 ⁽¹⁾	≤ 5	-	≥ 10	≥ 20	≥ 32	≥ 40
CP V- ARI		≤ 6,0	≥ 300	≥ 1	≤ 10 ⁽¹⁾	≤ 5 ⁽¹⁾	≤ 5,0	≥ 14	≥ 24	≥ 34	-	-

(1) Ensaio facultativo.

(2) Outras características podem ser exigidas, como calor de hidratação, inibição da expansão devida à relação álcali-agregado, resistência a meios agressivos, tempo máximo de início de pega.

Tabela 2.8. - Exigências químicas para os diversos tipos de cimento Portland (ABCP, 2002).

Tipo de cimento portland	Resíduo insolúvel (%)	Perda ao fogo (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	CO ₂ (%)	S (%)
CP I	≤ 1,0	≤ 2,0			≤ 1,0	-
CP I-S	≤ 5,0	≤ 4,5	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 3,0	-
CP II- E	≤ 2,5					-
CP II- Z	≤ 16,0	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 5,0	-
CP II- F	≤ 2,5					-
CP III	≤ 1,5	≤ 4,5	-	≤ 4,0	≤ 3,0	≤ 1,0 ⁽¹⁾
CP IV ⁽²⁾⁽³⁾	⁽⁴⁾	≤ 4,5	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 3,0	-
CP V- ARI	≤ 1,0	≤ 4,5	≤ 6,5	≤ 3,5 ≤ 4,5 ⁽⁵⁾	≤ 3,0	-

(1) Ensaio facultativo.

(2) A atividade pozzolânica do cimento, determinada conforme a NBR 5753, deve ser positiva.

(3) A atividade do material pozzolânico, determinada conforme a NBR 5752, deve ser maior que 75%.

(4) O teor de material pozzolânico deve ser determinado pelo ensaio de resíduo insolúvel.

(5) O teor de SO₃ igual a 3,5% aplica-se quando C₃A ≤ 8,0, e 4,5% quando C₃A ≥ 8,0%.

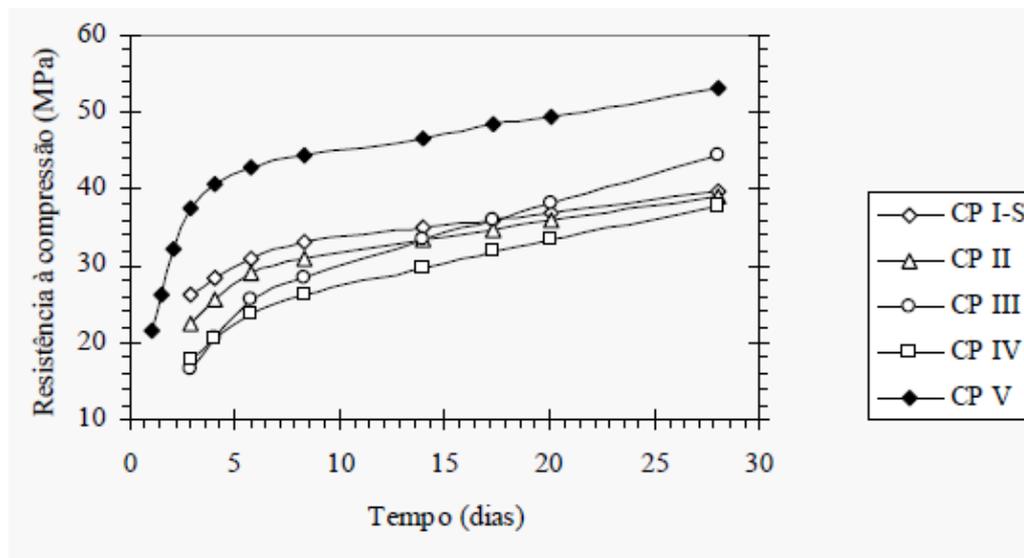


Figura 2.2. - Evolução média de resistência à compressão dos distintos tipos de cimento Portland (ABCP, 1999).

O cimento Portland de alto-forno CP III foi escolhido para utilização neste trabalho, devido à facilidade de encontrá-lo no âmbito comercial, seu baixo custo e por apresentar uma maior resistência à compressão, em aproximadamente 28 dias, em relação aos outros tipos de cimento Portland: CPI-S, II, III e IV (ABCP, 1999) (Figura 2.2).

2.3. Processo de tratamento de água

2.3.1. Estação de tratamento de água (ETA)

Para que a água bruta se torne adequada ao consumo humano, é necessário que ela passe por tratamento realizado em Estações de Tratamento de Água (ETA). A maioria das ETAs, no Brasil, é convencional ou de ciclo completo, tendo unidades de mistura rápida, floculação, decantação e filtração (Fadanelli e Wiecheteck, 2010).

As Estações de Tratamento de Água (ETA) possuem grande importância econômica e social. Segundo Braga *et. al.* (2005), o tratamento de água pode ser feito para atender a várias finalidades, sendo elas:

- Higiênicas: remoção de bactérias, vírus, protozoários e outros microorganismos, redução do excesso de impurezas e de teores elevados de compostos orgânicos, e remoção de substâncias tóxicas ou nocivas;
- Estéticas: correção de odor e sabor, cor, turbidez;
- Econômicas: redução de dureza, cor, turbidez, corrosividade, ferro, manganês, etc.

De acordo com Braga *et. al.* (2005), nas ETAs, onde a água bruta se torna adequada para o consumo humano, são realizadas as seguintes etapas de tratamento:

- **Sedimentação/Decantação:** Essa é uma técnica eficiente para remoção da matéria em suspensão, dependendo do tamanho e da densidade das partículas existentes e do tempo disponível para o processo. As partículas pesadas são removidas em um intervalo de tempo relativamente curto, enquanto mais tempo é exigido para materiais leves ou finamente dividido. Caso a concentração dessas partículas não-sedimentáveis for excessiva, esse método sozinho não será eficiente e outros meios deverão ser empregados.

- **Coagulação/Floculação:** É uma técnica de tratar a água com produtos químicos coagulantes, aplicados para agregar partículas dificilmente sedimentáveis em aglomerados que podem ser retirados com maior facilidade. Os aglomerados de material sólido resultantes, chamados flocos, são removidos por sedimentação e/ou por filtração.

- **Filtração:** A filtração da água é feita pelo uso de areia, antracito, diatomita e outros materiais de granulometria fina. Essa etapa também é capaz de remover impurezas muito leves para serem retiradas pela sedimentação.

- **Desinfecção:** A desinfecção tem como objetivo a destruição de organismos patogênicos e é realizada pela aplicação de cloro ou compostos de cloro. A desinfecção é a única etapa do tratamento de água especificamente destinada ao controle da qualidade bacteriológica.

- **Remoção de dureza:** Esse processo, chamado de abrandamento, significa a remoção dos elementos que conferem dureza à água, principalmente cálcio e magnésio. Produtos químicos, como carbonato de cálcio e hidróxido de magnésio, são adicionados para precipitação do cálcio e magnésio, respectivamente. Este processo reduz a quantidade total de sólidos dissolvidos na água.

- **Aeração:** Essa etapa remove substâncias voláteis, podendo influenciar sobre o sabor e odor da água.

- **Remoção de ferro e manganês:** Processos para remoção de ferro e manganês, porém só serão empregados em águas que contenham concentrações significativamente altas dessas substâncias, que podem causar problemas.

- **Remoção de sabor e odor:** Processos que permitam reduzir o sabor e odor da água, como por exemplo, aeração, adsorção ou oxidação.

- **Controle de corrosão:** É utilizado em alguns casos para remoção do excesso de dióxido de carbono, através da aeração, já em outros, aumenta a alcalinidade da água através de aplicação de um produto químico alcalino (cal e/ou carbonato de cálcio).

- **Fluoretação:** Adição de uma concentração de fluoreto na água que proporcione à população maior resistência a cáries dentárias.

As Estações de Tratamento de Água eliminam os colóides e matérias em suspensão presentes na água, como por exemplo, argilominerais, por tratamento químico usando floculantes, seguido por decantação e filtração. Dessa forma o resíduo de ETA é produzido nas unidades de decantação (Figura 2.3) e no sistema de filtração. (Tratamento de Água, 2011). Também para Di Bernardo e Dantas (2005), em uma ETA de ciclo completo, os resíduos gerados são provenientes das limpezas ou descargas de decantadores e da lavagem de filtros. Para Silva e Isaac (2002) a quantidade real de lodo originária dos decantadores representa cerca de 60

a 95 % da quantidade total de resíduos produzidos na ETA, sendo que o restante é oriundo do processo de filtração. Segundo Oliveira *et al* (2004), os floculantes mais empregados no tratamento primário de água são os sulfatos à base de alumínio e ferro. Esta atividade, no entanto, produz uma grande quantidade de resíduo (lodo). As características do resíduo variam com a natureza da água bruta, dos processos unitários e dos produtos químicos aplicados como constituintes da água. O destino deste tipo de resíduo tem sido no Brasil, ao longo dos anos, os sistemas hídricos mais próximos.



Figura 2.3. – Lodo do decantador (Cordeiro, 1999).

A Figura 2.4 mostra os pontos de geração de lodo em Estações de Tratamento de Água.

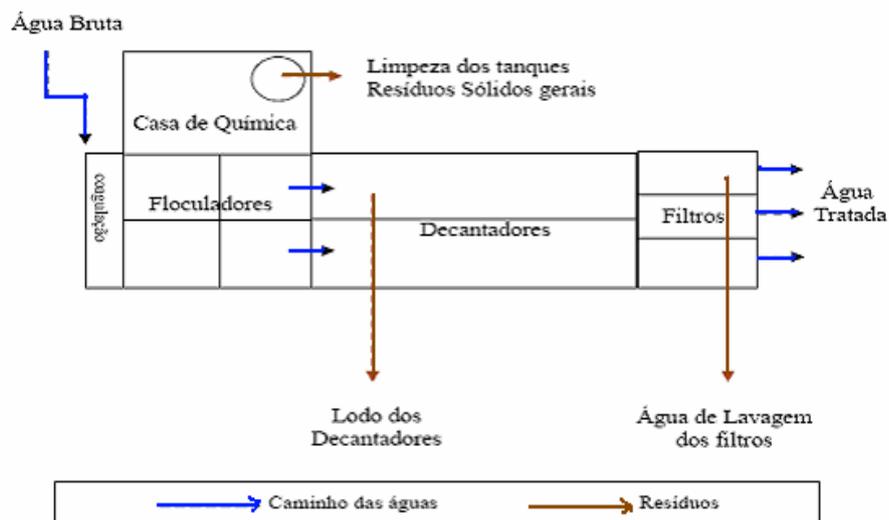


Figura 2.4. – Pontos de geração de resíduos em ETAs (Cordeiro, 1993).

2.3.2. ETA de Campos dos Goytacazes

De acordo com a empresa de abastecimento Águas do Paraíba (2011), a Estação de Tratamento de Água Coroa de Campos dos Goytacazes é a primeira ETA do Rio de Janeiro completamente automatizada, com capacidade de distribuição de 1.200 litros de água por segundo. Após sua automatização em 2010, 1,2 milhões de litros de água utilizados na limpeza e manutenção da ETA Coroa, antes lançados diariamente ao rio Paraíba do Sul, agora recebem tratamento. Tanto os floculadores quanto decantadores recebem pequenas descargas durante o dia, fazendo com que a água resultante seja tratada em estação independente na própria ETA, sendo estes os tanques de equalização e decantação, voltando ao sistema para reutilização. Em seguida ocorre a separação do lodo para ser utilizado na recomposição de pavimentos do município de Campos dos Goytacazes-RJ.

A ETA Coroa de Campos dos Goytacazes, é responsável por 70 % da água tratada do município (Águas do Paraíba, 2011).

2.4. Resíduos sólidos

Segundo a norma NBR 10004 (ABNT, 2004) os resíduos sólidos podem ser definidos como resíduos nos estados sólido ou semi-sólido que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Incluídos nesta definição estão os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, 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 técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

De acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004), os resíduos sólidos podem ser classificados quanto aos riscos potenciais ao meio ambiente e a saúde pública. Dessa forma são classificados em:

- **Resíduos classe I** – resíduos perigosos: aqueles que, em função das suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas, podem apresentar risco à saúde pública e ao meio ambiente ou apresentem características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade;

- **Resíduos classe II A** – resíduos não inertes: são aqueles que não apresentam periculosidade, mas apresentam características tais como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água;
- **Resíduos classe II B** – resíduos inertes: são aqueles que, submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, não tiveram nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, executando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

2.5. Resíduo de estação de tratamento de água

O resíduo de ETA é classificado de acordo com a norma NBR 10004 (ABNT, 2004) como resíduo sólido pertencente à classe II A - não inerte. Portanto, ele não pode ser lançado nos corpos d'água sem devido tratamento, por causar efeitos diretos ao ambiente aquático do corpo receptor, provocando danos à fauna aquática. De acordo com Di Bernardo e Dantas (2005) o lodo de ETA pode causar riscos à saúde humana devido à presença de agentes patogênicos. Os mesmos autores alertam quanto aos impactos devido à presença de metais pesados. Assim, se torna necessário o estudo da disposição final adequada do resíduo de ETA, com a finalidade de diminuir os impactos ambientais ocorridos por este lodo.

De acordo com Oliveira *et al.* (2004), o resíduo da ETA de Campos dos Goytacazes/RJ é mineralógicamente constituído de caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), quartzo (SiO_2), gibsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) e ilita/mica, com predominância de caulinita (Figura 2.5). Do ponto de vista químico, o resíduo de ETA é constituído basicamente por SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , correspondendo 80,42 %. A perda ao fogo do resíduo de ETA é alta, 16,93 %, podendo estar relacionada com a presença de argilominerais, hidróxidos e matéria orgânica (Tabela 2.9).

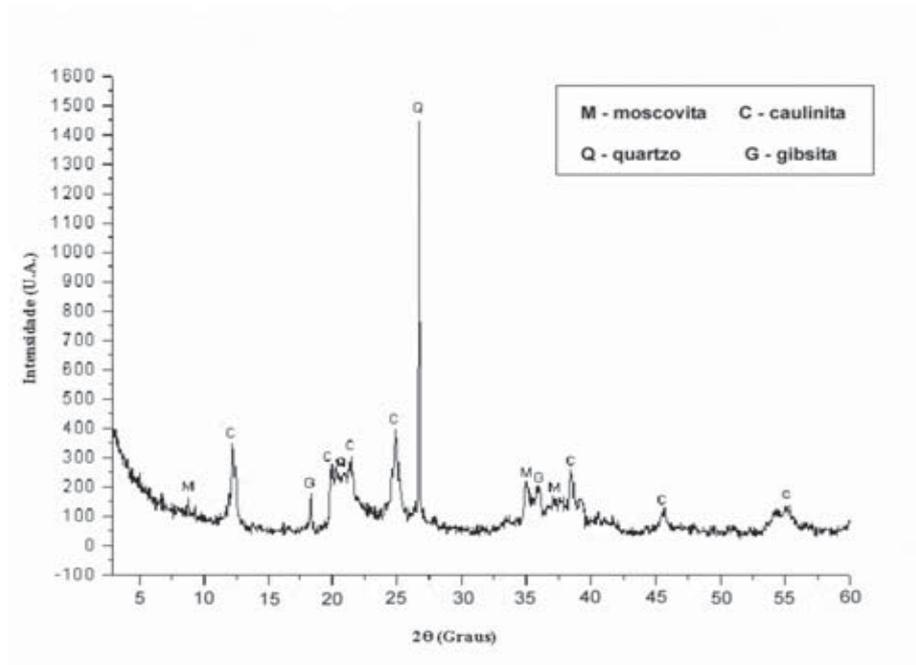


Figura 2.5. – Difratograma de raios-X do resíduo de ETA (Oliveira *et al.*, 2004).

Tabela 2.9. – Composição química de resíduo de ETA (Oliveira *et al.*, 2004).

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	PF
35,92	31,71	12,79	1,10	0,09	0,37	0,10	0,58	0,06	0,35	16,93

Do ponto de vista granulométrico, para Oliveira *et. al.* (2004), o resíduo de ETA de Campos dos Goytacazes é constituído por 45 % de fração argila, 41 % de silte e 14 % de areia. É um material plástico, tendo os limites de consistência de Atterberg: limite de liquidez de 73 %, limite de plasticidade de 53 % e índice de plasticidade de 20 % (Tabela 2.10).

Tabela 2.10. - Limites de atterberg do resíduo de ETA (Oliveira *et al.*, 2004).

Limite de Liquidez	Limite de Plasticidade	Índice de Plasticidade
73 %	53 %	20 %

2.5.1. Destino final do resíduo de estação de tratamento de água

A maioria das ETAs tem se defrontado com a questão do tratamento, reuso e disposição final de seus resíduos. O efeito da disposição inadequada do lodo tem se

mostrado, em particular nos grandes centros, extremamente danoso ao meio ambiente (Junk e Guizzi, 2003).

Os lodos lançados nos corpos d'água causam problemas ambientais, tais como assoreamento, mudança de cor e aumento da quantidade de sólidos em suspensão (Sabbag e Morita, 2003). Podendo também ocasionar redução do oxigênio dissolvido (OD) no corpo receptor pela decomposição da matéria orgânica contida neste resíduo (Souza, 2006).

Segundo Di Bernardo e Dantas (2005), o potencial tóxico gerado pelo resíduo de ETA é decorrente principalmente, do tipo de ocupação da área do corpo d'água (pecuária, agricultura e industrial), do tipo de solo da bacia ou do manancial, das características dos produtos químicos utilizados, podendo destacar a presença de metais e compostos orgânicos presentes na água bruta ou gerados em função do uso de oxidantes, forma de remoção e tempo de permanência dos resíduos nos decantadores, características hidráulicas, físicas, químicas e biológicas do corpo d'água. A Figura 2.6 ilustra a descarga do resíduo de ETA no Córrego Monjolinho, São Carlos, São Paulo.



Figura 2.6. – Despejo de lodo de ETA no Córrego Monjolinho (Souza, 2006).

Devido aos danos causados, vêm sendo estudadas aplicações para o resíduo de ETA. Em virtude de suas características, o lodo de ETA pode servir, de acordo com Bidone *et al.* (1999), Cornwell (1999); Di Bernardo e Dantas (1999), para aplicação no solo; destinação em aterro sanitário, incineração; recuperação de áreas degradadas; fabricação de concreto, fabricação de materiais cerâmicos e fabricação

de tijolos de solo-cimento. Outra alternativa é a aplicação na pavimentação de estradas, tijolos refratários, agente plastificador em cerâmica e na produção de cimento (Richter, 2001).

2.6. Solo-cimento

2.6.1. Tijolo solo-cimento

O tijolo solo-cimento também conhecido como tijolo ecológico, tijolo estrutural ou tijolo de encaixe, é definido segundo Freire (1976) como uma mistura de solo pulverizado, cimento Portland e água sob compactação a um teor de umidade ótima, o qual forma um material estruturalmente resistente, estável, durável e de baixo custo. Por sua vez, a ABCP (1999), relata que o solo-cimento é o produto resultante da mistura de solo, cimento Portland e água, que compactados na umidade ótima e sob a máxima massa específica seca, em proporções previamente definidas, adquire resistência e durabilidade através das reações de hidratação do cimento. A qualidade da mistura depende da massa específica que deseja ser alcançada no processo de compactação, porcentagem de cimento a ser adicionada e da quantidade de água. Dentre os principais fatores que afetam as propriedades do solo-cimento são: tipo de solo, teor de umidade, teor de cimento, homogeneidade da mistura, compactação, idade e processo de cura.

Segundo Ferraz (2000), o tijolo de solo-cimento (Figura 2.7.-a) é uma das alternativas para a construção de alvenaria em habitações e demais edificações (Figura 2.7.-b). As vantagens do uso do tijolo de solo-cimento vão desde a fabricação até sua utilização no canteiro de obras. Os equipamentos são simples e de baixo custo. A mão de obra para operar a máquina de fabricação não precisa ser especializada, permitindo sua operação no próprio local de obra, dessa forma reduzem-se os custos com transporte. Sua resistência à compressão é semelhante à do tijolo convencional, mas a qualidade final é superior, possuindo dimensões regulares e faces planas.

Estudos realizados pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) e Centro de Pesquisas e Desenvolvimento (CEPED) comprovaram que, além do bom desempenho termoacústico, o solo-cimento aplicado em

construções tem-se uma redução de custos de 20 a 40 % comparando-se com a alvenaria tradicional de tijolos de barro ou cerâmica (Fiquerola, 2004).



Figura 2.7. – (a) Tijolos de solo-cimento e (b) Construção civil em solo-cimento (Lima, 2006; Destefani, 2009).

O tijolo solo-cimento não precisa ser cozido, é auto encaixável, e dispensa acabamento. De acordo com Souza (2006), é uma alternativa ao tijolo comum devido às vantagens técnicas oferecidas tais como: a) praticidade na construção civil, ou seja, redução de tempo para a atividade, pois dispensa argamassa de assentamento; b) reduções de resíduos na construção; c) dispensa a quebra de tijolos para passar tubulações. Neste caso se utiliza o próprio furo do tijolo, que também serve para localizar colunas; e d) baixo custo. Na literatura são encontrados como exemplos de uso do solo-cimento: base de revestimento para tráfego leve, de pedestres ou bicicletas; base de pavimentação de estradas; pátios industriais, acostamentos, estacionamentos; terreiros para café; revestimento de barragens de terra, diques, canais, e reservatórios; pavimentação de estábulos; estabilização de taludes e encostas; revestimento e impermeabilizações de túneis; melhoria de suporte de fundações fracas de pavimentos, tijolos, blocos e painéis para a construção de habitações e depósitos.

A Figura 2.8 ilustra instalações de tubulações em alvenaria convencional e com tijolo solo-cimento.

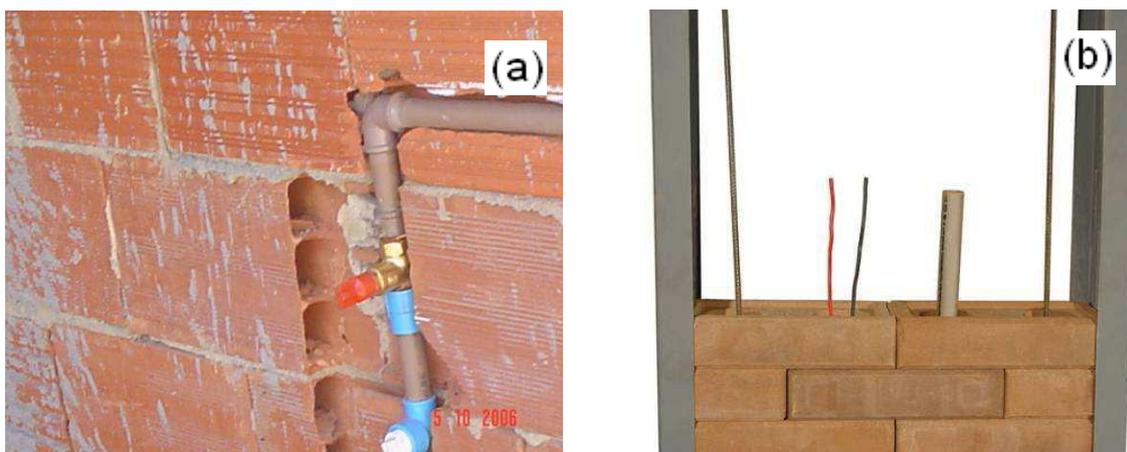


Figura 2.8. – (a) Rasgo em alvenaria convencional e (b) Passagem de tubulações pelos furos (Destefani, 2009).

Para Fadanelli e Wiecheteck (2010), o solo cimento é uma mistura homogênea de solo, cimento e água em proporções adequadas para um teor de umidade que conduza a uma massa específica seca máxima. Após compactação e cura úmida, o tijolo resulta em um material com boa resistência à compressão, bom índice de impermeabilidade, baixo índice de retração volumétrica e boa durabilidade.

No tijolo solo-cimento, o solo é o componente utilizado em maior quantidade, já o cimento entra numa quantidade de 5 a 10 % da massa do solo, para estabilizá-lo, garantindo a resistência esperada para a mistura (Porras *et al.*, 2008).

De acordo com Souza *et. al.* (2006), os solos arenosos são indicados, pois proporcionam condições para que tenha menor consumo de cimento e tijolos de melhor qualidade. E de acordo com a ABCP (1985), os solos mais arenosos estabilizam com menores quantidades de cimento. Também é necessária a presença de argila na sua composição, para dar à mistura, ao ser umedecida e compactada, coesão suficiente para a imediata retirada das formas.

Conforme a ABCP (2002) recomenda-se moldar tijolos com as proporções, em volume, de cimento e solo de 1:10, 1:12 e 1:14, ou seja, uma parte de cimento para 10, 12 e 14 partes de solo. A escolha do traço adequado deve ser o que apresente menor consumo de cimento e atenda às normas de resistência à compressão e absorção de água estabelecida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Segundo a NBR 10836/1994 as condições específicas para tijolos de solo-cimento são (Tabela 2.11):

Tabela 2.11. – Valores de resistência à compressão e absorção de água para tijolo de solo-cimento (ABNT, 1994).

Valores-limite (aos 28 dias)	Média	Individual
Resistência à compressão (MPa)	$\geq 2,0$	$\geq 1,7$
Absorção de água (%)	$\leq 20,0$	$\leq 22,0$

Segundo a ABCP (1985), os solos adequados para a fabricação de blocos vazados e tijolos maciços de solo-cimento devem atender as seguintes características (Tabela 2.12):

Tabela 2.12. – Características de solos para fabricação de tijolos de solo-cimento (ABCP, 1985).

Características	Requisitos (%)
% passando na peneira # 4 (4,8 mm)	100
% passando na peneira # 200 (0,075 mm)	10 a 50
Limite de Liquidez (LL)	≤ 45
Índice de Plasticidade (IP)	≤ 18
% de areia	50 a 70
% de silte	10 a 20
% de argila	10 a 20

2.6.2. Processo de fabricação do tijolo solo-cimento

O processo de fabricação dos tijolos solo-cimento compreende as fases de destorroamento, seguida pelo peneiramento e secagem do solo. Após seu beneficiamento, faz-se uma mistura homogênea do solo com o cimento adicionando água em quantidades definidas. A mistura é prensada e colocada em câmara úmida para cura. A Figura 2.9 ilustra o processo para produção do solo-cimento segundo Pedroti (2007).

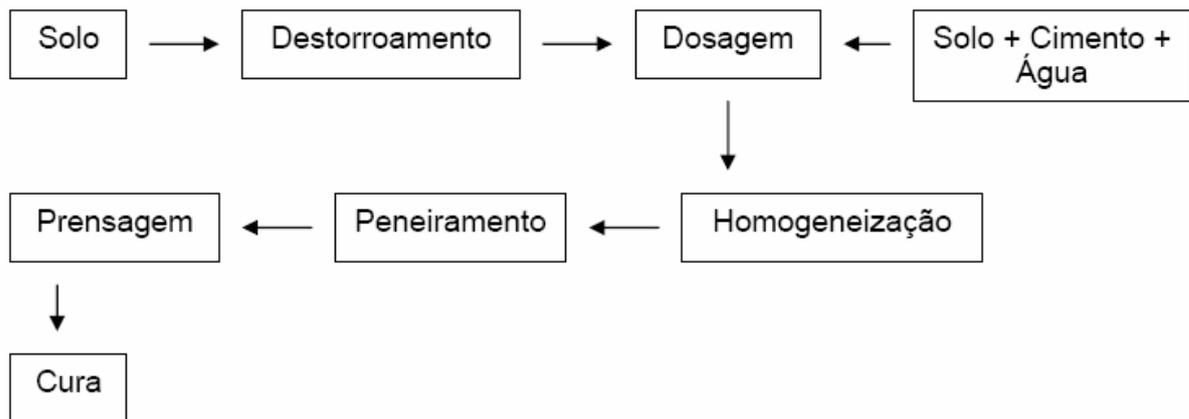


Figura 2.9. – Organograma do processo para fabricação de solo-cimento (Pedroti, 2007).

De acordo com a cartilha para produção de tijolo solo-cimento da Fundação de Tecnologia do Estado do Acre (FUNTAC), a Figura 2.10 mostra as dimensões do tijolo solo-cimento.



Figura 2.10. – Tijolo solo-cimento com suas respectivas dimensões (FUNTAC, 1999).

A confecção desses tijolos pode ser realizada em prensas manuais, mecânicas ou hidráulicas. Na fabricação do tijolo solo-cimento comparando-se com

o tijolo cerâmico convencional, não existe o processo de queima, reduzindo consumo de energia.

Daqui por diante será dada ênfase a incorporação do resíduo de ETA em materiais cerâmicos, em especial em tijolo solo-cimento.

2.7. Incorporação de resíduo de ETA em materiais cerâmicos

2.7.1. Incorporação em cerâmica vermelha

Trabalhos têm sido realizados a fim de buscar novas maneiras de reaproveitar o resíduo de ETA. Dentre os trabalhos desenvolvidos, uma grande parcela refere-se ao reaproveitamento do resíduo de ETA como matéria-prima alternativa incorporada em cerâmica vermelha. Abaixo serão apresentados sucintamente alguns destes trabalhos.

Ramires *et. al.* (2005) avaliaram o uso de lodo dos decantadores da Estação de Tratamento de Água Imperatriz Leopoldina, de São Leopoldo (RS), na produção de blocos cerâmicos para a construção civil. Foi incorporada na mistura 2 % em massa de lodo de ETA. As argilas foram provenientes de Canoas (RS) e São Leopoldo (RS). O teor de lodo foi fixado em 2 %, pois através de ensaios preliminares observou-se que os resultados de ensaios tecnológicos apresentavam decréscimo nas propriedades para teores acima deste valor. Foram desenvolvidos blocos cerâmicos de seis furos, pelo fato deste ser o componente mais comercializado no Rio Grande do Sul. Os corpos-de-prova foram queimados em temperatura de 900° C. O lodo apresentou em sua composição química alto teor de SiO₂, 37,90 %, Al₂O₃, 22,20 % e Fe₂O₃, 11,10 %. A granulometria foi 25 % de fração argila, 27 % de silte e 48 % de areia. No ensaio de difração de raios-X, observou-se picos cristalinos de quartzo e caulinita. Os resultados do Limite de Liquidez e do Limite de Plasticidade foram respectivamente de 62,60 % e 46,25 %, apresentando dessa forma um Índice de Plasticidade de 16,35 %.

Os resultados apresentados na Tabela 2.13 indicam que a absorção de água para os blocos com a adição de lodo está em conformidade com a NBR 7171-92, cujos valores devem estar na faixa entre 8 % e 25 % e também são apresentados os resultados de resistência à compressão para os blocos com adição de lodo. Verifica-se que os valores estão em conformidade com a NBR 7171-92, que fixa a

resistência mínima à compressão em 1,0 MPa. Já os blocos com adição de lodo apresentaram resistência mecânica superior aos sem adição.

Tabela 2.13. – Caracterização física dos blocos (Ramires *et. al.*, 2005).

Ensaio	Teor de Resíduo Argila A		Teor de Resíduo Argila B	
	0,0 %	2,0 %	0,0 %	2,0 %
Absorção de Água (%) – NBR 8042/92	12,7	12,3	14,1	14,5
Resistência à compressão (MPa) – NBR 6461/83	2,2	2,9	1,4	1,2

Ramires *et. al.* (2005) concluíram que esta técnica é economicamente viável para reciclagem de lodo de ETA, existe a possibilidade de solucionar um problema ambiental. Os ensaios de caracterização física dos blocos estão em conformidade com os limites especificados pelas normas. Destacando o pequeno acréscimo na resistência à compressão para os teores de adição de 2 % para a argila A.

Margem *et. al.* (2006) investigaram a influência da utilização do resíduo de ETA, nas propriedades físicas e mecânicas de queima de uma massa argilosa de cerâmica vermelha. O lodo foi coletado na etapa de filtração da ETA de Itaperuna (RJ). Prepararam-se composições com 0, 5, 10, 20 e 30 % de lodo em peso, incorporados em massa de cerâmica vermelha argilosa. Os corpos-de-prova foram queimados a 900° C.

A Tabela 2.14 mostra a composição química do lodo de ETA. O lodo apresenta elevada perda ao fogo, 57,73 %, que está associada à presença de matéria orgânica e grupos de hidroxilas da caulinita e dos hidróxidos de ferro e de alumínio, detectados por difração de raios-X. O elevado teor de Al_2O_3 está associado à presença de caulinita, e gibsita, à utilização de sulfato de alumínio na ETA com a função de agente floculante. A sílica está associada também à argila e quartzo. O Fe pode estar presente decorrente do cloreto férrico usado como floculante. Já os demais óxidos estão associados a impurezas presentes.

Tabela 2.14. – Composição química do lodo de ETA (% em peso) (Margem *et. al.*, 2006).

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O	MnO	CaO	P ₂ O ₅	PF
34,27	47,70	17,73	0,93	0,34	0,45	0,31	1,26	57,73

A Figura 2.11 mostra os valores de absorção de água. Observa-se que percentuais acima de 5 % em peso ocasionam aumento da absorção de água da cerâmica. A absorção de água está associada à porosidade aberta do material, assim este comportamento é atribuído à elevada perda ao fogo do lodo que acarreta porosidade na cerâmica durante a queima. Na Figura 2.12 observa-se uma redução da tensão de ruptura à flexão da massa argilosa, na medida em que aumenta o teor de porcentagem do lodo incorporado na massa.

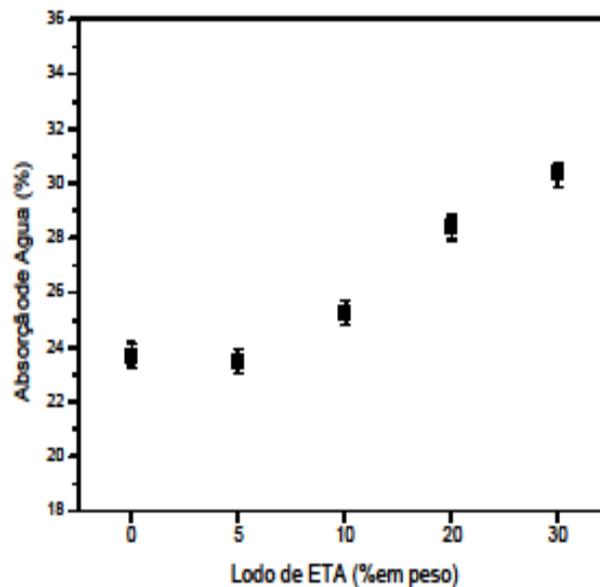


Figura 2.11. – Absorção de água da massa de cerâmica vermelha queimada em função do teor de lodo de ETA incorporado (Margem *et. al.*, 2006).

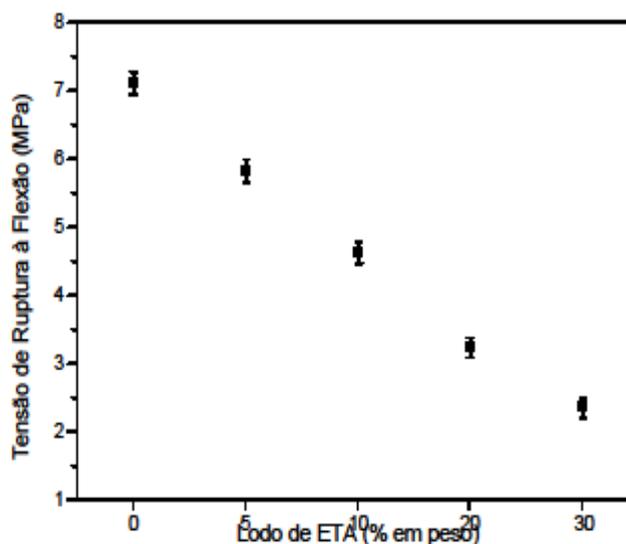


Figura 2.12. – Tensão de Ruptura à Flexão da massa de cerâmica vermelha queimada em função do teor de lodo de ETA incorporado (Margem *et. al.*, 2006).

Os autores concluíram que a incorporação do lodo na massa não trouxe benefícios para as propriedades da cerâmica, contribuindo para o aumento da absorção de água e redução da resistência mecânica. No caso de regiões produtoras de cerâmica vermelha que dispõem de argilas arenosas, a utilização de lodo de ETA pode trazer benefícios para o processamento e qualidade da cerâmica.

2.7.2. Incorporação de resíduo de ETA em tijolo solo-cimento

Existem inúmeras vantagens para a reciclagem de resíduos sólidos, em especial resíduos de ETA, em materiais para construção civil, ênfase em tijolos solo-cimento, sendo elas: beneficia à concessionária de serviços de saneamento, por esta ser uma solução definitiva na destinação de resíduo de ETA; redução do volume de extração de matérias-primas; conservação de matérias-primas não renováveis; beneficia o meio ambiente pela redução da supressão da vegetação devido à atividade extrativa; redução do consumo de energia; menores emissões de poluentes; melhoria da saúde e segurança da população e redução da poluição aquática causada pelo lançamento de lodo de ETA nos corpos de água (Chies *et. al.*, 2000). Mesmo os resíduos sólidos sendo depositados em aterros sanitários, sempre estarão sujeitos a acidentes de grandes consequências. Dessa forma a incorporação de resíduos em materiais de construção civil, torna-se mais interessante, tendo o objetivo de neutralizá-los. Além disso, fica caracterizada a

importância ecológica e socioeconômica da reciclagem do resíduo de ETA na fabricação de tijolos solo-cimento.

Silva (2009) avaliou a viabilidade de incorporação de resíduo de ETA de Carapina (ES) em tijolos de solo-cimento. Para este propósito foram feitas as caracterizações física, química e mineralógica das matérias-primas: lodo e solo. Os tijolos foram confeccionados a partir dos percentuais de 3, 5, 8 e 10 % de lodo incorporado na massa de solo-cimento, e com 10 % de cimento em todos os traços. O resíduo apresentou em sua granulometria 2,14 % de fração argila, 4,25 % de fração silte, 93,64 % de fração areia. Já a análise granulométrica do solo mostrou para argila, silte e areia: 1,57 %, 3,25 % e 95,18 %, respectivamente.

As Figuras 2.13 e 2.14 mostram a difração de raios-X das matérias-primas. O lodo e o solo são mineralógicamente constituídos por quartzo (SiO_2), montmorilonita $[(\text{OH})_4\text{Si}_8\text{Al}_4\text{O}_{20}\text{nH}_2\text{O}]$ e caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Porém, no lodo predomina quartzo e montmorilonita, e no solo predomina caulinita.

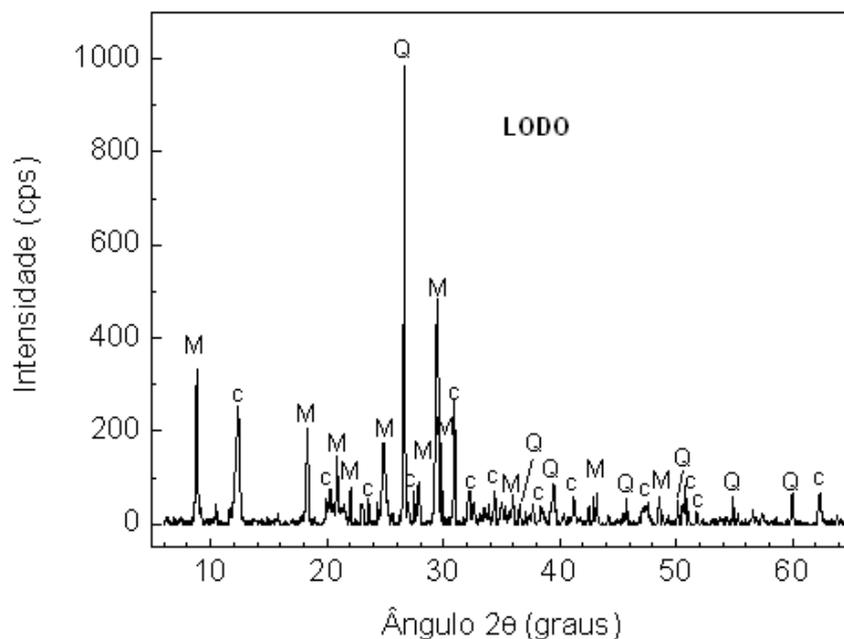


Figura 2.13. – Difração de raios-X do lodo (Silva, 2009).
Legenda: M – Montmorilonita, C – Caulinita, Q - Quartzo.

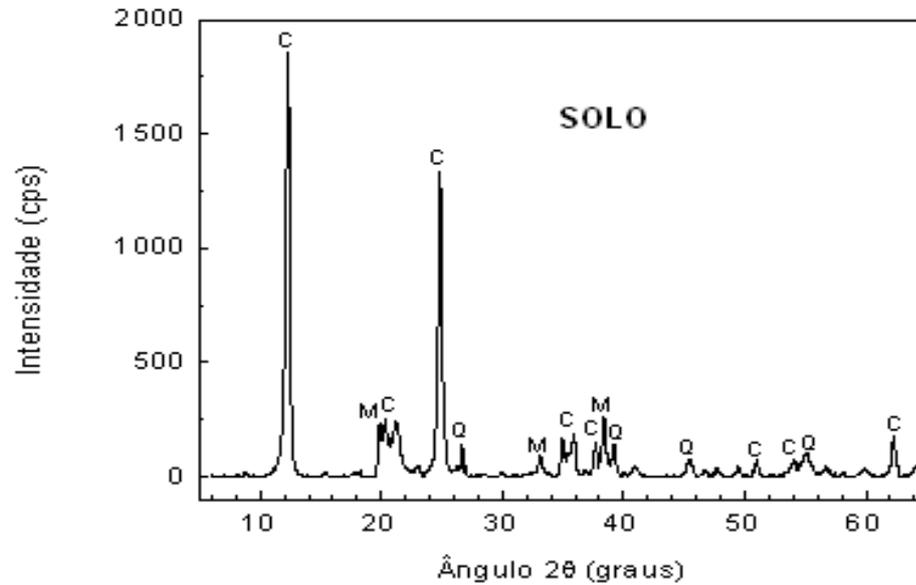


Figura 2.14. – Difração de raios-X do solo (Silva, 2009).

Legenda: M – Montmorilonita, C – Caulinita, Q – Quartzo.

Na Figura 2.15 observa-se que no lotes com 3 % de lodo houve aumento da absorção de água dos 7 para os 14 dias de cura. Dos 14 para os 28 dias de cura ocorreu diminuição da absorção de água. Entretanto, os valores de absorção de água não ultrapassaram o valor limite determinado pela NBR 10836/94. Quanto maior o tempo de cura, maior a resistência do tijolo. Aos 7 dias de cura o tijolo apresentou valor de resistência próximo ao limite crítico da NBR 10836/94. Dessa forma, recomenda-se que a utilização desse tipo de tijolo seja feita, após 14 dias de cura.

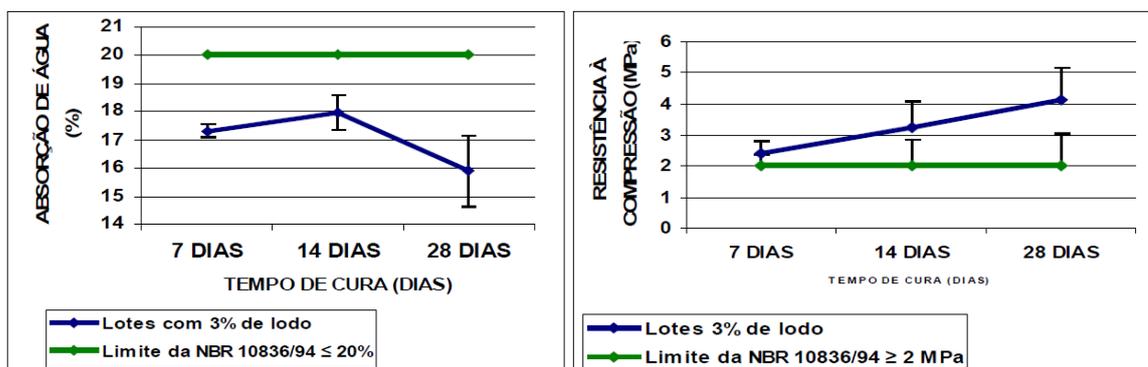


Figura 2.15. – Absorção de água e resistência à compressão dos tijolos com 3 % de lodo (Silva, 2009).

Na Figura 2.16 segundo Silva (2009), observa-se que nos lotes com 5 % de lodo diminuiu a absorção de água e aumentou a resistência à compressão. Ainda de

acordo com Silva (2009), para esta composição só é possível utilizar tijolos após 28 dias de cura. Sendo que aos 14 dias de cura os tijolos apresentaram valores de resistência à compressão próximos ao limite crítico da norma NBR 10836/94. Os valores de absorção de água não ultrapassaram o valor limite determinado pela norma citada.

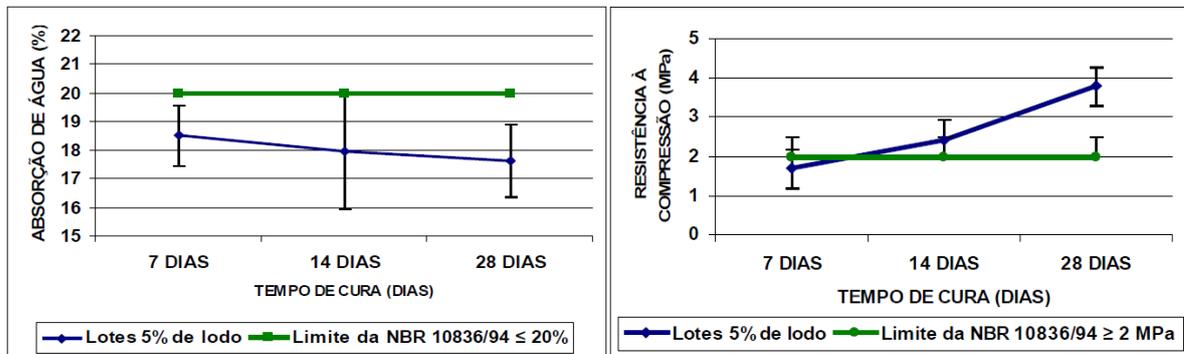


Figura 2.16. – Absorção de água e resistência à compressão dos tijolos com 5 % de lodo (Silva, 2009).

A Figura 2.17 mostra que nos lotes de 8 % com lodo, ocorreu diminuição discreta na absorção de água e aumento também discreto na resistência mecânica. Todos esses valores são inferiores ao limite máximo recomendado pela NBR 10836/94. Dessa forma, não é possível a utilização desse teor de porcentagem de lodo, como material construtivo.

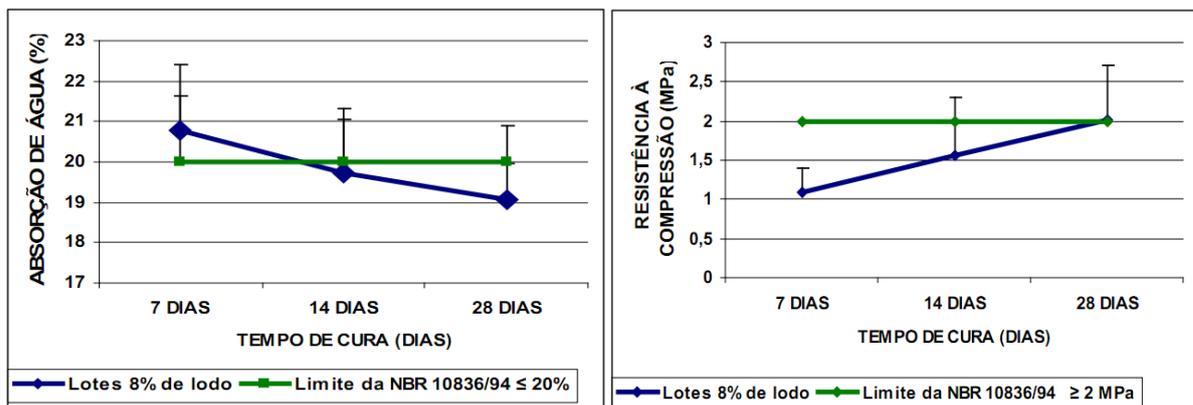


Figura 2.17. – Absorção de água e resistência à compressão dos tijolos com 8 % de lodo (Silva, 2009).

Na Figura 2.18 nota-se que nos lotes com 10 % de lodo não ocorreu variação na absorção de água e nem na resistência mecânica durante o período de cura. Todos os valores da absorção de água ficaram acima do limite determinado pela NBR 10836/94 e todos os valores da resistência à compressão abaixo desse limite.

Pode-se afirmar que não é possível a utilização para essa composição de lodo no tijolo.

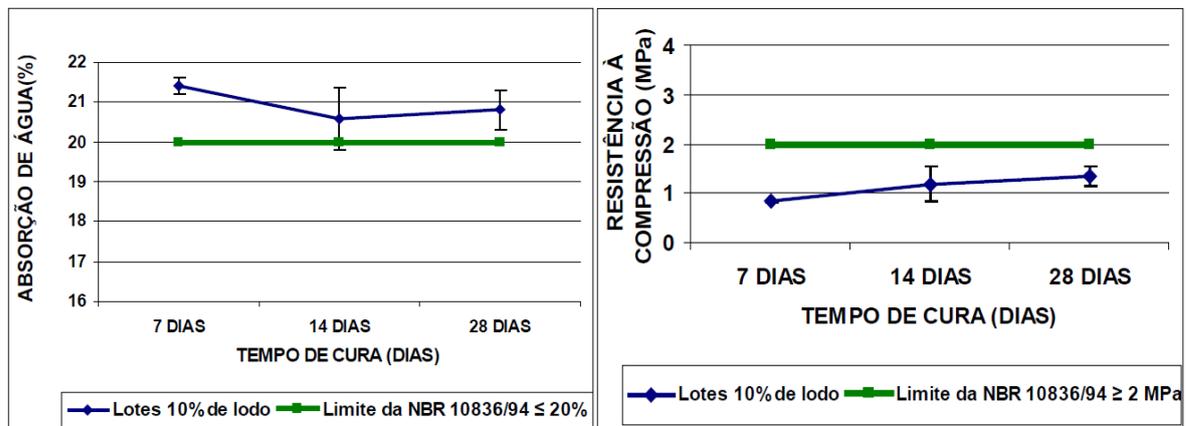


Figura 2.18. – Absorção de água e resistência à compressão dos tijolos com 10 % de lodo (Silva, 2009).

Na Figura 2.19 nota-se que aos 28 dias de cura, na medida em que se aumenta o percentual do lodo na composição da massa dos tijolos a absorção de água aumenta e a resistência à compressão diminui. Analisando os limites recomendados pela norma NBR 10836/94 em cada situação, verifica-se que para a composição estudada nesta pesquisa deve-se trabalhar com teor de lodo menor do que 8 % para que seja garantida as especificações exigidas pela norma técnica.

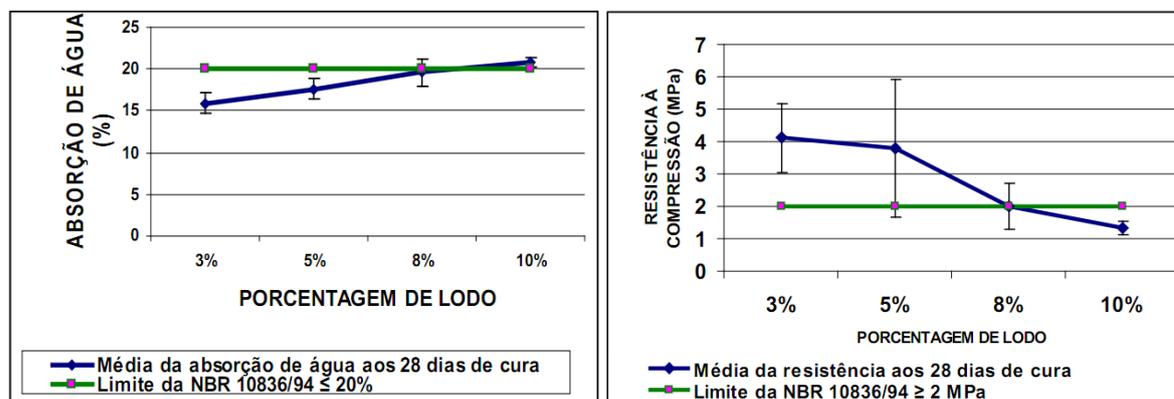


Figura 2.19. – Variação das médias de absorção de água e resistência à compressão com teores de lodo nos tijolos aos 28 dias de cura (Silva, 2009).

Silva (2009) concluiu que, devido a constituição granulométrica o solo e lodo são inadequados para a fabricação de tijolo solo-cimento segundo as NBRs 10832/92 e 10834/94. É possível incorporar até 5 % de lodo em tijolos de solo-cimento em condições de campo sem comprometer suas características construtivas.

Porras *et. al.* (2008) avaliaram a viabilidade da utilização dos lodos dos decantadores das estações de tratamento de água da Cidade de Campinas/SP juntamente com o agregado reciclado miúdo de resíduo da construção civil, para a fabricação de tijolos estabilizados com cimento. Foram estudadas as seguintes proporções mássicas de cimento, agregado reciclado miúdo, e lodo de decantador: 5:85:10, 5:80:15, 5:75:20, 5:70:25, 10:80:10, 10:75:15, 10:70:20 e 10:65:25. Para cada uma destas proporções, variou-se, como componente principal de avaliação, o teor de umidade do lodo: 0 %, 50 %, 70 a 74 % e 75 a 80 %.

As Tabelas 2.15 e 2.16 mostram os resultados obtidos na confecção dos tijolos com lodo desaguado da ETA, com 70 a 80 % de umidade. Observa-se que o teor de umidade de 75 a 80 %, em todos os casos avaliados, não permitiu a moldagem já que o lodo estava muito úmido. Nos valores do teor de umidade de 70 a 74 %, foi possível a moldagem, mas apresenta desagregação após desforma, devido à alta umidade do lodo. Para obter melhores resultados do teor de umidade do lodo desaguado, este foi submetido ao tratamento complementar com leito de secagem ao longo do tempo. Ao final de sete dias no leito de secagem, o lodo alcançou um teor de umidade em torno de 50 %.

Tabela 2.15. – Resultados obtidos na produção de tijolos com lodo desaguado contendo teor de umidade de 75 a 80 % (Porras *et. al.*, 2008).

Teor de Umidade do Lodo = 75 a 80 %					
Teor de Cimento = 5 %			Teor de Cimento = 10 %		
Lodo	Agregado	Resultado	Lodo	Agregado	Resultado
10	85	Não foi possível moldagem:lodo muito úmido	10	80	Não foi possível moldagem:lodo muito úmido
15	80	Não foi possível moldagem:lodo muito úmido	15	75	Não foi possível moldagem:lodo muito úmido
20	75	Não foi possível moldagem:lodo muito úmido	20	70	Não foi possível moldagem:lodo muito úmido
25	70	Não foi possível moldagem:lodo muito úmido	25	65	Não foi possível moldagem:lodo muito úmido

Tabela 2.16. – Resultados obtidos na produção de tijolos com lodo desaguado contendo teor de umidade de 70 a 74 % (Porras *et. al.*, 2008).

Teor de Umidade do Lodo = 70 a 74 %					
Teor de Cimento = 5 %			Teor de Cimento = 10 %		
Lodo	Agregado	Resultado	Lodo	Agregado	Resultado
10	85	Possível a moldagem, mas desagregação após desforma	10	80	Possível a moldagem, mas desagregação após desforma
15	80	Possível a moldagem, mas desagregação após desforma	15	75	Possível a moldagem, mas desagregação após desforma
20	75	Possível a moldagem, mas desagregação após desforma	20	70	Possível a moldagem, mas desagregação após desforma
25	70	Possível a moldagem, mas desagregação após desforma	25	65	Possível a moldagem, mas desagregação após desforma

Nas Tabelas 2.17 e 2.18 observam-se os resultados obtidos com os tijolos confeccionados com o lodo seco em leite e desidratado na estufa. Nestes tijolos foi possível a moldagem dos corpos, mas teve-se perda do material da superfície dele por atrito na retirada do equipamento.

Tabela 2.17. – Resultados obtidos na produção de tijolos com o lodo desaguado no leite de secagem (Porras *et. al.*, 2008).

Teor de Umidade do Lodo = 50 %		
Teor de Cimento = 10 %		
Lodo	Agregado	Resultado
10	85	Possível a moldagem, mas perda do material da superfície do tijolo por atrito
15	80	Possível a moldagem, mas perda do material da superfície do tijolo por atrito
20	75	Possível a moldagem, mas perda do material da superfície do tijolo por atrito
25	70	Possível a moldagem, mas perda do material da superfície do tijolo por atrito

Tabela 2.18. – Resultados obtidos na produção de tijolos com o lodo desidratado na estufa (Porras *et. al.*, 2008).

Teor de Umidade do Lodo = 0 %		
Teor de Cimento = 10 %		
Lodo	Agregado	Resultado
10	85	Possível a moldagem, mas perda do material da superfície do tijolo por atrito
15	80	Possível a moldagem, mas perda do material da superfície do tijolo por atrito
20	75	Possível a moldagem, mas perda do material da superfície do tijolo por atrito
25	70	Possível a moldagem, mas perda do material da superfície do tijolo por atrito

As Tabelas 2.19 e 2.2 mostram os ensaios de absorção de água e resistência à compressão dos tijolos. Para a absorção de água, segundo a norma NBR 8492/84, apenas os tijolos confeccionados com 10, 15, 20 e 25 % de lodo totalmente seco e 10 % de cimento atendem os limites. Já à resistência à compressão, as amostras foram ensaiadas de acordo a NBR 8492/84, que estipula que os valores médios devem ser superiores a 2,0 MPa para tijolos com idade mínima de sete dias. Neste trabalho a idade mínima adotada foi de 21 dias de cura. Verifica-se que os tijolos com percentuais de 10, 15, 20 e 25 % de lodo totalmente seco não atendem os limites especificados na norma.

Tabela 2.19. – Absorção de água dos tijolos confeccionados com o lodo em leito de secagem e totalmente seco (Porras *et. al.*, 2008).

Lodo (%)	Umidade (%)	Cimento (%)	Absorção de Água (%)
10,0	50,0	10,0	22,5
15,0	50,0	10,0	20,2
20,0	50,0	10,0	19,9
25,0	50,0	10,0	18,5
10,0	0,0	10,0	18,0
15,0	0,0	10,0	15,2
20,0	0,0	10,0	15,7
25,0	0,0	10,0	15,7

Tabela 2.20. – Resistência à compressão dos tijolos confeccionados com lodo totalmente seco que atenderam os limites estipulados de absorção de água (Porras *et. al.*, 2008).

Lodo (%)	Umidade (%)	Cimento (%)	Resistência à Compressão (MPa)
15,0	0,0	10,0	1,2
20,0	0,0	10,0	1,1
25,0	0,0	10,0	1,1

Porras *et. al.* (2008) concluíram que a umidade do lodo da ETA influenciou na produção dos tijolos estabilizados com cimento. Foi possível moldar tijolos a partir da mistura lodo: agregado reciclado: cimento, com teor de umidade menor que 50 %, mostrando a necessidade de uma secagem complementar de lodo. Nenhum tijolo produzido com a mistura de lodo, agregado e cimento atenderam as normas brasileiras de absorção de água e resistência à compressão.

Com base no exposto anteriormente, fica evidente que até o presente existem poucos trabalhos na literatura sobre a incorporação de resíduos de ETA em tijolo solo-cimento. Isto significa que há uma necessidade premente para estudos mais abrangentes sobre a reutilização de resíduos de ETAs em tijolos solo-cimento, com ênfase especial sobre os efeitos deste resíduo nas propriedades tecnológicas, microestrutura, durabilidade e caracterização químico-ambiental de tijolos solo-cimento. Dessa forma, o presente trabalho de dissertação pretende contribuir não

somente com a disposição final correta deste abundante resíduo, mas também contribuir para o desenvolvimento de novos tijolos solo-cimento incorporados com resíduo de ETA proveniente da região de Campos dos Goytacazes com propriedades adequadas para uso na construção civil.

Capítulo 3. Materiais e Métodos

A seguir, serão descritos os materiais e métodos empregados nesta dissertação de mestrado, que envolve diversas etapas relacionadas tanto com as matérias-primas quanto com o processamento e ensaios utilizados. A Figura 3.1 apresenta o fluxograma experimental a ser seguido no desenvolvido deste trabalho.

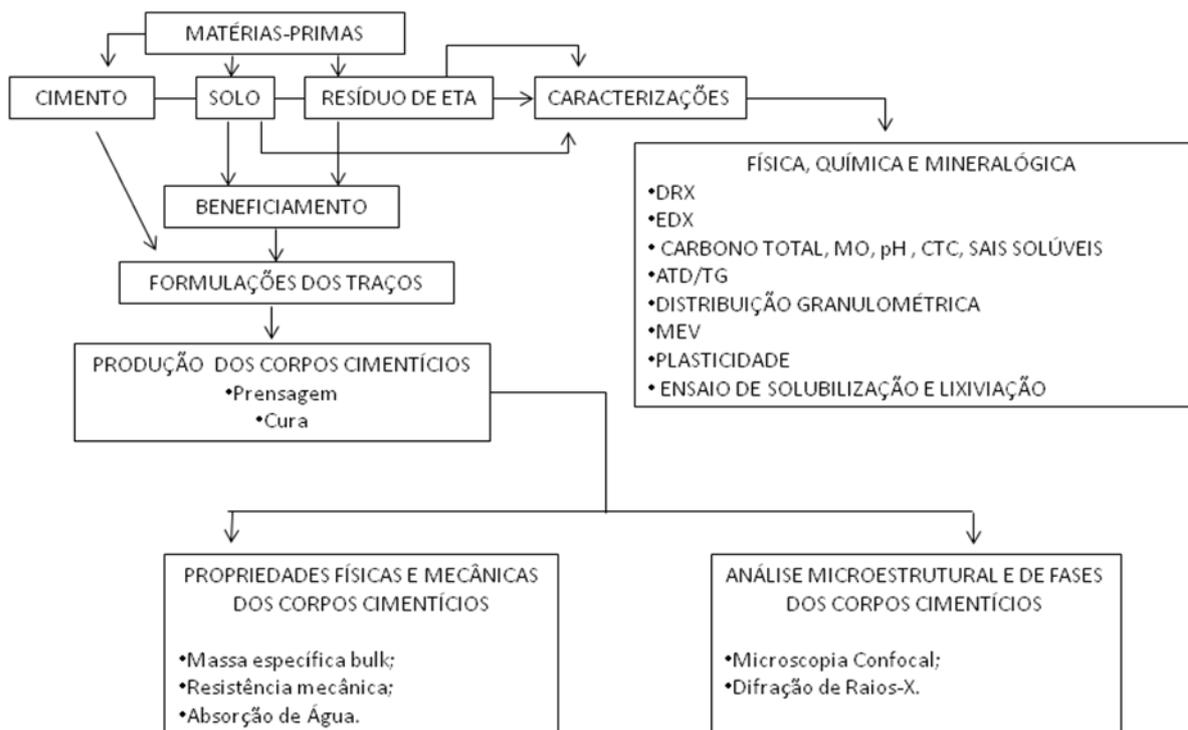


Figura 3.1. – Fluxograma das etapas envolvidas neste trabalho.

3.1. Matérias-primas

No presente trabalho foram utilizados como matérias-primas solo arenoso, cimento Portland, resíduo de estação de tratamento de água e água. O solo arenoso foi coletado na Artercerâmica Sardinha, localizada no Pólo de Cerâmica Vermelha de Campos dos Goytacazes/RJ. O cimento selecionado é do tipo cimento Portland CP III-40RS, devido à facilidade de encontrá-lo, baixo custo e por apresentar maior resistência em relação aos cimentos da linha CPIII. O resíduo de estação de tratamento de água utilizado foi coletado na empresa Águas do Paraíba (Figura 3.2), localizada no município de Campos dos Goytacazes-RJ.



Figura 3.2. – Vista parcial da Estação de Tratamento de Água de Campos dos Goytacazes.

3.2. Metodologia

3.2.1. Beneficiamento das matérias-primas

O resíduo de ETA in natura, em forma de lodo, foi coletado nos decantadores da ETA (Figura 3.3-a). Após coleta, a amostra de resíduo foi depositada em recipientes para decantação (Figura 3.3-b) e posterior secagem. Em seguida foi submetido à secagem em estufa de laboratório, marca Brasdonto, modelo 3, a 110° C durante 48 h. O solo in natura (Figura 3.4) também foi seco em estufa de laboratório a 110° C durante 24 h. Posteriormente, o solo foi desagregado manualmente com graal e pistilo de porcelana até passagem completa em peneira de 4 mesh (ABNT - 4,8 mm). O resíduo primeiramente foi cominuído em um moinho de bolas, marca Gardelin e modelo 1A – MB5 e depois desagregado com graal e pistilo e peinerado para 35 mesh (ABNT - 425 μ m). Ao final foram ensacados para posterior utilização, de modo a não absorver umidade do ar. A Figura 3.5 apresenta o resíduo final, e o solo pronto para o uso.



Figura 3.3. – (a) Tanques de decantação da ETA de Campos dos Goytacazes e (b) Lodo de ETA em processo de decantação.



Figura 3.4. – Solo in natura.

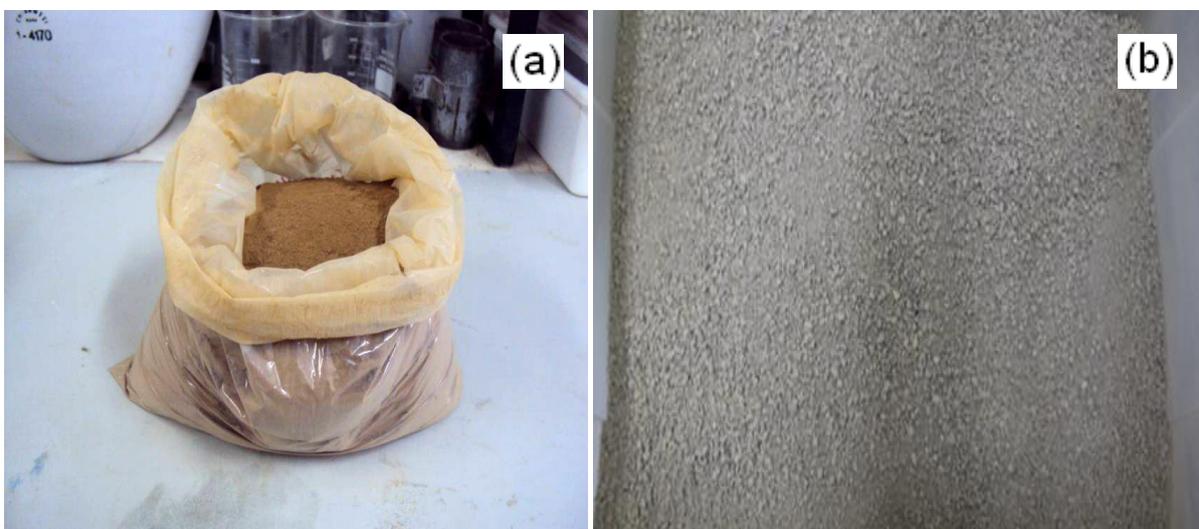


Figura 3.5. – (a) Resíduo de ETA beneficiado e (b) Solo destorroad e peneirado.

3.2.2. Caracterização das matérias-primas

As matérias-primas foram submetidas à caracterização mineralógica, física e química por meio de técnicas de difração de raios-X, fluorescência de raios-X, análise térmica diferencial e termogravimétrica, análise de tamanho de partículas, microscopia eletrônica de varredura, perda ao fogo e plasticidade.

3.2.2.1. Análise mineralógica

A análise de difração de raios-X (DRX) foi realizada em um difratômetro Shimadzu, XRD-7000, utilizando radiação monocromática de Cu-K α a uma velocidade de 1,5 $^\circ$ (2 θ) por minuto. As fases cristalinas foram identificadas por comparação entre as intensidades e as posições dos picos de Bragg com aqueles das fichas padrão JCPDS-ICDD.

3.2.2.2. Composição química

Para a identificação dos componentes químicos das amostras, foi realizada análise química utilizando um espectrômetro de fluorescência de raios-X, de energia dispersiva (EDX), da marca e modelo Shimadzu EDX-700. A perda ao fogo das matérias-primas foi determinada de acordo com a expressão (3.1):

$$PF(\%) = \frac{(M_s - M_c)}{M_s} \cdot 100 \quad (3.1)$$

Onde:

PF – perda ao fogo;

M_s – massa da amostra seca a 110 $^\circ$ C em estufa;

M_c – massa da amostra calcinada a 1000 $^\circ$ C por 2 h com uma taxa de aquecimento de 10 $^\circ$ C/min em forno mufla, marca Maitec, modelo FL 1300.

3.2.2.3 Determinação do carbono total, matéria orgânica, pH, capacidade de troca catiônica e sais solúveis.

A determinação do carbono total e matéria orgânica das matérias-primas foram feitas utilizando-se os seguintes equipamentos: medida de umidade (estufa com circulação forçada de ar, Modelo TE 394/3, marca TECNAL); preparação do resíduo de ETA (Forno Mufla, Modelo Q 318, marca QUIMIS); medida do teor de carbono (Espectrofotômetro, modelo 600, marca FENTO; Balança Analítica, Modelo AY220, marca Shimadzu). A Determinação do Carbono foi feita por meio do Método Walkley-Black. O pH foi medido por meio de eletrodo imerso em suspensão sólido líquido (H₂O), através do equipamento: potenciômetro. A Capacidade de troca catiônica (CTC) foi medida através da soma dos cátions Ca⁺²+Mg⁺²+K⁺+Na⁺+(H+Al). Os sais solúveis foram determinados através dos teores de Ca, K, Mg, Na e H+Al.

3.2.2.4. Análises térmicas (ATD/TG)

As análises térmica diferencial e termogravimétrica (ATD/TG) foram realizadas em um analisador simultâneo ATG-ATD, marca Shimadzu, modelo DTG-60H. O ensaio foi realizado sob atmosfera de nitrogênio (28° C) até 1000° C, com uma taxa de aquecimento de 10° C/min durante 30 minutos.

3.2.2.5. Análise granulométrica

Análises granulométricas das matérias-primas foram determinadas através de procedimentos de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 1984), pelo processo combinado de sedimentação e peneiramento.

3.2.2.6. Análise morfológica

A morfologia das partículas das matérias-primas foi determinada por microscopia eletrônica de varredura e mapeamento por EDS, utilizando-se um microscópio eletrônico de varredura, marca Shimadzu, modelo SSX-550, após cobertura das partículas com uma fina camada de ouro.

3.2.2.7. Plasticidade

As propriedades plásticas (limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade) foram determinadas de acordo com a NBR 6459 (ABNT, 1984) e NBR 7180 (ABNT, 1984). O índice de plasticidade (IP) de Atterberg é dado pela expressão (3.2):

$$IP = LL - LP \quad (3.2)$$

Onde:

IP – índice de plasticidade;

LL – limite de liquidez;

LP – limite de plasticidade.

3.2.2.8. Avaliação ambiental do resíduo de ETA

O resíduo de ETA utilizado foi submetido à caracterização ambiental visando determinar o seu potencial poluidor. Para a sua classificação ambiental, o resíduo de ETA foi submetido à teste de lixiviação de acordo com a norma técnicas NBR 10005 (ABNT, 2004a) e teste de solubilização de acordo com a norma NBR 10006 (ABNT, 2004a). Os extratos de lixiviação e solubilização foram comparados com os valores padrões dos elementos poluentes descritos nos anexos da norma NBR 10004 (ABNT, 2004c).

3.2.2.9. Caracterização do cimento

Parte dos resultados de caracterização do cimento Portland CP III-40RS utilizado neste trabalho foi fornecido pela empresa fabricante e são apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. – Caracterização física do cimento Portland CIII-40RS.

Ensaio	Norma	Resultado
Água da pasta de consistência normal	NBR NM 43/2003	31 %
Tempo de início de pega	NBR NM 65/2003	250 min
Tempo de fim de pega	NBR NM 65/2003	300 min
Massa específica	NBR NM 23/2001	2,98 g/cm ³
Finura na #200	NBR 11579/1991	0,10 %
Resistência à compressão axial	NBR 7215/1996	3 dias – 17 MPa 7 dias – 30 MPa 28 dias – 45 MPa

3.2.3. Formulação e preparação dos traços com adição de resíduo de ETA

Esta etapa consiste na formulação das composições com incorporação do resíduo de estação de tratamento de água. Foi utilizada uma mistura de solo-cimento padrão determinada de acordo com a ABCP (1999), sendo 1:10, ou seja, uma parte de cimento para dez partes de solo. A massa foi umedecida com 16 % em peso em água, através de um borrifador. Para a mistura de referência de solo-cimento foi adicionado o resíduo de ETA em substituição ao solo. Essas substituições foram da ordem de 1,25 %, 2,50 % e 5,00 % em peso de resíduo de ETA. Para melhor visualização, as Tabelas 3.2, 3.3 e 3.4 mostram as composições referentes à análise da adição do resíduo de ETA dadas em partes de cada componente, em gramas (g) e em % em peso, respectivamente.

As matérias-primas devidamente secas foram misturadas de acordo com as proporções dadas nas Tabelas 3.2, 3.3 e 3.4, utilizando-se um misturador cilíndrico durante 30 minutos. As massas cimentícias preparadas foram submetidas à análise granulométrica e plasticidade.

Tabela 3.2. – Composição dos traços (em partes).

Traço	Cimento	Solo	ETA	Água
TR	1,00	10,00	0,00	1,50
T1	1,00	9,75	0,25	1,50
T2	1,00	9,55	0,45	1,50
T3	1,00	9,10	0,90	1,50

Tabela 3.3. – Composição das massas cimentícias (g).

Formulação	Cimento	Solo	ETA	Água
FR	12,00	108,00	0,00	19,20
F1	12,00	106,50	1,50	19,20
F2	12,00	105,00	3,00	19,20
F3	12,00	102,00	6,00	19,20

Tabela 3.4. – Composição das massas cimentícias (% em peso).

Massa Cimentícia	Cimento	Solo	ETA	Água
MCR	10,00	90,00	0,00	16,00
MC1	10,00	88,75	1,25	16,00
MC2	10,00	87,50	2,50	16,00
MC3	10,00	85,00	5,00	16,00

3.2.4. Preparação dos corpos cimentícios

Os corpos cimentícios foram conformados por prensagem uniaxial em prensa hidráulica, de marca Metalmex, modelo PHP, com capacidade de 15 toneladas (Figura 3.6-a). Em uma pressão de compactação de 18 MPa. A matriz utilizada é de forma cilíndrica ($\varnothing = 37,17$ mm) e pistões de aço (Figura 3.6-b). Após a

compactação os corpos cimentícios foram submetidos ao processo de cura por 28 dias.

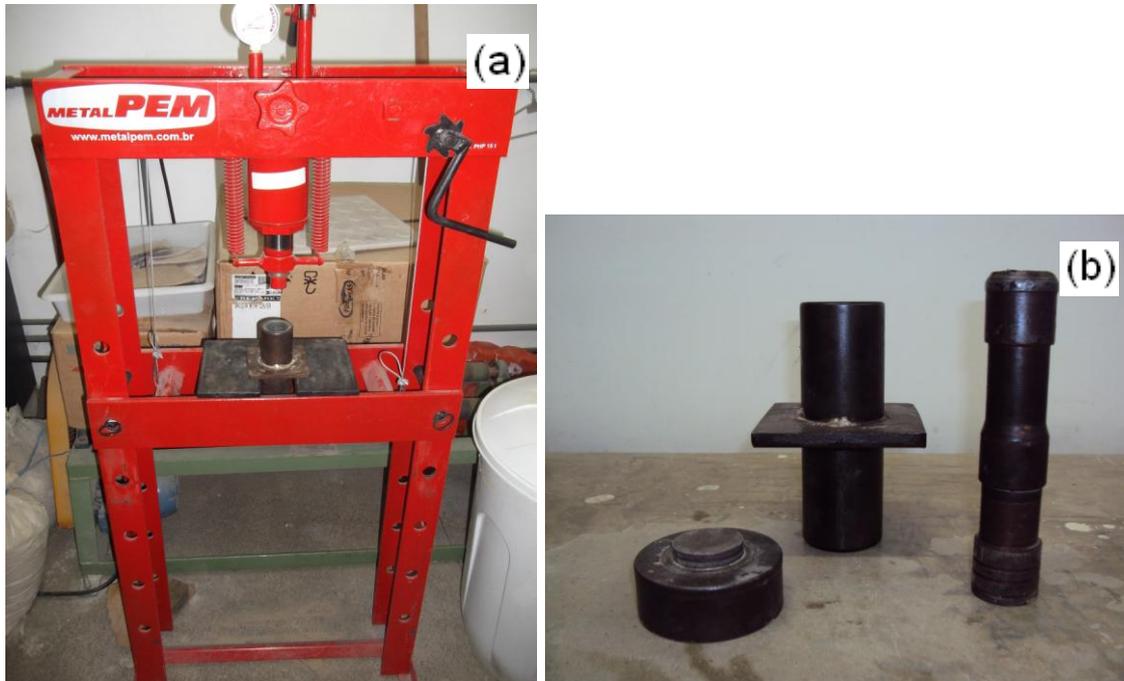


Figura 3.6. – (a) Prensa hidráulica e (b) molde cilíndrico utilizado na confecção dos corpos cimentícios.

3.2.5. Etapa de cura dos corpos cimentícios

Após a prensagem, os corpos cimentícios foram desmoldados, devidamente pesados, medidos, identificados e então depositados em uma câmara úmida. Foram curados durante 28 dias para realização dos ensaios tecnológicos. Na câmara úmida (Figura 3.7) os corpos cimentícios foram curados sob condições de 95 % de umidade e 24 ° C, valores considerados ideais de acordo com a norma NBR 12024 (ABNT, 1992).

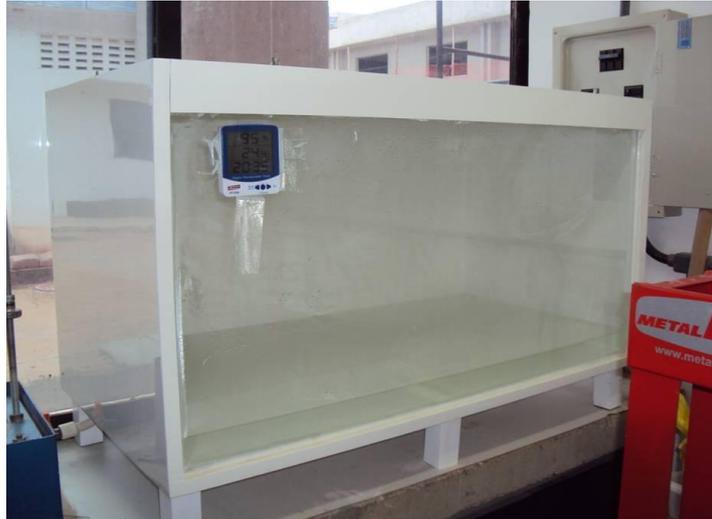


Figura 3.7. – Câmara úmida para processo de cura.

3.2.6. Caracterização física e mecânica dos corpos cimentícios

3.2.6.1. Massa específica bulk

A massa específica bulk (ρ_b) dos corpos cimentícios após cura foi determinada de acordo com a seguinte expressão (3.3):

$$\rho_b = \frac{M}{V} \quad (3.3)$$

Onde:

ρ_b – massa específica bulk, em g/cm³;

M – massa do corpo cimentício curado, em gramas;

V – volume do corpo cimentício curado, em cm³.

As medidas de massas e das dimensões dos corpos cimentícios curados foram feitas com o auxílio de uma balança digital marca Gehaka, modelo BG-2000 Classe II e de um paquímetro digital Miltutoyo, respectivamente.

3.2.6.2. Resistência à compressão simples

A resistência mecânica dos corpos cimentícios foi determinada por meio do ensaio de resistência à compressão, utilizando-se uma máquina de ensaios universal, marca Instron, modelo 5582 com velocidade de carregamento de 1 mm/min. A resistência à compressão dos corpos cimentícios foi obtida a partir da expressão (3.4):

$$T = \frac{F}{A} \quad (3.4)$$

Onde:

T – Tensão de ruptura à compressão simples, em MPa;

F – carga de ruptura, em N;

A – área das peças curadas, em mm²;

3.2.6.3. Absorção de água

A absorção de água foi determinada de acordo com a norma NBR 10836 (ABNT, 1994). O valor de absorção de água é obtido por meio da expressão (3.5):

$$AA(\%) = \frac{(M_u - M_s)}{M_s} \cdot 100 \quad (3.5)$$

Onde:

AA – absorção de água, em %;

M_u – massa do corpo cimentício saturado em água, em gramas;

M_s – massa do corpo cimentício seco, em gramas.

3.2.7. Caracterização microestrutural e de fases dos corpos cimentícios

A microestrutura dos corpos cimentícios curados foi analisada através de microscopia confocal, utilizando um microscópio a laser de medição 3D, marca Olympus, modelo LEXT OLS4000.

A análise de fases dos corpos cimentícios incorporados foi feita por difração de raios-X, na qual foram identificadas as fases cristalinas remanescentes e as novas fases que foram formadas durante o processo de incorporação. A análise de difração de raios-X (DRX) foi realizada em um difratômetro Shimadzu, XRD-7000, utilizando radiação monocromática de Cu-K α a uma velocidade de 1,5 $^\circ$ (2 θ) por minuto.

Capítulo 4. Resultados e Discussão

4.1. Caracterização das Matérias-Primas Utilizadas

4.1.1. Análise mineralógica

A Figura de 4.1 apresenta o difratograma de raios-X do resíduo de estação de tratamento de água utilizado nesse trabalho. Nota-se que o resíduo de ETA é constituído principalmente de caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), com a sílica (SiO_2), gibsitita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), e goetita ($\text{FeO}(\text{OH})$) como minerais acessórios. Foi observado também indício da presença de illita/mica. Este resultado está em acordo com a literatura (Oliveira e Holanda, 2008) em que a caulinita é o principal componente mineral encontrado no resíduo de ETA proveniente da região de Campos dos Goytacazes-RJ.

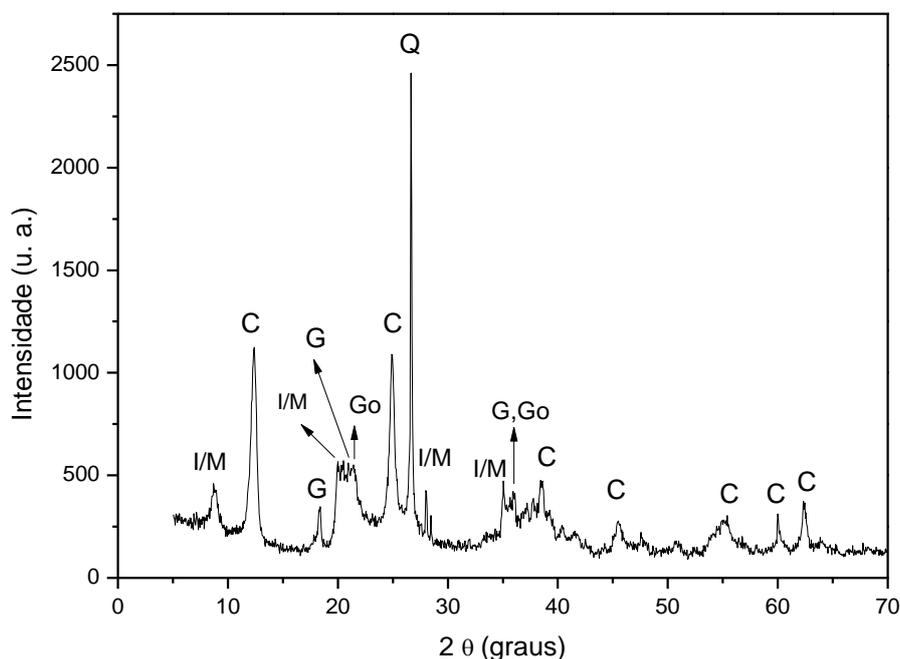


Figura 4.1. – Difratograma de raios-X do resíduo de ETA: C - Caulinita; G - Gibsitita; I/M = Illita/Mica; Q - Quartzo; Go - Goetita.

Na Figura 4.2 é apresentado o difratograma de raios-X do solo arenoso. Pode-se observar que o solo arenoso é rico principalmente em quartzo e caulinita. Foram também identificadas as presenças de gibsitita, goetita e illita/mica. Como

esperado, o solo arenoso é rico em partículas de quartzo livre (SiO_2), ou seja, rico na fração areia. Isto significa que em termos mineralógico e físico o solo arenoso é completamente diferente do resíduo de ETA. Deve-se ressaltar que a presença de alta quantidade de quartzo no solo arenoso é altamente desejável para o uso desse material como um componente de tijolo solo-cimento. O quartzo atua como material não plástico e diminui a plasticidade global do solo arenoso.

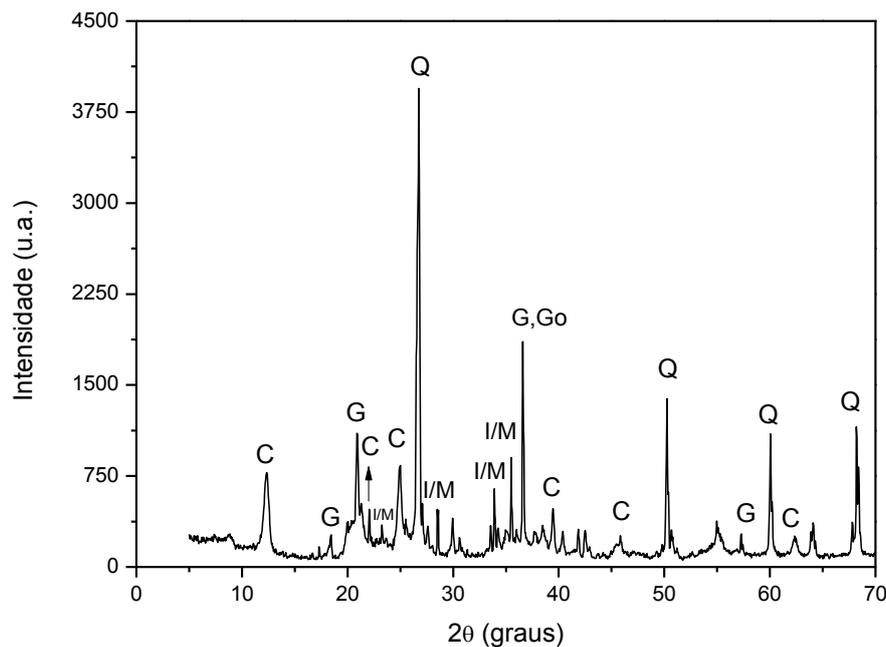


Figura 4.2. – Difratograma de raios-X do solo arenoso: C = Caulinita; G = Gibsitita; Go = Goetita; I/M = Illita/Mica; Q = Quartzo.

A Figura 4.3 apresenta o difratograma de raios-X do cimento Portland CP III-40RS. Foram identificadas as seguintes fases mineralógicas: silicato tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) também conhecido como alita, silicato bicálcio ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) chamado de belita, ferroaluminato tetracálcico ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$), aluminato tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) e sulfato de cálcio hidratado ($\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) comumente chamado de gesso. Além dessas fases, foi identificada a presença de CaO , que pode estar relacionado a composição da escória de alto forno do cimento estudado (Tabela 4.1), e ao calcário (CaCO_3), uma das matérias-primas do cimento Portland.

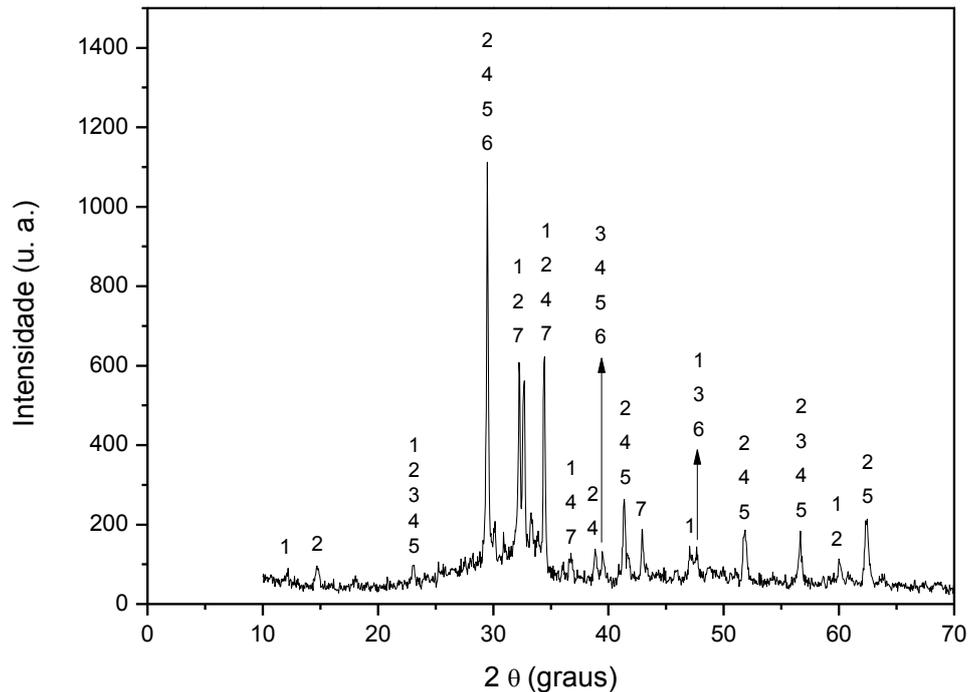


Figura 4.3. – Difratoograma de raios-X do cimento Portland CIII-40RS: 1 = Ferroaluminato tetracálcico (C_4AF); 2 = Alita (C_3S); 3 = Carbonato de cálcio; 4 = Belita (C_2S); 5 = Aluminato tricálcio (C_3A); 6 = Óxido de cálcio; 7 = Gipsita ($CaSO_4$).

Tabela 4.1. – Composição química da escória de alto forno do cimento Portland CIII-40RS (Pinto, 2010).

Óxido	Teor (%)
CaO	41,60
SiO ₂	33,65
Al ₂ O ₃	12,42
MgO	7,95
TiO	0,73
FeO	0,45

4.1.2. Análise química

A Tabela 4.2 apresenta os resultados da composição química e perda ao fogo das matérias-primas utilizadas. Pode-se observar que o resíduo de ETA é constituído essencialmente por Al₂O₃, SiO₂ e Fe₂O₃, com predominância de alumina.

O solo arenoso também apresenta como compostos majoritários Al_2O_3 , SiO_2 e Fe_2O_3 , mas com predominância de sílica. O cimento Portland CPIII-40 RS apresenta alto teor de óxido de cálcio (CaO). Estes resultados estão de acordo com os resultados de difração de raios-X (Figuras. 4.1 - 4.3).

Tabela 4.2. – Composição química do resíduo de ETA, solo arenoso e cimento Portland CPIII-40RS (%).

Composição	Resíduo de ETA	Solo arenoso	Cimento Portland CPIII-40RS
Al_2O_3	31,18	28,63	7,11
SiO_2	29,59	46,70	18,87
Fe_2O_3	10,21	7,40	1,21
SO_3	1,61	2,00	3,71
K_2O	1,27	3,80	0,56
TiO_2	1,04	2,21	0,53
MnO	0,14	0,07	0,30
CaO	0,34	0,98	65,15
V_2O_5	0,09	0,13	-
CuO	-	-	-
ZrO_2	0,01	0,24	-
Rb_2O	-	-	-
ZnO	0,02	0,02	-
Y_2O_3	-	0,01	-
SrO	-	0,01	0,06
PF	24,50	7,80	2,50

PF = Perda ao fogo

De acordo com a Tabela 4.2 o resíduo de ETA é quimicamente composto principalmente por alumina (Al_2O_3), sílica (SiO_2) e hematita (Fe_2O_3), que correspondem à cerca 70,98 %. Estes compostos estão presentes no resíduo de ETA associados a minerais como: caulinita, quartzo, gibsita e illita/mica. A alumina e a sílica podem estar associadas formando a caulinita e illita/mica. A hematita pode estar relacionada aos flocculantes a base de sulfato de ferro utilizado no tratamento da água e a goetita. Pode-se observar também que o resíduo de ETA apresenta

baixos teores de óxidos fundentes (K_2O e CaO), exceto óxido de ferro. A presença destes elementos é justificada pelo uso do floculante a base de sulfato, no tratamento de água e pela própria composição da água, a qual contém materiais em suspensão, como areia e materiais argilosos. O resíduo de ETA possui elevada perda ao fogo da ordem de 24,50 % em peso. De acordo com Oliveira (2004), isto se deve principalmente à perda de água de constituição dos argilominerais, a desidratação de hidróxidos e a oxidação da matéria-orgânica.

Na Tabela 4.2 são também apresentados os resultados da composição química do solo arenoso. O solo é constituído quimicamente por SiO_2 (46,70 %), Al_2O_3 (28,63 %) e Fe_2O_3 (7,40 %). No solo, a sílica (SiO_2) apresenta-se normalmente na forma de sílica livre (quartzo) ou presentes nos minerais argilosos. A alumina (Al_2O_3) que é o segundo elemento mais abundante encontra-se quase sempre formando parte da estrutura dos aluminossilicatos como a caulinita e minerais micáceos e também da gibsita. O óxido de ferro (Fe_2O_3) está presente como uma das impurezas mais frequentes associadas aos solos. Ainda seguindo a Tabela 4.2, observa-se à presença de óxidos fundentes como, óxido de potássio e óxido de cálcio (K_2O e CaO). O CaO é mais escasso com teor de 0,98 %, enquanto o K_2O está em torno de 3,80 %. Os óxidos alcalis encontram-se nos solos na forma de compostos insolúveis (feldspatos e micas), como íons livres no retículo cristalino de minerais (ilita) e como sais solúveis (cloretos e sulfatos).

Segundo Holanda e Vieira (2002), os solos da região de Campos dos Goytacazes-RJ são provenientes de sedimentos quaternários, originados de processos de decantação de material sílico-argiloso da carga de suspensão, após eventos de enchentes do Rio Paraíba do Sul. Deve-se ressaltar que é do Rio Paraíba a retirada de água para o abastecimento do município. Isto justifica o fato da constituição do resíduo de ETA ser muito semelhante às argilas usadas no pólo de cerâmica da região de Campos dos Goytacazes-RJ.

Do ponto de vista químico, o resíduo de ETA e o solo arenoso são constituídos essencialmente por SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , que correspondem a 70,98 e 82,73 %, respectivamente. No entanto, podem ser observadas pequenas, mas importantes diferenças na composição química destes materiais. O solo arenoso apresenta maior presença de quartzo em sua constituição, 46,70 % em peso. O SiO_2 quando se mostra na forma livre diminui a plasticidade do solo. Dessa maneira o solo arenoso estudado apresenta menor plasticidade em relação ao resíduo de ETA.

Ainda, o solo arenoso apresenta menor perda ao fogo da ordem de 7,80 %. O resíduo de ETA contém menos óxidos fundentes ($K_2O + CaO$), exceto óxido de ferro.

O cimento Portland CPIII-40RS é composto principalmente por CaO , com teor de 65,15 % em peso e, também, por Al_2O_3 e SiO_2 , correspondendo a 7,11 % e 18,87 % respectivamente. O CaO está relacionado ao calcário, um dos constituintes do cimento Portland e pode ser proveniente da composição da escória de alto forno do cimento analisado. Já o Al_2O_3 e SiO_2 encontram-se na argila que juntamente com o calcário, após queima, formará o clínquer (Tabela 4.3). Observa-se que a perda ao fogo é baixa, em torno de 2,50 %.

Tabela 4.3. – Composição química do clínquer (ABCP, 2002).

Óxido	Teor (%)
CaO	60,0 – 67,0
SiO_2	17,0 – 25,0
Al_2O_3	3,0 – 8,0
Fe_2O_3	0,5 – 0,6
MgO	0,5 – 4,0
Álcalis	0,3 – 1,2
SO_3	2,0 – 3,5

4.1.3. Avaliação do carbono total, matéria orgânica, pH, capacidade de troca catiônica e sais solúveis.

A Tabela 4.4 apresenta algumas características importantes do resíduo de ETA e do solo arenoso. O pH (em água) do solo é da ordem de 5,00 e do resíduo de 5,30, o que podem ser considerados como elevada acidez e média acidez, respectivamente, de acordo com a EMBRAPA (1999). A capacidade de troca catiônica (CTC) do resíduo é da ordem de 6,89 meq/100g. Este valor está dentro da faixa usual de valores de CTC para a caulinita (3 ate 15 meq/100g) (Santos, 1989). No caso da caulinita o processo de troca ocorre predominantemente nas faces dos cristais e devem-se principalmente as ligações quebradas. Pode-se observar também que as matérias-primas analisadas possuem baixo teor de sais solúveis. O resíduo de ETA apresenta maior CTC em relação ao solo. Os resultados também mostram que o resíduo de ETA apresenta altos valores de matéria orgânica (25,86

%) e carbono orgânico (15 %), ao contrário do solo que apresenta 3,10 % de matéria orgânica e 1,80 % de carbono orgânico. Estes resultados confirmam os dados de perda ao fogo de ambas as matérias-primas na Tabela 4.2. A matéria orgânica encontrada contribui fortemente para aumentar a CTC e a perda ao fogo das matérias-primas.

Tabela 4.4. – Análise do carbono total, matéria orgânica, pH, capacidade de troca catiônica e sais solúveis do resíduo de ETA e do solo arenoso.

Análise	Solo arenoso	Resíduo de ETA
pH (H ₂ O)	5,00	5,30
Teor de sais solúveis (ppm)		
K	1,70	1,20
Ca	14,80	18,80
Mg	10,20	6,60
Al	4,90	5,10
H+Al	30,60	40,80
Na	6,00	1,50
Carbono Orgânico (%)	1,80	1,50
Matéria Orgânica (%)	3,10	25,86
Capacidade de Troca Catiônica (meq/100g)	6,33	6,89

4.1.4. Análise granulométrica

A Figura 4.4 apresenta a análise granulométrica do resíduo de ETA. Observa-se que a quantidade de fração argila ($< 2 \mu\text{m}$) do resíduo é relativamente alta da ordem de 35 %. O teor de silte ($2 \mu\text{m} \leq x < 60 \mu\text{m}$) é da ordem de 62 %. O teor de areia ($60 \mu\text{m} \leq x < 600 \mu\text{m}$) é cerca de 3 %. O alto percentual de partículas finas do resíduo está fundamentalmente relacionado com a presença de caulinita, conforme mostrado na Figura 4.1. O alto teor de fração argila do resíduo é problemático para a

função apenas de enchimento, permitirá a liberação de maior quantidade de cimento para aglomerar os grãos menores.

O Valor da massa específica real dos grãos do solo arenoso medido por meio de picnometria foi de $2,72 \text{ g/cm}^3$.

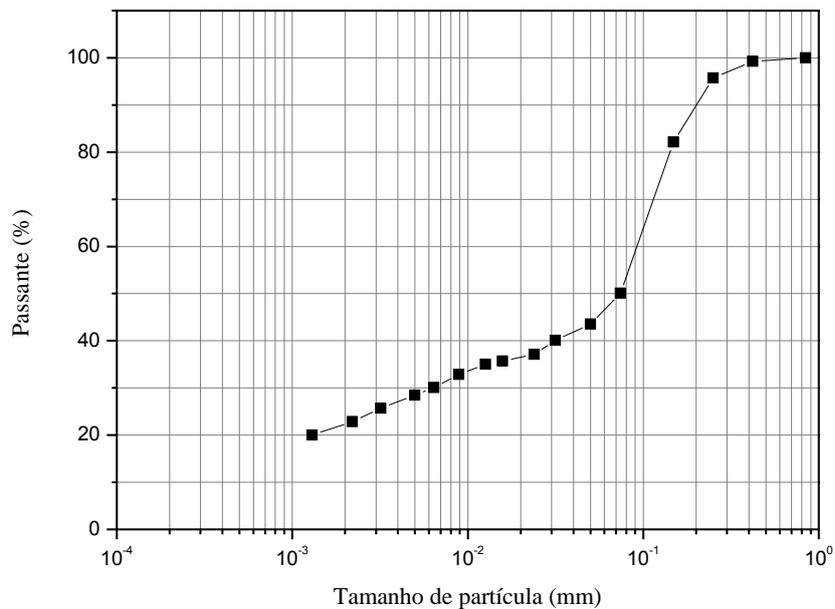


Figura 4.5. – Distribuição de tamanho de partícula do solo arenoso.

Para as massas cimentícias com 1,25 % e 5,00 % de incorporação de resíduo de ETA, como mostrado na Figura 4.6, os valores de fração argila obtidas foram de 38,40 % e 39,60 %, respectivamente. Verifica-se que o teor de silte ($2 \leq x < 60 \mu\text{m}$) para a composição de 1,25 % de resíduo de ETA é de 39,90 % e para 5,00 % de resíduo de ETA incorporada é de 41,00 %. Os teores de areia ($60 \leq x < 600 \mu\text{m}$) para 1,25 % de resíduo de ETA foi de 21,60 % e para 5,00 % de resíduo de ETA de 19,40 %. Esses valores evidenciam que a adição do resíduo de ETA incorpora partículas finas na massa cimentícia, refletindo as fases mineralógicas presentes no resíduo que são principalmente partículas de caulinita.

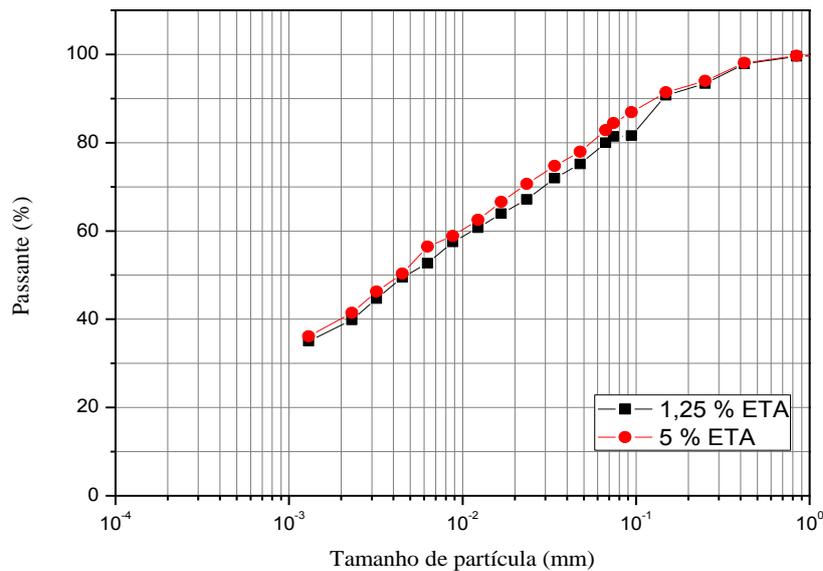


Figura 4.6. – Distribuição de tamanho de partícula das massas cimentícias incorporadas com resíduo de ETA.

4.1.5. Plasticidade

A Tabela 4.5 apresenta os valores dos limites de consistência de Atterberg do resíduo de ETA. Os limites de consistência são as variáveis que melhor expressam as condições de trabalhabilidade dos solos. O limite de plasticidade (LP) está relacionado à quantidade de água mínima necessária para que o estado de consistência plástico seja adquirido. O limite de liquidez (LL) está relacionado à quantidade de água em que o material apresenta uma consistência de lama, ultrapassando assim, a faixa de consistência plástica. Valores elevados podem conduzir a maiores dificuldades no destorroamento e também no processo de mistura dos componentes. Segundo a ABCP (1985), os solos adequados para a fabricação de blocos vazados e tijolos maciços de solo-cimento devem atender um $LL \leq 45 \%$ e $IP \leq 18 \%$. Observa-se que o resíduo de ETA apresenta índice de plasticidade relativamente alto, na faixa de 25,4 %. Assim, o valor de IP sugere que o resíduo de ETA pode ser usado na fabricação de tijolos solo-cimento, desde que adicionado em quantidades pequenas.

Tabela 4.5. – Limites de consistência de Atterberg do resíduo de ETA (%).

Limite de Liquidez	Limite de Plasticidade	Índice de Plasticidade
58,2	32,8	25,4

A Tabela 4.6 mostra os valores dos limites de consistência de Atterberg do solo arenoso. O solo arenoso estudado apresentou limite de liquidez em torno de 27,9 % e índice de plasticidade da ordem de 9,5 %. Observa-se que os valores de limite de liquidez (LL) e índice de plasticidade (IP) estão dentro da faixa de valores recomendados pela ABCP (1985), ($LL \leq 45\%$ e $IP \leq 18\%$) para produção de tijolo solo-cimento. Isto significa que o solo arenoso usado apresenta plasticidade dentro do recomendado. Os solos arenosos são indicados para fabricação de tijolo solo-cimento, pois estabilizam com menores quantidades de cimento. Quanto menor o índice de plasticidade do solo, maior facilidade terá para estabilizá-lo, uma vez que o material estará menos sujeito às variações dimensionais, resultantes do inchamento do solo.

É importante ressaltar também que os teores de materiais plásticos e não plásticos estão relacionados diretamente com a plasticidade, podendo influenciar nos fatores tecnológicos como conformação, resistência mecânica e ainda no comportamento de hidratação do cimento.

Tabela 4.6. – Limites de consistência de Atterberg do solo arenoso (%).

Limite de Liquidez	Limite de Plasticidade	Índice de Plasticidade
27,9	18,4	9,5

Na Tabela 4.7 são apresentados os valores dos limites de consistência de Atterberg para as misturas solo-resíduo incorporadas com 1,25 % e 5,00 % de resíduo de ETA. Observa-se que o efeito da incorporação do resíduo é o aumento da plasticidade global das misturas solo-resíduo. Quando comparado com o solo arenoso puro (Tabela 4.6), observa-se que a incorporação de resíduo de ETA modifica significativamente o comportamento de plasticidade do solo arenoso. Isto se deve não somente ao fato do resíduo de ETA ser rico em partículas finas de

argilominerais, como a caulinita e illita/mica, mas também ser rico em matéria orgânica.

Tabela 4.7. – Limites de consistência de Atterberg das massas cimentícias (%).

Massas Cimentícias	Limite de Liquidez	Limite de Plasticidade	Índice de Plasticidade
1,25 % ETA	51,1	31,0	20,1
5,00 % ETA	50,8	30,3	20,5

A Tabela 4.8 apresenta os valores da densidade real dos grãos para as partículas das misturas solo-resíduo de ETA. Como esperado, a incorporação do resíduo de ETA tende a diminuir a densidade real dos grãos das misturas solo-resíduo de ETA.

Tabela 4.8. – Densidade real dos grãos das massas cimentícias (g/cm³).

Densidade real dos grãos (g/cm ³)	1,25 % ETA	5,00 % ETA
	2,66	2,64

4.1.6. Análises térmicas

O comportamento térmico do resíduo de ETA e do solo arenoso foi estudado por meio de análise térmica diferencial (ATD) e análise termogravimétrica (ATG). A Figura 4.7 apresenta as curvas de análises térmica diferencial (ATD) e termogravimétrica (ATG) para o resíduo de ETA. Observa-se por volta de 57° C a presença de um pico endotérmico, que deve está relacionado à perda de água fisicamente adsorvida sobre as partículas do resíduo. Outro evento endotérmico é visto por volta de 265° C, que está relacionado à desidratação dos hidróxidos, tais como gibsita e goetita. Um pico exotérmico é notado por volta de 318° C, o qual não está associado a qualquer perda de massa. Este evento térmico se deve à combustão de matéria orgânica presente no resíduo, ainda pode estar associado à presença de sulfatos, como, por exemplo, sulfato de alumínio e ferro, utilizado como floculante no processo de tratamento de água (Oliveira *et. al.*, 2004). O sulfato de alumínio, por exemplo, perde água quimicamente ligada por volta de 300 °C (Reed,

1995). Contudo, a inexistência de uma linha base dificulta a interpretação deste fenômeno térmico, possibilitando apenas a sua especulação. A própria existência de dois fenômenos térmicos próximos, no caso em 265° C e 318° C, pode estar contribuindo para isso. Por volta de 481° C observa-se um vale endotérmico que se deve a desidroxilação da caulinita, levando a formação de metacaulinita. Embora não esteja bem esclarecido, nota-se ainda um pequeno pico exotérmico por volta de 748° C, o qual não está associado a qualquer perda de massa. Este evento que pode estar relacionado à decomposição da metacaulinita e a consequente formação de novas fases cerâmicas de alta temperatura (Santos,1989). As fases podem ser uma estrutura espinélio (Al-Si) (Chen *et. al.*, 2000). Porém, não há na literatura consenso se uma estrutura espinélio é formada nesta região de temperatura. Além disso, é possível também, que ocorra a nucleação de mulita primária nesta região de temperatura (Santos, 1989).

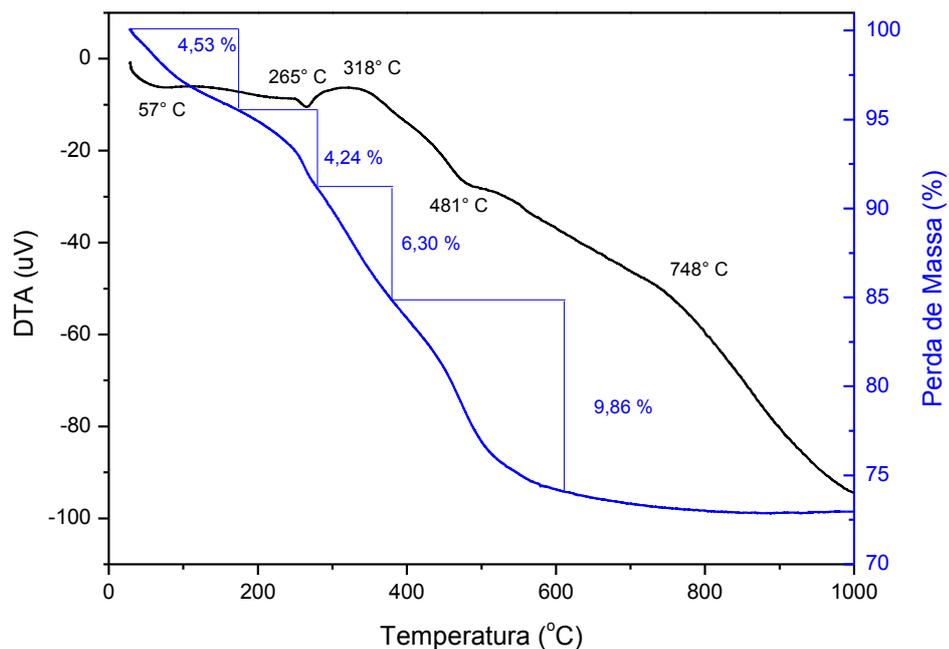


Figura 4.7. – Curvas de análises térmica diferencial e termogravimétrica (ATD e ATG) para o resíduo de ETA.

A Tabela 4.9 apresenta os resultados de variação de massa em função da temperatura, obtidos a partir da curva termogravimétrica. Todos os eventos térmicos são acompanhados por intenso processo de transferência de massa na amostra, como mostrado nas curvas ATD/TG e resumidos nesta tabela. A amostra apresentou

uma perda de massa total obtida da curva TG de 24,93 % durante o aquecimento, que está correlacionada com o valor da perda ao fogo de 24,50 % (Tabela 4.2)

Tabela 4.9. – Variação da massa em função da temperatura na análise termogravimétrica do resíduo de ETA.

Varição de massa (%)	Temperatura (°C)
4,53	57
4,24	265
6,30	318
9,86	481

A Figura 4.8 apresenta as curvas de análises térmica diferencial (ATD) e termogravimétrica (ATG) para o solo arenoso. De acordo com a curva de ATD, a amostra do solo apresenta três vales endotérmicos nas temperaturas de 52° C, 270° C e 490° C, respectivamente. O pico endotérmico em torno de 52° C possui perda de massa de 0,72 % (Tabela 4.10) que está associado à perda de água fisicamente adsorvida. O pico endotérmico por volta de 270° C possui perda de massa de 1,76 % (Tabela 4.10) e está atribuído à desidratação de hidróxidos, tais como gibsitita e goetita. Nota-se outro pico endotérmico em torno de 490° C, com perda de massa de 4,97 % (Tabela 4.10) que está relacionado à perda de água de constituição de argilominerais, sobretudo a caulinita.

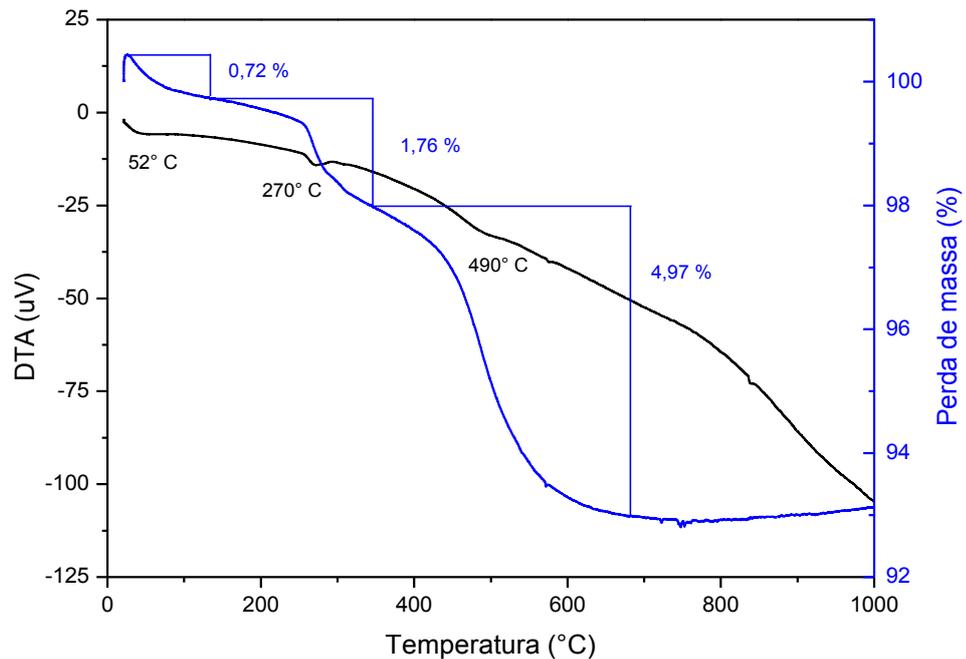


Figura 4.8. – Curvas de análises térmica diferencial e termogravimétrica (ATD e ATG) para o solo arenoso.

A amostra apresentou uma perda de massa total obtida da curva TG de 7,45 % durante o aquecimento, que é bem correlacionada com o valor da perda ao fogo de 7,80 % (Tabela 4.2).

Tabela 4.10 – Variação da massa em função da temperatura na análise termogravimétrica do solo arenoso.

Varição de massa (%)	Temperatura (°C)
0,72	52
1,76	270
4,97	490

4.1.7. Morfologia

A Figura 4.9 apresenta diversas micrografias do resíduo de ETA obtidas por microscopia eletrônica de varredura. O resíduo de ETA é constituído de placas de lamelas com perfil irregular. Observa-se a presença de partículas finas aglomeradas, constituindo placas de lamelas com perfil irregular, possivelmente do argilomineral caulinita, como pode ser comprovada sua presença na difração de raios-X (Figura

4.1). Nota-se que as partículas menores encontram-se aderidas às partículas maiores ou formando aglomerados. Além disso, observa-se larga distribuição de tamanho de partículas do resíduo, comprovando os dados de granulometria do resíduo (Figura 4.4).

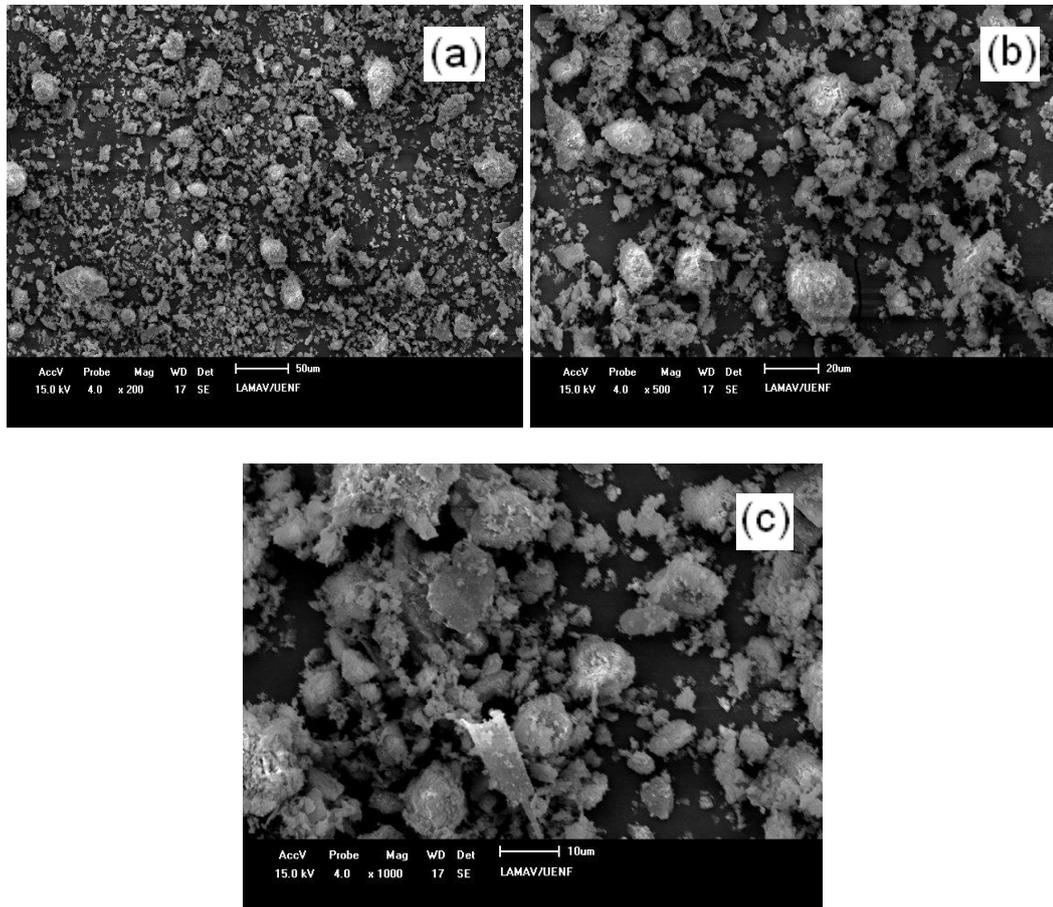


Figura 4.9. – Morfologia das partículas do resíduo de ETA: (a) 200X; (b) 500X; (c) 1000X.

A Figura 4.10 apresenta o espectro de EDS (espectrometria de energia dispersiva de raios-X) realizado na amostra de resíduo de ETA. O mapeamento por elementos através de EDS indicou a presença de Fe, Al, Si, C, O e K os quais confirmam os dados da análise química (Tabela 4.2) e mineralógica do resíduo de ETA (Figura 4.1).

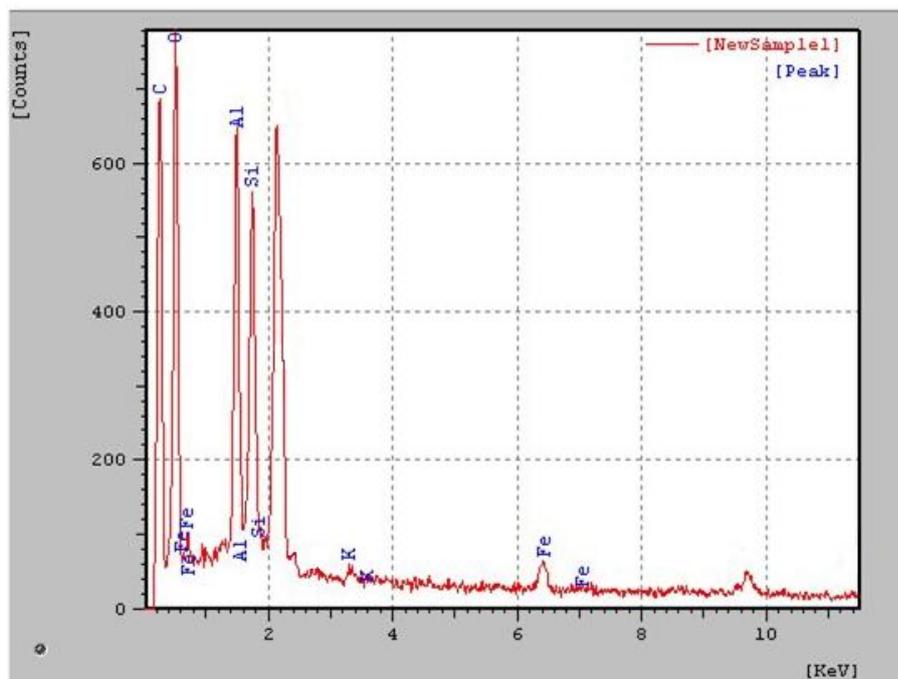


Figura 4.10. – Mapeamento por EDS para o resíduo de ETA.

4.1.8. Avaliação ambiental do resíduo de ETA

As Tabelas 4.11 e 4.12 apresentam os resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização da amostra do resíduo de ETA conforme as normas ABNT NBR 10005:2004 e 10006:2004, respectivamente. No presente trabalho foram determinadas às concentrações no lixiviado de arsênio, bário, cádmio, chumbo, cromo, mercúrio e prata. Observa-se que os resultados do ensaio de lixiviação (Tabela 4.11) indicam a presença desses elementos no resíduo de ETA. Mas é importante notar, que as concentrações obtidas para esses elementos estão abaixo dos valores limites estabelecidos no anexo F da norma NBR 10004:2004. Dessa forma identificou-se que o resíduo de ETA estudado não apresenta periculosidade, podendo ser classificado como um resíduo de Classe II (Não perigoso).

Tabela 4.11. – Ensaio de lixiviação do resíduo de ETA (mg/L).

Parâmetros	Resultado	ABNT NBR 10004:2004 – Anexo F
Arsênio Total	0,0024	1,0000
Bário Total	1,9900	70,0000
Cádmio Total	< 0,0120	0,5000
Chumbo Total	< 0,0300	1,0000
Cromo Total	0,0420	5,0000
Mercúrio Total	< 0,0001	0,1000
Prata Total	< 0,0130	5,0000

Tabela 4.12 – Ensaio de solubilização do resíduo de ETA (mg/L).

Parâmetros	Resultado	ABNT NBR 10004:2004 – Anexo G
Alumínio Total	0,3090	0,2000
Arsênio Total	0,0008	0,0100
Bário Total	< 0,4100	0,7000
Cobre Total	0,0340	2,0000
Cromo Total	< 0,0100	0,0500
Ferro Total	0,8090	0,3000
Manganês Total	19,4810	0,1000
Mercúrio Total	0,0001	0,0010
Prata Total	< 0,0130	0,0500
Zinco Total	< 0,0140	5,0000

Na Tabela 4.12 são apresentados os resultados do ensaio de solubilização do resíduo de ETA. Pode-se observar que o extrato solubilizado apresentou resultados acima do limite estabelecido pelo anexo G da norma 10004:2004 para o alumínio

(0,3090 mg/L), ferro (0,8090 mg/L) e manganês (19,4810 mg/L). Assim, nota-se que o resíduo de ETA apresentou solubilização para alguns parâmetros analisados, podendo dessa forma, ser classificado como um resíduo Não inerte, ou seja, Classe II A.

4.2. Análise de fases e microestrutural dos corpos cimentícios curados

4.2.1. Análise microestrutural

A análise microestrutural dos corpos cimentícios estudados contribui para o maior entendimento do comportamento das suas propriedades em função da adição do resíduo de ETA e da hidratação do cimento.

A Figura 4.11 apresenta as micrografias obtidas por microscopia confocal, em três aumentos, da superfície de fratura para os corpos de solo-cimento preparados com a massa cimentícia referência, ou seja, corpos cimentícios sem incorporação de resíduo de ETA. Todos os corpos cimentícios foram curados durante 28 dias.

Observa-se que a massa referência apresenta grande quantidade de quartzo mostrada pelos círculos. Isso pode estar relacionado com o alto teor de partículas de quartzo livre (SiO_2) encontrado no solo arenoso (Tabela 4.2). Nota-se que as partículas de quartzo estão entre a pasta de cimento, pasta essa formada pelas fases anidras do cimento que em contato com água irão formar principalmente: portlandita (CH), silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e etringita. Os produtos de hidratação do cimento, especialmente os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) são os principais responsáveis pela resistência mecânica após hidratação do cimento.

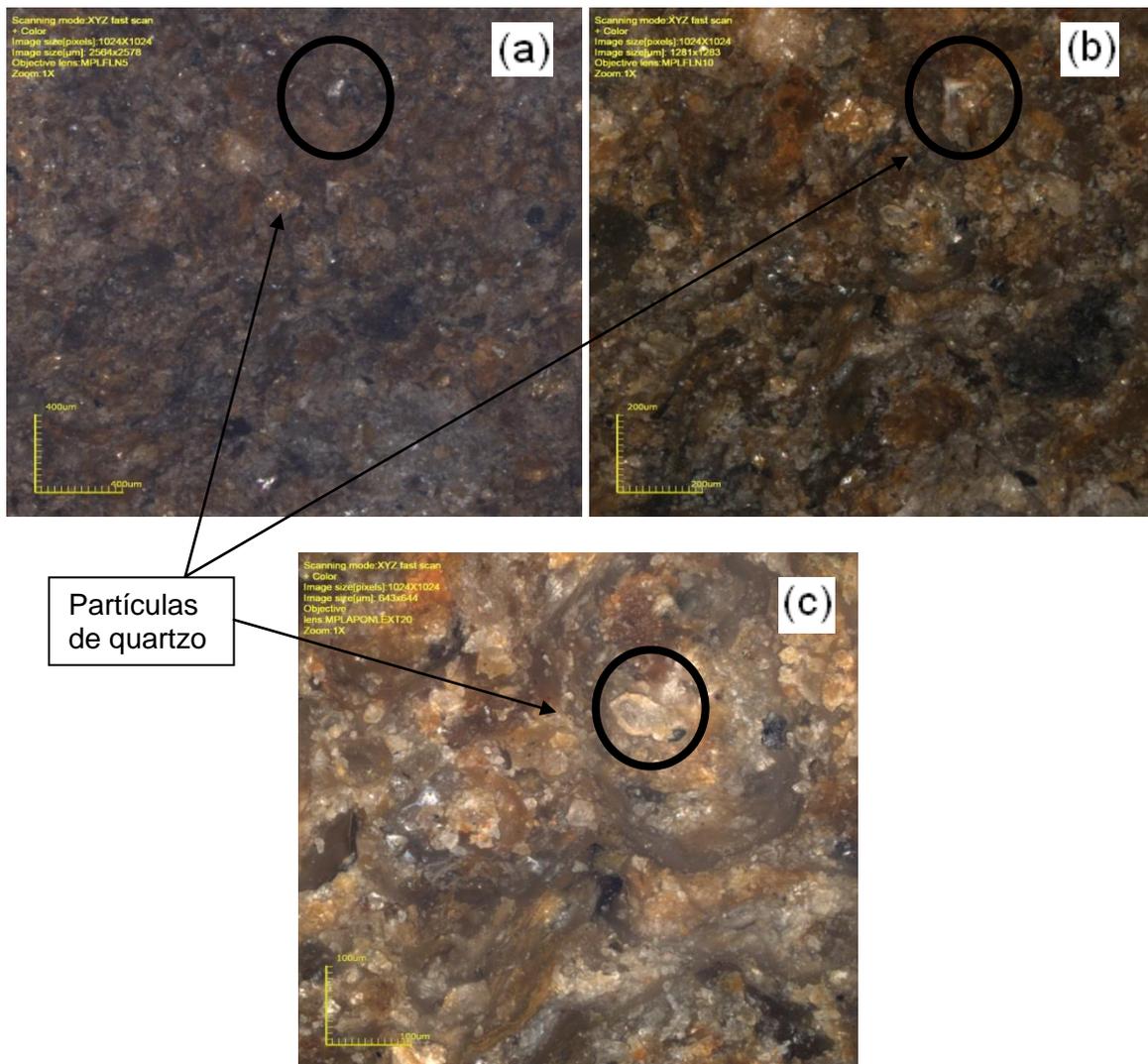


Figura 4.11. – Microestrutura da superfície de fratura para a composição de 0,00 % de resíduo de ETA: (a) 108X; (b) 216X; (c) 430X.

A Figura 4.12 mostra a microestrutura da superfície de fratura obtida por micrografia confocal dos corpos cimentícios com incorporação de 1,25 % de resíduo de ETA. Todos os corpos cimentícios foram curados durante 28 dias. Nota-se a presença de partículas de quartzo. Observa-se também a presença dos compostos de ferro, conforme indicado na composição química do solo e do resíduo de ETA, este apresentando um maior teor de óxido de ferro (Tabela 4.2). A hematita (Fe_2O_3) é responsável pela cor avermelhada do resíduo de ETA. Pode-se observar que a massa cimentícia incorporada com o resíduo de ETA apresenta aglomerados do resíduo, identificados através de círculos pretos, que pode estar relacionado com o processo de homogeneização da mistura das matérias-primas. Nota-se ainda que a pasta de cimento aparece em menor quantidade, o que pode estar relacionado com

a alta capacidade de absorção de água do resíduo de ETA, prejudicando possivelmente o processo de hidratação do cimento. O resíduo de ETA é um material argiloso, ou seja, constituído por argilominerais, de acordo com os resultados obtidos de limites de consistência de Atterberg (Tabela 4.5) e literatura reportada (Oliveira e Holanda, 2008), o que requer maior quantidade de água para sua conformação.

Pode-se observar também, que a massa cimentícia incorporada com resíduo de ETA apresentou poros, identificados através de setas brancas. O surgimento desses poros nos corpos cimentícios incorporados com resíduo de ETA podem estar relacionados com a hidratação do cimento.

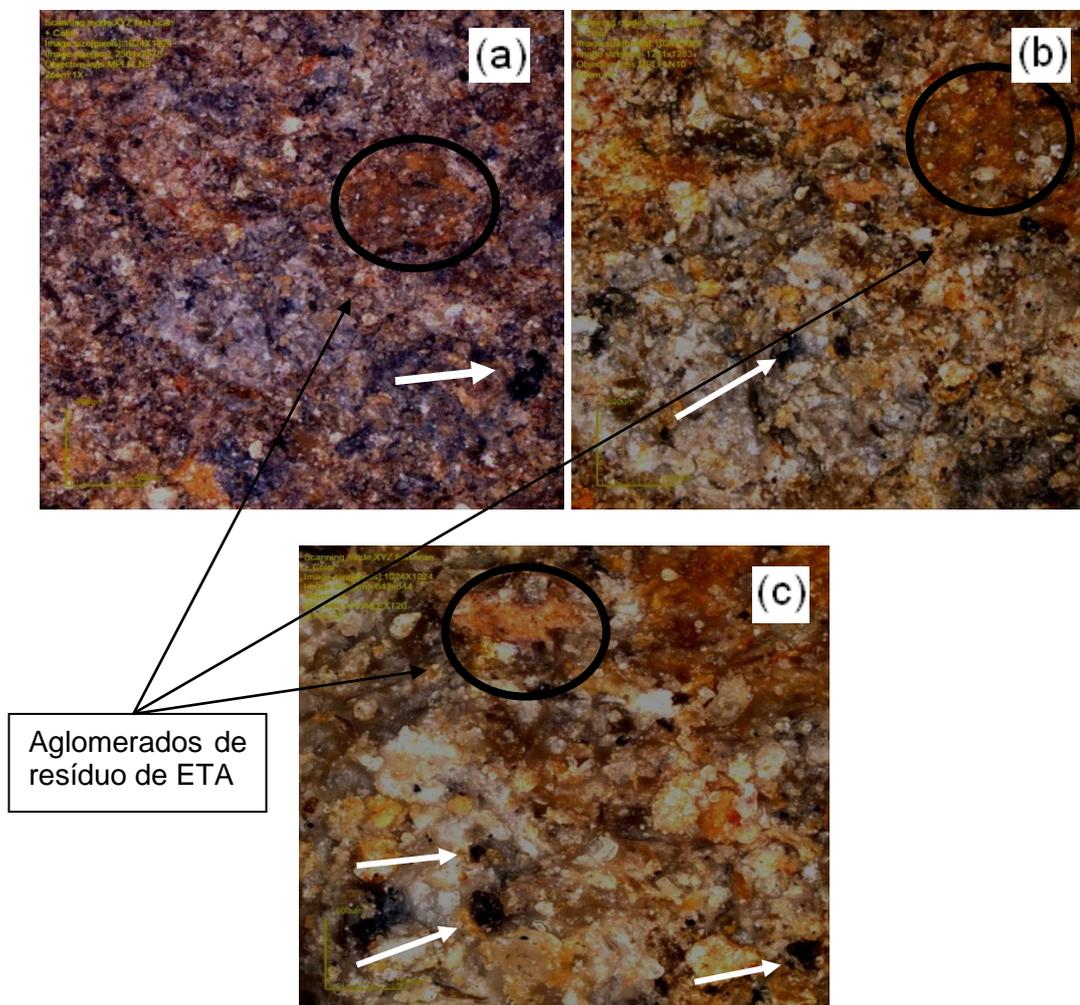


Figura 4.12. – Microestrutura da superfície de fratura para a composição de 1,25 % de resíduo de ETA: (a) 108X; (b) 216X; (c) 430X.

4.2.2. Análise de fases

A Figura 4.13 apresenta os difratogramas de raios-X dos corpos cimentícios com incorporação de 0,00, 1,25 e 5,00 % de resíduo de ETA, aos 28 dias de cura. Observa-se que a adição do resíduo de ETA não modificou as fases cristalinas: caulinita, ilita/mica, gibsita, quartzo e goetita. Nota-se que houve formação de novas fases como etringita, portlandita (CH) e silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Essas fases são decorrentes da hidratação das fases anidras do cimento (Figura 4.3) durante o processo de cura.

Observa-se também que existem fases anidras do cimento, sendo a belita (C_2S) e aluminato tricálcico. Isto pode ocorrer devido à incompleta hidratação do cimento, decorrente da alta plasticidade do resíduo de ETA que influencia o processo de hidratação do cimento, absorvendo grande quantidade de água deste e impossibilitando o completo mecanismo de hidratação.

Observa-se que, quando comparado o difratograma de raios-X de 5,00 % de incorporação de ETA, com os difratogramas com 0,00 % e 1,25 % houve uma diminuição da intensidade pico de belita, portlandita e etringita. Isto pode ter ocorrido devido a maior quantidade de incorporação de resíduo de ETA, que possivelmente prejudicou em maior proporção à hidratação do cimento durante a cura.

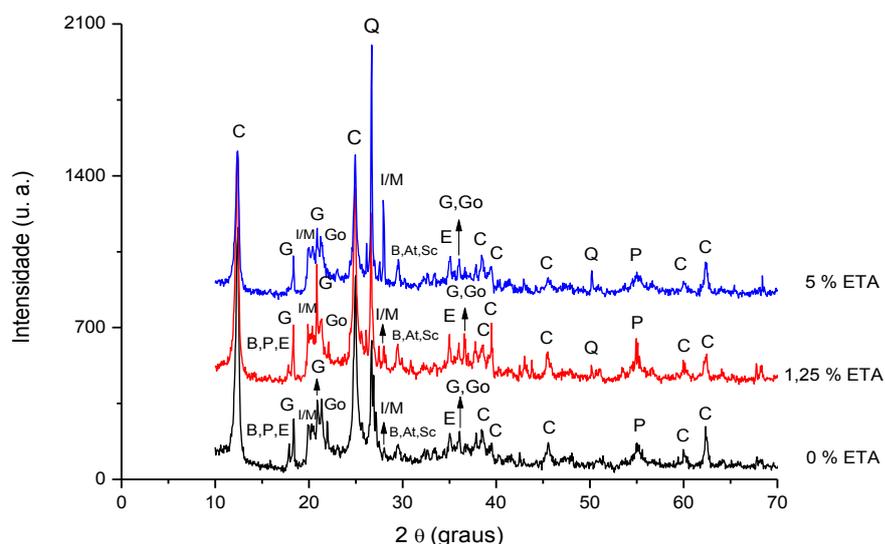


Figura 4.13. – Difração de raios-X dos corpos cimentícios com incorporação de 0,00, 1,25 e 5,00 % de resíduo de ETA: C = Caulinita; G = Gibsita; I/M = Ilita/Mica; Q = Quartzo; Go = Goetita; B = Belita (C_2S); P = Portlandita (CH); Sc = Silicato de cálcio hidratado (C-S-H); E = Etringita; At = Aluminato tricálcico.

4.3. Efeitos do resíduo de ETA nas propriedades tecnológicas de solo-cimento

4.3.1. Avaliação das propriedades tecnológicas dos corpos cimentícios curados

As Figuras 4.14, 4.15 e 4.16 apresentam as propriedades tecnológicas: massa específica bulk, resistência à compressão e absorção de água respectivamente, dos corpos cimentícios curados aos 28 dias.

A Figura 4.14 apresenta o efeito da adição do resíduo de ETA na massa específica bulk dos corpos cimentícios. Pode-se observar que o efeito da adição do resíduo de ETA é o de diminuir a massa específica bulk dos corpos cimentícios. No entanto, para as condições estudadas as peças contendo resíduo de ETA são somente ligeiramente menos densas do que as peças de referência. Isto se deve ao fato do resíduo contribuir para um menor grau empacotamento das massas estudadas, diminuindo a densificação das peças. As barras de erros representam os desvios padrão.

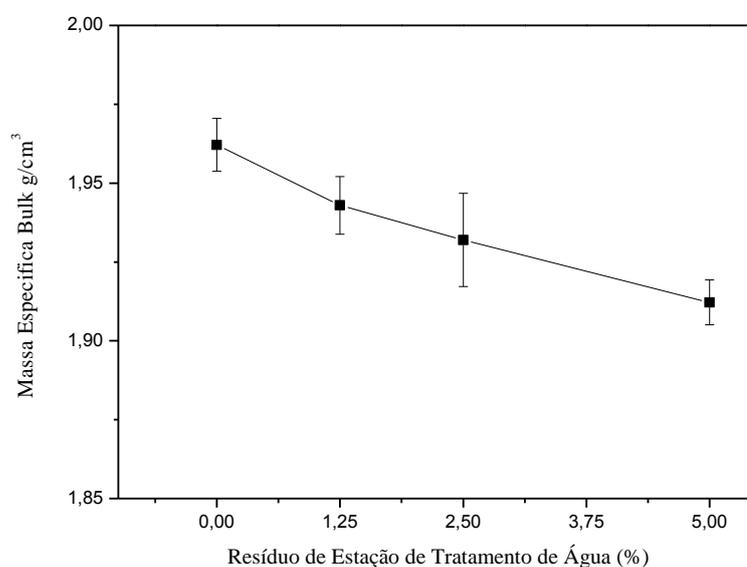


Figura 4.14. – Massa específica bulk dos corpos cimentícios incorporados com resíduo de ETA após 28 dias de cura.

A resistência à compressão simples é um dos parâmetros mais importantes do solo-cimento, pois está diretamente relacionada com o desempenho das paredes de uma edificação. A NBR 10834 (ABNT, 1994) determina que a resistência média

dos tijolos de solo-cimento deve ser igual ou superior a 2,0 MPa aos 28 dias, mas que os valores individuais não podem ser inferiores a 1,7 MPa.

A Figura 4.15 mostra os resultados de resistência à compressão dos corpos cimentícios incorporados com resíduo de ETA, aos 28 dias de cura. Observa-se que para os lotes dos corpos cimentícios com 2,50 e 5,00 % de resíduo de ETA diminuíram os valores de resistência à compressão comparada aos corpos cimentícios sem incorporação e com 1,25 % de ETA, mas atingiram o valor recomendado pela norma 10834-94 (ABNT, 1994). Nota-se que o lote de corpos cimentícios com 1,25 % de resíduo de ETA possui maior resistência à compressão, comparado aos outros lotes com incorporação.

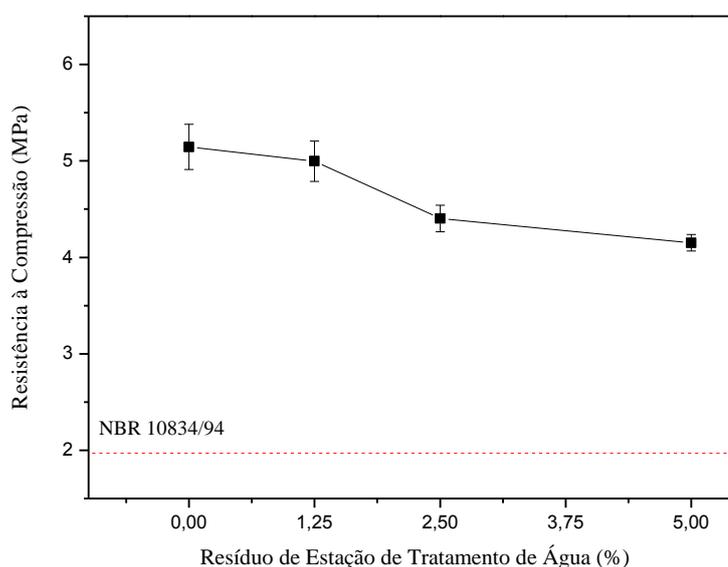


Figura 4.15. – Resistência à compressão (NBR 10834-94) dos corpos cimentícios incorporados com resíduo de ETA após 28 dias de cura.

A absorção de água é outro parâmetro analisado em ensaios de solo-cimento, e é uma propriedade física que está associada à porosidade aberta e microestrutura do material. A NBR 10834 (ABNT, 1994) determina que a absorção de água dos tijolos de solo-cimento deve ser igual ou inferior a 20 % aos 28 dias, e que os valores individuais devem ser iguais ou inferiores a 22 %.

Na Figura 4.16 são apresentados os valores de absorção de água dos corpos cimentícios incorporados com resíduo de ETA, aos 28 dias de cura. Os resultados mostram que os valores de absorção de água dos corpos cimentícios são fortemente influenciados pela adição do resíduo de ETA. Em geral tem-se um aumento da

absorção de água com a adição do resíduo. No entanto, nota-se que incorporação de até 1,25 % de resíduo de ETA praticamente não acarretou alteração nos valores de absorção de água, e que os resultados acima de 1,25 % tendem a aumentar a absorção de água dos corpos cimentícios. Observa-se que os lotes dos corpos cimentícios sem incorporação e com 1,25 % de resíduo de ETA estão dentro do limite estabelecido pela norma NBR 10834 (ABNT, 1994), porém os lotes com 2,50 e 5,00 % de incorporação ficaram acima do limite determinado pela norma NBR 10834 (ABNT, 1994).

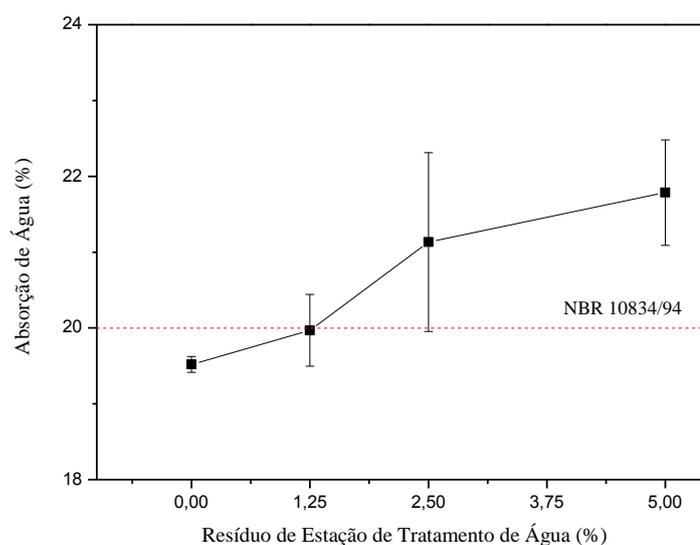


Figura 4.16. – Absorção de água (NBR 10834-94) dos corpos cimentícios incorporados com resíduo de ETA após 28 dias de cura.

Observa-se que os corpos cimentícios com maior percentual de resíduo de ETA (5,00 %), apresentaram propriedades tecnológicas inferiores ao lote com menor percentual de resíduo de ETA (1,25 %). Isto pode ser atribuído ao fato deste resíduo apresentar alto percentual de fração argila, 35 %, e ser um material argiloso de alta plasticidade ($IP = 25,4$ %), o que irá influenciar na hidratação do cimento, absorvendo alta quantidade de água e dessa forma não obtendo água suficiente para a completa formação das fases hidratadas do cimento. Estas fases, especialmente os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) são os principais responsáveis pela resistência mecânica durante a cura (Mehta e Monteiro, 1994). Além disso, durante a hidratação é liberado grande quantidade de calor o que pode

estar relacionado com o aparecimento de poros nos corpos cimentícios incorporados com resíduo de ETA.

As Figuras 4.17 e 4.18 mostram os corpos cimentícios após ensaio de resistência à compressão e absorção de água, respectivamente, aos 28 dias de cura.

Em relação ao ensaio de absorção de água, visualmente nota-se que os corpos cimentícios com incorporação de 5,00 % de ETA apresentaram maior perda de massa, isso ocorreu devido ao maior teor de resíduo de ETA incorporado à massa de solo e cimento.

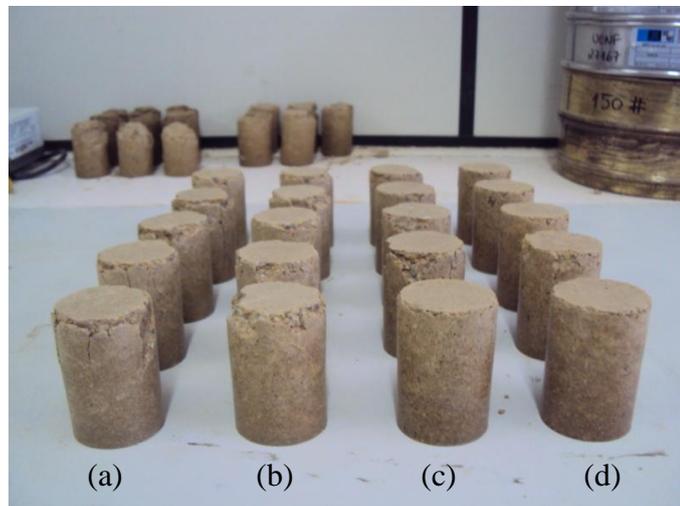


Figura 4.17. – Corpos cimentícios com 28 dias de cura após ensaio de resistência à compressão: (a) 0,00 % de resíduo de ETA; (b) 1, 25 %; (c) 2,50 %; (d) 5,00 %.

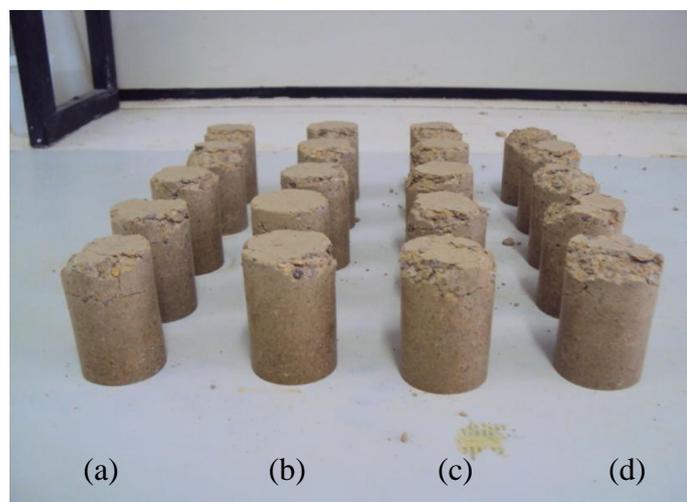


Figura 4.18. – Corpos cimentícios com 28 dias de cura após ensaio de absorção de água: (a) 0,00 % de resíduo de ETA; (b) 1, 25 %; (c) 2,50 %; (d) 5,00 %.

Capítulo 5. Conclusões e Sugestões

5.1. Conclusões

Nesta dissertação de mestrado foi estudada à influência da incorporação de resíduo de ETA nas propriedades e microestrutura de corpos cimentícios para emprego em tijolo solo-cimento. Os resultados experimentais e discussão deles permitiram às seguintes conclusões:

- ✓ O resíduo de ETA é constituído quimicamente principalmente por sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), óxido de ferro (Fe_2O_3). Além disso, o resíduo de ETA contém uma grande quantidade de matéria orgânica (25,86 %) e alta perda ao fogo (24,5 %). Do ponto de vista mineralógico, o resíduo de ETA é constituído principalmente por caulinita. Do ponto de vista físico, o resíduo de ETA utilizado apresenta alto teor de partículas finas ($< 2 \mu\text{m}$) (35 %), principalmente de partículas lamelares de caulinita e é um material argiloso de alta plasticidade ($\text{IP} = 25,4 \%$).
- ✓ Do ponto de vista ambiental, o resíduo de ETA foi classificado como um resíduo de Classe II A, ou seja, resíduo não perigoso (Classe II) e não inerte (A).
- ✓ O solo arenoso é constituído quimicamente por sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), óxido de ferro (Fe_2O_3). O solo arenoso contém pequena quantidade de matéria orgânica (3,10 %) e perda ao fogo da ordem de 7,80 %. Do ponto de vista mineralógico, o solo arenoso é constituído principalmente por quartzo. Do ponto de vista físico, o solo arenoso utilizado apresenta alto teor de areia ($60 \mu\text{m} \leq x < 600 \mu\text{m}$), da ordem de 49,20 %, resultando em uma distribuição granulométrica muito próxima daquela recomendada para a produção de tijolo solo-cimento de acordo com a ABCP. O solo arenoso utilizado é um material que apresenta média plasticidade ($\text{IP} = 9,5 \%$).
- ✓ O resíduo de ETA quando incorporado à massa de solo e cimento pura modifica as características física, química e mineralógica dela. A adição do

resíduo de ETA incorpora partículas finas e aumenta a plasticidade na massa cimentícia pura.

- ✓ A incorporação de resíduo de ETA provocou alterações significativas nas propriedades tecnológicas dos corpos cimentícios de solo-cimento. Foi constatado que o resíduo de ETA tende a diminuir a massa específica bulk e resistência à compressão e aumentar a absorção de água.
- ✓ Análise mineralógica nas amostras incorporadas indicou que a incorporação do resíduo de ETA na massa de solo e cimento pura não modificou as fases cristalinas majoritárias, mas introduziu novas fases como etringita, portlandita e silicato de cálcio hidratado, provenientes da hidratação do cimento. Além disso, a adição do resíduo de ETA tende a modificar as intensidades dos picos de difração.
- ✓ Foi verificado que a incorporação do resíduo de ETA influencia a microestrutura dos corpos cimentícios. Em geral os corpos cimentícios de solo-cimento contendo resíduo de ETA são mais porosos.
- ✓ Finalmente, com base nos resultados obtidos neste trabalho, sugere-se que o resíduo de ETA utilizado seja adicionado à massa de solo e cimento numa quantidade de até 1,25 % em peso para fabricação de tijolos solo-cimento para construção civil.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

- ✓ A partir do traço ótimo que atenda as especificações exigidas pelas normas técnicas brasileiras, realizar a fabricação de tijolos solo-cimento incorporado com resíduo de ETA em escala piloto, submetendo-os a processo de cura e ensaios tecnológicos;
- ✓ Realizar análise químico-ambiental nos tijolos de solo-cimento contendo resíduo de ETA, com ênfase sobre o seu potencial poluidor (ensaio de lixiviação e solubilização);
- ✓ Realizar um estudo de análise de custo do tijolo solo-cimento;
- ✓ Aumentar a quantidade de corpos-de-prova para uma análise estatística mais apurada;
- ✓ Estudar a possibilidade de se incorporar o resíduo de ETA em outros materiais cerâmicos para a construção civil, como pisos e revestimentos cerâmicos.

Referências Bibliográficas

American Society for Testing and Materials (1994) Test method for water absorption, bulk density and apparent porosity. ASTM- C373-88.

Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP (1985) Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensas manuais. São Paulo.

Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP (1999) Dosagem das misturas de solo-cimento: normas de dosagem e métodos de ensaio. ET-35. São Paulo.

Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP (2002) Guia básico de utilização do cimento portland. BT-106. São Paulo.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984) Análise Granulométrica - Solo: ABNT NBR 7181. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984) Determinação de limites de plasticidade - Método de ensaio: ABNT NBR 7180. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984) Determinação do limite de liquidez - Método de ensaio: ABNT NBR 6459. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984) Determinação da massa específica: ABNT NBR 6508. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1984) Tijolo maciço de solo-cimento - Determinação da resistência à compressão e da absorção d' água: ABNT NBR 8492. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – (1991) Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 micrômetros (número 200) – ABNT NBR 11579. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992) Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos. ABNT NBR 12024. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992) – Fabricação de tijolo maciço de solo-cimento com a utilização de prensa manual: ABNT NBR 10832. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992) Cimentos Portland resistentes a sulfatos: ABNT NBR 5737. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1993) Cimento Portland branco: ABNT NBR 12989. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1994) – Bloco vazado de solo-cimento. Especificação. Método de ensaio: ABNT NBR 10834. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1994) Bloco vazado de solo-cimento. Determinação da resistência à compressão e a absorção de água. Método de ensaio: ABNT NBR 10836. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1996) Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão: ABNT NBR 7215. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1996) Solo-cimento – Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem: ABNT NBR 13554. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – (2001) Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação de massa específica – ABNT NM 23. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – (2003) Cimento Portland – Determinação do tempo de pega – ABNT NM 65. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – (2003) Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal – ABNT NM 43. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004) Amostragem de resíduos sólidos. ABNT NBR 10007. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004c) Resíduos Sólidos - Classificação: ABNT NBR 10004. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004a) Resíduos Sólidos – Lixiviação: ABNT NBR 10005. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004b) Resíduos Sólidos - Solubilização: ABNT NBR 10006. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005) Blocos Cerâmicos para alvenaria de vedação – Terminologia e Requisitos: ABNT NBR 15270. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2006) Cimento Portland destinado à cimentação de poços petrolíferos - Requisitos e métodos de ensaio: ABNT NBR 9831. Rio de Janeiro.

Barbosa, R. M. (2001) A toxicidade de despejos (lodos) de estações de tratamento de água: à *Daphnia similis* (cladocera, crustácea). XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. Porto Alegre, RS.

Bidone, F., Silva, A. P., Marques, D. da M. (1999) Lodos Produzidos nas Estações de Tratamento de Água (ETAs): Desidratação em Leitões de Secagem e Codisposição em Aterros Sanitários. Programa de Pesquisa de Saneamento Básico. Rio de Janeiro. 215 - 244p.

Bosi, S., Pianaro, S. A., Tartari, R. Mora, N. D., Módenes, A. N., Luz, E. M. L. (2008) Incorporação de lodo da estação de tratamento de água Tamanduá – Foz do Iguaçu

– PR, como aditivo em uma massa de cerâmica vermelha. 18º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Porto de Galinhas, PE, Brasil.

Braga, B., Hespanhol, I., Conejo, J. G. L., Mierzwa, J. C., Barros, M. T. L., Spencer, M., Porto, M., Nucci, N., Juliano, N., Eiger, S. (2005) *Introdução à Engenharia Ambiental*. 2º ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall. 108-110p.

Bueno, B. S., Vilar O. M. (1980) *Mecânica dos Solos*. Imprensa Universitária, UFV, Viçosa-MG, 131p.

Carvalho, C.L. (2005) *Propriedades Mecânicas, morfologia, e biodegradação de poliolefinas pós-consumo e blendas com amido termoplástico*. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais). Itabita, Universidade São Francisco.

Castro, F. S. (2008) *Incorporção de resíduos de caulim em solo-cimento para construções civis*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Campina Grande-PB. Universidade Federal de Campina Grande - UFCG.

CEBRACE (1981) *Centro Brasileiro de Construções e Equipamentos Escolares. Solo-cimento na construção de escolas - SC-01 (Sistema Construtivo 02)*. 2ª Ed. Rio de Janeiro: MEC/CEBRACE, 39p.

CEPED (1984) *Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Bahia. Cartilha para construção de paredes monolíticas em solo-cimento*. 3ª ed revisada e ampliada. Rio de Janeiro: BNH/DEPEA, 32p.

Chen, C. Y., Lan, G. S., Tenon, S. H. (2000) *Microstructural evolution of mullite during the sintering of kaolin powder compacts*. *Ceramics International*. 26:715 – 720p.

Chies, F., Zwonok, O., Silva, N. I. W, Calarge, L. M. (2000) *Desenvolvimento de tijolos a partir de cinzas pesadas e cal hidratada. II – Caracterização Tecnológica*. In: Frankenberg, C. L. C.; Raya-rodrigues, M. T.; Cantelli, M. (orgs.) *Gerenciamento de Resíduos e Certificação Ambiental*. Porto Alegre. 140 – 148p.

Cordeiro, J. S. (1993). O problema dos lodos gerados em decantadores de estações tratamento de água. 1993. 343p. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – São Carlos-SP, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Cordeiro, J. S. (1999) Importância do Tratamento e Disposição Adequada dos Lodos de Estações de Tratamento de Água. Noções Gerais de Tratamento e Disposição Final de Lodo de Estações de Tratamento de Água. Programa de Pesquisa de Saneamento Básico. São Paulo, SP.

Cornwell, D. A. (1999) Water Treatment Plant Residuals Management. In: Water Quality and Treatment. McGraw-Hill. 5ª. ed. McGraw-Hill. Washington. D. C. Cap. 16, 1267p.

Destefani, A. Z. (2009) Utilização do planejamento experimental na adição do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais para produção de blocos prensados de encaixe. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Campos dos Goytacazes-RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense-UENF.

Di Bernardo, L., Dantas, A. D. B. (2005) Métodos e Técnicas de Tratamento de Água. 2ª. ed. São Carlos: Rima.

Dondi, M.; Marsigli, M.; Fabbri, B. (1997) Recycling of individual and urban wastes in brick production – a review. *Tile & Brick International*, Germany, v. 13, 218-225p.

Embrapa. (1999) Sistema brasileiro de classificação de solos - Brasília. Embrapa Produção de Informação, Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 412p.

Fadanelli, L. E. A., Wiecheteck, G. K. (2010) Estudo da utilização do lodo de estação de tratamento de água em solo cimento para pavimentação rodoviária. *Revista de Engenharia e Tecnologia*. 2 (2): 31-37p.

Ferraz, R. L.; Belicanta, A., Gutierrez, N. H. M. (2000) Estudo comparativo de alguns métodos de dosagens de misturas de solo-cimento. Editora Eduem, UEM, Maringá-PR, 6p.

Fiquerola, V. (2004). Alvenaria de solo-cimento. Revista Técnica, Editora Pini, São Paulo-SP, nº 85.

Freire, W. J. Tratamento prévio do solo com aditivos químicos e seu efeito sobre a qualidade do solo-cimento (1976). Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Piracicaba – SP, Escola Superior de Agricultura Luiz Queiroz – ESALQ-USP, 142p.

Fundação de Tecnologia do Estado do Acre (1999) - Cartilha para produção de tijolo solo-cimento. Rio Branco-AC.

Grande, F. M. (2003) Fabricação de Tijolos Modulares de Solo-cimento por Prensagem Manual com e sem Adição de Sílica Ativa. 165p. Dissertação - São Carlos-SP, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Holanda, J. N. F., Vieira, C. M. F. (2002) Mundo Cerâmico 82. 29p.

Hoppen, *et al.* (2005). Codisposição de Lodo Centrifugado de Estação de Tratamento de Água (ETA) em Matriz de Concreto: método alternativo de Preservação Ambiental. Cerâmica, 51:85 - 94p.

<http://www.aguasdoparaiba.com.br>. Acesso em: 06/2011.

<http://www.tratamentodeagua.com.br/agua> Acesso em: 05/2011.

<http://www.anicer.com.br> Acesso em 08/2011.

Isaac, R.L. (2001) Caracterização, tratamento e disposição final de lodo de ETA (2000) Curso Extensão Faculdade de Engenharia Civil – Unicamp. Campinas, SP.

Junk, M.; Guizzi, F. (2003) Estudo da viabilidade e implantação da recuperação da água de lavagem dos filtros e do lodo dos decantadores da ETA Capim Fino, através da Estação de Tratamento de Lodo Capim Fino. Monografia. UNICAMP, Campinas, SP.

Lébeis, V. D. L. (2003) Viabilidade do uso do resíduo da fabricação do papel em argamassas. Dissertação – Campinas-SP. Universidade Estadual de Campinas. 96p.

Lima, T. V. (2006) Estudo da produção de blocos de solo-cimento com matérias-primas do núcleo urbano da cidade de Campos dos Goytacazes. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, 107p.

Margem, J. I., Alexandre, J., Vieira, C.M.F., Monteiro, S.N. (2006) Cerâmica Vermelha incorporada com lodo de ETA. 17º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais. Foz do Iguaçu, PR. 314-322p.

Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. (1994) Concreto: estrutura, propriedades e materiais. 1ª ed., São Paulo: Editora Pini, 616 p.

Monteiro, S. N., Alexandre, J., Margem, J. I., Sánchez, R., Vieira, C. M. F. (2008) Incorporation of sludge waste from water treatment plant into red ceramic. *Construction and building materials* 22, 1281-1287p.

Monteiro, S. N., Vieira, C. M. F. (2004) *Applied Science* 27, 229p.

Morita, D. M., Sampaio, A. de O., Miki, M. K., David, A. C. (2002) Incorporação de lodos de estações de Tratamento de Água em blocos cerâmicos. In: *10º. Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Braga, Pt. Lisboa.

Neville, A. M. (1997) Propriedades do concreto. Trad. Giannusso, S. E.. 2a ed., São Paulo: Editora Pini, 828 p.

Oliveira, E. M. S., Machado, S. Q., Holanda, J. N. F. (2004) Caracterização de resíduo (lodo) proveniente de estação de tratamento de águas visando sua utilização em cerâmica vermelha. *Cerâmica*. 324-330p.

Oliveira, E. M. S., Holanda, J. N. F. (2008) Influência da adição de resíduo (lodo) de estação de tratamento de águas nas propriedades e microestrutura de cerâmica vermelha. *Cerâmica*.167-173p.

Pedroti, L. G., Alexandre, J., Bahiense, A. V. (2007) Processo de Produção de Blocos Cerâmicos de Encaixe Prensados e Queimados. 51º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Salvador, BA.

Pereira, E. G. (2008) Aproveitamento do resíduo da estação de tratamento de água de Cubatão para fabricação de elementos construtivos estruturais. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia Civil) – Rio de Janeiro-RJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro-UFRJ.

Pinto, P.C. (2010) Investigação de parâmetros do ccr com incorporação de escória de alto forno para utilização como base de pavimentos Dissertação (Mestrado em Engenharia) – São Paulo-SP, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Porras, A. C., Isaac, R.L., Morita, D. (2008) Incorporação do lodo das estações de tratamento de água e agregado reciclado do resíduo da construção civil em elementos de alvenaria – tijolos estabilizados com cimento. *Ciência e Ingeniería Neogranadina*. Bogotá.18-2: 5-28p.

Reali, M.A.P. (1999) Espessamento de lodos de ETAs. In: *Penalva, M. A. (org.) Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de água*. Rio de Janeiro, ABES.

Reichardt, K. (1987) *A Água em Sistemas Agrícolas*. Manole Ltda. São Paulo. 188p.

Reed, J.S. (1995) *Principales of ceramic processing*, 2 ed. New York, John Wiley & Sons, 658p.

Ribeiro, A.C., Guimarães, P.T.G., Alvarez, V.V.H. (1999) Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais. Viçosa: CFSEMG, 1999. p.25-32.

Richter, C.A. (2001) Tratamento de lodos de estações de tratamento de água, São Paulo, SP.

Russo, M. A. T. (2003) Tratamento de resíduos sólidos. Apostila do curso de tratamento de resíduos da Faculdade de Ciência e Tecnologia do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra – Portugal, 196p.

Saboya, F., Xavier, G.C., Alexandre, J. (2007) The use of the powder marble by-product to enhance the properties of bricks ceramics, *Construction and Building Materials*, 21(10): 1950-196p.

Sabbag, M. G; Morita, D. M. Incorporação de Lodo de Estações de Tratamento de Água Em Blocos Cerâmicos. 2003. Disponível em: <<http://www.bayer.com.br/byee>> Acesso em 03/2011.

Santos, P.S. (1989). Ciência e tecnologia das argilas. 2 ed. São Paulo. Edgard Blucher. V.01. 408 p.

Segantini, A. A. da S. (2000) Utilização de solo-cimento plástico em estacas escavadas com trado mecânico em Ilha Solteira-SP. Tese de doutorado, Faculdade de Engenharia Agrícola – FEAGRI, Departamento de Construções Rurais, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas-São Paulo, 176p.

Silva, M. R. (2009) Incorporação de lodo de estação de tratamento de água (ETAs) em tijolos de solo-cimento como forma de minimização de impactos ambientais Dissertação - Aracruz, ES, Faculdade de Aracruz.

Silva J. A. P. da, ISAAC, R. de L. (2002) Adensamento por gravidade de Lodo de ETA gerado em decantador convencional e decantador laminar. Anais do XXVIII Congresso Interamericano de Ingenieria Sanitária y Ambiental. Cancun-México.

Souza, G. P., Sanchez, R., Holanda, J. N. F. (2002) *Revista Cerâmica*. 48(306): 102-107.

Souza, F. R. de. (2006) *Estudo da Eco-eficiência de Argamassas e Concretos Reciclados com Resíduos de Estações de Tratamento de Água e de Construções e Demolições*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – São Carlos-SP, Universidade Federal de São Carlos.

Teixeira, S.R., Souza, A. E., Santos, G.T.A., Pena, A.F.V. (2008) Sugarcane bagasse ash as a potential quartz replacement in red ceramic, *Journal of the American Ceramic Society*, v. 91, 1883-1887p.

Taylor, G. D. *Materials In Construction*. London: Longman Scientific & Technical, 2^a ed., 1992.284p.

Tomé Jr., J. B. (1997) *Manual para interpretação de análise de solo*. Livraria e Editora Agropecuária. Guaíba-RS, 247p.

Vieira, C. M.F. (2002) *Curso de introdução à tecnologia de cerâmica vermelha*. Campos dos Goytacazes-RJ, 60p.

Zampieri, V. A. (1989) *Mineralogia e mecanismos de ativação e reação das pozolanas de argilas calcinadas*. Dissertação (Mestrado em Mineralogia e Petrografia). Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 191 p.