

CINTHYA HOPPEN

**RECICLAGEM DE LODO DE ETA CENTRIFUGADO NA
CONSTRUÇÃO CIVIL, MÉTODO ALTERNATIVO PARA
PRESERVAÇÃO AMBIENTAL**

**CURITIBA
2004**

CINTHYA HOPPEN

RECICLAGEM DE LODO DE ETA CENTRIFUGADO NA CONSTRUÇÃO CIVIL, MÉTODO ALTERNATIVO PARA PRESERVAÇÃO AMBIENTAL

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre, pelo Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, área de concentração Engenharia Ambiental, da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Dr. Kleber Franke Portella

Co-orientador: Dr. Cleverson V. Andreoli

**CURITIBA
2004**

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho àqueles que dedicaram
a sua vida pela minha formação, sempre me
dando o apoio de que precisei e acreditando
nos meus sonhos

MEUS PAIS

AGRADECIMENTOS

Agradeço,

À meu orientador Dr. Kleber Franke Portella, por todo o ensinamento transmitido, orientação e incentivo em todo o desenvolvimento deste trabalho;

Ao Dr. Cleverson V. Andreoli, co-orientador e amigo, por toda a confiança em mim depositada, pela imensa colaboração e oportunidade de trabalhar com ele;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pela bolsa de estudo concedida;

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental da Universidade Federal do Paraná pela oportunidade e contribuição à formação científica e pessoal;

Ao Instituto de tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC, pelo apoio a pesquisa e disposição da infra-estrutura, sem os quais a conclusão deste trabalho não seria possível;

À Companhia de Saneamento do Paraná – SANEPAR, pelo apoio tornando este trabalho possível, e à todos os colegas da Sanepar, que de alguma forma colaboraram com este trabalho;

Aos amigos: Andréia C. Ferreira, Cristina Rincon, Eduardo Pegorini, Marilene Lora, Milene França, Constance Pinheiro, Regina Mazzaron e Aderlene Lara pela amizade, incentivo e contribuição;

Ao pessoal do LACTEC: Rafael, Orlando, Alex, Marcela pelo auxílio nas análises, dosagens e ensaios realizados no desenvolvimento deste estudo;

Ao Dr. Almir Sales pela imensa colaboração ao conteúdo deste trabalho;

À minha mãe Therezinha pela compreensão, ensinamentos, apoio, paciência e amor, e ao meu pai Elson que mesmo ausente sempre esteve presente na minha memória;

Aos meus irmãos, Sérgio e Silvia, pela compreensão e amizade em todos os momentos de minha vida;

Aos meus sobrinhos, Thiago, Lucas, Raissa, Isabelle e Fernanda, pelos instantes de descontração e alegria;

A todos os meus amigos pela amizade que sempre me dedicaram em todos os momentos de minha vida;

E, a todos que me ajudaram, direta ou indiretamente, na elaboração deste trabalho, mas que por esquecimento não foram citados nestas páginas, meu muito obrigado.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	IX
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE ABREVIATURAS E CÓDIGOS	XII
RESUMO	XIII
ABSTRACT	XIV
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo Geral	3
2.2 Objetivos Específicos	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA (ETA).....	4
3.1.1 Definição de Lodo de ETA.....	4
3.1.2 Produção de Lodo de ETA	5
3.1.3 Histórico.....	6
3.2 CARACTERIZAÇÃO DE LODO DE ETA	7
3.2.1 Características Químicas	7
3.2.2 Características Físicas.....	11
3.2.3 Lodo com Cloretos Férricos e Sulfato de Alumínio.....	14
3.3 ALTERNATIVAS DE DISPOSIÇÃO FINAL DO LODO DE ETA.....	17
3.3.1 Lançamento em Rio	18
3.3.2 Aplicação no Solo	20
3.3.3 Disposição em Aterro Sanitário.....	21
3.3.4 Descarga em Estações de Tratamento de Esgoto (ETE)	22
3.3.5 Compostagem	23
3.3.6 Fabricação de Cimento	23
3.3.7 Fabricação de Tijolo	24
3.3.8 Fabricação de Matriz de Concreto.....	25
3.3.9 Outras Alternativas	25
3.4 O CONCRETO E SUAS CARACTERÍSTICAS	27
3.4.1 Resistência à Compressão.....	28
3.4.2 Resistência à Tração	29
3.4.2.1 Resistência à tração por compressão diametral.....	29
3.4.2.2 Resistência à tração por flexão	30
3.4.3 Módulo de Deformação Estática	30
3.4.4 Permeabilidade.....	32
3.4.5 Durabilidade.....	34
3.5 OUTRAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO – QUÍMICAS DO MATERIAL.....	35
3.6 RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL	38
3.6.1 Benefícios Ambientais da Reciclagem	38

3.6.2 A EXPERIÊNCIA DA RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	40
4. METODOLOGIA.....	45
4.1 ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA PASSAÚNA.....	45
4.2 CARACTERIZAÇÃO DO LODO DA ETA PASSAÚNA.....	48
4.2.1 Umidade.....	48
4.2.2 Massa Específica.....	49
4.2.3 Análise de Perda ao Fogo.....	49
4.2.4 Análise Química por Fluorescência de Raios - X.....	50
4.2.5 Difração de Raios-X (DRX).....	50
4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS.....	50
4.3.1 Agregados.....	51
4.3.2 Aglomerante.....	51
4.4 ESTUDO DE DOSAGEM DO LODO DE ETA.....	52
4.4.1 Concreto Referência.....	53
4.4.2 Concreto Contendo Lodo de ETA Centrifugado.....	53
4.4.3 Propriedades do Concreto.....	54
4.5 CONFECÇÃO DOS CONCRETOS.....	54
4.6 PROPRIEDADES DO CONCRETO FRESCO.....	56
4.7 PROPRIEDADES DO CONCRETO ENDURECIDO.....	57
4.7.1 Moldagem dos Corpos-de-Prova.....	57
4.7.2 Resistência à Compressão Axial Simples.....	58
4.7.3 Resistência à Tração por Flexão.....	59
4.7.4 Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	60
4.7.5 Módulo de Deformação Estática.....	61
4.7.6 Índice de Vazios, Massa Específica e Absorção.....	62
4.7.7 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do Concreto.....	63
4.7.8 Difração de Raios-X (DRX).....	64
4.7.9 Estudo da Permeabilidade e Lixiviação.....	64
4.7.10 Ensaio de Durabilidade.....	66
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	70
5.1 CARACTERIZAÇÃO DO LODO DA ETA PASSAÚNA.....	70
5.1.1 Umidade.....	70
5.1.2 Massa específica.....	70
5.1.3 Análise de Perda ao Fogo.....	71
5.1.4 Análise Química por Fluorescência de Raios-X.....	72
5.1.5 Difração de Raios-X (DRX).....	73
5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS – PRIMAS.....	74
5.2.1 Agregados.....	75
5.2.2 Aglomerantes.....	77
5.3 ESTUDO DE DOSAGEM DO LODO DE ETA.....	79
5.3.1 Propriedades do Concreto.....	79
5.4 PROPRIEDADES DO CONCRETO FRESCO.....	86

5.5	PROPRIEDADES DO CONCRETO ENDURECIDO.....	88
5.5.1	Resistência à Compressão Axial Simples.....	89
5.5.2	Resistência à Tração por Flexão.....	92
5.5.3	Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	93
5.5.4	Módulo de Deformação Estática.....	94
5.5.5	Índice de Vazios, Massa Específica e Absorção D'água.....	96
5.5.6	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do Concreto.....	98
5.5.7	Difração de Raios - X (DRX).....	100
5.5.8	Estudo da Permeabilidade e Lixiviação.....	102
5.5.9	Ensaio de Durabilidade.....	107
6.	CONCLUSÃO.....	112
7.	COMENTÁRIOS FINAIS.....	115
8.	REFERÊNCIAS.....	116
	ANEXO 1 – DIAGRAMA DE NYQUIST E BODE DAS AMOSTRAS DE CONCRETO COM LODO.....	127

LISTA DE TABELAS

TABELA 01 - PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS PARA O LODO DAS ETAS SÃO CARLOS, ARARAQUARA E RIO CLARO.....	9
TABELA 02 - COMPOSIÇÃO TÍPICA DO LODO DE ETA COMPARADO COM O LODO DE ESGOTO.	10
TABELA 03 - DENSIDADE DO LODO DE ETA EM RELAÇÃO À CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS.....	11
TABELA 04 - CARACTERÍSTICAS TÍPICAS DE LODOS DE SULFATO DE ALUMÍNIO.	14
TABELA 05 - CARACTERÍSTICAS TÍPICAS DO LODO DE SAIS DE FERRO.	16
TABELA 06 - METAIS ENCONTRADOS NOS LODOS DE ETAS USANDO ALUMÍNIO E CLORETO FÉRRICO (MG/KG PESO SECO).	17
TABELA 07 - PROBABILIDADE DE CORROSÃO EM FUNÇÃO DO POTENCIAL	38
TABELA 08 - ENSAIOS REALIZADOS NOS AGREGADOS GRAÚDOS E MIÚDOS.....	51
TABELA 09 - ENSAIOS REALIZADOS NO AGLOMERANTE (CIMENTO CPII-F 32).....	52
TABELA 10 - DETERMINAÇÃO DE UMIDADE	70
TABELA 11 - ANÁLISE DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X	72
TABELA 12 – ENSAIOS FÍSICOS DOS AGREGADOS, MIÚDO E GRAÚDO.....	75
TABELA 13 - ANÁLISE QUÍMICA POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X DOS AGREGADOS.....	77
TABELA 14 - RESULTADOS DOS ENSAIOS FÍSICOS-QUÍMICOS E MECÂNICOS DO CIMENTO.	78
TABELA 15 - PROPRIEDADES DO CONCRETO FRESCO NO ESTUDO DE DOSAGEM.	79
TABELA 16 - ENSAIOS FÍSICOS DO CONCRETO ENDURECIDO PARA ESTUDO DE DOSAGEM.....	84
TABELA 17 – PROPRIEDADES DO CONCRETO FRESCO.	86
TABELA 18 - ABSORÇÃO, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA.....	96
TABELA 19 - COEFICIENTES DE PERMEABILIDADE.....	103
TABELA 20 - METAIS PRESENTES NAS SOLUÇÕES ÁCIDAS E BÁSICAS DA LIXIVIAÇÃO DO CONCRETO.....	105
TABELA 21 - LIMITES ESTABELECIDOS PELA LEGISLAÇÃO PARA A PRESENÇA DE METAIS.....	107

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01 - CURVA TENSÃO – DEFORMAÇÃO ($\sigma - \epsilon$), PARA MÓDULO DE DEFORMAÇÃO ESTÁTICA SECANTE.	31
FIGURA 02 - PARÂMETROS DE INFLUÊNCIA NO MÓDULO DE DEFORMAÇÃO.	32
FIGURA 03 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO AOS 28 DIAS X % DE LODO DE ETE EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL AO CIMENTO.....	41
FIGURA 04 - FLUXOGRAMA DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA PASSAÚNA	47
FIGURA 05 - TESTE DE ABATIMENTO (SLUMP TESTE).	57
FIGURA 06 – ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL SIMPLES.	59
FIGURA 07 - ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR FLEXÃO.	60
FIGURA 08 - ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.	61
FIGURA 09 - ENSAIO DO MÓDULO DE DEFORMAÇÃO ELÁSTICO PELO MODULO SECANTE.....	62
FIGURA 10 - TESTE DE PERMEABILIDADE (METODO DE BUREAU).....	65
FIGURA 11 – ENSAIO DE PERMEABILIDADE EM MEIO ÁCIDO E BÁSICO, RESPECTIVAMENTE.....	66
FIGURA 12 –CONCRETO COM LODO DEMONSTRANDO OS ELETRODOS.....	67
FIGURA 13 – TESTE DE IMPEDÂNCIA COM DEMONSTRAÇÃO DO ELETRODO DE REFERÊNCIA.	68
FIGURA 14 - TERMOGRAMA DA AMOSTRA DE LODO SECO.	71
FIGURA 15 - DIFRATOGRAMA DO LODO DE ETA CALCINADO	74
FIGURA 16 - CURVA GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO MIÚDO E GRAÚDO.	76
FIGURA 17 – CONSUMO DE CIMENTO E LODO DE ETA EM FUNÇÃO DO TRAÇO UTILIZADO	80
FIGURA 18 - ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE EM FUNÇÃO DO TEOR DE LODO.	81
FIGURA 19 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO COM LODO EM FUNÇÃO DA IDADE.	83
FIGURA 20 - TEOR DE ABSORÇÃO DE ÁGUA EM FUNÇÃO DO TEOR DE LODO.	84
FIGURA 21 - MASSA ESPECÍFICA EM FUNÇÃO DO TEOR DE LODO.....	85
FIGURA 22 - ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE (<i>SLUMP TEST</i>).....	88

FIGURA 23 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL SIMPLES EM FUNÇÃO DA IDADE.....	89
FIGURA 24 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL AOS 7 DIAS.....	91
FIGURA 25 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL AOS 14 DIAS.....	91
FIGURA 26 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL AOS 28 DIAS.....	91
FIGURA 27 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL AOS 91 DIAS.....	91
FIGURA 28 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR FLEXÃO.....	92
FIGURA 29 - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	93
FIGURA 30 - MÓDULO DE DEFORMAÇÃO ESTÁTICA PARA O TRAÇO DE 4% DE LODO.....	94
FIGURA 31 - MÓDULO DE DEFORMAÇÃO ESTÁTICA – MÓDULO SECANTE PLANO III.....	95
FIGURA 32 - MEV DO CONCRETO COM 4% DE LODO.....	98
FIGURA 33 – MEV DO CONCRETO COM 8% DE LODO.....	98
FIGURA 34 – PRESENÇA DE POROS NO CONCRETO COM ADIÇÃO DE 4% E 8% DE LODO, RESPECTIVAMENTE.....	99
FIGURA 35 – MEV DO CONCRETO COM 4% DEMONSTRANDO PRESENÇA DE ETRINGITAS.....	100
FIGURA 36 – DIFRATOGRAMA DAS AMOSTRAS DE CONCRETO COM E SEM A ADIÇÃO DE LODO.....	101
FIGURA 37 - PERMEABILIDADE: PEROLAÇÃO ACUMULADA X HORA ACUMULADA.....	102
FIGURA 38 - ESPECTRO DO MATERIAL LIXIVIADO NO CONCRETO POR MICROSSONDA ANALÍTICA DE RAIOS – X.....	105
FIGURA 39 – CURVA POTENCIAL DE CORROSÃO X TEMPO DE ENVELHECIMENTO PARA O ELETRODO DE TRABALHO A DO CONCRETO COM 4% DE LODO.....	108
FIGURA 40 - CURVA POTENCIAL DE CORROSÃO X TEMPO DE ENVELHECIMENTO PARA O ELETRODO DE TRABALHO B DO CONCRETO COM 4% DE LODO.....	109
FIGURA 41 - CURVA POTENCIAL DE CORROSÃO X TEMPO DE ENVELHECIMENTO PARA O ELETRODO DE TRABALHO A DO CONCRETO COM 8% DE LODO.....	110
FIGURA 42 - CURVA POTENCIAL DE CORROSÃO X TEMPO DE ENVELHECIMENTO PARA O ELETRODO DE TRABALHO B DO CONCRETO COM 8% DE LODO.....	110

LISTA DE ABREVIATURAS E CÓDIGOS

a/c – Relação água – cimento
AWWA – American Water Works Association
AWWARF - American Water Works Association Research Foundation
C/N – relação carbono – nitrogênio
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP – Corpo de prova
CPII – F – Cimento Portland composto com filler
CuK α - Radiação de cobre por energia de 1^a. ionização
DBO – Demanda bioquímica de oxigênio
DQO – Demanda química de oxigênio
DRX – Difração de Raios – X
DTA – Análise térmica diferencial
ECS – Eletrodo de calomelano saturado
ETA – Estação de Tratamento de Água
ETE – Estação de Tratamento de Esgoto
Ga – Amostra 01 do concreto com 4% de lodo com o eletrodo de trabalho no eletrodo a
Gb – Amostra 01 do concreto com 4% de lodo com o eletrodo de trabalho no eletrodo b
GGa – Amostra 02 do concreto com 4% de lodo com o eletrodo de trabalho no eletrodo a
GGb – Amostra 02 do concreto com 4% de lodo com o eletrodo de trabalho no eletrodo b
GPa – Giga Pascal
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura
MO – matéria orgânica
MPa – Mega Pascal
MS – Matéria seca
NBR – Norma brasileira
NKT – nitrogênio khyeldal total
OD – oxigênio dissolvido
pH – potencial de hidrogênio
TG – Análise termogravimétrica
TOC – Carbono orgânico total
UC – unidade de cor
UT – unidade de turbidez
XRF – Fluorescência de Raios – X
Za – Amostra 01 do concreto com 8% de lodo com o eletrodo de trabalho no eletrodo a
Zb – Amostra 01 do concreto com 8% de lodo com o eletrodo de trabalho no eletrodo b
ZZ b – Amostra 02 do concreto com 8% de lodo com o eletrodo de trabalho no eletrodo b
ZZa – Amostra 02 do concreto com 8% de lodo com o eletrodo de trabalho no eletrodo a

RESUMO

A exigência de água de boa qualidade está necessitando maiores concentrações de produtos químicos, aumentando assim a geração de resíduos das Estações de Tratamento de Água (ETA), denominados lodo de ETA. Há muito tempo, o destino destes lodos vinha sendo os cursos d'água próximo às estações, causando sérios impactos ambientais. No entanto, esta prática está sendo questionada por órgãos ambientais, os quais estão restringindo e, até mesmo, proibindo esta forma de disposição final. A incorporação dos lodos de ETAs em matriz de concreto pode reduzir significativamente os impactos ambientais, uma vez que além de reduzirem o consumo de recursos naturais, diminuem a disposição incorreta dos lodos. O objetivo deste trabalho foi avaliar a possibilidade da incorporação deste lodo de ETA em matriz de concreto, como forma de disposição final. Para este estudo foi realizada caracterização física dos agregados miúdos (areia) e graúdo (brita 1) e aglomerante (cimento), os quais foram considerados satisfatórios para a confecção dos concretos. Realizou-se, também, outras caracterizações como umidade, massa específica, análise de perda ao fogo, análise química e difração de raios – X. Com estas análises verificou-se a presença em alta concentração de alumínio e sílica devido aos produtos químicos utilizados no tratamento de água e ao material sedimentado. Para o estudo de dosagem utilizou-se os teores de 3%, 5%, 7% e 10% de lodo em relação ao peso seco da areia, realizando-se os estudos de abatimento do tronco de cone, absorção e resistência. Com a avaliação destas propriedades, verificou-se que dosagens acima de 10% não são recomendadas, por não atenderem as exigências mínimas na construção civil. Segundo este estudo, optou-se pelas dosagens de 4% e 8% de lodo para a verificação da possibilidade de incorporação do lodo de ETA em comparação com o padrão (sem a adição do lodo). Foram realizados os ensaios de resistência à compressão, tração por compressão diametral e flexão, módulo de deformação estática, absorção d'água difração de raios – X, microscopia eletrônica, durabilidade por impedância eletroquímica e permeabilidade. No ensaio de resistência à compressão aos 28 dias, ensaio mais comumente realizado, todos os CPs alcançaram valores superiores a 27 MPa, atendendo as exigências de fabricação. A avaliação dos demais ensaios também sugere a possibilidade da utilização destes concretos na construção civil. A comparação dos valores obtidos do concreto com e sem a adição do lodo demonstraram uma redução nas suas propriedades na medida em que o lodo é acrescido. No entanto, esta redução da qualidade não opõe a utilização do lodo em concretos, pois todos os valores obtidos estão acima do exigido na construção civil. Outro benefício da utilização do lodo em concretos, é a diminuição da extração dos recursos naturais, tais como areia e pedra brita, mas, principalmente, a diminuição do lançamento indiscriminado dos lodos em corpos d'água.

ABSTRACT

The request of water of good quality is requiring a bigger concentration of chemicals, increasing thus the generation of residues at the Water Treatment Stations, called Water Treatment Sludge (WTS). For a long time, the destination for these WTS had been the river courses next to the Stations, causing serious environmental impacts. Nevertheless, this activity has been questioned by the environmental agencies, which are restricting, and even forbidding, this kind of disposal. The incorporation of the WTS to a reinforced concrete matrix can expressively reduce environmental impacts, for, besides reducing the consumption of natural resources, it also reduces the incorrect disposal of the WTS. According to this, the purpose of this work is to evaluate the possibility of the incorporation of WTS to a reinforced concrete matrix, as a form of final disposal. For this test, it was carried out a physical characterisation of small and great aggregates (sand and Brita 1) and binder (cement), which were considered satisfactory for the reinforced concrete construction. It was also carried out other characterisations, such as humidity, specific mass, analysis of fire loss, chemical analysis, and X-ray diffraction. With these analyses, it was observed the presence of aluminium and silica in high concentration due to the chemical products used in the water treatment and to the sediment material. For the dosage test were used contents of 3, 5, 7 and 10% of silt in relation to the dry weight of the sand. With the evaluation of these properties, it was observed that dosages above 10% are not recommended, as they do not reach the minimum requirements in civil construction. In accordance with this test, were chosen the dosages of 4 and 8% of silt to verify the possibility of incorporation of the WTS silt in comparison to the standard (without the addition of silt). Assays for compression resistance, traction for diametrical compression and deflection, module of static deformation, water absorption, X-ray diffraction, scanning electron microscopy, durability by electrochemical impedance, and permeability were carried out. In the assay of the compression resistance after 28 days, the most usual assay carried out, all CPs reached values above 27 MPa, attending the manufacture requirements. The evaluation of the other assays also suggests the possibility for the utilisation of these reinforced concretes in civil construction. The comparison of the values obtained from the reinforced concrete with and without the addition of WTS demonstrates a reduction in its properties as the WTS is added. Yet, this reduction in the quality does not prevent the use of the silt in reinforced concrete, as all the obtained values are above the values demanded in civil construction. Another benefit of the WTS utilisation in reinforced concrete is the reduction in natural resources extraction, such as sand and Brita, but specially the reduction in indiscriminate casting of WTS in river courses.

1. INTRODUÇÃO

A demanda de água de boa qualidade tem aumentado em decorrência do crescimento das cidades e das maiores exigências da qualidade de vida da população. A falta de programas adequados de gestão de mananciais determinam a paulatina redução de qualidade de água, exigindo maiores concentrações de produtos químicos, aumentando a geração de resíduos das Estações de Tratamento de Água (ETA), denominados lodo de ETA.

Há muito tempo, o destino destes resíduos de ETA vinha sendo os cursos d'água próximos às estações, causando impactos ambientais. No entanto, esta prática tem sido questionada por órgãos ambientais devido aos riscos à saúde humana e ao meio ambiente. Esta crescente preocupação tem gerado regulamentações que restringem e, até mesmo, proíbem esta forma de disposição.

De acordo com a NBR 10.004, este lodo é classificado como “resíduo sólido”, portanto, deve ser tratado e disposto conforme exigência dos órgãos reguladores. A Lei Estadual nº 12.493 / 99 classifica diretamente como resíduos, os lodos provenientes de estações de tratamento de água e determina que estes devam ser minimizados, reutilizados e / ou reciclados, ficando proibido o lançamento destes em corpos d'água, em todo o estado do Paraná.

Os métodos de tratamento e disposição final existentes têm sido raramente adotados nas estações de tratamento brasileiras, principalmente pelo alto custo envolvido. Entre as alternativas mais conhecidas de disposição final destacam-se: aplicação no solo, aterro sanitário, incineração e utilização como matéria-prima em alguns tipos de indústrias.

A aplicação no solo não é considerada uma boa opção, pois os flocculantes adicionados aos lodos podem estar agregados a alguns metais, principalmente ferro e alumínio, o que acarretaria em contaminação do solo ou redução da disponibilidade de

alguns nutrientes. A disposição em aterro sanitário requer cuidadosos estudos de implantação, pois são maiores as restrições ambientais, necessitando de programas de monitoramento. A incineração pode ser uma alternativa viável para lodos contaminados, no entanto este processo possui um custo elevado.

Assim, a busca de soluções economicamente e ambientalmente vantajosas para o tratamento e disposição final do lodo de ETA continua sendo um desafio, principalmente para países em desenvolvimento que vivem em severas restrições econômicas e onde os problemas sanitários exigem soluções emergenciais.

Desta maneira, a possibilidade de incorporar o lodo de ETA em matrizes de concreto pode ser uma alternativa viável, pois pode reduzir em grande parte os agregados naturais empregados na construção civil mas, principalmente, minimizar de maneira significativa os impactos ambientais advindos da disposição final destes resíduos no meio.

Vale salientar, que o setor da construção civil é o maior consumidor individual de recursos naturais alcançando de 20 a 50% do total, portanto, a reciclagem pode ser uma alternativa para a diminuição de impactos ambientais.

No caso do lodo de ETA, são produzidos, aproximadamente, 4.000 ton/mês em matéria seca em todo o Paraná. Na cidade de Curitiba, o abastecimento de água é realizado pelas Estações de Tratamento Iguaçu, Tarumã, Iraí e Passaúna, o que corresponde a mais de 50% de toda a produção de lodo do estado. A ETA Passaúna produz cerca de 360 ton/mês de lodo, estação que foi o objeto de estudo neste trabalho.

A incorporação deste lodo em matriz de concreto, pode reduzir, significativamente, os impactos ambientais, uma vez que a utilização dos resíduos como matéria-prima reduz a quantidade de recursos naturais retirados do meio ambiente, além de reduzir a quantidade de lodo disposto em aterro sanitário, aumentando assim, sua vida útil e adotando as exigências legais.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a possibilidade de incorporação do lodo da Estação de Tratamento de Água Passaúna em matrizes de concreto, como forma de disposição final.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar as características físico-químicas do lodo da ETA Passaúna;
- Caracterizar os materiais utilizados no concreto (aglomerantes e agregados);
- Determinar os teores adequados para incorporação do lodo de ETA no concreto;
- Determinar as propriedades do concreto fresco nas diferentes dosagens;
- Verificar as diferenças na resistência mecânica dos concretos;
- Avaliar a durabilidade e lixiviação do concreto nas dosagens determinadas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA (ETA)

3.1.1 Definição de Lodo de ETA

Para transformar a água bruta em água potável para consumo humano, as ETAs utilizam processos como coagulação, floculação, decantação e filtração, que formam resíduos que serão removidos, principalmente, nos decantadores, denominados lodo de ETA (TSUTIYA; HIRATA, 2001).

A geração destes resíduos nos decantadores ocorre pela desestabilização química, podendo as partículas ser de natureza química, física e biológica, e em sua grande maioria, colóides (CORDEIRO, 2002).

De acordo com Richter (2001), o lodo de ETA é considerado um resíduo composto de água e sólidos suspensos contidos na fonte, acrescidos dos produtos aplicados durante o processo de tratamento de água. Cordeiro (1999) compara a ETA com uma indústria, na qual uma matéria-prima, a água, é trabalhada resultando em um produto final, gerado durante este processo de transformação, o lodo de ETA.

Segundo Grandin, Além Sobrinho e Garcia Jr (1993) o lodo de ETA é constituído, basicamente, de resíduos sólidos orgânicos e inorgânicos provenientes da água bruta, tais como: algas, bactérias, vírus, partículas orgânicas em suspensão, colóides, areias, argila, siltes, cálcio, magnésio, ferro, manganês, etc. Silva, Bidone e Marques (2000) complementam a composição dos lodos com hidróxidos de alumínio em grande quantidade, provenientes da adição de produtos químicos e, em alguns casos, polímeros condicionantes também utilizados no processo.

O lodo de ETA possui uma característica mais similar aos solos do que se comparado com o lodo de esgoto. Neste último caso, em geral, o nitrogênio e o carbono orgânico no lodo de ETA são mais estáveis, menos reativos e estão em menores concentrações (AWWA, 1995).

Silva e Isaac (2002) caracterizam o lodo de ETA como um fluido não-newtoniano, volumoso e tixotrópico, apresentando-se em estado gel quando em repouso e relativamente líquido quando agitado.

3.1.2 Produção de Lodo de ETA

A quantidade e, também, a qualidade do lodo de ETA dependem da frequência de remoção deste dos decantadores (GRANDIN, ALÉM SOBRINHO, GARCIA JR, 1993). Richter (2001), complementa que a quantidade de lodo, também, depende da qualidade físico-química da água bruta, da qualidade final desejada desta, dos coagulantes e produtos utilizados durante o processo de tratamento, sendo o volume de lodo gerado diretamente proporcional à dosagem de coagulante utilizado no processo. Reali (1999), também sugere que as variações sazonais e a turbidez presente na água influenciam a taxa de geração do lodo.

De acordo com Richter (2001), o volume da produção do lodo varia entre 0,2% e 5% do volume total de água tratada pela ETA. Luciano (1998), afirma que este valor representa, em volume entre, 0,3 a 1% da água tratada. Segundo Silva e Isaac (2002) a quantidade de lodo originária dos decantadores representa cerca de 60 a 95% da quantidade total de resíduos produzidos na ETA, sendo o restante oriundo do processo de filtração.

Atualmente, existem cerca de 7.500 ETAs de ciclo completo ou convencional no Brasil, estimando-se que são lançados em cursos d'água cerca de 2.000 toneladas/dia de lodo de ETA sem nenhum tratamento (CORDEIRO, 1999).

3.1.3 Histórico

Nos EUA o lodo de ETA é considerado resíduo industrial de acordo com a emenda da “National Pollutant Discharge Act” de 1972, sofrendo assim, restrições legais (RICHTER, 2001). Cordeiro (1993), complementa que a partir desta década de 70, passou a ser proibido o lançamento de qualquer tipo de resíduo, inclusive lodo de ETAs, nas águas superficiais sem a autorização das autoridades responsáveis.

De acordo com Barroso e Cordeiro (2001a), os limites federais norte-americanos para lançamento de efluentes são definidos pela EPA (Environmental Protection Agency), cabendo aos escritórios estaduais a limitação específica para o lançamento de resíduos de ETAs, contemplando diretrizes de pré - tratamento e descargas de efluentes associados as unidades de tratamento de resíduos. Segundo Cordeiro (1993), estudos realizados nos EUA no ano de 1953 verificaram que 92,5% das ETAs dispunham seu lodo em cursos d’água, 3,5% em esgotos sanitários e 3% removiam a água em leitos de secagem. Ainda, em 1969, observou-se que 60% destas ETAs continuavam lançando seu lodo diretamente no rio. A partir dos anos 80 houve uma maior preocupação com o impacto ambiental causado pelo lançamento deste material no rio, fazendo com que os países desenvolvidos tentem encontrar soluções definitivas para os lodos.

No caso da União Européia, Sabogal-Paz et. al. (2003) classificaram a legislação em duas fases. Na primeira, entre 1970 e 1980, foram definidos os requisitos mínimos de qualidade da água que garantissem a saúde humana e que não fossem prejudiciais, também, ao meio ambiente. Na segunda, a partir de 1990 foram criados conjuntos de leis que regulamentavam descargas de poluentes aos ambientes aquáticos oriundos de processos, tais como: tratamento de água e esgoto, descarga industrial e da agricultura.

No Brasil, somente após 1970, ocorreram as primeiras preocupações relacionadas com este assunto. Cordeiro (2001) mostra que os primeiros trabalhos referentes a esse

assunto foram publicados no Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental nos anos de 1975 e 1977.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DE LODO DE ETA

As características do lodo de ETA podem variar com o tipo de coagulante e auxiliares utilizados no tratamento e qualidade de água bruta, que varia sazonalmente (REALI, 1999). Saron e Leite (2001), afirmam que pode ocorrer a variação destas características, também, em função da tecnologia usada no tratamento de água.

3.2.1 Características Químicas

Segundo Cordeiro (1993), a caracterização de alguns aspectos do lodo de ETA tais como: composição química, distribuição e tamanho das partículas, filtrabilidade e resistência específica, é fundamental, pois por meio destes parâmetros poderão ser estudados os possíveis impactos ambientais, métodos para remoção de água e formas de disposição final.

Barroso e Cordeiro (2001a) descrevem que alguns metais, como cobre, zinco, níquel, chumbo, cádmio, cromo e manganês e, em especial, o alumínio, presente no lodo de ETA, possuem ações tóxicas, podendo apresentar efeitos positivos ou negativos nas técnicas de tratamento, disposição final e, até mesmo, na reutilização destes resíduos. Em estudos realizados por Costa et. al. (2003), estes observaram que o sedimento da ETA é extremamente tóxico ao microcrustáceo *Daphnia Magna*, explicado pela alta concentração de metais tóxicos encontrados no sedimento.

Bidone, Castro e Aboy (1997) acreditam que a cor real da água é decorrente da decomposição materiais orgânicos (vegetais), e que a turbidez (cor aparente) pode ter componentes orgânicos significativos. Como o processo de sedimentação remove a

turbidez e a cor, os sólidos em suspensão, tais como: argila, silte, areia, detritos orgânicos, entre outros, presentes na água passarão a fazer parte do lodo sedimentado.

O potencial tóxico dos resíduos de ETAs depende, principalmente, do teor de metais, além destes, podem ser incluídas as características físico-químicas. Outros fatores que também influenciam a toxicidade são as reações sofridas durante o processo de tratamento, forma e tempo de retenção, características do curso d'água, composição e impureza dos coagulantes ou outros produtos químicos utilizados (BARROSO e CORDEIRO, 2001b).

Nos documentos de AWWA (1992), é complementado que, aproximadamente, 20 a 90% dos resíduos sólidos gerados nas ETAs são compostos de contaminantes químicos, os quais afetam, significativamente, a qualidade do lodo final gerado.

Em testes de acidificação no lodo de ETA com ácido clorídrico para recuperação de coagulante realizado por Demattos et. al. (2001) na Região Metropolitana de Belo Horizonte, este observou que 92% do volume do lodo foi originário de coagulante e apenas 8% foram considerados resíduos provenientes de impurezas removidas da água.

Em análises realizadas por Bidone, Silva e Marques (2001), na cidade de Porto Alegre / RS, verificou-se que 5% da massa do lodo era constituído de alumínio, havendo, também, uma predominância de material inorgânico sobre o orgânico, com um teor de sólidos totais em torno de 22,6%. Silva e Isaac (2002) demonstram a baixa biodegradabilidade de matéria orgânica relativamente estável, pois o lodo analisado apresentou uma alta DQO (30-160 mg/l) e baixa DBO₅ (2-4 mg/l). Tavares e Kato (2003) também observaram o caráter inorgânico nos lodos de ETAs devido a inferioridade da quantidade de sólidos voláteis sobre os sólidos totais fixos.

Ao contrário, Machado et. al. (2002) verificaram que o lodo da ETA Bolonha situada na Região Metropolitana de Belém apresenta um alto teor de matéria orgânica pela alta relação entre sólidos voláteis por sólidos totais encontrada, em torno de 59 a 87%. Este lodo também apresentou baixa sedimentabilidade, observada pelos baixos valores de sólidos sedimentáveis, em média 510 ml/L.

Cordeiro (2000) analisando o lodo de três ETAs: São Carlos, Araraquara e Rio Claro, observou que os valores obtidos na caracterização, variam de acordo com o ponto de coleta. Os parâmetros analisados nestas ETAs e sua variabilidade podem ser observados na Tabela 01.

TABELA 01 - PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS PARA O LODO DAS ETAS SÃO CARLOS, ARARAQUARA E RIO CLARO.

Parâmetros	ETA – São Carlos	ETA - Araraquara	ETA – Rio Claro
Conc. de Sólidos (%)	4,68	0,14	5,49
pH	7,2	8,93	7,35
Cor (U.C.)	4.300.000	10.650	250.000
Turbidez (U.T.)	800.000	924	36.000
DQO (mg/l)	4.800	140	5.450
Sólidos Totais (mg/l)	58.630	1.620	57.400
Sólidos Suspensos (mg/l)	23.520	775	15.330
Sólidos Dissolvidos (mg/l)	32.110	845	42.070
Alumínio (mg/l)	11.100	2,16	30
Zinco (mg/l)	4,25	0,10	48,53
Chumbo (mg/l)	1,60	0,00	1,06
Cádmio (mg/l)	0,02	0,00	0,27
Níquel (mg/l)	1,80	0,00	1,16
Ferro (mg/l)	5.000	214	4.200
Manganês (mg/l)	60,00	3,33	30
Cobre (mg/l)	2,06	1,70	0,091
Cromo (mg/l)	1,58	0,19	0,86

FONTE: (CORDEIRO,2000).

Em análises de difração de raios - X (DRX) deste lodo da ETA São Carlos, Cordeiro (1993) verificou que entre os compostos minerais mais prováveis, encontram-se a aloisita e a caulinita. Os compostos inorgânicos predominantes são os silicatos de ferro e de alumínio e os compostos orgânicos mais encontrados foram os clorados e nitrogenados.

Barbosa et. al. (2000) também realizaram estudos com lodo de ETAs situadas nas cidades de Araraquara e São Carlos, analisando pH, condutividade, OD, dureza, turbidez, DQO, série de sólidos, metais (Al, Cr, Fe, Ni, Pb, Cd, Zn, Mn, Cu) e nutrientes (N e P) nos períodos chuvoso e seco. Neste estudo, pôde ser observado que as variáveis que expressaram a influência do período com chuva foram: pH, turbidez, sólidos totais,

sólidos suspensos, DQO, nitrogênio e fósforo. Os metais que apresentaram concentrações elevadas foram o alumínio, ferro e manganês, justificado pelo aumento da dosagem de coagulantes utilizado no tratamento, pela maior concentração de contaminantes e materiais provenientes da erosão.

Em estudos realizados com lodo de ETAs que utilizam coagulante de ferro e alumínio no processo comparado com lodo de esgoto, nos documentos de AWWA (1990) é observado que, a concentração de coliformes presentes neste lodo de ETA é baixa e, em alguns casos, ausente. Verificou-se ainda que, ao contrário do lodo de esgoto, que é composto basicamente de matéria orgânica, o lodo de ETA possui apenas 6%, sendo o restante, material inorgânico. Na Tabela 02, estão demonstradas as demais comparações entre o lodo de ETA e o lodo de esgoto.

TABELA 02 - COMPOSIÇÃO TÍPICA DO LODO DE ETA COMPARADO COM O LODO DE ESGOTO.

Parâmetros	Lodo de ETA	Lodo de Esgoto
% sólidos	6,6	-
Perda de MO por ignição	33	70
TOC (%)	3	40
NKT (%)	0,6	4
Relação C/N	7:1	10:1
NH ₃ - N (%)	0,05	0,1
P Total	0,2	2,5
Al (%)	7,1	0,5
Fe (%)	6,9	1,5
pH	6,8	6,9 – 7,5
CaCO ₃ (%)	10 – 25	-
Coliformes (#/gm)	<20	10 ⁶
Cd Total (ppm)	1,5	15
Cu Total (ppm)	134	800
Ni Total (ppm)	55	80
Pb Total (ppm)	88	500
Zn Total (ppm)	308	1700

FONTE: AWWA (1990).

3.2.2 Características Físicas

Segundo Richter (2001), o teor de sólidos totais presentes em um lodo de ETA varia entre 1.000 a 40.000 mg/l (0,1 a 4%), sendo 75 a 90% de sólidos suspensos e 20 a 35% de compostos voláteis, apresentando, portanto, uma pequena porção biodegradável, mas que pode ser prontamente oxidável. O autor, ainda, complementa que a massa específica deste lodo varia de acordo com as concentrações de sólidos presentes neste, podendo variar de 1.002 kg/m³ para lodos com teores de sólidos de 1%, até 1.236 kg/m³ para teores de sólidos de 30% após processo de desidratação, como observado na Tabela 03.

TABELA 03 - DENSIDADE DO LODO DE ETA EM RELAÇÃO À CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS.

Conc. de sólidos (%)	Varição de densidade (kg/m³)
1	1.002 – 1.006
3	1.007 – 1.019
6	1.014 – 1.040
10	1.024 – 1.068
15	1.036 – 1.106
20	1.048 – 1.146
25	1.061 – 1.189
30	1.074 – 1.236

FONTE: RICHTER (2001).

Sartori e Nunes (1997) afirmam que o lodo é composto quase que integralmente de partículas finas a coloidais, havendo uma predominância de fração argilosa quando o lodo é removido no decantador.

No lodo de ETA, são encontradas diferentes frações de água, as quais irão influenciar na separação das fases líquida e sólida. Esta água pode ser dividida em quatro frações, segundo Bisogenin, Ide e Imolene (1999) e Silva e Isaac (2002):

- água livre: retida entre os flocos de maneira similar a uma esponja. Não é associada, nem influenciada por partículas sólidas em suspensão. Pode ser facilmente removida por gravidade;

- água intersticial ou capilar: é a umidade que está quimicamente ligada às partículas sólidas. Exigem forças maiores para serem separadas dos sólidos presentes no lodo, portanto, só podem ser removidas por forças mecânicas ou pelo uso de flocculantes;
- água vicinal: constituída de moléculas de água, as quais se encontram fortemente ligadas a partículas sólidas por pontes de hidrogênio. Só pode ser removida se o floco for quebrado, ocorrendo uma diminuição da área superficial total, e
- água de ligação química: quimicamente ligada à superfície da partícula coloidal. Removível apenas pelo aumento da energia térmica, que provoca mudanças no estado de agregação da água.

Cordeiro (1981) afirma que a desidratação ou remoção de água presente no lodo tem por objetivo principal a redução de seu volume. Segundo Gradin, Além Sobrinho e Garcia Jr (1993), o lodo de ETA pode sofrer desidratação por meio natural ou mecânico, sendo os principais métodos:

- sistema de secagem natural: lagoas de lodo e leitos de secagem; e
- sistema de desidratação mecânica: centrífuga; filtro a vácuo; filtro prensa e prensa desaguadora.

Segundo Cordeiro (2002), tanto os sistemas mecânicos como os naturais não apresentam eficiência satisfatória no desaguamento do lodo de ETA, se comparado com o desaguamento gerado pelos lodos de Estação de Tratamento de Água Residuárias. Nos EUA os métodos mais utilizados são os de desidratação natural (CORDEIRO, 1993).

As vantagens de se utilizar o sistema mecânico são: menor área exigida para implantação, independência de condições meteorológicas e minimização de determinados impactos ambientais. No entanto, este tipo de sistema necessita que o lodo seja condicionado com polímero ou outro tipo de produto químico, é mais sensível à variação qualitativa e quantitativa de lodo, existindo ainda, em alguns casos, a necessidade de troca

de pano de filtração e demais equipamentos que estiveram em contato com o lodo (GRANDIN; ALÉM SOBRINHO; GARCIA JR, 1993).

Segundo Richter (2001) a filtração a vácuo não é uma alternativa recomendada, principalmente para lodos de sulfato de alumínio, por possuir elevado consumo de energia, além de possuir problemas com o meio filtrante. No caso de filtros prensa, é necessária a aplicação de cal, para que o pH seja elevado para 11 ou mais, se tornando necessário, em alguns casos, a aplicação de polímeros. Demattos et. al. (2001) complementam que o teor de sólidos conseguido por esta alternativa está em torno de 40%, no entanto, apresenta um custo elevado de implantação.

No caso da prensa desaguadora, esta possui um custo relativamente baixo, e é capaz de produzir uma torta que, segundo Richter (2001), possui consistência adequada para disposição em aterro sanitário. Influenciam, também, neste custo baixo, segundo Cordeiro (1993), a sua simplicidade de manutenção e operação.

As centrífugas consistem, basicamente, na aplicação de uma força centrífuga, com aceleração de 500 até 4.000 vezes a aceleração da gravidade. De acordo com Demattos et. al. (2001) o processo de centrifugação produz o lodo com uma concentração média de 20% de sólidos, possuindo um elevado custo de operação, principalmente no consumo de polieletrólitos. Cordeiro (1981), afirma que a centrifugação pode ser considerada um estágio intermediário entre a secagem e o adensamento.

De acordo com Grandim, Além Sobrinho e Garcia Jr. (1993) os sistemas de secagem natural apresentam vantagens, principalmente, para ETAs de pequeno e médio porte, pois possuem viabilidade econômica de implantação e baixo consumo de energia e produtos químicos, no entanto, necessitam de grandes áreas para implantação, mão-de-obra intensiva para remoção do lodo e risco de geração de odores e de poluição do lençol freático.

Nos leitos de secagem a remoção de umidade se dá pela decantação, drenagem e evaporação para que se obtenha a concentração desejada (RICHTER, 2001). Cordeiro (1993) complementa que este processo envolve, basicamente, duas operações: aplicação

de pressão sobre a massa de lodo e filtração da água contida nessa massa. No entanto, de acordo com Cordeiro (1981), este sistema possui a desvantagem de ser afetado pela temperatura, umidade do ar, ventilação e viscosidade do lodo, e em casos de locais de clima frio de alta umidade, é necessário um longo período para que ocorra a desidratação do lodo.

3.2.3 Lodo com Cloretos Férricos e Sulfato de Alumínio

Durante o processo de tratamento de água são utilizados coagulantes que desestabilizam as partículas coloidais, formando flocos com tamanho suficiente para remoção pela sedimentação. Geralmente, os coagulantes utilizados são sais de ferro e alumínio, que desestabilizam as partículas devido as suas cargas. Quando o coagulante utilizado é o sulfato de alumínio, o lodo de ETA é conhecido como lodo de sulfato de alumínio, o mesmo acontece para lodo com sais de ferro (CORDEIRO, 1999).

Segundo Richter (2001) o lodo de sulfato de alumínio apresenta baixa biodegradabilidade e suas principais características são apresentadas na Tabela 04.

TABELA 04 - CARACTERÍSTICAS TÍPICAS DE LODOS DE SULFATO DE ALUMÍNIO.

Sólidos Totais (%)	Al ₂ O ₃ .5H ₂ O (%)	Inorgânicos (%)	Matéria Orgânica (%)	pH	DBO (mg/l)	DQO (mg/l)
0,1 – 4	15 - 40	35 – 70	15 – 25	6 - 8	30 - 300	30 – 5.000

FONTE: RICHTER (2001)

De acordo com Reali (1999), o lodo de sulfato de alumínio apresenta coloração marrom, com viscosidade e consistência que lembram chocolate líquido, além de possuir difícil sedimentação ou flotação em seu estado natural.

A utilização do sulfato de alumínio gera lodos em que a forma predominante de hidróxidos presentes é a Al(OH)₃. 3H₂O, no entanto, também existem em equilíbrio com este hidróxido, diversas formas de monômeros e polímeros (RICHTER, 2001).

Cordeiro (1993) acrescenta que, com o uso de sulfato de alumínio, a formação dos compostos derivados irá depender do pH, presença de ligantes e hidróxidos já presentes na água. Estes compostos podem ser gerados pela hidrólise simples com formação de $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, processo mais comum, ou até mesmo a formação de complexos orgânicos de alumínio ou substâncias alumino-fluoradas em condições de baixo pH e grande concentração de complexos ligantes.

As reações que ocorrem com a adição de sulfato de alumínio na água podem ser descritas como:



No entanto, quando existe alcalinidade natural suficiente na água, as equações são:



Segundo Richter (2001), a forma deste lodo varia em função da sua concentração de sólidos. Para concentrações de 0 – 5%: forma líquida; 8 – 12%: esponjoso ou semi-sólido; e para 18 – 25%: argila ou barro suave. A sedimentabilidade destes lodos é alta, porém, existe uma baixa compactilidade resultando em um grande volume com baixo teor de sólidos. Luciano (1998), descreve que, se for diminuído o conteúdo de $\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, a desidratação do lodo irá melhorar e, conseqüentemente, seu volume será reduzido.

Os lodos de sais de ferro são similares aos lodos de sulfato de alumínio em suas características (RICHTER, 2001), sendo que algumas destas estão demonstradas na Tabela 05. Segundo Reali (1999), este lodo possui uma coloração marrom avermelhada e, assim como o de sulfato de alumínio, apresenta dificuldade na decantação e flotação necessitando de adição de polímeros.

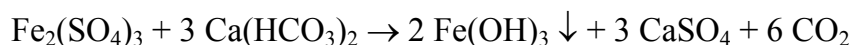
TABELA 05 - CARACTERÍSTICAS TÍPICAS DO LODO DE SAIS DE FERRO.

Sólidos Totais (%)	Fe (%)	Voláteis (%)	pH
0,25 – 3,5	4,6 – 20,6	5,1 – 14,1	7,4 – 9,5

FONTE: RICHTER (2001)

Os coagulantes mais utilizados de ferros são sulfato férrico e cloreto férrico, e sua influência na água pode ser demonstrada pelas seguintes relações:

- sulfato férrico



- cloreto férrico



Segundo Richter (2001) cada 1 mg/l de sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$) contém 17% como Al_2O_3 e forma 0,26 mg/l de hidróxido de alumínio ($\text{Al}(\text{OH})_3$), já 1 mg/l de cloreto férrico produz de 0,40 a 0,54 mg/l de hidróxido de ferro ($\text{Fe}(\text{OH})_3$), enquanto que o sulfato férrico forma 0,56 mg deste hidróxido.

Em pesquisa realizada nos EUA, nos documentos de AWWA (1992) foram comparados os lodos de sulfato de alumínio e de sais de ferro, resultando que o lodo de alumínio apresentou maior concentração deste elemento, acontecendo o mesmo para a concentração de ferro no lodo de sais férricos, o que demonstra que a concentração destes metais está diretamente ligada ao coagulante utilizado. Foi observado, também, que as concentrações de manganês, níquel, chumbo, bário e zinco foram maiores no lodo de sais de ferro. Na Tabela 06 são demonstradas as concentrações destes metais encontradas nos lodos de alumínio e de cloreto férrico, podendo-se observar que no de cloreto férrico as médias são superiores ao lodo de alumínio, sugerindo que a composição do coagulante influencia a contaminação final dos metais presentes no lodo de ETA.

TABELA 06 - METAIS ENCONTRADOS NOS LODOS DE ETAS USANDO ALUMÍNIO E CLORETO FÉRRICO (MG/KG PESO SECO).

Metais	Alumínio		FeCl ₃	
	Taxa de variação	Média	Taxa de variação	Média
Cd	1 – 2	1,6	<0,1 – 2	<1
Cu	135 – 230	171	135 – 485	272
Cr	40 – 64	50	62 – 513	269
Ni	26 – 65	44	33 – 218	136
Pb	47 – 439	204	18 – 840	245
Zn	195 - 815	527	215 – 865	575

FONTE: AWWA (1990)

3.3 ALTERNATIVAS DE DISPOSIÇÃO FINAL DO LODO DE ETA

Um dos grandes desafios, atualmente, é a busca de alternativas economicamente e tecnicamente viáveis, além de ambientalmente vantajosas de destinação final do lodo de ETA. A utilização benéfica do lodo de ETA pode ser considerada uma oportunidade para aumentar a receita das empresas de saneamento, mas, principalmente, reduzir custos e impactos ambientais associados a este resíduo (TSUTIYA; HIRATA, 2001). Cordeiro (2000), complementa que a utilização de lodo de ETA como matéria – prima pode reduzir a quantidade de recursos naturais utilizados, além de deixar de ocupar espaços em aterro sanitário.

Segundo Richter (2001), o destino final do lodo de ETA é considerado uma das tarefas mais difíceis no tratamento de água, pois envolve transporte e algumas restrições ao meio ambiente. Entre as alternativas mais utilizadas, ele destaca:

- lançamento em curso d'água;
- lançamento no mar;
- lançamento na rede de esgoto sanitário;
- lagoa;
- aplicação ao solo; e
- aterro sanitário.

De acordo com AWWARF¹ citado por Tsutiya e Hirata (2001), nos EUA, a alternativa mais utilizada para disposição deste lodo é a agricultura com 25%, seguido de disposição em rede de esgoto com 24%. Os aterros, tanto municipais como exclusivos, também, têm destaque (20 e 13% respectivamente) e mesmo sendo restringido a descarga em corpo d'água é uma alternativa de disposição em 11% dos casos.

Em análises realizadas com as ETAs de tratamento convencional e coagulante de sulfato de alumínio das capitais estaduais, Cordeiro (1993), verificou que a maioria destas lançavam seu lodo diretamente em cursos d'água, a exceção da ETA Bolonha em Belém-PA, que realiza seu lançamento direto no solo e das ETAs de Goiânia e Rio Claro que utilizam lagoas como local de disposição deste lodo. Estes dados demonstram que 95% das ETAs brasileiras, no início da década de 90, ainda dispunham seu lodo em cursos d'água.

Cordeiro (1981), complementa que, para embasar a escolha para a melhor disposição final de lodo devem ser avaliados alguns aspectos como: quantidade e característica do lodo e custos das possíveis soluções escolhidas.

3.3.1 Lançamento em Rio

Segundo Barbosa et. al. (2000), o lançamento do lodo de ETA em rio pode alterar significativamente a bióta aquática, bem como, causar degradação da qualidade das águas e sedimentos. Os principais parâmetros que influenciam o aumento desta degradação são: turbidez, série de sólidos, nitrogênio, fósforo, DQO e metais, principalmente alumínio, manganês e ferro.

Cordeiro (1981), conclui que os sólidos suspensos presentes podem ser dispersos nas correntes, mas, que dependendo do regime de escoamento, estes podem sedimentar

¹ AWWARF. Commercial Application and Marketing of Water Plant Residuals. American Water Works Association Research Foundation, 1999.

próximo ao local de lançamento, resultando em uma alta DBO, inibição da atividade biológica e, até mesmo, uma má condição estética.

Barbosa et. al. (2000), acrescentam que, além do alumínio, outros contaminantes podem estar associados ao coagulante, ou, até mesmo, à água bruta, sendo assim, bioacumulados à bióta aquática no caso de lançamento. Barroso e Cordeiro (2001a), complementam que o aumento da concentração de metais tóxicos pode limitar o teor de carbono disponível na biótica aquática, e em alguns casos, o alumínio forma ligação com o fosfato, indisponibilizando este nutriente essencial à vegetação aquática. Outro dano ao corpo receptor citado por Machado et. al. (2002), é a redução da concentração de OD nas massas líquidas, ocorrida pela decomposição de materiais orgânicos, o que torna o ambiente anaeróbico com acúmulo de material no fundo, odores desagradáveis, além de mortandade na bióta aquática.

Nos países desenvolvidos, a prática de lançamento em rio está sendo reduzida, devida às legislações mais rigorosas de controle de poluição e escassez de recursos hídricos, que estão sendo captados cada vez em locais mais distantes e em piores condições (BIDONE; CASTRO; ABOY, 1997). No entanto, Richter (2001), cita esta alternativa como a mais barata, pois ocorre apenas a devolução ao rio do material dele removido durante o processo de tratamento da água. Deve ser levado em conta nesta alternativa, algumas restrições, como a quantidade de coagulantes e produtos químicos, os quais aumentam a sedimentabilidade dos resíduos formando depósitos.

Cordeiro (1981), acredita que o lançamento em corpo d'água pode ser uma alternativa viável em casos onde o rio possui a capacidade de absorção da carga lançada, ou em casos em que estes rios não são destinados ao abastecimento público e são considerados de classe 4, segundo o CONAMA n.º 20/80.

De acordo com AWWA (1992), em alguns estados dos EUA a descarga direta do lodo em rio é permitida com ou sem algum tipo de pré-tratamento, enquanto em outros, esta descarga é proibida, geralmente pelas limitações de descarga de sólidos suspensos.

Em estudos de lançamento do lodo em cursos d'água, Sabogal-Paz et. al. (2003), demonstram uma alta carga de alumínio (57,12 kg/dia), ferro (17,97 kg/dia) e níquel (7,10 kg/dia) presente no lodo da ETA São Carlos, o qual era lançado diretamente no Córrego Monjolinho, causando ainda a elevação dos teores de sólidos, metais e DQO.

3.3.2 Aplicação no Solo

Segundo Tsutiya e Hirata (2001), a aplicação do lodo de ETA no solo pode trazer alguns benefícios, tais como: melhoria estrutural do solo, ajuste de pH, adição de traços minerais, aumento da capacidade de retenção de água e melhoria das condições de aeração. Ao contrário, pode apresentar a tendência de reagir e indisponibilizar o fósforo presente no solo ou, até mesmo, apresentar toxicidade do alumínio com pH superior a 6,5. Outra preocupação de acordo com AWWA (1992) é o carreamento do nitrato do solo, podendo atingir até mesmo a água subterrânea.

Richter (2001), afirma que esta técnica consiste apenas em esparramar o lodo no solo natural ou na agricultura. Nos documentos AWWA (1995), é apresentado que esta alternativa pode ser viável, principalmente, por ser de baixo custo e por oferecer a possibilidade de minimização de impactos ambientais. Entretanto, Tsutiya e Hirata (2001), acreditam na sua viabilidade apenas quando a concentração de matéria orgânica e nutrientes presentes no lodo de ETA se apresentarem altas ou, então, como Reali (1999), que sugere esta alternativa apenas em casos em que seja comprovada a inexistência de impactos negativos no solo.

AWWA (1990) mostra a redução da disponibilidade do fósforo no solo devido a alta concentração de hidróxidos de alumínio e ferro presentes no lodo de ETA. Os autores afirmam ainda que este decréscimo da capacidade de fósforo implica em um aumento de fertilizantes utilizados para a obtenção de produção na plantação.

Lenzi et. al. (2003) caracterizaram o lodo proveniente das ETAs da cidade de Maringá-PR no período de 1995 a 2002, observando que houve um aumento de Pb, Cr, Cd, Ca, K e P, o que pode indicar um aumento na degradação da bacia e descartes de efluentes industriais. Com esta caracterização, os autores indicam a aplicação deste lodo na recuperação de solos, desde que sejam tomados cuidados semelhantes com a aplicação do lodo de ETEs.

3.3.3 Disposição em Aterro Sanitário

Disposição em aterro sanitário consiste em uma colocação controlada do lodo em células previamente impermeabilizadas e recoberto com terra, sujeito à regulamentação legal. Este lançamento pode ser realizado em aterro exclusivo ou municipais de resíduos urbanos, neste último caso o lodo deve estar desidratado (RICHTER, 2001).

Silva, Bidone e Marques (2000) afirmam que no Brasil o aterro sanitário também pode ser uma alternativa viável para disposição final dos lodos de ETAs, principalmente em cidades de pequeno e médio porte, com disponibilidade de áreas economicamente acessíveis. Ao contrário, Tsutiya e Hirata (2001), associam a esta alternativa o alto custo de implantação e devido a este elevado custo, Richter (2001) sugere que esta seja a última escolha a ser considerada. Reali (1999), também não acredita nesta alternativa como meio de disposição, pois o aterro pode apresentar restrições quanto à umidade máxima permitida para recebimento da torta de lodo.

De acordo com AWWA (1995) nos EUA, o aterro exclusivo é um método altamente utilizado para destinação de lodo de ETA, ocorrendo em 20,7% das cidades de até 100.000 habitantes. No entanto, devido ao sulfato de alumínio utilizado no processo o desaguamento é dificultado, sendo um obstáculo para os aterros que não aceitam materiais semi-sólidos, tornando esta opção restrita.

A co-disposição dos lodos de ETAs em aterro sanitário com baixo conteúdo de resíduos sólidos orgânicos pode ser uma possibilidade de disposição final deste lodo, porém, quando esta ocorre com grande quantidade de resíduos sólidos orgânicos, pode ocorrer uma intensa produção de ácidos graxos voláteis, o que ocasiona baixo pH favorecendo a lixiviação do alumínio presente no lodo (SILVA; BIDONE; MARQUES, 2000). Em AWWA (1992), é destacado que, quando a disposição é realizada com resíduos sólidos municipais e até mesmo industriais, pode ocorrer uma diminuição da capacidade do aterro, bem como intensificar a necessidade do monitoramento da água subterrânea desta região e água de lixiviação (chorume).

3.3.4 Descarga em Estações de Tratamento de Esgoto (ETE)

Um método alternativo de disposição do lodo de ETA é o lançamento destes em Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), sendo comumente utilizado na Europa e nos EUA. Di Bernardo, Carvalho e Scalize (1999) consideram esta alternativa atraente, pois elimina a implantação de sistemas de tratamento de resíduos na própria ETA.

Esta alternativa apenas transfere o problema do tratamento e disposição do lodo de ETA para a ETE (RICHTER, 2001). Reali (1999), acredita que o lançamento direto na rede de tratamento de esgoto sem nenhum tratamento prévio pode ser considerado uma das alternativas mais baratas de disposição final.

Segundo Tsutiya e Hirata (2001), para descargas inferiores de 150 a 200 mg/l não são observados efeitos negativos nesta técnica, apenas em casos de altas concentrações de sólidos dissolvidos que podem inibir o processo biológico. Ao contrário, pode-se observar efeitos positivos com a aplicação do lodo de ETA em redes de esgoto sanitário como controle de H₂S, aumento na eficiência dos decantadores primários e remoção de fósforo.

Cordeiro (1981), cita estudos realizados nos EUA, com a introdução do lodo em sistemas de tratamento de esgoto, verificando que a eficiência na remoção de DQO

permaneceu a mesma, e ainda que devido ao caráter inerte do lodo de ETA, também não foram notados efeitos adversos nos sistemas de lodos ativados.

3.3.5 Compostagem

Uma alternativa que vem mostrando benefícios, segundo Tsutiya e Hirata (2001), é a compostagem, ou seja, adição do lodo de ETA em compostos, utilizando os sistemas de leiras com restos vegetais, resíduos sólidos doméstico e bio-sólidos. Neste caso, observa-se um ajuste de pH e umidade, fornecimento de traços minerais e material de aumento do volume do composto.

De acordo com AWWA (1992), existem poucos documentos que se referem à utilização do lodo de água na compostagem, pois a maioria dos dados existentes envolvem lodo de esgoto. Alguns estudos já conduzidos com lodo de água e lodo de esgoto indicam que esta adição não altera a qualidade deste composto.

3.3.6 Fabricação de Cimento

Segundo Richter (2001), os principais componentes do cimento são encontrados também nos lodos de ETA (CaO , SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3), podendo assim, substituir a matéria-prima na fabricação do cimento, em determinadas proporções. Tsutiya e Hirata (2001), acreditam que esta substituição possa ocorrer na fase de pré-homogeneização das matérias - primas, no entanto, sua umidade deve ser de no máximo 50%.

3.3.7 Fabricação de Tijolo

Devido às características do lodo de ETA, Sartori e Nunes (1997), acreditam que este possa ser utilizado na fabricação de materiais cerâmicos, tais como: tijolo comum ou maciço, tijolo furado, telhas, manilhas de grês e, até mesmo, produtos de louças. Tsutiya e Hirata (2001), complementam essa afirmação dizendo que, como as características físicas e químicas do lodo de ETA são similares às características dos materiais utilizados na fabricação do tijolo, esta pode ser uma alternativa de disposição final adequada, além da quantidade de lodo utilizada poder diminuir significativamente a quantidade de matéria-prima na fabricação, aumentando assim, a vida útil das jazidas.

Em estudos realizados, Teixeira (2002), verificou que em geral a adição do lodo à massa cerâmica sempre piora suas propriedades, dependendo das características deste lodo, da concentração utilizada e da temperatura de queima, entretanto, as suas características permanecem dentro dos limites aceitáveis para tijolos. Ao contrário, no documento AWWA (1992), é demonstrado que a adição de lodo como ingrediente no processo de fabricação do tijolo não causa impacto adverso a estrutura do produto, porém em alguns casos o custo de secagem e transporte podem inviabilizar economicamente esta alternativa.

David et. al. (2002), realizaram ensaios de incorporação de lodo da ETA Cubatão na argila, em diferentes dosagens, para confecção de blocos cerâmicos pela mistura de lodo mais argila. Com estes estudos foi verificado que a incorporação deve ser feita caso a caso de modo a verificar a compatibilidade entre os materiais e os processos de fabricação envolvidos, a fim de se estabelecer as dosagens adequadas de incorporação.

3.3.8 Fabricação de Matriz de Concreto

Outra alternativa considerada por Cordeiro (2000), é a incorporação do lodo em matriz de concreto, pois não prejudica o meio ambiente e ainda pode trazer benefícios para estas estruturas.

Em estudos com lodo seco de ETA, substituindo parte do agregado miúdo na fabricação do concreto, Sales e Cordeiro (2001), observaram que por meio dos valores obtidos nos ensaios de resistência à compressão axial e absorção, o concreto com lodo de ETA pode ser utilizado em aplicações não-estruturais, alcançando os parâmetros exigidos ao desempenho mecânico e à durabilidade.

Cordeiro (2000), sugere as seguintes aplicações potenciais do concreto contendo lodo de ETA como: construção de contrapiso, argamassas para assentamento de componentes e confecção de blocos de concreto de uso não-estrutural, além de outras aplicações que não exijam resistências elevadas.

3.3.9 Outras Alternativas

Para a disposição de lodo de ETA podem ser consideradas também outras alternativas, como a utilização em substrato comercial substituindo alguns componentes. Neste caso pode-se observar, entre outros fatores, uma melhoria estrutural e aeração deste solo (TSUTIYA; HIRATA, 2001). Cordeiro (1993), também, sugere sua utilização como condicionante de solo para a germinação de sementes, sendo considerado um fator positivo a presença de teores de N e P, ao contrário das partículas que podem criar uma condição de retenção de água com necessidade de permanente irrigação, ou até mesmo a presença de alumínio que pode indisponibilizar o fósforo presente.

Segundo Sartori e Nunes (1997), de acordo com as características apresentadas pelo lodo de ETA, este pode ser utilizado na fabricação de solo-cimento, misturado com

areia ou outros solos. Devido a sua granulometria muito fina, poderia ser utilizado como pigmentação em argamassas, pastas e revestimento, ou ainda como aditivos, alterando as características iniciais de agregados.

Outra alternativa a ser utilizada são as lagoas, no entanto, estas podem contaminar o lençol freático, sendo obrigatório um monitoramento para detectar a degradação na qualidade da água subterrânea (AWWA, 1992). Cordeiro (1981), complementa que esta disposição em lagoas é considerada um dos métodos mais populares pela simplicidade na operação e manutenção, e recomendado para lugares com áreas baratas próximas as estações de pequeno porte.

Tsutiya e Hirata (2001), definem como uma opção para destino final do lodo o cultivo de grama comercial, a qual poderia ter aumentada sua aeração e a capacidade de retenção de líquidos no solo, além dos nutrientes adicionais às plantas. No entanto, deve-se tomar cuidado para que não haja acúmulo de metais no solo, excesso de umidade, bem como, na fase de crescimento, os sólidos presentes não cubram as folhas da planta interferindo na fotossíntese.

Outra alternativa considerada por Hikishima et. al. (2003), é a utilização do lodo de água em mistura com composto do lodo aeróbio de esgoto e material carbonáceo de podas de árvores, como substrato na produção de flores (*C. argentea* e *T. erecta*). Em estudos, os autores verificaram que os níveis de metais pesados presente no lodo não restringiram a sua utilização. Nesta alternativa, o lodo de água foi utilizado para aumentar a densidade e a umidade do composto de lodo de esgoto (CLE), e utilizou-se dosagens variando de 0% a 40%, observando-se que a dosagem mais promissora para o uso como substrato na produção de flores foi 70% de CLE e 30% de lodo de água.

A incineração pode ser considerada uma alternativa disponível, no entanto, esta possui custos elevados, além de resultar em cinzas, as quais necessitam de disposição final adequada (REALI, 1999).

Cordeiro (1981), acredita que a recuperação do sulfato de alumínio vem despertando grande interesse, pois esta alternativa, além de reduzir cerca de 80% do

volume do lodo, possui a vantagem de recuperar o alumínio. O sulfato de alumínio recuperado, poderá ser reutilizado na coagulação para remoção de fósforo em efluentes de tratamento de esgoto, principalmente, se contiver ferro e magnésio. Segundo Cordeiro (1993), este processo consiste, basicamente, na acidificação dos lodos com ácido sulfúrico (H_2SO_4), sendo um método bastante utilizado no Japão, onde 15 ETAs já o adotavam no final da década de 70. Ao contrário nos EUA, apenas em meados dos anos 80 três ETAs utilizavam esta recuperação.

Além destas, a aplicação em diversos tipos de indústrias está sendo bastante estudada, entretanto, Sabogal-Paz et. al. (2003), acreditam que estas aplicações irão depender das características do resíduo mas, principalmente, das características do material que se deseja produzir, sendo necessário, ainda, um estudo da viabilidade técnica, econômica e ambiental.

3.4 O CONCRETO E SUAS CARACTERISTICAS

Concreto é uma mistura de aglomerantes (cimento), agregados graúdos e miúdos com água, com aplicações em: estruturas, revestimentos, pavimentos, fundações, entre outras (Silva, 1991).

Segundo Neville (1997) uma das propriedades considerada mais importante na qualidade do concreto é a resistência, no entanto, em alguns casos práticos, a dureza e a permeabilidade podem ser mais interessantes. Estes ensaios podem ser feitos com diferentes finalidades, mas principalmente para o controle de qualidade e atendimento de especificações. Sobral (1997) complementa que esta qualidade irá depender da qualidade da pasta, a qual depende da relação água / cimento, tipo de cimento utilizado e tempo de execução da cura.

3.4.1 Resistência à Compressão

Resistência é a medida da tensão exigida para romper determinado material. Baseado nesta resistência, medida aos 28 dias, Mehta e Monteiro (1994) dividem o concreto em três categorias:

- concreto de baixa resistência: resistência à compressão menor que 20 MPa;
- concreto de resistência moderada: resistência à compressão entre 20 e 40 MPa (a mais utilizada em estruturas); e
- concreto de alta resistência: resistência à compressão superior a 40 MPa.

O teste de resistência à compressão é realizado aos 28 dias com ensaios adicionais aos 3 e aos 7 dias, é o teste mais comum para demonstrar a qualidade do concreto. Segundo Neville (1997), a maioria das características desejáveis do concreto estão relacionadas com a resistência.

Neste tipo de ensaio o corpo-de-prova (CP) é colocado centrado sobre o prato da máquina, e submetido à compressão entre 0,15 e 0,30 MPa/s até ruptura, anotando-se o valor da carga máxima (SCANDIUZZI; ANDRIOLO, 1986).

De acordo com ScandiuZZi e Andriolo (1986), esta resistência sofre aumento com a idade do concreto, presença de umidade, composição química e características do cimento e adensamento do concreto, além de ser altamente influenciada pela relação água / cimento (a/c) da mistura utilizada. Silva (1991) destaca a importância da relação água / cimento, pois a maioria dos defeitos relacionados à resistência do concreto são decorrentes do excesso de água presente.

Segundo Petrucci (1993), a influência dos agregados miúdos na resistência é devida à granulometria, sendo que o agregado graúdo influencia em função de sua forma e textura do grão. No caso dos agregados miúdos, quanto mais finos, mais superfícies específicas terão, exigindo assim uma maior quantidade de água para molhar os grãos e, conseqüentemente, diminuindo a resistência.

Helene e Terzian (1992) acreditam em duas resistências à compressão, a resistência real ou efetiva do concreto na obra, a qual é obtida em operações de execução da estrutura, e a resistência potencial de controle de concreto, a qual é obtida em operação de ensaios e controle. Esta última, possui, na mesma idade e condições, valores maiores que a resistência de concretos de estrutura (real), pois pode ser considerado como a máxima resistência à compressão que o concreto pode apresentar.

3.4.2 Resistência à Tração

Segundo Scandiuzzi e Andriolo (1986), a resistência à tração do concreto é geralmente obtida por esforços indiretos, no entanto, existe menção de algumas tentativas de desenvolvimento de metodologias para a medida direta no concreto. Estas tentativas ocorrem devido às dificuldades na determinação direta, ligadas ao baixo valor desta propriedade em relação à compressão dos CPs, gerando assim, um desenvolvimento de metodologias alternativas para essa propriedade, por meio da flexão em vigas ou tração indireta por compressão diametral de cilindros (Sobral, 1997).

3.4.2.1 Resistência à tração por compressão diametral

Neste tipo de resistência, os CPs, em formato cilíndrico, são submetidos a cargas de compressão ao longo de duas linhas axiais diretamente opostas, num intervalo de 0,7 a 1,4 MPa até a ruptura do CP (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

De acordo com Neville (1997), além de ser um ensaio mais simples de ser realizado do que a tração direta, gera resultados mais uniformes, cerca de 5 a 12% maiores que a tração direta. Scandiuzzi e Andriolo (1986), complementam que os fatores

que influem nestes ensaios são os mesmos que influem no ensaio de resistência à tração direta.

3.4.2.2 Resistência à tração por flexão

Segundo Scandiuzzi e Andriolo (1986), é a propriedade que, um material ou peça, indica a sua capacidade de resistir à ruptura por flexão. Neste ensaio, de acordo com Neville (1997), um prisma de concreto é submetido à flexão com carregamento simétrico em dois pontos até a ruptura. Para sua determinação, uma viga é carregada nos terços do CP com velocidade de 0,8 a 1,2 MPa / min. Devido a esta distribuição da carga de 1/3 do vão, este ensaio é qualificado, também, como “carregamento no terço”.

Sobral (1997) afirma que os valores obtidos nesta resistência à tração por flexão são, geralmente, maiores que os obtidos pela tração por compressão diametral.

3.4.3 Módulo de Deformação Estática

Módulo de deformação é a relação entre a tensão normal para a correspondente deformação abaixo do limite de proporcionalidade (SCANDIUZZI; ANDRIOLO, 1986), ou seja, é dada pela declividade da curva $\sigma - \varepsilon$ (tensão – deformação) para concreto sob carregamento uniaxial, como observada na Figura 01. Segundo Mehta e Monteiro (1994), são utilizados três métodos para seu cálculo, já que esta curva para o concreto é não-linear:

- módulo tangente;
- módulo secante; e
- módulo corda.

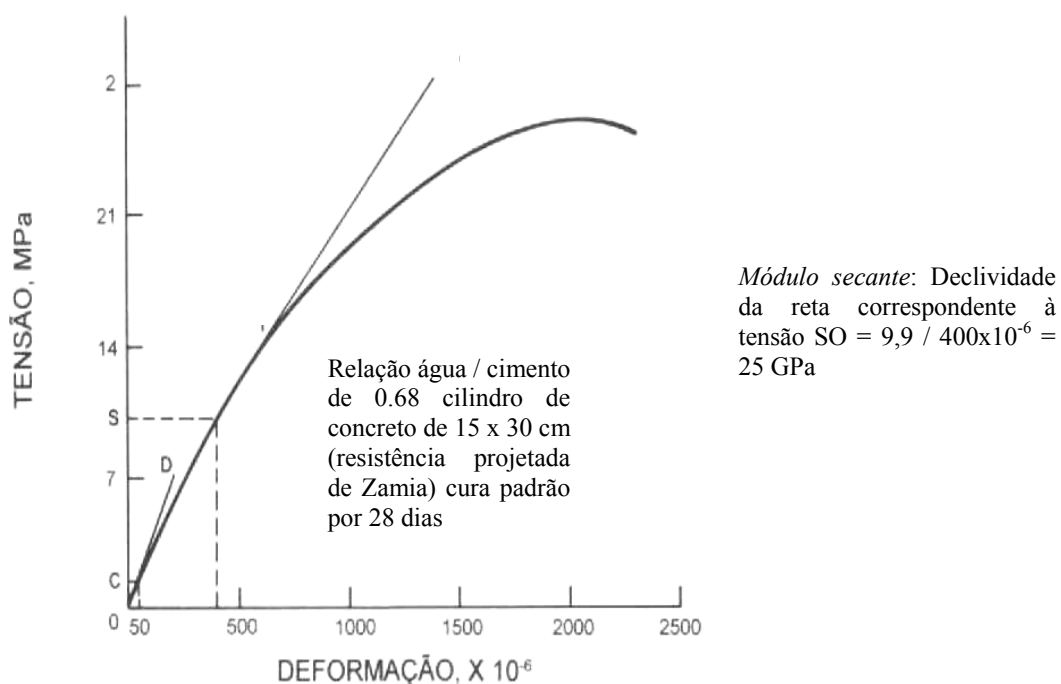


FIGURA 01 - CURVA TENSÃO – DEFORMAÇÃO ($\sigma - \epsilon$), PARA MÓDULO DE DEFORMAÇÃO ESTÁTICA SECANTE.
 FONTE: MEHTA e MONTEIRO (1994)

Petrucci (1993) acredita que o concreto traz problemas diferentes como material de construção, por isso a necessidade da utilização de módulo de deformação do concreto sob diferentes definições.

O módulo secante, mais comumente utilizado, é dado pela declividade de uma reta traçada da origem a um ponto da curva correspondente a 40% da tensão da carga de ruptura (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Scandiuzzi e Andriolo (1986) complementam que o módulo secante é considerado como a diferença das tensões pela diferença dos alongamentos correspondentes a dois pontos deste diagrama tensão – deformação. Petrucci (1993) complementa com a definição de que o módulo tangente é o coeficiente angular da tangente geométrica no ponto considerado, e o módulo obtido nas linhas de carga e descarga no diagrama tensão – deformação é considerado módulo corda.

No concreto, tanto o módulo de deformação como a resistência são afetados pela porosidade das fases constituintes, no entanto, não no mesmo grau, gerando, uma relação direta entre ambos. Na Figura 02, são demonstrados os parâmetros que influenciam este módulo de deformação do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

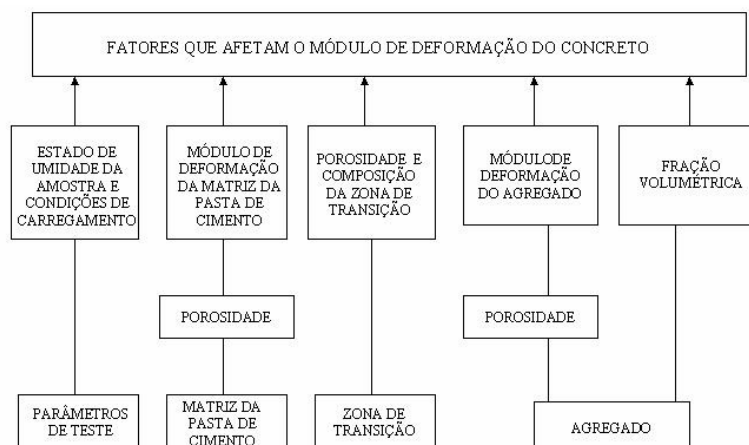


FIGURA 02 - PARÂMETROS DE INFLUÊNCIA NO MÓDULO DE DEFORMAÇÃO.
 FONTE: MEHTA e MONTEIRO (1994)

Silva (1991) complementa que os fatores que influenciam neste módulo de deformação são proporções de mistura (o módulo é maior quanto maior for a quantidade de agregados), massa específica do agregado e temperatura inicial de cura, etc.

3.4.4 Permeabilidade

Permeabilidade é a propriedade que indica a facilidade à passagem de água através de seus vazios, conseqüente de uma diferença de pressão hidrostática entre dois pontos, sendo expressa por meio do coeficiente de permeabilidade (k) em cm/s (SCANDIUZZI; ANDRIOLO, 1986). Silva (1991) complementa que esta passagem da água é decorrente da filtração, pressão, difusão através dos condutos capilares e capilaridade.

Segundo Mehta e Monteiro (1994), é esta propriedade que governa a taxa de fluxo viscoso de um fluido para o interior de um sólido poroso, dependendo das proporções da mistura, compactação e cura, bem como, as microfissuras causadas pelos ciclos normais de temperatura e umidade. Neville (1997) complementa que a permeabilidade não depende apenas da porosidade, mas também das dimensões, distribuição, forma, tortuosidade e continuidade dos poros (poros comunicantes e não comunicantes).

A permeabilidade torna-se a principal propriedade do concreto, que exposto ao ar, pode sofrer ataques de águas agressivas ou ação destrutiva dos agentes atmosféricos (TARTUCE; GIOVANNETTI, 1990).

De acordo com Sobral (1997), quando se analisa um concreto quanto a permeabilidade deve-se considerar não somente a pasta de cimento, mas também, os vazios presentes no concreto oriundos de defeitos de compactação, que podem ocupar de 1% a 10% do volume deste concreto.

Para medição da permeabilidade é necessário fazer agir sob pressão um líquido, na superfície do CP, recolhendo-se em tempos determinados a água que atravessa essa massa de concreto (PETRUCCI, 1993). De acordo com Scandiuzzi e Andriolo (1986), este teste consiste basicamente em forçar a penetração de água no CP, por meio da pressão específica (2,55 MPa com variação máxima de 0,07 MPa) por, aproximadamente, 500 horas, medindo-se o volume de água percolada pelo concreto.

Resistência e permeabilidade são influenciadas pelos mesmos fatores, pois ambas estão relacionadas à porosidade capilar (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Além desta porosidade, Silva (1991) cita como fatores que afetam a permeabilidade: materiais constituintes como água, cimento, agregados e aditivos, métodos de preparação, mistura, adensamento e acabamento, idade e cura do concreto e condições do ensaio.

Neville (1997) afirma que o coeficiente de permeabilidade decresce com o aumento da relação água / cimento, e este é importante na estanqueidade da água em estruturas para contenção de líquidos e outras estruturas, como por exemplo, com problemas de pressão hidrostática no interior de barragens. A composição da pasta de

cimento e seu grau de hidratação (idade de concreto) são considerados, segundo Scandiuzzi e Andriolo (1986) os fatores mais importantes na permeabilidade e absorção do concreto.

3.4.5 Durabilidade

Scandiuzzi e Andriolo (1986), definem durabilidade como a “capacidade de um material resistir à ação de intempéries, ataques químicos, abrasão e outras condições de deterioração durante a sua vida útil”. Para Neville (1997), um concreto durável, é aquele que suporta determinado processo de deterioração ao qual pode vir a ser submetido.

Segundo Mehta e Monteiro (1994), os concretos que apresentam durabilidade a longo prazo são densos ou impermeáveis, conservando sua forma original, qualidade, capacidade de utilização, microestrutura e propriedades dos materiais quando exposto a interações ambientais. Neste caso, a água é considerada o fator central para a maioria dos problemas de durabilidade.

Silva (1991) afirma que para a durabilidade ser maior, é necessário o menor volume de vazios no interior da massa, diminuindo assim a permeabilidade e dificultando a penetração de substâncias agressivas.

A deterioração do concreto pode ser originada no próprio interior do concreto ou por formas de ação físicas, químicas ou mecânicas (NEVILLE, 1997):

- físicas: aumento de temperatura ou diferença de dilatação térmica do agregado e pasta de cimento hidratada;
- químicas: reações álcali-silica e álcali carbonato, além de ataque de íons agressivos como cloretos, sulfatos, dióxidos de carbono ou líquidos e gases industriais; e
- mecânicas: impactos, abrasão, erosão e cavitação.

Scandiuzzi e Andriolo (1986), acreditam que substâncias como ácido sulfúrico, nítrico, fluorídrico, acético, láctico e alguns sais inorgânicos como cloritos, sulfatos de alumínio, cálcio, amônia podem produzir ataques de deterioração ao concreto, complementando, que a água do mar pode ser causadora de deteriorações químicas ou físicas ou até mesmo, a ação conjunta destes dois processos. Outros fatores que segundo os autores, influenciam na durabilidade do concreto são:

- características dos materiais componentes do concreto (agregados e aglomerantes);
- propriedades do concreto endurecido;
- condições de exposição;
- cargas impostas à estrutura;
- práticas usadas durante sua construção; e
- projeto estrutural.

3.5 OUTRAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO – QUÍMICAS DO MATERIAL

Para a caracterização dos materiais trabalhados, desde os insumos até o produto final, que é o concreto contendo quantidades determinadas de lodo, foram utilizadas, também outras técnicas analíticas. Dentre estas destacam-se aquelas para a identificação e quantificação das fases e elementos químicos presentes, tais como, a difração e a fluorescência de raios – X; a espectroscopia de raios – X, acoplada à microscopia eletrônica de varredura, também utilizada na verificação micrográfica da superfície de fratura do CP e, finalmente, além de outras técnicas analíticas já descritas, as análises térmicas.

A análise térmica pode ser definida como a medida de propriedades físicas e químicas de materiais em função da temperatura, portanto, para conhecer o comportamento dos materiais a diferentes temperaturas podem ser utilizadas diferentes

técnicas, entre elas: análise termogravimétrica (TG) e análise térmica diferencial (DTA) (Brown, 1988). Ainda segundo o autor, o resultado desta medida é uma curva, aonde as suas características (picos, descontinuidade, mudanças de inclinação, etc.) são relatadas como eventos térmicos desta amostra.

A análise termogravimétrica (TG) identifica perdas ou ganho de massa e pode ser considerada como a técnica utilizada para medir a variação do peso de uma substância em função da temperatura ou tempo. Esta análise tem sua aplicação em decomposição e processos de oxidação (Brown, 1988).

Segundo Siqueira (1988) a análise térmica diferencial (DTA) pode ser considerada como um monitoramento da diferença de temperatura entre dois corpos ao longo do tempo, identificando trocas de calor associadas a transformações de reações ou transformações de fase. Nestes corpos um será a referência e o outro a substância a ser analisada, estando estes, sujeitos às mesmas condições de aquecimento ou resfriamento. Brown (1988) complementa afirmando que este tipo de análise térmica é a mais simples, além de ser a mais extensamente utilizada.

Outra análise realizada foi a de durabilidade da estrutura de concreto, que pode ser entendida como a sua vida útil quando esta é submetida a determinadas condições ambientais e solicitações externas. É de difícil determinação, devido à quantidade de variáveis a serem consideradas. Em épocas anteriores, acreditava-se que estava correlacionada à resistência mecânica, ou seja, estruturas com boa resistência mecânica, teriam vida útil mais longa. Sabe-se, atualmente (MEHTA; MONTEIRO, 1994), que estruturas de concreto armado têm sua vida útil reduzida em função, principalmente, da sua alta permeabilidade e facilidade de difusão iônica no seu volume. Assim, devem ser considerados os defeitos internos à estrutura, tais como trincas e vazios, os poros abertos ou comunicantes, e as condições de serviço (pressões hidráulicas, temperatura, gases industriais, águas de despejo, etc.).

Uma maneira de medir a durabilidade da estrutura em análise, e que foi adotada nesse trabalho, é a partir da medida das propriedades elétricas, exclusivamente, a

determinação do potencial de corrosão das barras metálicas da armadura, em função do tempo e do meio agressivo, por espectroscopia de impedância eletroquímica.

A corrosão pode ser definida como a interação destrutiva ou a que implique inutilização para uso, de um material com o ambiente, seja por reação química, ou por eletroquímica. Já, potencial de corrosão é uma diferença de potencial que ocorre em um determinado metal e um meio aquoso, através da dupla camada elétrica resultante de um estado estacionário que se estabelece.

O potencial de corrosão da armadura de aço em concreto é, hoje, a maior preocupação da área da construção civil, já que, sob corrosão, o metal de origem acaba perdendo suas propriedades, principalmente mecânicas, ao longo da formação dos seus óxidos.

No caso da armadura de concreto, os processos corrosivos levam à formação de micro ou macropilhas ao longo da superfície do aço. Nas macropilhas, o potencial de corrosão pode ser determinado ou no ânodo ou no cátodo, separadamente. Nas micropilhas, o potencial de corrosão na verdade é um potencial misto, no qual o potencial do ânodo afeta o do cátodo e vice-versa. Sendo assim, esses potenciais de corrosão dos metais no concreto são parâmetros termodinâmicos que dependem de inúmeras variáveis: umidade, tipo de cimento, aditivos, idade, etc. (CASCUDO, 1997).

O potencial de corrosão é uma técnica que vem sendo empregada na avaliação do estado quanto a corrosão das armaduras de concreto. Segundo Cascudo (1997), a técnica consiste na medida dos potenciais em corpos-de-prova com barras metálicas ou nas estruturas de concreto, e seu posterior registro. Para tanto é necessário um eletrodo de referência em relação ao qual os potenciais são tomados. A magnitude desses potenciais dá indício do risco de corrosão, sejam eles por valores de potenciais muito negativos (corrosão avançada) ou potenciais muito positivos (ausência de corrosão).

Os valores de potenciais podem ser associados à probabilidade de corrosão segundo os critérios propostos pela ASTM C 876, na qual se apresentam situações com relação ao eletrodo de cobre – sulfato de cobre (ESC). Estes valores podem ser

convertidos para determinar os valores de referência para a probabilidade de corrosão, em relação ao eletrodo de calomelano saturado (ECS), conforme Tabela 07.

TABELA 07 - PROBABILIDADE DE CORROSÃO EM FUNÇÃO DO POTENCIAL

Potencial de corrosão relativo ao eletrodo de referência de cobre-sulfato de cobre – ESC (mV) – de acordo com ASTM C 876	Potencial de corrosão relativo ao eletrodo de referência de calomelano saturado – ECS (V)	Probabilidade de corrosão (%)
Mais negativo que -400	Mais negativo que -0,275	90
Mais positivo que -332	Mais positivo que -0,125	10
Entre -400 e -332	Entre -0,275 e -0,125	Atividade incerta

Para efeitos práticos, considera-se que em valores de potencial maior que -0,125V, a chance de ocorrer corrosão é muito pequena, praticamente nula, com o metal encontrando-se num estado passivo (presença de camada de óxido protetora). Para potenciais menores que -0,275 V, certamente existe uma atividade corrosiva nas armaduras do concreto. Já, para potenciais intermediários a estes valores (-0,275 V e -0,125V), nada se pode afirmar quanto a corrosão, pois a armadura tanto pode apresentar recuperação da sua camada como avançar para a corrosão ativa.

3.6 RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL

3.6.1 Benefícios Ambientais da Reciclagem

Reciclagem é o conjunto de atividades que torna possível o reaproveitamento ou utilização dos resíduos sólidos que são considerados lixo. Este processo inicia-se com a separação na origem da formação dos mesmos, coleta seletiva, triagem, tratamento, disposição ou reutilização (VALLE, 2000).

Segundo Leite (2001), a reciclagem de resíduos pode ser uma alternativa viável para controlar e / ou minimizar os danos causados pelo consumo das matérias-primas e

energia. Neste caso, a utilização de resíduos de outras indústrias ou da própria construção civil tem se mostrado como um setor promissor da absorção destes novos materiais dentro da construção civil. A viabilidade econômica desta alternativa de acordo com John (2003), deve ser avaliada quanto ao valor de mercado do produto, além do custo do processo de reciclagem e os custos da disposição deste resíduo em aterro.

A reciclagem na construção civil vem se consolidando como uma prática sustentável, pois além de atenuar os riscos de impactos ambientais, reduz os custos necessários para produção no setor (ÂNGULO; ZORDAN; JOHN, 2001). John (2003) complementa que esta reciclagem pode ser uma oportunidade de transformar uma fonte importante de despesas para uma fonte de faturamento, ou pelo menos, de redução de despesas da disposição final.

De acordo com John (2000), a reciclagem de resíduos na construção civil pode também resultar na oferta de uma maior quantidade de produtos alternativos, além de soluções mais adequadas para situações específicas, com ganho de eficiência no processo.

Ângulo, Zordan e John (2001) citam como exemplo de produtos reciclados para a construção civil, os resíduos derivados do saneamento urbano, ou seja, escória de incineração de lixo urbano domiciliar e lixo hospitalar e lodo de esgoto, o qual segundo os autores deve apresentar um crescimento acentuado na sua produção no futuro próximo.

Segundo Sales e Cordeiro (2001) a reciclagem na construção civil pode gerar economia de recursos, transporte e disposição, tornando-se um fator de incentivo ao aproveitamento de resíduos que antes não tinham destino final adequado. Ângulo, Zordan e John (2001) citam como outros benefícios da reciclagem:

- redução no consumo de recursos naturais não renováveis;
- redução de área necessária para aterro, devido a minimização do volume dos resíduos;
- redução do consumo de energia durante o processo de produção; e
- redução da poluição.

São sugeridas como metodologias para orientar as atividades de pesquisa e desenvolvimento de reciclagem de resíduos, como materiais de construção civil, as seguintes etapas (Ângulo, Zordan e John, 2001):

- identificação e quantificação de resíduos disponíveis;
- caracterização dos resíduos por meio de análises química e físicas, microestrutural, e ambiental;
- seleção das aplicações a serem desenvolvidas de acordo com as características físico-químicas;
- análise de desempenho e durabilidade do produto;
- desenvolvimento do produto; e
- transferência de tecnologia;

John (2000) afirma ainda que as aplicações mais adequadas para a reciclagem, são aquelas que além de minimizar a necessidade de separação, classificação e transformação industrial do produto, minimizem o risco de lixiviação ou volatilização de eventuais materiais e resultem em um produto reciclável e com vantagem competitiva sobre os já existentes no mercado.

3.6.2 A Experiência da Reciclagem na Construção Civil

Em pesquisa realizada por Prim et. al. (1998) por meio da incorporação de lodo da indústria têxtil com cimento e também esta mistura acrescida de cinza pesada (proveniente de indústria termelétrica), afirmam que esta incorporação pode ser uma forma de valorização do resíduo. Nestes estudos, os autores obtiveram resistências em torno de 30 MPa para concretos com 30% do lodo e 20 MPa para 20% de cinza pesada e os mesmos 30% de lodo, sendo considerados valores interessantes para a construção civil, do ponto de vista mecânico.

Geyer et. al. (1998), também realizaram estudos com a incorporação de lodos em concreto, utilizando o lodo da Estação de Tratamento de Esgoto da cidade de Porto Alegre em substituição ao cimento. Neste caso, pode-se observar que a resistência decresceu a medida que o lodo foi acrescentado, como mostra a Figura 03. Os teores até 10%, não afetaram o desempenho final do concreto, no entanto, mesmo apesar de os teores até 20% terem reduzido esta resistência em até 40%, não foi inviabilizado seu uso.

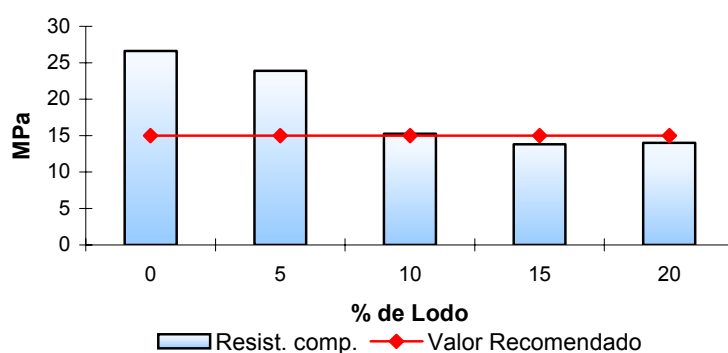


FIGURA 03 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO AOS 28 DIAS X % DE LODO DE ETE EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL AO CIMENTO

Zordan (1997), avaliou a utilização de entulho da construção civil como agregado (graúdo e miúdo) na confecção de concreto, com traços de 1:3, 1:5 e 1:7 (cimento: agregado). O autor observou que a resistência à compressão simples aos 28 dias representou em média 63% da resistência obtida pelo concreto referência (agregados naturais: areia e brita), com a parte graúda do entulho implicando em aspectos negativos a resistência devido a materiais cerâmicos presentes neste. Em análise conjunta dos resultados obtidos nos testes de resistência à compressão, abrasão e permeabilidade, os concretos produzidos atenderam às exigências de fabricação de peças utilizadas em drenagem superficial de estradas; guias e blocos para calçamento e blocos de concreto sem função estrutural. O autor considera neste estudo, também, os benefícios ao meio ambiente, pois esta utilização diminui a produção de resíduos de construção civil que degradam o meio ambiente.

Em estudo semelhante Leite (2001) também substituiu agregados naturais por material reciclado de resíduos de construção e demolição, verificando as propriedades do concreto fresco e endurecido, com diferentes teores e diferentes relações água/cimento (0,40; 0,45; 0,60; 0,75 e 0,80). Observou que os agregados graúdos reciclados exercem forte influência no concreto, determinando que a massa específica ficou menor que do concreto referência (agregado natural). Verificou, também, que, com o aumento da relação água / cimento (a/c), houve uma redução na resistência à tração de 26% na flexão e 42% na compressão diametral. A análise da microestrutura evidenciou a melhoria da zona de transição pasta / agregado do concreto reciclado, aumentando este entrelaçamento. O autor concluiu que do ponto de vista mecânico é viável o uso de agregado reciclado em substituição aos naturais na produção de concreto, destacando que o uso combinado de agregado graúdo e miúdo reciclado podem ser prejudiciais apenas com baixas relações de a/c.

Collignarelli e Sorlini (2002) concordam com os estudos anteriores, afirmando que o uso de resíduos como agregado reciclado no concreto pode ser interessante também na redução de consumo de agregados naturais. Em estudos que avaliaram a substituição de 11% e 22% do agregado natural por cinzas de resíduos sólidos municipais, verificaram que a utilização de cinzas diminuíram a resistência à compressão, no entanto, todas as misturas obtiveram valores acima da exigência de 15 MPa após os 28 dias. As outras características mecânicas (resistência à flexão, resistência à tração, módulo de elasticidade e contração), apresentaram comportamentos similares com o concreto com agregado reciclado ficando cerca de 40 a 50% abaixo dos valores alcançados pelo concreto com agregado natural. Esses resultados demonstram que o concreto com as cinzas do resíduo sólido municipal pode ser uma alternativa viável para diferentes aplicações na construção civil.

Cenni et. al. (2001) criticam estas aplicações, pois de acordo com os autores não existe uma regulamentação que analise a composição química e mobilidade de metais dos resíduos incorporados na construção civil. Estas características são comparadas com a

regulamentação europeia relativa às cinzas de carvão na indústria da construção civil, onde não são levados em conta, alguns elementos usualmente presentes em baixa concentração no carvão, mas que podem ser abundantes em combustões, como por exemplo o fósforo no lodo de esgoto. Devido a essas ausências na regulamentação, o autor desconsidera o uso de cinzas da combustão de lodo de esgoto e carvão como aditivo no cimento, pois pode causar uma possível presença de contaminantes.

Em outro exemplo de aplicação na construção civil, Nuvolari (2002) verificou a inertização do lodo de esgoto em tijolos cerâmicos, neste caso utilizando lodo de decantador primário e lodo de reator anaeróbico de fluxo ascendente (RAFA), ambos secos a 105 °C, e também cinzas destes lodos com queima à 900 °C. O autor verificou que as misturas de lodo seco a 105 °C na massa cerâmica só podem ser utilizada até 10%, pois as demais misturas apresentaram resistência abaixo de norma. No caso das cinzas, esta poderia ser usada até 40% de acordo com testes de lixiviação, os quais não apresentaram elementos potencialmente tóxicos acima do permitido pela norma NBR 10.004. Já, segundo os testes de solubilização, o autor classifica os resíduos de tijolo como resíduo não inerte devido ao alto índice de metais e elementos potencialmente tóxicos, que não poderiam ser dispostos em aterros sanitários classe 3.

Em substituição de parte do agregado miúdo por lodo de ETA e entulho de construção civil, na fabricação de concreto, Cordeiro (2000) verificou por meio de testes na argamassa que o traço com 5% de lodo é que apresentou maior possibilidade de aplicação na construção civil. O traço de 50% de lodo não apresentou resistência mínima e uma absorção muito acima da recomendada. No estudo que analisou resistência à compressão do concreto com lodo e agregado natural e lodo e agregado reciclado (entulho de construção), a massa com adição de 3% de lodo, foi a que apresentou os melhores resultados se comparados com o concreto referência (sem adição do lodo e agregado natural), podendo ser indicado para uso na construção civil. Outra verificação realizada pelo autor, é a não interferência da origem do lodo nas propriedades do concreto, uma vez que foram utilizados lodo de três diferentes estações da região de São Carlos / SP.

Sales e Cordeiro (2001) acreditam que unir os resíduos do tratamento de água e da construção civil, pode ser uma forma de minimização de impactos ambientais. De acordo com isto, os autores estudaram a viabilidade técnica na imobilização de resíduos de ETA, após secagem e destorroamento, em matriz de argamassa e concreto em conjunto com agregados reciclados de entulho da construção civil. A resistência à compressão axial e absorção nos traços estudados, possibilitavam a utilização deste concreto em aplicações não estruturais, permitindo o atendimento de requisitos mínimos inerentes ao desempenho mecânico, no entanto, devem ser investigadas, ainda, a permeabilidade e a espectroscopia de impedância eletroquímica, que permitem avaliar a durabilidade em relação à corrosão.

4. METODOLOGIA

O trabalho foi constituído basicamente de três etapas, nas quais primeiramente ocorreu a caracterização das matérias - primas (areia, pedra brita 01 e lodo de ETA) utilizadas na fabricação do concreto. Posteriormente ocorreu o estudo de dosagem com cinco teores do lodo em relação com o peso seco da areia, no qual foram verificados, através da resistência à compressão, duas melhores dosagens. Esses concretos das duas melhores dosagens sofreram uma caracterização por meio de resistências mecânicas, permeabilidade e durabilidade.

4.1 ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA PASSAÚNA

O Sistema de Tratamento de Água Passaúna foi projetado de forma modular, com cada módulo possuindo quatro decantadores, seis filtros e um floculador hidráulico. Estes módulos assim formados têm capacidade de tratar 600 L/s, sendo a capacidade total de tratamento de ETA de 2.400 L/s.

Na ETA Passaúna, após a captação, a água sofre adição de sulfato de alumínio passando pelo tanque de coagulação com agitação rápida e, posteriormente, pela floculação com agitação lenta. Após este tanque a água segue para o decantador onde as partículas sólidas sofrem decantação e a água clarificada passa para a fase de filtração. Depois de filtrada esta água segue para a câmara de contato com a adição de flúor, determinado pelo Ministério da Saúde para prevenção de cáries, e fosfato, que tem a finalidade de impedir a formação da água vermelha ou preta e a incrustação das redes de ferro. Em seguida, a água é distribuída para a população.

A água de lavagem dos filtros (24 unidades) é recolhida em um reservatório de 300 m³ dotado de um agitador submersível para manter o lodo em suspensão. Essa lavagem é realizada uma vez por dia em cada filtro durante uma hora, totalizando 24

horas. O objetivo deste reservatório é equalizar a vazão de água de lavagem, retornando a água para a chegada de água bruta reiniciando no processo de tratamento.

Como os decantadores trabalham com altas taxas e possuem fluxo vertical, faz-se necessárias purgas de lodo para evitar-se que o mesmo venha a concentrar-se sob as placas. Este lodo é acumulado em um reservatório de 500 m³. A partir deste reservatório bombas de deslocamento positivo encaminham a suspensão de lodo até a unidade de adensamento, no qual a água clarificada é recolhida por um canal circular, sendo encaminhada para o reservatório de 300 m³ que recebe a água dos filtros retornando posteriormente para o processo de tratamento.

O lodo adensado é, então, succionado por bombas de cavidade progressiva passando para centrífuga tipo “decanter”. Para melhorar a eficiência desta centrífuga são aplicados 0,20 g/L de polímero aniônico forte, por meio de bombas dosadoras na entrada desta.

A fração líquida (clarificado), é encaminhada por gravidade ao reservatório de 300 m³ retornando ao processo. A fração mais seca (lodo seco) proveniente do “decanter” centrífugo é encaminhada para caçambas de coleta de lodo e, posteriormente, sofre destinação final adequada. Atualmente, estão sendo produzidas cerca de 12 toneladas / dia de lodo com, aproximadamente, 85% de umidade (1,8 ton. Matéria Seca/dia), o qual é transportado para olarias e disposto em tijolos durante seu processo de fabricação.

Na Figura 04, pode ser observado este esquema de funcionamento da Estação de Tratamento de Água Passaúna.

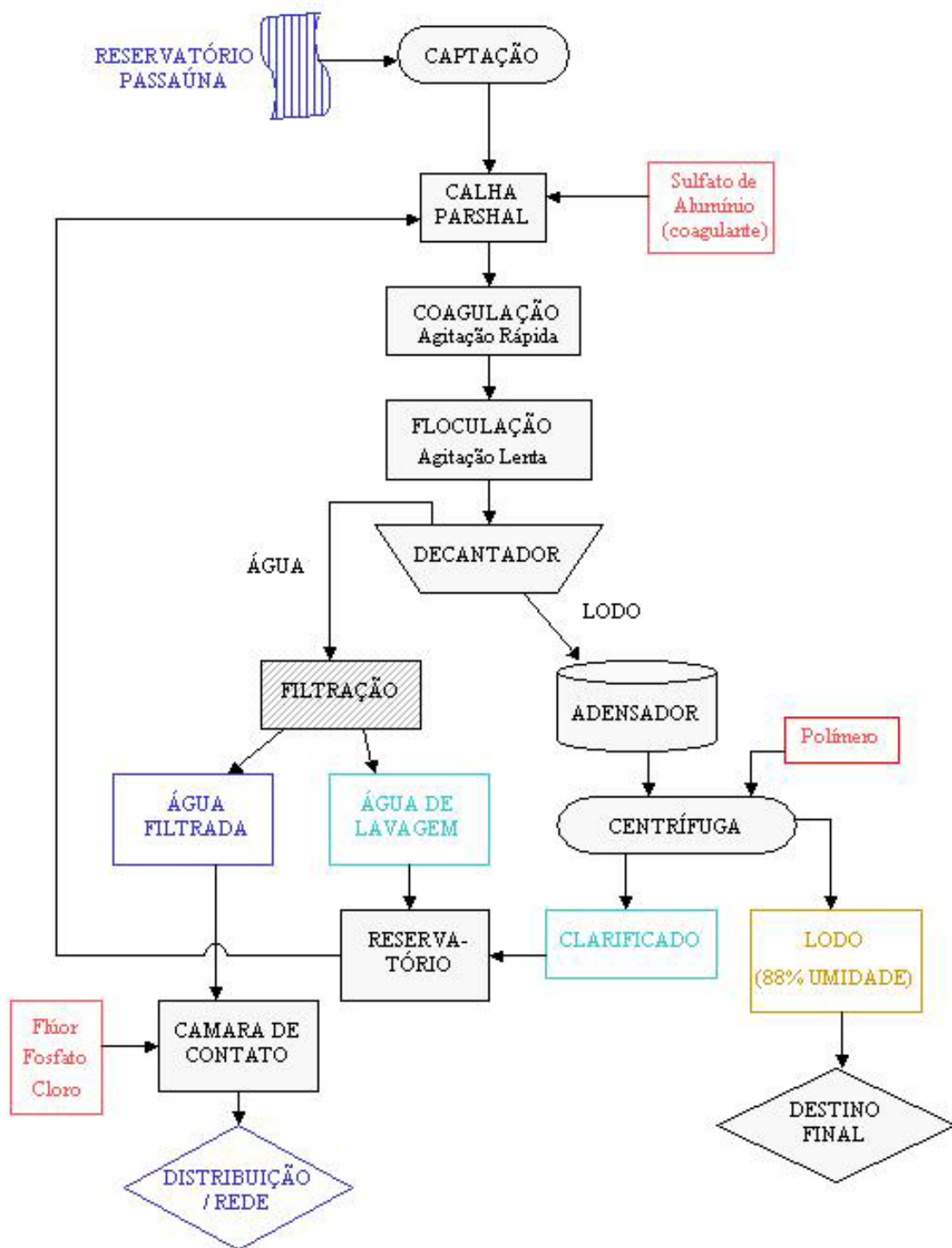


FIGURA 04 - FLUXOGRAMA DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA PASSAÚNA

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO LODO DA ETA PASSAÚNA

A caracterização do lodo da ETA Passaúna foi realizada de forma a obter um material representativo do resíduo gerado na estação. Para esta caracterização ocorreram coletas semanais durante os meses de janeiro e fevereiro de 2003, sendo estas realizadas nos dias 14, 21 e 28 de janeiro e 04 de fevereiro. Esta coleta se deu logo após a centrifuga já com a aplicação do polímero, ou seja, o lodo coletado foi previamente desaguado.

Antes de qualquer ensaio com o lodo ou mesmo a sua utilização em concreto, procedeu-se a homogeneização das 4 coletas por meio de mistura manual, formando assim uma única amostra composta, com a finalidade de avaliar a sua composição físico-química.

A caracterização do lodo ocorreu por meio das análises de umidade, densidade, de perda ao fogo, análise química por fluorescência e difração de raios-X (DRX).

4.2.1 Umidade

Para determinação da umidade, utilizou-se apenas uma pequena quantidade deste lodo homogeneizado. Primeiramente, pesou-se o cadinho vazio, anotando seu peso, depois o cadinho contendo uma certa quantidade de lodo. Após esta pesagem, este cadinho com o lodo foi colocado em estufa para que houvesse a secagem do material a uma temperatura média de 110 °C por, aproximadamente, 48 horas ou peso constante.

Depois da secagem, o cadinho com o material foi pesado novamente e anotado seu valor para posterior cálculo da umidade pela equação (1):

$$\frac{P_u - P_s}{P_u - P_c} * 100 = \% \text{ Umidade} \quad (\text{eq. 1})$$

Onde:

P_c = peso do cadinho;

P_u = peso do cadinho + lodo úmido; e

P_s = peso do cadinho + lodo seco após 48 horas.

Para este teste de umidade foram realizadas 3 repetições, obtendo-se assim uma umidade média do lodo (adaptado de Standard Methods, 1993).

4.2.2 Massa Específica

No ensaio de massa específica, primeiramente, apanhou-se um recipiente de volume conhecido (V). Neste recipiente, foi colocada determinada quantidade de lodo até atingir a marca do volume. Este foi pesado e descontado o peso do recipiente, obtendo-se assim o peso do lodo (P).

Para a determinação da massa específica, ρ , deste lodo, ocorreu a divisão do peso, P, do lodo pelo volume, V, do recipiente ($\rho = P / V$). Neste ensaio também foram realizadas 3 repetições com determinação de uma densidade média.

4.2.3 Análise de Perda ao Fogo

Para esta análise, utilizou-se cerca de 0,15 gramas de lodo seco em estufa com uma temperatura média de 110 °C durante 24 horas.

Na análise de perda ao fogo foi utilizado um equipamento de análise térmica marca Netzsch modelo STA 409 C, em cadinho de platina aberto sob atmosfera de O₂ e N₂, e taxa de aquecimento do forno de 10 °C por minuto até temperatura de 1.500 °C.

4.2.4 Análise Química por Fluorescência de Raios - X

Para análise química foram necessárias cerca de 1 grama da amostra de lodo seco, com o qual foram confeccionadas pastilhas prensadas e analisadas pela fluorescência de raios-X no aparelho Philips PW 2400, visando fornecer informações, qualitativas e quantitativas, sobre a composição química do material.

4.2.5 Difração de Raios-X (DRX)

Para a análise por DRX, foram utilizadas amostras de lodo após secagem em estufa a 110 °C por 12 horas e amostras de lodo calcinadas à temperatura de 1000 °C por, aproximadamente, 3 horas. Estas amostras foram analisadas em equipamento Philips modelo X'Pert, utilizando radiação Cu K α , $\lambda = 1,54184 \text{ \AA}$; tensão = 40 kV; corrente = 40 mA; varredura $2\theta = 5$ a 90° ; tamanho do passo = 0,020; tempo do passo = 1,00 s; e velocidade de varredura = 0,020 °/s.

Os difratogramas obtidos nesta análise com a amostra do lodo calcinado exibiram picos de difração, os quais foram identificados pela comparação com fichas de padrões do International Centre for Diffraction Data (ICDD).

4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

A caracterização dos agregados e aglomerantes foi determinada com o objetivo de controlar e balizar o estudo de dosagem e análises posteriores pertinentes aos concretos produzidos.

4.3.1 Agregados

Com o intuito de caracterizar fisicamente os agregados (miúdo e graúdo) foram realizados diversos ensaios e análises de forma a se obter os parâmetros necessários para a estipulação dos traços de concreto e sua confecção.

Os agregados utilizados na confecção dos concretos são originários da região de Curitiba e constituídos de areia natural média lavada (agregado miúdo) e pedra britada nº 1 com dimensão máxima característica de 19 mm (agregado graúdo).

Para esta caracterização foram realizadas as análises químicas por meio da técnica de fluorescência de raios-X, além das análises apresentadas na Tabela 08.

TABELA 08 - ENSAIOS REALIZADOS NOS AGREGADOS GRAÚDOS E MIÚDOS.

Ensaios realizados	Referência
Agregado miúdo (areia)	
Granulometria, $D_{máx}$ e módulo de finura	NBR 7217/87
Teor de argila em torrões	NBR 7218/87
Material pulverulento	NBR 7219/87
Massa unitária solta	NBR 7251/82
Massa específica seca e SSS	NBR 9776/87
Absorção de água	NBR NM 30/01
Impurezas orgânicas	NBR NM 49/01
Agregado graúdo (brita 1)	
Granulometria, $D_{máx}$ e módulo de finura	NBR 7217/87
Material pulverulento	NBR 7219/87
Massa unitária solta	NBR 7251/82
Massa unitária compactada	NBR 7810/83
Absorção, massa específica seca e SSS	NBR 9937/87

4.3.2 Aglomerante

A caracterização do aglomerante teve como objetivo a identificação e determinação quantitativa dos principais compostos químicos presentes. Esta caracterização foi realizada por meio de análises físico-químicas e ensaios mecânicos.

Para a confecção dos concretos, utilizou-se o cimento Portland CII-F 32 (composto com adição de filler, com resistência característica mínima de 32 MPa aos 28 dias), pois é o cimento mais comumente encontrado no mercado de materiais de construção em Curitiba.

Na Tabela 09 são demonstrados os ensaios realizados para este aglomerante.

TABELA 09 - ENSAIOS REALIZADOS NO AGLOMERANTE (CIMENTO CII-F 32).

Ensaio realizado	Referência
Ensaio químico	
PERDA AO FOGO	NBR 5743/89
Resíduo insolúvel	NBR 5744/89
Teor de SO ₃	NBR 5745/89
Teor de Na ₂ O, K ₂ O	NBR 5747/89
Teor de CaO livre	NBR 7227/89
TEORES DE AL ₂ O ₃ , SiO ₂ , Fe ₂ O ₃ , CaO, MgO	NBR 9203/85
Análise química por fluorescência	NBR MB 1866/91
Equivalente alcalino	
Ensaio físico	
Resíduo na peneira #325	NBR 9202/85
Resíduo na peneira #200	NBR 11579/91
Tempos de pega	NBR 11584/91
Expansibilidade à quente	NBR 11582/91
Massa específica	NBR NM 23/01
Finura	NBR NM 76/98
Ensaio mecânico	
Resistência à compressão	NBR 7215/96

4.4 ESTUDO DE DOSAGEM DO LODO DE ETA

O estudo de dosagem foi realizado com a finalidade de se obter o teor de lodo de ETA incorporado no concreto que apresentasse melhor desempenho.

Os principais fatores considerados para o desenvolvimento das dosagens foram as variações de trabalhabilidade e de resistência mecânica do material obtido, em termos da quantidade de lodo de ETA adicionada a um concreto referência (sem adição de lodo).

4.4.1 Concreto Referência

Para a confecção do concreto referência, sem a adição do lodo, foram fixados alguns parâmetros de dosagens:

- relação água / cimento (a/c): 0,5;
- teor de agregados miúdos: 40,4%;
- teor de agregados graúdos: 59,6%; e
- relação cimento / agregados totais: 0,2 (ou 1/5).

A consistência dos concretos, expressa pela medida do abatimento do tronco de cone “*slump test*”, foi deixada livre, de forma que pudesse ser um dos parâmetros variáveis a serem avaliados em função do teor de lodo de ETA adicionado.

4.4.2 Concreto Contendo Lodo de ETA Centrifugado

Para confecção dos concretos com adição do lodo de ETA, foram adotados os mesmos parâmetros de dosagem utilizados no concreto referência, de forma a ser possível uma correlação entre as propriedades de todos os traços dosados.

Foram fabricados quatro concretos incorporando o lodo de ETA, com teores de 3%, 5%, 7% e 10% em substituição ao peso do agregado miúdo. A quantidade total de água a ser adicionada a cada traço foi corrigida em função do peso e do teor de umidade do lodo acrescentado.

4.4.3 Propriedades do Concreto

Ao término das misturas de concreto de cada dosagem executada, foram realizados ensaios para determinação das principais propriedades da mistura fresca conforme abaixo:

- abatimento do tronco de cone “*slump test*” - NBR NM 67/98;
- massa unitária - NBR 9833/87; e
- teor de ar incorporado - NBR NM 47/98.

Para cada traço de concreto confeccionado foram moldados 6 corpos-de-prova (CPs) cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, destinados ao ensaio de determinação da resistência mecânica à compressão axial, aos 7 e aos 28 dias.

Até a data dos ensaios, os CPs foram mantidos sob câmara úmida com umidade relativa mínima de 95%. Ao completarem as idades previstas (7 e 28 dias), os CPs de cada dosagem, após capeados com enxofre, foram levados à ruptura por compressão axial simples, em máquina universal de ensaios seguindo recomendações da norma NBR 5739/94.

Dos CPs de concreto rompidos no ensaio de compressão axial aos 28 dias foram extraídas amostras para serem submetidas ao ensaio de determinação de absorção da água por imersão, massa específica e índice de vazios do concreto endurecido, conforme orientações da norma NBR 9778/87.

4.5 CONFECÇÃO DOS CONCRETOS

Dos concretos trabalhados dois traços foram escolhidos para novos estudos.

Para a confecção destes concretos com a adição do lodo de ETA, foram adotados os mesmos parâmetros utilizados no estudo de dosagem com diferentes traços, sendo os parâmetros:

- relação água / cimento (a/c): 0,5;
- teor de agregados miúdos: 40,4 %;
- teor de agregados graúdos: 59,6 %; e
- relação cimento / agregados totais: 1/5.

A quantidade total de água adicionada em cada traço foi corrigida em função do peso e do teor de umidade de lodo acrescentado.

Para a adição do lodo, procedeu-se previamente a mistura do mesmo na água de amassamento prevista com o auxílio de um misturador constituído de uma hélice acoplada a uma furadeira elétrica. Antes do início das dosagens foram realizadas determinações da umidade dos agregados naturais, por meio da pesagem antes e após a secagem dos mesmos. Os valores obtidos foram levados em consideração no cálculo do peso de água adicionada na massa.

Para a mistura dos concretos utilizou-se uma betoneira com capacidade nominal de 120 litros e rotação do tambor de 28 rpm, sendo que em cada amassada foi utilizado um volume total de mistura de 80 litros. Inicialmente, foi realizada a imprimação da betoneira, que consiste na mistura de uma pequena quantidade de concreto (geralmente 10% em peso de cada material), representativo do traço previsto.

Os insumos foram pesados em balança digital, com precisão de 10 g, e, então, colocados na betoneira. Primeiramente, foram adicionados os agregados graúdos, seguidos dos agregados miúdos e metade mistura água + lodo prevista. A betoneira foi então acionada por 30 segundos, a fim de promover a mistura entre a areia e a brita. Então, adicionou-se o cimento e o restante da mistura água + lodo.

O amassamento do concreto deu-se em 3 etapas totalizando um tempo total de 8 minutos, sendo 3 minutos para a mistura inicial, 2 minutos para a massa "descansar" e 3 minutos para a mistura final. Ao término deste tempo, o concreto foi retirado da betoneira e submetido a ensaios para verificação das suas propriedades.

4.6 PROPRIEDADES DO CONCRETO FRESCO

Ao término da mistura do concreto, em cada uma das dosagens, foram realizados ensaios para determinação das principais propriedades da mistura fresca.

Para o concreto fresco foram determinadas a temperatura e umidade desta mistura, além da massa unitária, de acordo com a NBR 9833/87. Com o valor da massa unitária foi possível o cálculo dos consumos (em pesos) de cada material para 1 m³ de concreto, assim como o teor de ar incorporado teórico. A determinação do teor de ar incorporado seguiu orientação da norma NBR NM 47/98.

Para avaliar a trabalhabilidade da mistura de concreto foi determinado o abatimento do tronco de cone “*slump test*”. Neste ensaio, a mistura de concreto foi colocada em um molde em forma de cone com a menor abertura voltada para cima e preenchido com o concreto em três camadas, para uma melhor compactação. Cada camada foi apiloada 25 vezes com uma barra de aço padronizada com 16 mm de diâmetro. Após preenchimento do cone, este foi retirado lentamente e medida a sua trabalhabilidade pela redução de altura do concreto, sendo esta medida em milímetros (mm). Na Figura 05 é mostrada a seqüência do ensaio de acordo com exigências da norma NBR NM 67/98.

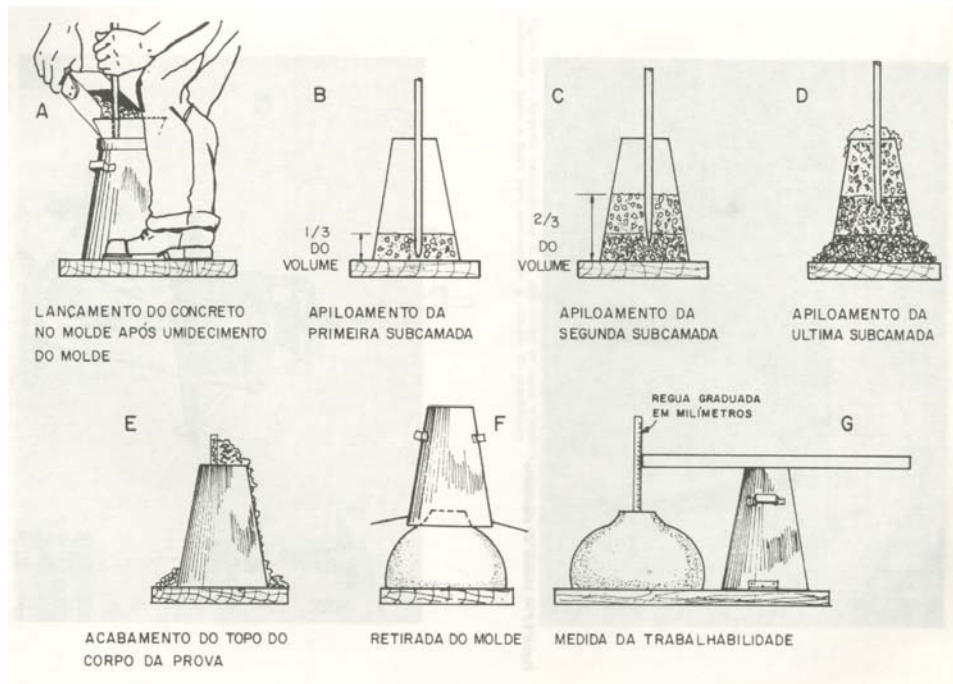


FIGURA 05 - TESTE DE ABATIMENTO (SLUMP TESTE).
 FONTE: SCANDIUZZI e ANDRIOLO (1986)

4.7 PROPRIEDADES DO CONCRETO ENDURECIDO

4.7.1 Moldagem dos Corpos-de-Prova

Para cada dosagem de concreto confeccionado, foram moldados 10 CPs cilíndricos de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, destinados aos ensaios para determinação da resistência mecânica à compressão axial simples (aos 7, 14, 28 e 91 dias) e módulo de deformação estática. Foram moldados, também, 2 CPs prismáticos ((15x15x50) cm) para o ensaio de resistência à tração por flexão e 4 cilíndricos de 15 cm de diâmetro por 30 cm de altura para determinação da resistência à tração por compressão diametral e permeabilidade.

Para o ensaio de permeabilidade em meio ácido e básico, confeccionaram-se 2 CPs prismáticos para cada dosagem no tamanho de (9x10x5) cm, e mais 2 CPs, para cada traço para o ensaio de durabilidade, neste mesmo tamanho, no entanto, esses foram confeccionados com a aplicação de 3 barras de ferro CA 50A de 6,3 mm encapadas com tinta a base de alcatrão de hulha em sua estrutura.

A moldagem dos CPs seguiu as recomendações da NBR 5738/94. Para o enchimento dos moldes utilizou-se o auxílio de um vibrador para os CPs cilíndricos e prismáticos e mesa vibratória para os CPs menores de (9x10x5) cm.

A amostragem de dois CPs para as dosagens em cada ensaio seguiu a NBR 12655/96, a qual sugere que das resistências obtidas para os dois CPs utilize-se o exemplar de maior valor obtidos nos ensaios. Esta operação foi realizada para todos os ensaios do estudo, nos quais os menores valores foram desprezados sendo considerados apenas as maiores resistências. Segundo Helene e Terzian (1992), esta resistência é a que melhor representa a resistência potencial, que pode ser considerada como a máxima resistência que o concreto pode apresentar à idade do ensaio.

Até as datas dos ensaios, os CPs foram mantidos sob cura em câmara úmida à 23 ± 2° C e umidade relativa mínima de 95%.

4.7.2 Resistência à Compressão Axial Simples

Após completarem as idades previstas para o ensaio (7, 14, 28 e 91 dias) , os CPs foram capeados com enxofre para que houvesse uma regularidade das superfícies de aplicação de carga, de modo que o carregamento ocorresse uniforme. Para cada idade foram ensaiados dois exemplares para cada traço de concreto.

Após capeação estes CPs foram levados à ruptura por compressão axial simples, utilizando-se uma máquina universal de ensaios modelo Emic DL30000N, conforme

mostrada na Figura 06, observando-se os procedimentos recomendados pela norma NBR 5739/94.

Neste ensaio o CP de (10x20) cm, foi colocado centrado sobre o prato da máquina e submetido à pressão aumentada progressivamente até ruptura, anotando-se o valor da carga máxima.



FIGURA 06 – ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL SIMPLES.

4.7.3 Resistência à Tração por Flexão

Para este ensaio, utilizou-se os CPs prismáticos ((15x15x50) cm) com idade de 28 dias, utilizando-se a mesma máquina do ensaio de resistência à compressão axial simples seguindo a norma NBR 12142/94.

Este ensaio consistiu em aplicar uma força simétrica em pontos situados nos terços do prisma, até que ocorresse a ruptura, sendo desejável a ocorrência desta ruptura no terço do meio, conforme mostrado no procedimento da Figura 07. Para esta propriedade foram ensaiados dois exemplares por traço de concreto.

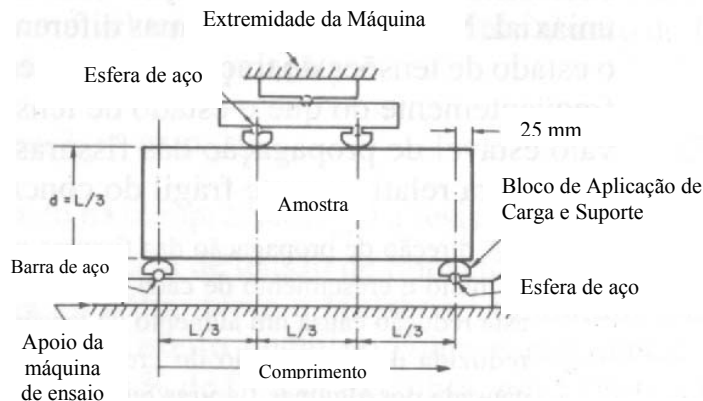


FIGURA 07 - ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR FLEXÃO.
 FONTE: MEHTA e MONTEIRO (1994)

4.7.4 Resistência à Tração por Compressão Diametral

Para este ensaio utilizou-se o CP cilíndrico de (15x30) cm com idade de 28 dias, com o objetivo de verificar a ruptura no seu diâmetro. Para isto foi utilizada uma máquina universal de ensaios modelo Emic DL30000N, na qual o CP foi colocado com o eixo horizontal entre os pratos da prensa e submetido a uma carga de compressão contínua e velocidade constante ao longo das duas linhas axiais opostas até sua ruptura diametral, como mostrado na Figura 08.

O ensaio ocorreu de acordo com a especificação da norma NBR 7220/94, sendo realizado em dois exemplares de cada traço.

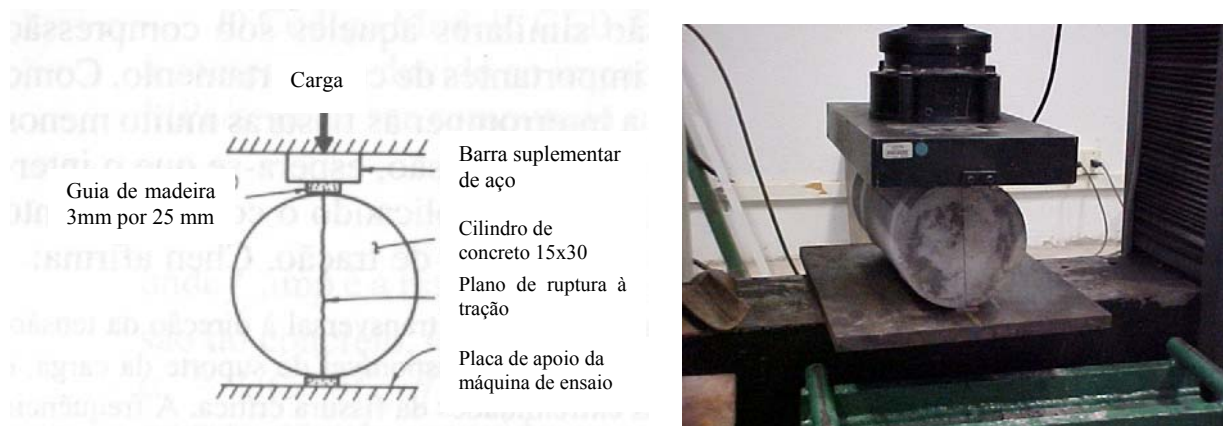


FIGURA 08 - ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.
 FONTE: MEHTA e MONTEIRO (1994)

4.7.5 Módulo de Deformação Estática

Neste ensaio, os CPs cilíndricos de dimensão (10x20) cm, foram submetidos a uma aplicação de força em máquina Emic DL30000N, a fim de se verificar a sua elasticidade pelo módulo secante plano III, como mostrado na Figura 09. Em cada CP foi aplicado uma força crescente em 10%, adotando um intervalo de tempo de 60 segundos para realização das medidas de deformação. Esta aplicação de carga foi mantida a velocidade constante até a ruptura do CP.

Essa deformação foi medida por um extensômetro mecânico afixado externamente no CP, o qual forneceu a sua deformação longitudinal. A determinação por este aparelho, foi feita em duas linhas diametralmente opostas e centradas no eixo longitudinal do CP, conforme NBR 8522/84.

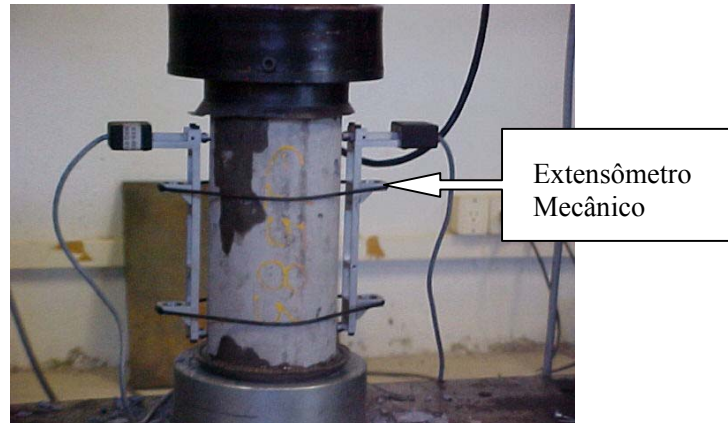


FIGURA 09 - ENSAIO DO MÓDULO DE DEFORMAÇÃO ELÁSTICO PELO MODULO SECANTE.

4.7.6 Índice de Vazios, Massa Específica e Absorção

Dos CPs de concreto cortados da permeabilidade após 91 dias, foram extraídas amostras, preferencialmente, isentas de trincas, fissuras e outros defeitos, para serem submetidas ao ensaio para determinação da absorção de água por imersão, da massa específica e do índice de vazios dos concretos endurecidos, seguindo-se as recomendações da norma NBR 9778/87.

Foram utilizadas 3 amostras para cada traço, as quais foram determinadas a sua massa ao ar, sendo, posteriormente, secas em estufa com temperatura aproximada de $110\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ durante 72 horas, resfriando a amostra em dessecador para posterior pesagem. Em seguida as amostras foram submetidas à imersão de água por 72 horas, após o término do tempo, as amostras foram secas com papel toalha e pesadas para obtenção da condição saturada. Além desta condição, determinou-se o valor da massa da amostra imersa com o auxílio da balança hidrostática. Posteriormente, estas amostras foram submetidas à fervura por 5 horas, com temperatura aproximada de 100 °C . Após esta fervura, ocorreu um resfriamento da amostra e a sua pesagem, ocorrendo também a pesagem da amostra em imersão por meio de balança hidrostática.

Com estes valores foi determinada a massa específica, absorção e índice de vazios pelas equações:

- absorção de água por imersão:

$$\frac{MSat - MS}{MS} \times 100 \quad (\text{eq. 2})$$

- índice de vazios:

$$\frac{MSat - MS}{MSat - MI} \times 100 \quad (\text{eq. 3})$$

- massa específica:

$$\frac{MS}{MSat - MI} \quad (\text{eq. 4})$$

- massa específica da amostra saturada:

$$\frac{MSat}{MSat - MI} \quad (\text{eq. 5})$$

Onde:

MS: massa seca em estufa;

MSat: massa saturada; e

MI: massa após imersão.

4.7.7 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do Concreto

Para este ensaio, foram extraídas amostras dos CPs de concreto cortados após 91 dias. As amostras para análise da superfície foram limpas por meio de jatos de ar e gás inerte.

Para poder garantir uma boa qualidade das imagens, as amostras foram metalizadas com um banho de ouro, realizada por evaporação catódica à vácuo em

equipamento Baltec SCD 005. Posteriormente, foi realizada a análise por MEV para verificação da microestrutura e dos componentes do concreto com o lodo da superfície fraturada da amostra, com o uso de uma microsonda analítica para espectroscopia de energia dispersiva de raios - X (EDS) marca Edax, acoplada ao microscópio.

4.7.8 Difração de Raios-X (DRX)

Dos CPs de concreto cortados da permeabilidade, foram extraídas pequenas amostras, as quais foram moídas para serem submetidas ao ensaio de DRX.

Para a análise por DRX foi utilizado equipamento Philips modelo X'Pert, com radiação $\text{Cu K}\alpha$, $\lambda = 1,54056 \text{ \AA}$; tensão = 42 kV; corrente = 40 mA; varredura $2\theta = 5$ a 90° ; tamanho do passo = 0,020; tempo do passo = 1,00 s; velocidade de varredura = 0,020 $^\circ/\text{s}$.

4.7.9 Estudo da Permeabilidade e Lixiviação

Este ensaio foi realizado pelo método de água sob pressão de acordo com a NBR 10786/89, em aparelho demonstrado na Figura 10, no qual foi forçada a penetração de água no CP por meio de pressão específica de 2,1 MPa, por, aproximadamente, 21 dias (500 horas), medindo-se o volume de água percolada por este concreto, determinando-se assim o coeficiente de permeabilidade. As vazões de água foram lidas periodicamente.

Na preparação do CP, o espaço entre a superfície lateral do CP e a campânula de ensaio ficou perfeitamente estanque para que a água percolasse apenas pelo concreto.

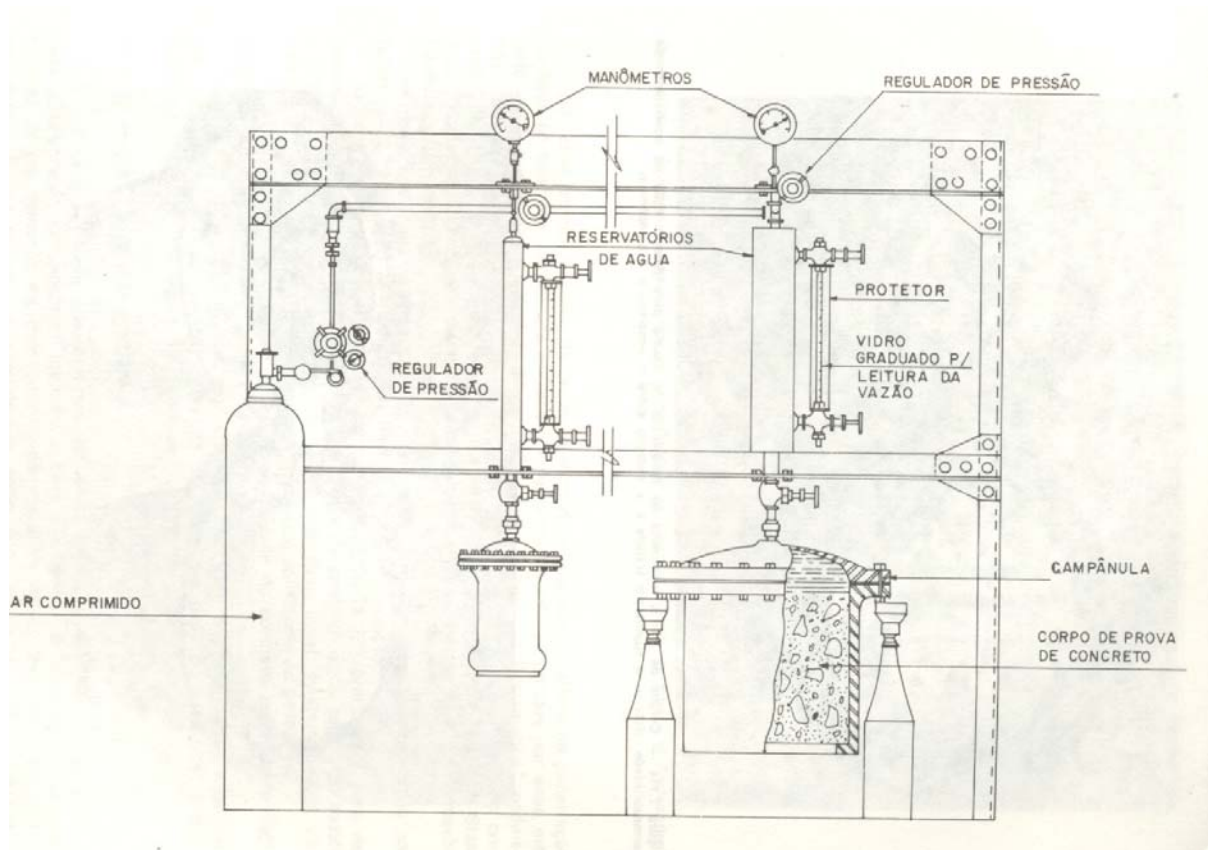


FIGURA 10 - TESTE DE PERMEABILIDADE (METODO DE BUREAU).
 FONTE: SCANDIUZZI e ANDRIOLO (1986)

Ao término do ensaio, a água percolada pelo concreto foi coletada, seca, e o material sólido obtido analisado em MEV, para determinação dos metais presentes.

A lixiviação foi determinada, em presença de meio ácido e básico, simulando um possíveis acidentes.

Para o meio ácido, elaborou-se uma solução de ácido acético a 4,5%, colocando um CP para cada uma das duas dosagens imersos nesta solução, durante uma semana, conforme observado na Figura 11. Após este período, parte da solução foi coletada e analisada por espectrofotometria de absorção atômica com atomização em chama, com a finalidade de verificar os metais e/ou íons presentes nesta solução, após processo de lixiviação.

O mesmo procedimento ocorreu com a solução básica, para isto, preparou-se uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) 1M, imergindo o CP nesta solução, conforme observado na Figura 11, e, posteriormente, analisando por meio de espectrofotometria de absorção atômica com atomização em chama, para determinação dos metais e/ou íons liberados do concreto e presentes nesta solução.

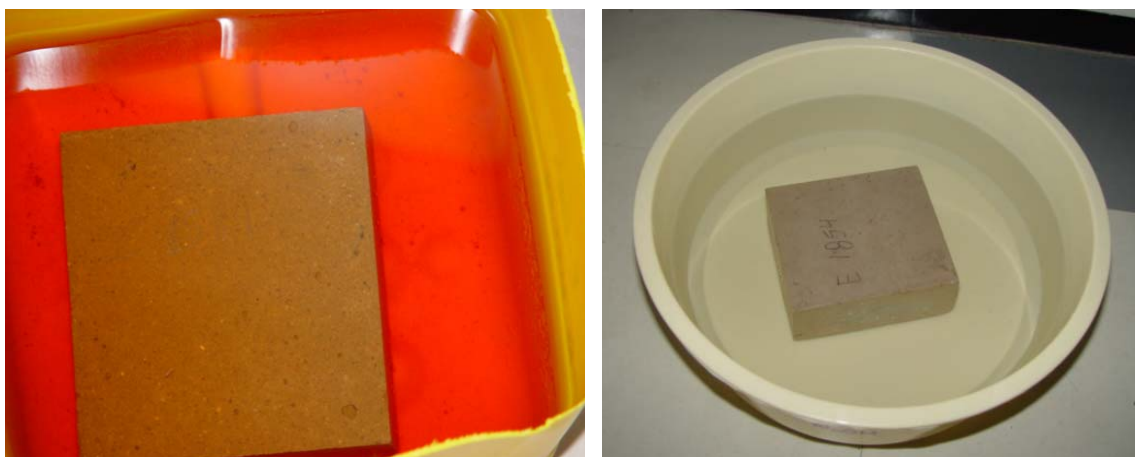


FIGURA 11 – ENSAIO DE PERMEABILIDADE EM MEIO ÁCIDO E BÁSICO, RESPECTIVAMENTE.

4.7.10 Ensaio de Durabilidade

Para a realização deste ensaio foram necessários dois CPs prismáticos para cada dosagem no tamanho (9x10x5) cm, confeccionados com a aplicação de 3 barras de ferro isoladas uma das outras em cada amostras.

A medida de durabilidade foi realizada por testes de potencial de corrosão de armadura por espectroscopia de impedância eletroquímica nos CPs, em um sistema de medição eletroquímica, marca Eco Chemie, modelo Autolab 20, com o software FRA (Analisadores de Resposta e Freqüência), o qual segundo Cascudo (1997) aplica uma técnica digital de geração de ondas para produzir sinais de baixa freqüência com amplitude estável.

Para essas medidas utilizou-se o sistema de três eletrodos, como mostra a Figura 12, na qual estipulou-se como a primeira barra o eletrodo de trabalho A, a segunda como contra-eletrodo e, a terceira barra, o eletrodo de trabalho B.



FIGURA 12 –CONCRETO COM LODO DEMONSTRANDO OS ELETRODOS.

O eletrodo de referência utilizado foi o de calomelano saturado (ECS), que consiste de mercúrio coberto por uma pasta de cloreto mercurioso (Hg_2Cl_2), imerso num eletrólito contendo íons cloreto, normalmente uma solução saturada de cloreto de potássio (KCl) (CASCUDO, 1997). O contato deste eletrodo com a superfície do CP foi realizada pela utilização de um pedaço de feltro embebido em água destilada. A ligação dos terminais do sistema de medição aos eletrodos de trabalho (a e b) e o contra-eletrodo foi realizado por pinças metálicas, “jacarés”. A Figura 13 mostra este sistema utilizado, bem como, o eletrodo de referência de calomelano saturado.

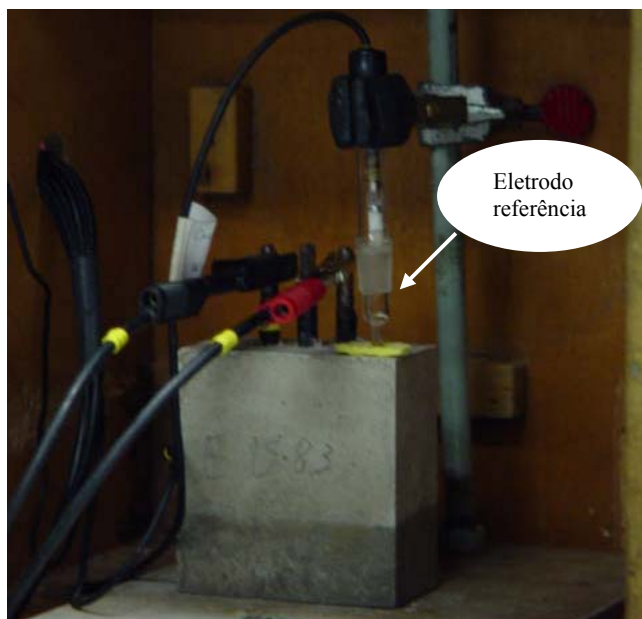


FIGURA 13 – TESTE DE IMPEDÂNCIA COM DEMONSTRAÇÃO DO ELETRODO DE REFERÊNCIA.

Quando as conexões entre o Autolab e os eletrodos foram realizadas, o canal de leitura foi ligado mostrando na tela do monitor o potencial do sistema medido em relação ao eletrodo de referência. Nos instantes iniciais, este potencial variou lentamente, mas tendeu a se estabilizar após alguns minutos, sendo que a medição só foi iniciada após esta estabilização.

Os ensaios foram realizados por varredura freqüencial descendente. A seguir estão colocadas algumas informações a respeito desta varredura:

- equipamento: *Eco Chemie, Autolab 20*;
- software: *FRA v 2.3*;
- número de freqüências: *66*;
- freqüência inicial: *50.000 Hz*;
- freqüência final: *0,01 Hz*;
- amplitude (rms): *5 mV*;
- faixa de corrente: *1A a 100 nA e*;
- utilização: *Gaiola de Faraday*.

Parte dos resultados obtidos neste ensaio são apresentados na forma do gráfico de potencial de corrosão x tempo de envelhecimento. Estes resultados foram utilizados no trabalho para interpretar, comparativamente com uma amostra padrão, o desempenho do concreto com diferentes adições de lodo, sob envelhecimento acelerado. Utilizou-se para tanto, procedimento de imersão parcial dos CPs em uma solução salina a 3,4% de NaCl em função do tempo. A interpretação dos resultados foi baseada nos parâmetros definidos na norma ASTM C 876, fazendo-se as devidas correções nos potenciais pelo uso do eletrodo calomelano saturado, conforme Tabela 07, apresentada na revisão bibliográfica.

As medidas iniciaram no dia 01/04/2003 sendo realizadas, primeiramente, com intervalos semanais e, após dois meses, estes intervalos foram em média de 15 dias, totalizando 20 medidas, ao longo de 283 dias de envelhecimento para cada amostra.

Para este ensaio utilizaram-se dois CPs para cada dosagem, os quais foram nomeados de G e GG para a dosagem de 4% de lodo e Z e ZZ para a dosagem de 8% de lodo. Para estes 4 CPs utilizou-se, ainda, o acompanhamento da nomenclatura a e b, que mostram os eletrodos de trabalho utilizados, totalizando as 8 (oito) medidas realizadas. A técnica utilizada, potencial de corrosão, foi a empregada na avaliação do estado de corrosão das armaduras de concreto.

Medidas de espectroscopia de impedância eletroquímica, também foram realizadas nas amostras sob envelhecimento, estão representadas no Anexo 1, porém, seus resultados não foram utilizados no diagnóstico.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO LODO DA ETA PASSAÚNA

5.1.1 Umidade

O teor de umidade médio do lodo foi de 88,11 %. Valor considerado ainda alto, principalmente, por este ser coletado após a passagem pela centrífuga. Na Tabela 10 estão reunidos os resultados de cada amostra analisada.

TABELA 10 - DETERMINAÇÃO DE UMIDADE .

	Pc	Pu	Ps	Umidade
Amostra 1	106,90	208,89	119,06	88,077 %
Amostra 2	145,27	286,01	162,00	88,113 %
Amostra 3	105,13	242,25	121,40	88,134 %

Onde:

Pc = peso do cadinho;

Ps = peso do cadinho + lodo úmido; e

Pu = peso do cadinho + lodo seco após 48 horas.

5.1.2 Massa específica

A massa específica (ρ) foi determinada em três amostras e os valores obtidos são:

- amostra 1: $\rho = 1,052 \text{ g/cm}^3$;
- amostra 2: $\rho = 1,037 \text{ g/cm}^3$;
- amostra 3: $\rho = 1,064 \text{ g/cm}^3$.

A massa específica média do lodo foi de $1,051 \text{ g/cm}^3$, com um desvio padrão de, aproximadamente, $0,013$.

Observa-se que esta massa específica é, aproximadamente, a da água, que é $1,00 \text{ g/cm}^3$, justificada pela alta umidade da amostra, uma vez que 88% desta é constituída por água.

Este valor encontrado está dentro da faixa citada por Richter (2001) para um lodo de 12% de sólidos, sendo de $1,029$ a $1,083 \text{ g/cm}^3$.

5.1.3 Análise de Perda ao Fogo

Na análise de perda ao fogo pela técnica termogravimétrica (TG), mesmo com o lodo previamente seco houve uma redução de $49,79\%$ da sua massa total até atingir a temperatura de 1000 °C . No intervalo de 20 °C a 220 °C a redução ocorrida foi de $12,04\%$ e para o intervalo de 220 °C a 750 °C esta redução foi de $36,64\%$, como mostra a Figura 14.

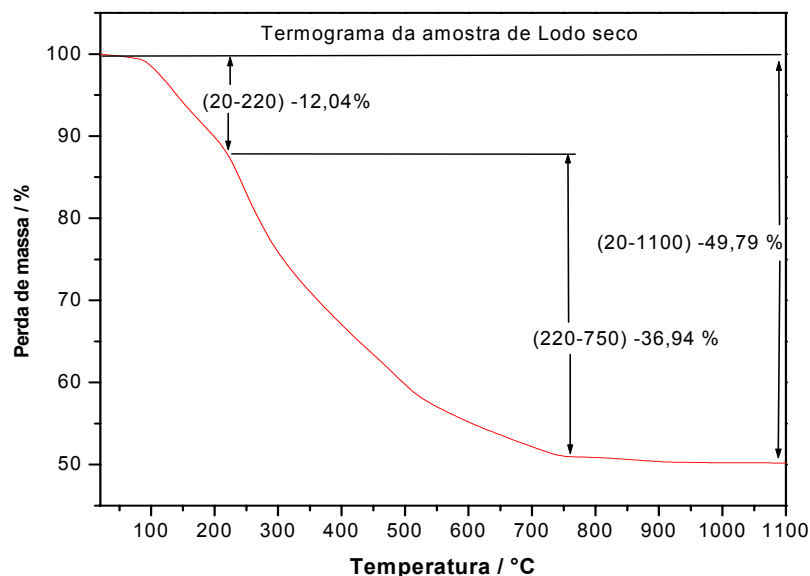


FIGURA 14 - TERMOGRAMA DA AMOSTRA DE LODO SECO.

Esta redução de massa pode ter ocorrido devido a desidratação de materiais argilosos, decomposição de materiais carbonáceos e queima de material orgânico presentes na amostra.

5.1.4 Análise Química por Fluorescência de Raios-X

Pela análise química por fluorescência de raios-X pôde-se verificar que o lodo da ETA Passaúna é composto, principalmente, de sílica, alumina e ferrita. Foram encontrados neste lodo 16,55% de SiO₂, 13,07% de Al₂O₃ e 4,15% de Fe₂O₃, como observado na Tabela 11.

TABELA 11 - ANÁLISE DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X

Compostos Analisados (%)	Lodo
SiO ₂	16,55
Al ₂ O ₃	13,07
TiO ₂	0,19
Fe ₂ O ₃	4,15
MnO	0,22
MgO	0,15
CaO	0,43
Na ₂ O	0,04
K ₂ O	0,06
P ₂ O ₅	0,26
Soma	35,12
Perda ao fogo	49,79
Total	84,91
Compostos volatilizados	15,09
Total	100

Estas concentrações elevadas, principalmente a sílica e a alumina, já eram esperadas devido a própria composição do material sedimentado no tratamento de água, como, por exemplo, materiais argilosos e siltosos, e também pela contribuição do uso do sulfato de alumínio como coagulante no tratamento de água.

O total de compostos verificados não foi 100% devido a volatilização de materiais presentes, uma vez que a análise foi realizada diretamente com o material seco a 110 °C e não com o material calcinado.

Comparando os valores obtidos com os valores obtidos na literatura por AWWA (1990) e Cordeiro (2000), observa-se que estão próximos, demonstrando a similaridade nas características dos lodos.

5.1.5 Difração de Raios-X (DRX)

O difratograma da amostra seca, sem prévia queima, não apresentou picos característicos de fases cristalinas, mas sim, aumento de ruído da linha base, e, por este fato, necessitou-se calcinar a amostra de lodo a uma temperatura de 1000° C por 3 horas.

Na Figura 15 é mostrado o difratograma com os principais picos da amostra de lodo calcinada, obtidos com os padrões ICDD (International Centre for Diffraction Data) 38-0471 (Al_2SiO_5), 15-0776 ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$), 11-0252 (SiO_2), 13-0534 (Fe_2O_3) e 45-1206 ($\text{Al}_{0,3}\text{F}$ e $3\text{Si}_{0,7}$).

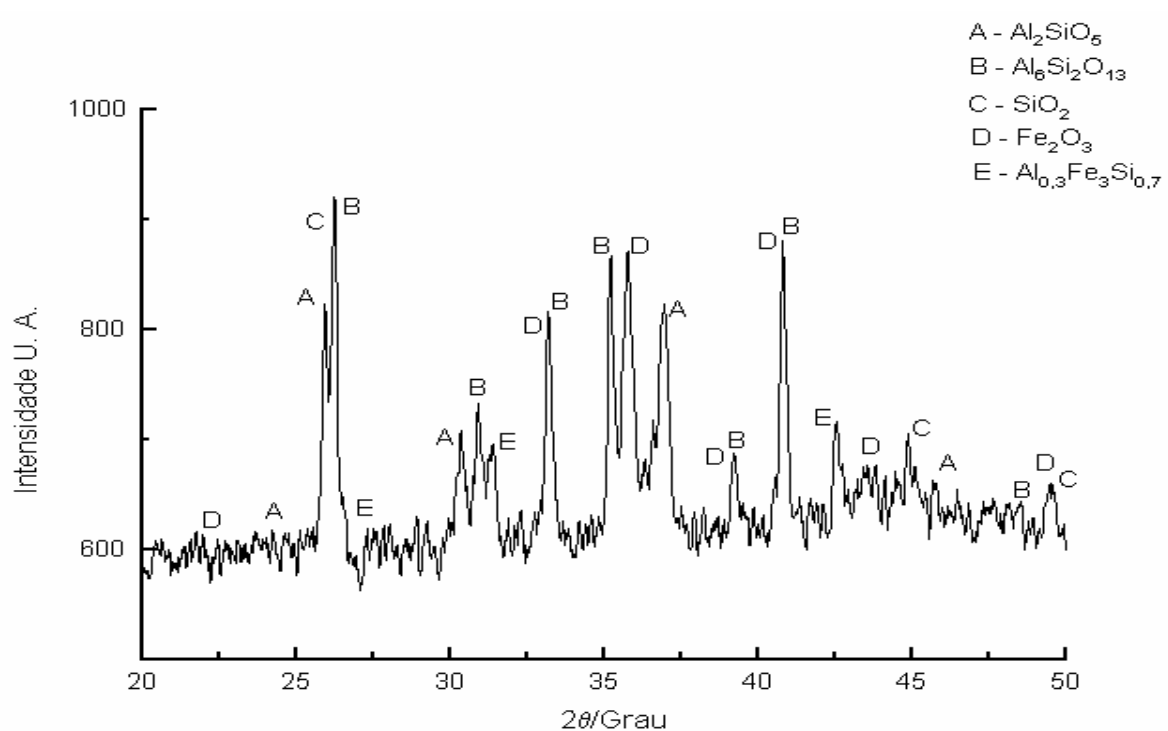


FIGURA 15 - DIFRATOGRAMA DO LODO DE ETA CALCINADO

Como pode ser observado pelos difratogramas comparados com os padrões do ICDD, as fases químicas encontradas no lodo da ETA Passaúna contém alumínio, ferro e sílica. Estes compostos também já foram identificados como os de maior quantidade pela análise de fluorescência de raios-X no item 5.1.4, confirmando assim, sua presença.

No entanto, não pode-se identificar qual a fase existente no lodo de ETA, pois com a calcinação de 1000 °C os compostos podem ter se decompostos e formado os respectivos óxidos. Pode-se dizer apenas que foram encontradas fases contendo alumínio, ferro e silício.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS – PRIMAS

Neste item são apresentados os resultados da caracterização das matérias-primas utilizadas na fabricação do concreto.

5.2.1 Agregados

Os resultados obtidos pelos ensaios físicos realizados nos agregados, miúdo e graúdo, são mostrados na Tabela 12.

TABELA 12 – ENSAIOS FÍSICOS DOS AGREGADOS, MIÚDO E GRAÚDO.

Análise	Areia	Brita 1
Absorção (%)	0,8	0,4
Massa específica seca (g/cm ³)	2,60	2,60
Massa específica SSS (g/cm ³)	2,61	2,61
Massa unitária solta (kg/dm ³)	1,43	1,43
Massa unitária compactada (kg/dm ³)	NA	1,50
Módulo de finura	2,83	6,60
D _{máx} (mm)	4,8	19
Teor de material pulverulento (%)	3,2	0,5
Teor de argila em torrões (%)	0,1	NA
Teor de impurezas orgânicas (ppm)	> 300	NA

NA: não aplicável.

A maior parte destes resultados atenderam aos limites estabelecidos pelas normas correspondentes, exceto aos referentes aos teores de material pulverulento e de impurezas orgânicas na areia, estipulados pela ABNT em 3,0% e 300 ppm (parte por milhão), respectivamente. Entretanto, estes valores verificados não comprometeram a qualidade do concreto fabricado com este agregado.

Na Figura 16, são mostradas as curvas granulométricas dos agregados miúdo e graúdo, expressas em termos das porcentagens passantes acumuladas em cada peneira. As linhas tracejadas representam os limites máximos e mínimos estabelecidos pela norma NBR 7211/83.

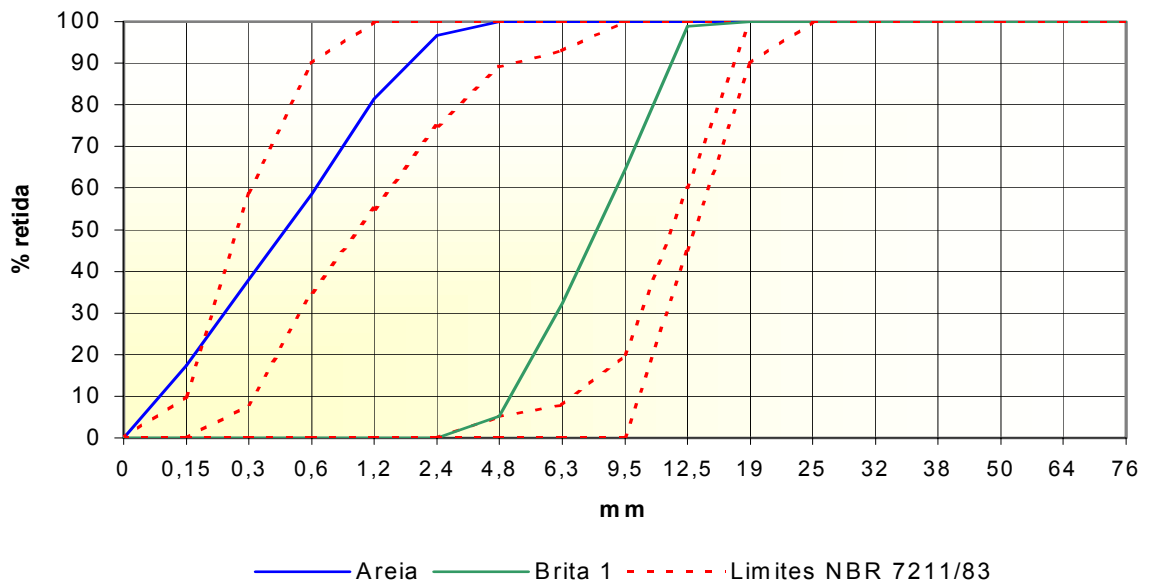


FIGURA 16 - CURVA GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO MIÚDO E GRAÚDO.

Ambos os agregados possuem granulometria tipicamente contínua. De acordo com o enquadramento do agregado miúdo nos limites granulométricos normalizados, o mesmo foi caracterizado como areia média, pertencente à zona 3. Já no caso do agregado graúdo, a faixa que mais se aproxima da sua granulometria é a referente à brita de graduação 1. Como o limite de granulometria está abaixo do recomendado em norma, poderão ser necessários ajustes destes agregados miúdos e graúdos para uma boa dosagem.

Na Tabela 13 estão inseridos os resultados da análise química dos agregados por fluorescência de raios-X. De acordo com esta análise pôde-se verificar uma grande quantidade de SiO_2 e Al_2O_3 , em ambos os agregados e ainda uma grande presença de Na_2O e K_2O na brita 1.

TABELA 13 - ANÁLISE QUÍMICA POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X DOS AGREGADOS

Análise (%)	Areia	Brita 1
SiO ₂	90,24	71,54
Al ₂ O ₃	4,34	14,91
TiO ₂	0,54	0,03
Fe ₂ O ₃	0,94	0,93
MnO	0,01	0,02
MgO	0,24	0,18
CaO	0,14	0,75
Na ₂ O	0,42	5,27
K ₂ O	1,51	3,84
P ₂ O ₅	0,01	0,03
Soma	98,39	97,50

Os elementos encontrados em maior quantidade (alumínio e sílica) em ambos os agregados são os mesmos encontrados no lodo de ETA.

A presença de grande quantidade de álcalis, nestes agregados, resultou em um Na₂O_{eq} de 1,417% para a areia e 7,804% para a brita 1, o qual segundo Taylor (1992) possui um valor recomendado maior que 0,6%, sendo definido como Na₂O_{eq} = Na₂O + 0,66 K₂O. Estes altos valores obtidos indicam a probabilidade de reações expansivas em concretos se não forem utilizados cimentos com adições especiais capazes de reduzir este efeito, tal como com pozolana, escória de alto forno e sílica ativa, diminuindo a reação alcali-sílica.

5.2.2 Aglomerantes

Na Tabela 14 estão contidos os resultados dos ensaios físico-químicos e mecânicos efetuados no cimento CII-F 32.

TABELA 14 - RESULTADOS DOS ENSAIOS FÍSICOS-QUÍMICOS E MECÂNICOS DO CIMENTO.

Análises	Resultados
Ensaio Físicos	
Massa específica (g/cm ³)	3,10
Finura blaine (cm ² /g)	3170
Expansibilidade a quente (mm)	0,0
Resíduo na peneira # 200 (%)	3,0
Resíduo na peneira # 325 (%)	11,2
Início de pega (h:mm)	3:40
Fim de pega (h:mm)	4:30
Ensaio Químicos (%)	
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	4,1
Dióxido de silício (SiO ₂)	18,4
Óxido férrico (Fe ₂ O ₃)	2,55
Óxido de cálcio (CaO)	60,2
Óxido de magnésio (MgO)	4,89
Trióxido de enxofre (SO ₃)	2,64
Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,13
Óxido de potássio (K ₂ O)	1,03
Perda ao fogo	5,56
Total	99,50
Resíduos insolúveis	0,85
Óxido de cálcio livre	0,7
Equivalente alcalino (Na ₂ O + 0,658 K ₂ O)	0,81
Resistência à compressão (MPa)	
3 dias	21,1
7 dias	23,6
28 dias	29,5

O teor de álcalis determinado é suficiente para proporcionar reações expansivas do tipo álcali-agregado. Somado a este deve-se levar em conta o teor de álcalis nos agregados, conforme recomendado anteriormente. A resistência à compressão axial 28 dias (29,5 MPa), resultou abaixo do valor especificado e esperado para este cimento, que foi de 32 MPa, mas encontrou-se dentro do desvio padrão admitido pela técnica.

A análise química por XRF do cimento apresentou resultados similares à estes ensaios físicos-químicos realizados.

5.3 ESTUDO DE DOSAGEM DO LODO DE ETA

Através do estudo de dosagem com a análises das propriedades obtidas, foi possível determinar qual as duas melhores dosagens para a confecção dos concretos com lodo de ETA.

5.3.1 Propriedades do Concreto

Na Tabela 15 são apresentadas as propriedades do concreto no estado fresco, obtidas para cada traço no estudo de dosagem.

TABELA 15 - PROPRIEDADES DO CONCRETO FRESCO NO ESTUDO DE DOSAGEM.

Teor do lodo de ETA (% peso de areia)	0%	3%	5%	7%	10%
Temperatura do concreto (°C)	18,3	19,0	19,5	20,3	21,2
Traço					
Cimento	1	1	1	1	1
Areia média	2,02	1,96	1,92	1,88	1,82
Brita 1	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98
Lodo de ETA	-	0,06	0,10	0,14	0,20
Consumos (kg/m³)					
Cimento	364	356	355	352	349
Areia média	736	698	682	662	636
Brita 1	1085	1061	1058	1049	1041
Água	183	178	178	177	175
Lodo de ETA	-	22	36	50	70
Abatimento do tronco de cone (mm)					
	65	17	10	6	0
Massa unitária (kg/m³)					
Teórica	2373	2345	2326	2307	2280
Real	2366	2319	2305	2293	2268
Ar incorporado (%)					
Teórico	0,3	1,1	0,9	0,6	0,5
Real	-	2,0	1,5	1,5	1,0

De acordo com as propriedades analisadas, observa-se uma mistura mais exotérmica com o incremento do teor de lodo, porém, como esta elevação não atinge 3 °C,

o aumento da fissuração como consequência de uma retração mais intensa do concreto deve ser muito pequeno.

A medida que o teor de lodo aumentou de 0 a 10%, ocorreu uma pequena redução no consumo do cimento, cerca de 4%, devido à substituição de parte dos materiais (agregado, aglomerantes e água de amassamento) pelo lodo de ETA, conforme observado na Figura 17.

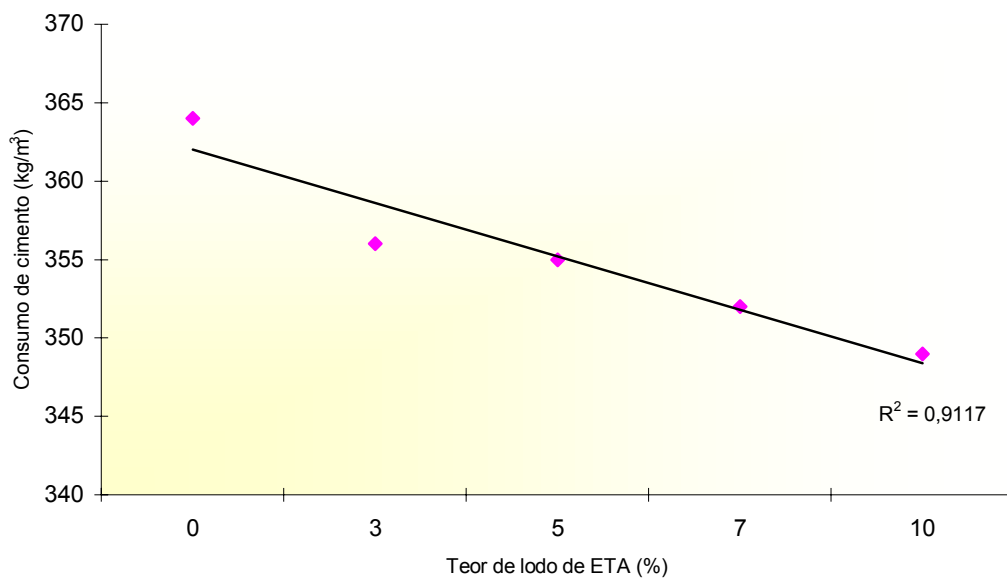


FIGURA 17 – CONSUMO DE CIMENTO E LODO DE ETA EM FUNÇÃO DO TRAÇO UTILIZADO .

Observa-se, também, que pela reta de regressão, o coeficiente de determinação foi de, aproximadamente, $R^2 = 0,9$, o que significa que mais de 90% da variação total de y podem ser explicados pela reta de regressão (TRIOLA, 1999). Podendo assim considerar a reta de regressão como demonstrativo do aumento do consumo de lodo de ETA e conseqüente diminuição do consumo de cimento. Sendo R^2 obtida com a variação explicada pela variação total.

Como o cimento é o material de maior custo dentre os insumos do concreto, esta redução é considerada boa, pois gera uma economia acentuada em grandes obras de concreto, considerando o traço com 10% de lodo.

Mesmo considerando valores intermediários de lodo de aproximadamente 8%, a redução do consumo de cimento é interessante do ponto de vista econômico, mas, principalmente do ponto de vista ambiental, onde grandes quantidades de minério deixaram de ser extraídas das jazidas locais para a fabricação do cimento. Também, com isto, tem-se redução considerável de poluentes atmosféricos, tal como CO₂, durante a síntese do clínquer / cimento.

A consistência do concreto fresco, denotada pela medida do abatimento do tronco de cone, apresentou uma variação bastante expressiva, sendo que a maior taxa de variação foi observada até a mistura de 3% de lodo. A partir deste teor, a variação foi, praticamente, linear, com o concreto com adição de 10% de lodo atingindo uma elevada consistência (abatimento nulo). Isto se deve ao fato de o lodo ser constituído, na maior parte, por finos, apresentando maior superfície específica que a areia substituída e, conseqüentemente, requerendo mais água para o adensamento, conforme Figura 18.

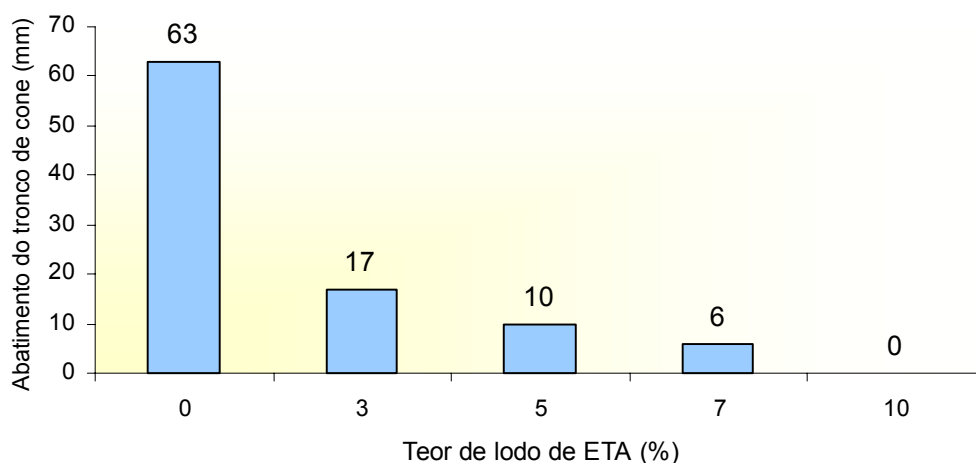


FIGURA 18 - ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE EM FUNÇÃO DO TEOR DE LODO.

Os concretos com 7 e 10% de lodo mostraram grande dificuldade de adensamento, mesmo com a utilização de vibradores com imersão, em virtude de sua elevada consistência (abatimento de 6 e 0 mm, respectivamente). Nestes casos, houve a necessidade de adensamento em mesa vibratória por vários minutos.

No caso da massa unitária, o valor correspondente ao concreto referência diminuiu cerca de 4% com o incremento da quantidade de lodo de ETA, o que demonstrou uma pequena redução de peso do material contendo o lodo. Isto se deve a menor massa específica do lodo centrifugado, cujo valor é em torno de 40% da densidade do agregado miúdo substituído.

O teor de ar incorporado, também diminuiu com o incremento do lodo. Apesar da redução relativa total ter sido de, aproximadamente, de 50%, isto não teve influência considerável nas demais propriedades dos concretos.

Na Figura 19 estão contidos os resultados da resistência à compressão axial simples, obtidos da ruptura dos CPs aos 7 e aos 28 dias a partir da moldagem. Os dados expressos referem-se ao valor médio da resistência obtida de três rupturas, para cada idade de dosagem.

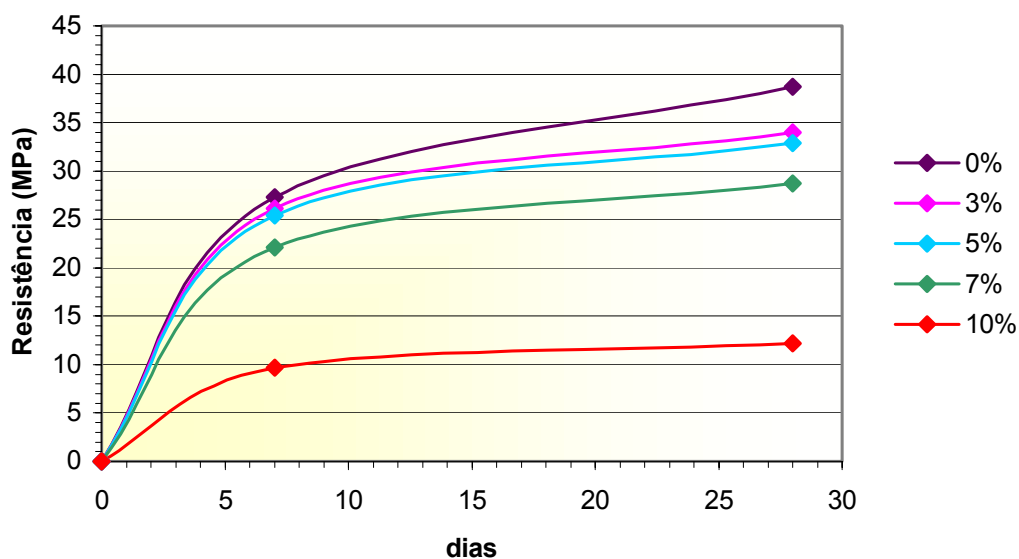


FIGURA 19 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO COM LODO EM FUNÇÃO DA IDADE.

Comparando-se as tensões de ruptura dos traços contendo lodo com a do concreto referência observa-se que, mesmo aos 7 dias de idade, a resistência à compressão já atingiu valores acima de 20 MPa, exceto para a dosagem com 10% de lodo, a qual pode ser utilizada apenas para fins menos nobres com baixas resistências.

Considerando apenas os valores de resistência mecânica obtidos, pode-se direcionar o uso das misturas incorporando até 5% de lodo, cujas resistências resultaram acima de 30 MPa, aos 28 dias, em aplicações de concreto convencional. No entanto, deve-se proceder a realização de outros ensaios mecânicos e de durabilidade, como os realizados no item 5.5.

Os valores de absorção, massa específica e índice de vazios, obtidos para as amostras dos concretos confeccionados, estão demonstrados na Tabela 16.

TABELA 16 - ENSAIOS FÍSICOS DO CONCRETO ENDURECIDO PARA ESTUDO DE DOSAGEM.

Teor do lodo de ETA (% peso areia)	0%	3%	5%	7%	10%
Absorção (%)					
Após imersão em água	7,14	7,76	7,80	8,62	8,94
Após imersão e fervura	7,44	7,87	9,18	9,39	9,63
Massa específica (kg/L)					
Real	2,70	2,54	2,54	2,53	2,54
Seca	2,25	2,12	2,06	2,05	2,05
Após saturação	2,41	2,28	2,22	2,22	2,23
Após saturação e fervura	2,42	2,28	2,25	2,24	2,24
Índice de vazios (%)					
Após saturação	16,13	16,40	16,51	17,87	18,45
Após saturação e fervura	16,72	17,62	19,26	19,52	19,95

Pode-se verificar pela Figura 20 que a absorção aumentou, consideravelmente, com o incremento da quantidade de lodo na massa, o que não é bom do ponto de vista da durabilidade frente a ambientes agressivos, uma vez que isto propicia o ingresso de elementos prejudiciais ao concreto como, por exemplo, os íons de cloreto e sulfato.

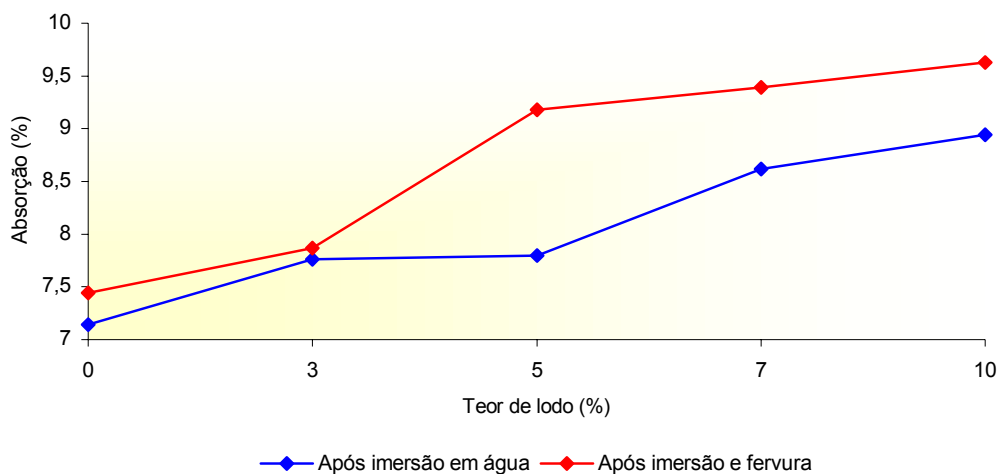


FIGURA 20 - TEOR DE ABSORÇÃO DE ÁGUA EM FUNÇÃO DO TEOR DE LODO.

Tanto a absorção quanto o índice de vazios apresentaram uma elevação drástica dos valores para teores de lodo acima de 5%, no que diz respeito às medidas realizadas após a saturação. Para as determinações realizadas após saturação e fervura dos CPs, este

aumento ocorreu para teores acima de 3%. A explicação mais provável para este aumento abrupto de ambos os parâmetros vem do fato de que o lodo, ou passa a se comportar como uma "esponja" no interior do concreto, fazendo com que a água penetre o material com maior facilidade, ou sofre dissolução pela imersão em água.

Em relação à massa específica (Figura 21), houve redução média de 7,4% nos valores, com a concentração de lodo de 0 a 10%, entretanto, a maior taxa de variação ocorreu para a mistura com 3% do material, uma vez que a partir deste teor de acréscimo foi praticamente linear e quase nulo. Esta redução da massa específica pode ser em decorrência da menor densidade do lodo centrifugado em comparação à da areia.

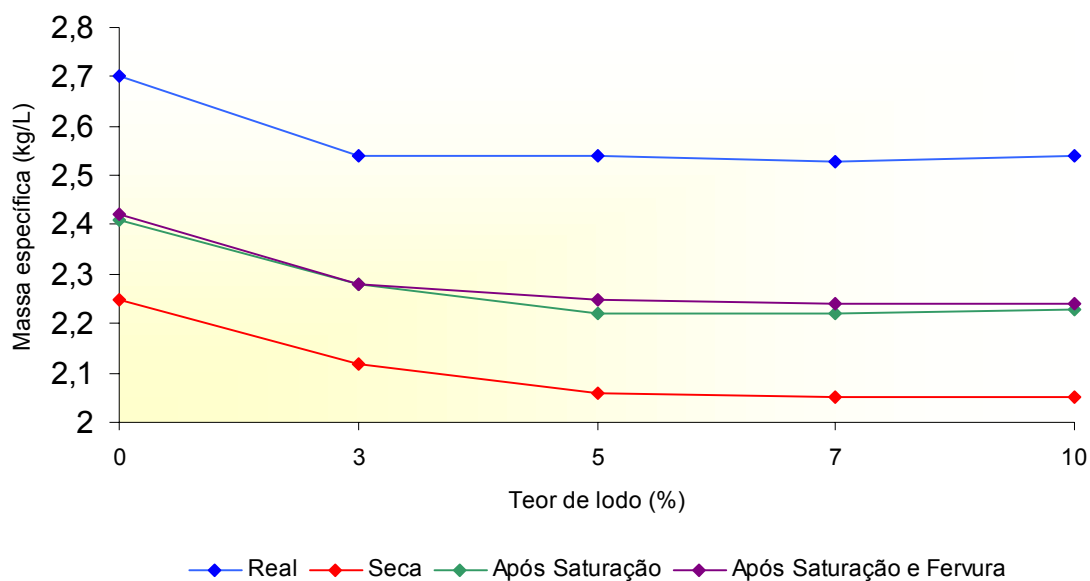


FIGURA 21 - MASSA ESPECÍFICA EM FUNÇÃO DO TEOR DE LODO.

A análise conjunta dos dados e resultados obtidos nos concretos confeccionados permitiu verificar que, nas condições e parâmetros adotados, os traços acima de 5% restringem a sua aplicação. De acordo com estes resultados, determinou-se os teores de 4% e 8% para a realização de análises complementares, afim de verificar a real possibilidade de sua utilização. Esses valores foram determinados pelo fato de 4% ser um

valor médio dos valores estudados e a dosagem de 8% por ser a provável dosagem máxima que se possa utilizar sem alterar a resistência moderada do concreto.

5.4 PROPRIEDADES DO CONCRETO FRESCO

Na Tabela 17 estão representadas algumas propriedades do concreto fresco, para as dosagens de 4% e 8% de lodo de ETA.

TABELA 17 – PROPRIEDADES DO CONCRETO FRESCO.

Teor do lodo de ETA (% peso da areia)	4%	8%
Temperatura do concreto (°C)	25	25,5
Traço		
Cimento	1,00	1,00
Areia	1,94	1,86
Brita 1	2,98	2,98
Lodo de ETA	0,08	0,16
Consumo (kg/m³)		
Cimento	348	344
Areia	676	640
Brita 1	1038	1026
Água	176	176
Lodo de ETA	28	56
Massa Unitária (kg/m³)		
Teórica	2331	2291
Real	2263	2247
Ar Incorporado (%)		
Teórica	2,9	1,9
Real	3,5	3,5

Analisando as propriedades obtidas para o concreto fresco, conforme já comentado anteriormente, observa-se que a mistura se torna igualmente mais exotérmica com o aumento do teor de lodo, no entanto, este aumento pode ser considerado insignificante, por ser de apenas 0,5 °C e este não interferir no aumento da fissuração do concreto.

Quando se adicionou 8% de lodo de ETA, observou-se uma redução de cerca de 2,5% de agregados (areia e brita) e aglomerante (cimento) se comparado com o traço de

4%. Já, comparando o consumo de cimento destes teores de 4% e 8% com o referência (0%) obtido no estudo de dosagem, a redução é de 4,4% e 5,5%, respectivamente. Esta redução é interessante economicamente na fabricação de concreto massa, e, principalmente, da preservação ambiental, já discutida no item 5.3.1.

Para a massa unitária houve uma redução de 1,72% com o aumento de 4% para 8% de lodo e de 3,45% se comparada com o concreto referência. Esta redução da massa unitária é explicada devido a menor densidade do lodo de ETA em relação a areia, como observado no item 5.3.1.

O teor de ar incorporado segue o mesmo processo que a massa unitária, diminuindo seu valor com o aumento do teor de lodo de ETA. Este diminuiu cerca de 34% entre os dois traços confeccionados, o que não interfere nas propriedades finais do concreto, para regiões onde não há a ocorrência de frios intensivos, temperaturas muito abaixo de 0 °C.

Na trabalhabilidade do concreto, obteve-se um abatimento do tronco de cone de 36 mm para o traço de 4% e de 18 mm para o traço de 8%. Isto era esperado, pois aumentou-se a parcela de finos (maiores superfícies específicas) e portanto, maior quantidade de água para uma mesma consistência. Para que ocorra um aumento na trabalhabilidade do concreto com 8% de lodo seria necessário um aumento na relação a/c, o que pode acarretar em uma diminuição da resistência. Na Figura 22 é mostrado o procedimento de medida do tronco de cone em uma das amostras obtida.



FIGURA 22 - ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE (*SLUMP TEST*).

Segundo Petrucci (1993), o abatimento de 18 mm é considerado como sendo uma consistência seca e pode ser utilizado para obras de estrutura de concreto armado ou protendido e, 36 mm possui uma consistência rija e é utilizado apenas em estruturas correntes. Tartuci e Giovannetti (1990) complementam que a consistência é o grau de umidade do concreto relacionado com a facilidade de deformar-se sob a ação de esforços.

A trabalhabilidade é definida em função de fatores internos e externos ao concreto fresco, sendo a consistência em fator interno importante mas não preponderante. Neste caso de concretos com 36 mm e 18 mm de abatimento do tronco de cone, a consistência pode ser considerada satisfatória dependendo das condições de obra, adensamento, desejados. Para o caso estudado, considerou-se como melhor consistência de 36 mm para o concreto com 4% de lodo.

5.5 PROPRIEDADES DO CONCRETO ENDURECIDO

Neste item são demonstrados os resultados das propriedades do concreto endurecido contendo teores de 4% e 8% de lodo de ETA, sendo elas: resistências mecânicas, módulo de deformação estática, índice de vazios, massa específica e absorção

d'água, microscopia eletrônica de varredura, difração de raios-X, permeabilidade e lixiviação e durabilidade.

5.5.1 Resistência à Compressão Axial Simples

Para este ensaio, utilizou-se os CPs com idades de 7, 14, 28 e 91 dias, obtendo-se uma resistência à compressão axial simples para cada traço em cada idade, como observado na Figura 23. A resistência foi obtida após o ensaio em dois CPs, no qual desprezou-se a mais baixa, pois a resistência maior representa melhor a resistência potencial do concreto, sendo esta considerada a máxima resistência que este concreto pode atingir.

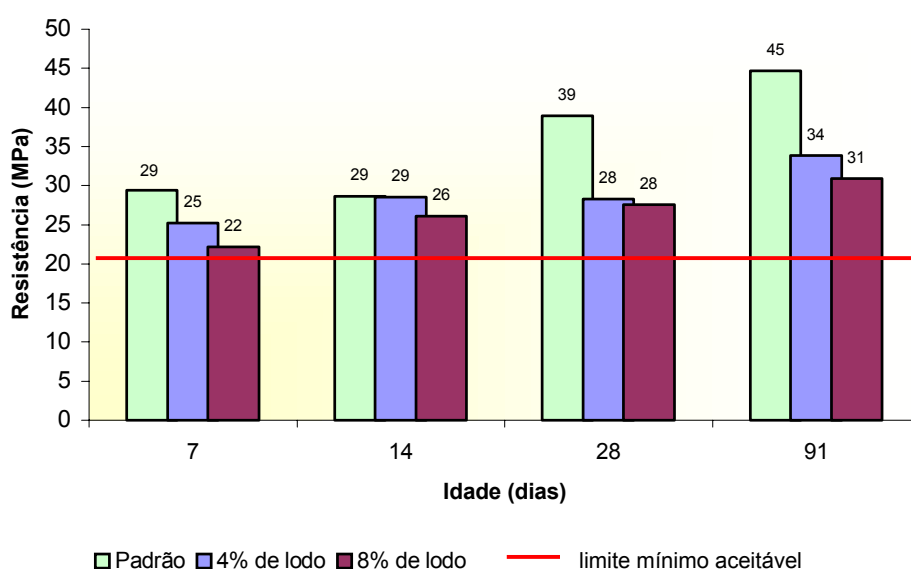


FIGURA 23 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL SIMPLES EM FUNÇÃO DA IDADE.

Analisando o gráfico observa-se que a resistência à compressão para a dosagem de 8% é em média 8% inferior a resistência da dosagem de 4%. No entanto, observa-se

que já aos 7 dias o traço com 4% de lodo atingiu resistência superior a 25 MPa, o que aconteceu aos 14 dias para o traço com 8% de lodo.

Observa-se, também, que aos 28 dias (idade de medida mais comum) o CP de 4% já atingiu uma resistência acima de 28 MPa, chegando a 33,9 MPa com 91 dias. Já, o CP de 8%, aos 28 dias teve uma resistência de 27,6 MPa atingindo valores de 30,9 MPa aos 91 dias.

De acordo com Mehta e Monteiro (1994) a resistência mais utilizada nas estruturas é a moderada, na qual a resistência à compressão varia entre 20 e 40 MPa. Helene e Terzian (1995) confirmam que a resistência para garantir a viabilidade do concreto deve ser superior a 20 MPa. Limite mínimo em que os CPs com a incorporação de lodo atingiram já aos 7 dias.

Em comparação com o traço padrão (sem utilização do lodo) observa-se uma redução média de 21,9% na resistência para o traço com 4% de lodo e 23,29% para 8% de lodo. A maior redução na resistência do CP com lodo comparado com o padrão foi verificada a partir dos 28 dias, onde esta redução ficou em torno de 28,15% e 27,51% para 91 dias.

Mesmo com estas reduções, os CPs com lodo atingiram valores superiores a 30 MPa, o que pode ser considerada uma boa resistência. Se considerar apenas esta resistência à compressão, pode-se direcionar o uso destes concretos em contrapisos, blocos e placas de vedação, peças decorativas, etc., porém, para confirmar tais aplicações deve-se verificar as análises dos outros ensaios mecânicos (tração à flexão, tração por compressão diametral, deformação estática) e durabilidade.

Na seqüência das Figuras 24 a 27, observa-se os CPs de concreto submetidos a resistência à compressão aos 7, 14, 28 e 91 dias, destacando-se suas fissuras após submetidos a tensão máxima.

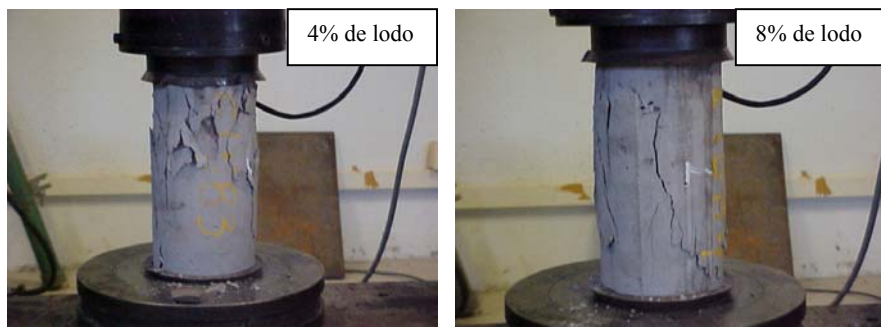


FIGURA 24 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL AOS 7 DIAS.

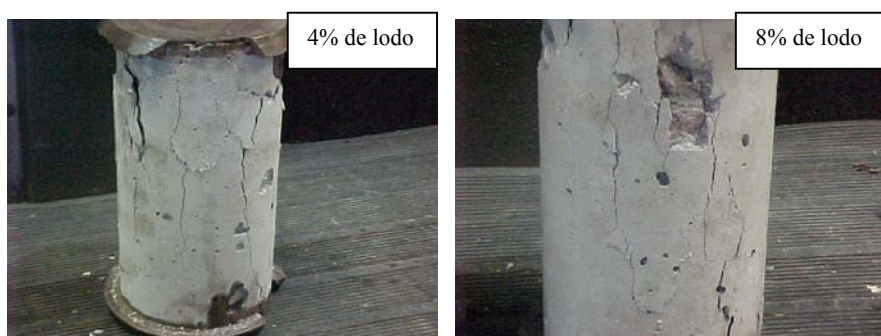


FIGURA 25 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL AOS 14 DIAS.



FIGURA 26 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL AOS 28 DIAS.

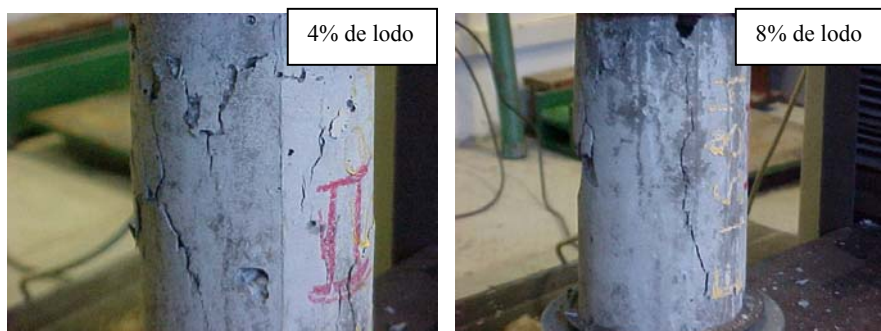


FIGURA 27 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL AOS 91 DIAS.

5.5.2 Resistência à Tração por Flexão

Na Figura 28, observam-se os CPs de concreto rompidos no terço do meio, ponto de ruptura desejável, após serem submetidos à tensão máxima no ensaio de resistência à tração por flexão.

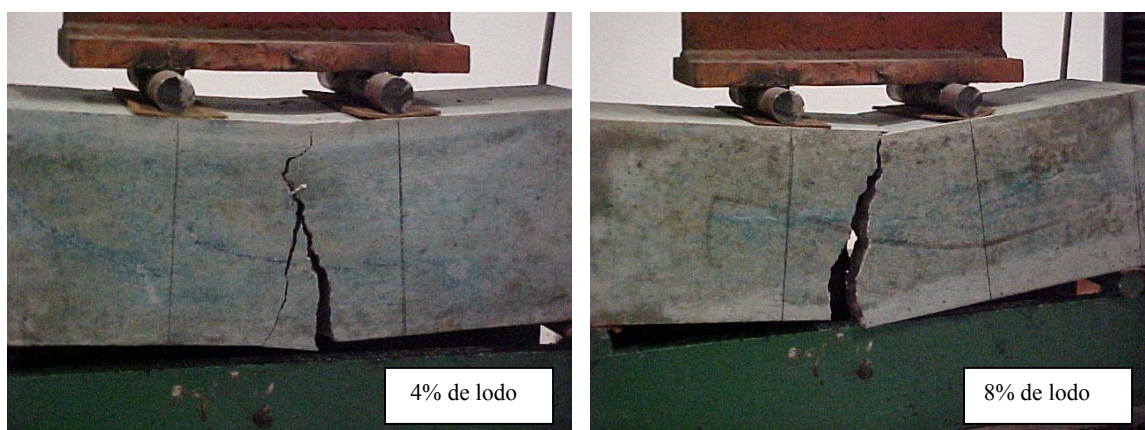


FIGURA 28 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR FLEXÃO

A ruptura destes CPs aconteceu em tensão de 3,1 MPa para o concreto com dosagem de 4% de lodo e 3,0 MPa para a dosagem de 8% de lodo. O traço padrão, sem a adição de lodo, obteve uma resistência de 4,2 MPa.

Comparando os traços contendo lodo e o traço padrão, observa-se redução média de 27,38%, ocorrendo a maior redução para o traço com 8% de lodo (28,57%). Na comparação entre os dois CPs com o lodo, esta redução foi de 3,50% com o aumento do incremento de lodo.

Mehta e Monteiro (1994) consideram que a resistência à tração por flexão representa 10% da resistência à compressão axial simples. De acordo com esta consideração, pode-se verificar que no CP com 4% de lodo esta relação de resistência fica em torno de 10,95%, sendo semelhante para o traço com 8% de lodo, com uma relação de 10,87%. Conforme resultados apresentados no item 5.5.1, estes valores estão 26,19 % abaixo do obtido para o concreto com 4% de lodo e, de 28,57 % para com 8% de adição,

aos 28 dias em relação ao padrão, mesmo assim, estas resistências estão similares aos valores indicados pela literatura, ou seja, possuem uma resistência recomendada, mesmo obtendo valores menores que o traço padrão.

5.5.3 Resistência à Tração por Compressão Diametral

Na ruptura diametral, o CP com dosagem de 4% de lodo obteve uma resistência média de 2,60 MPa e 2,55 MPa para a dosagem de 8% de lodo. A resistência padrão, obtida com o CP sem a adição de lodo, assim como a dosagem de 4%, foi de 2,60 MPa.

Na Figura 29, podem ser observadas as rupturas diametrais obtida nos CPs para as dosagens de 4 e 8% de lodo com a aplicação da tensão de 2,60 MPa e 2,55 MPa, respectivamente.

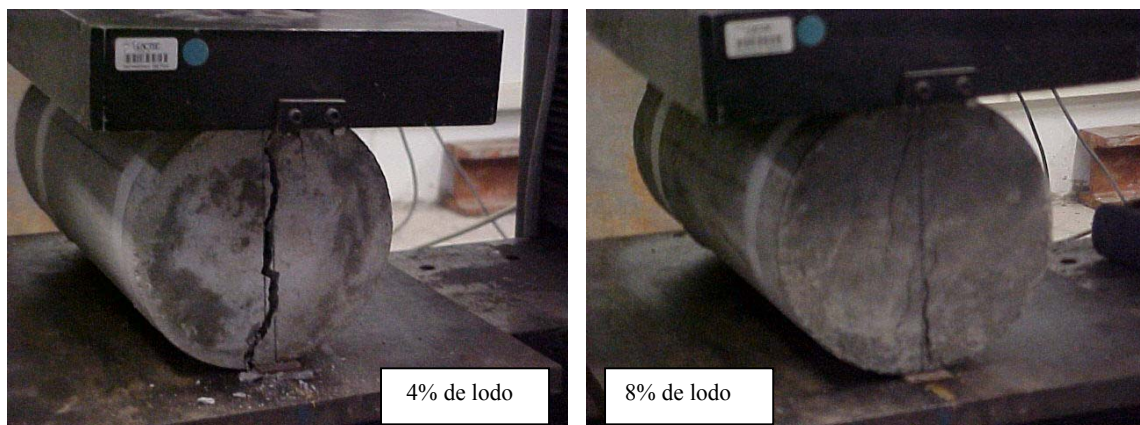


FIGURA 29 - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Segundo Scandiuzzi e Andriolo (1986) a razão típica da resistência à tração por compressão diametral pela resistência à compressão axial é em torno de 7 a 8%. Verificando esta razão para os concretos confeccionados com o lodo de ETA, obteve-se uma relação de 9,19% para o traço de 4% de lodo e 9,24% para o traço de 8% de lodo. Já para o traço padrão, houve uma redução nesta para 6,7%.

Observa-se uma similaridade nos valores obtidos para a resistência à tração por compressão diametral para os concretos com e sem a adição do lodo de ETA, o que demonstra que estes valores de resistências obtidos podem ser considerados satisfatórios, uma vez que foram obtidos também valores superiores aos indicados pela literatura, como demonstrado anteriormente.

5.5.4 Módulo de Deformação Estática

Na Figura 30, pode ser observada a ruptura ocorrida no CP com dosagem de 4% de lodo, no qual foi medida a deformação longitudinal com auxílio de extensômetro mecânico.



FIGURA 30 - MÓDULO DE DEFORMAÇÃO ESTÁTICA PARA O TRAÇO DE 4% DE LODO.

Na Figura 31, o gráfico demonstra o módulo de deformação (GPa) versus o carregamento (MPa) realizado pelo método do módulo secante plano III, nas amostras padrão, 4% e 8%, respectivamente.

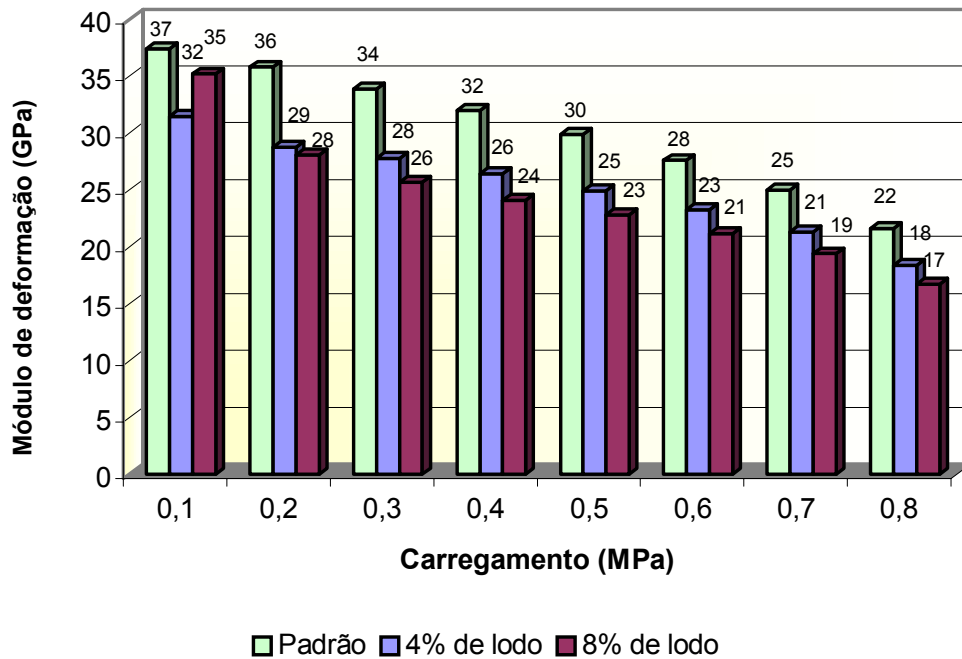


FIGURA 31 - MÓDULO DE DEFORMAÇÃO ESTÁTICA – MÓDULO SECANTE PLANO III.

Observando o gráfico verifica-se que o módulo de deformação do traço padrão foi cerca de 19% superior ao concreto com adição de lodo de ETA. No entanto, esta diferença foi reduzida para 8% quando a comparação é feita entre as duas dosagens de lodo.

O concreto com 8% de lodo obteve menores valores, que variam entre 16,7 GPa e 35,2 GPa, ficando cerca de 21% abaixo do padrão. Já na dosagem de 4%, houve uma redução de 16,59%, obtendo 31,5 GPa também como valor máximo, mas 18,4 GPa para o valor mínimo.

De acordo com Mehta e Monteiro (1994), os valores de módulo de deformação estática para concreto de peso normal podem variar entre 20 e 40 GPa, Neville (1997) complementa que este módulo de deformação estática varia de acordo com a resistência à compressão obtida pelo concreto, sendo este módulo em média 26 GPa para um concreto com resistência de 25 MPa e 28 GPa para concreto 30 MPa de resistência. Segundo estes dados, pode-se verificar que todos os concretos analisados ficaram com valores superiores

a 31 GPa, podendo estes serem utilizados normalmente por possuírem alto módulo de deformação estática, acima do valor mínimo recomendado.

5.5.5 Índice de Vazios, Massa Específica e Absorção D'água

Os valores obtidos para índice de vazios, massa específica e absorção d'água para os concretos com dosagem de 4% e 8% de lodo, estão descritos na Tabela 18.

TABELA 18 - ABSORÇÃO, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA.

Teor de lodo de ETA (% peso da areia)	4%	8%
Absorção (%)		
Após imersão em água	7,41	7,46
Após imersão em água	7,41	7,46
Massa específica (kg/L)		
Real	2,51	2,51
Seca	2,09	2,08
Após saturação	2,24	2,24
Após saturação e fervura	2,26	2,25
Índice de vazios (%)		
Após saturação	15,64	16,93
Após saturação e fervura	15,76	17,51

Observa-se que a absorção d'água aumentou com o incremento na quantidade de lodo. Se comparado o concreto com adição de lodo e o concreto referência (sem adição de lodo - estudo de dosagem) observa-se que ocorreu um aumento médio de 4,15% nesta absorção. No entanto, o aumento sofrido pelo concreto com 8% de lodo em relação de 4% de lodo, foi de apenas 0,67%, não sendo considerado significativo, portanto, qualquer umas das duas dosagens podem ser indicadas para a utilização. Um ponto considerado desfavorável a este aumento na absorção, é que altos valores representam um maior ingresso de elementos que podem ser prejudiciais ao concreto.

Este aumento de 4,15% na absorção pode ter ocorrido pelos mesmos fatores já citados no item 5.3.1, de que o lodo pode se comportar como “esponja” no interior do concreto, absorvendo a água.

A absorção mede o volume ocupado pelos poros de concreto e é diferente de permeabilidade (NEVILLE, 1997). Segundo o autor, pode ocorrer uma grande variação nos resultados devido a não remoção suficiente da água ou pela elevada temperatura que pode remover parte da água combinada. Devido a isso, a absorção não é considerada uma medida de qualidade do concreto, no entanto, observa-se que os concretos de boa qualidade apresentam absorção abaixo de 10%.

No caso do concreto com adição de lodo, a absorção ficou em torno de 7,4%, podendo ser enquadrado como um concreto de boa qualidade, para certos tipos de obras onde a absorção possa ser evitada (interiores, por exemplo).

Para o índice de vazios, comparando com o concreto referência, observa-se uma redução para o concreto com 4% de lodo e um aumento para o concreto com 8% de lodo. Fazendo uma comparação entre estes dois CPs, observa-se um aumento com o incremento do lodo, principalmente, após saturação e fervura. Este aumento no índice de vazios pode ser um fator desfavorável ao concreto, pois estes vazios podem facilitar o ingresso de materiais que sejam prejudiciais ao concreto.

Em relação à massa específica, observa-se que esta ficou em 2,5 kg/L para ambas as dosagens. Segundo Petrucci (1993), Scandiuzzi e Andriolo (1986), a massa específica do concreto normalmente utilizado varia entre 2,30 e 2,50 kg/L, estando os valores encontrados na faixa encontrada na literatura. Comparando com o valor encontrado para o concreto sem a adição de lodo, cerca de 2,70 kg/L, observa-se uma redução, a qual pode ser justificada pela implementação do lodo com menor valor (cerca de 1,05 kg/L) comparado com a areia (massa específica = 2,61 kg/L). No entanto, mesmo com esta redução os valores encontrados se enquadram dentro daqueles usados na construção civil.

5.5.6 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do Concreto

A microscopia eletrônica de varredura com microsonda analítica de raios-X do concreto permite, pelas imagens e espectro, a determinação de dados relacionados a porosidade e composição. Para os concretos com a adição de lodo foram realizadas diferentes imagens para cada dosagem, as quais estão demonstradas nas seqüência de Figuras 32 a 35.

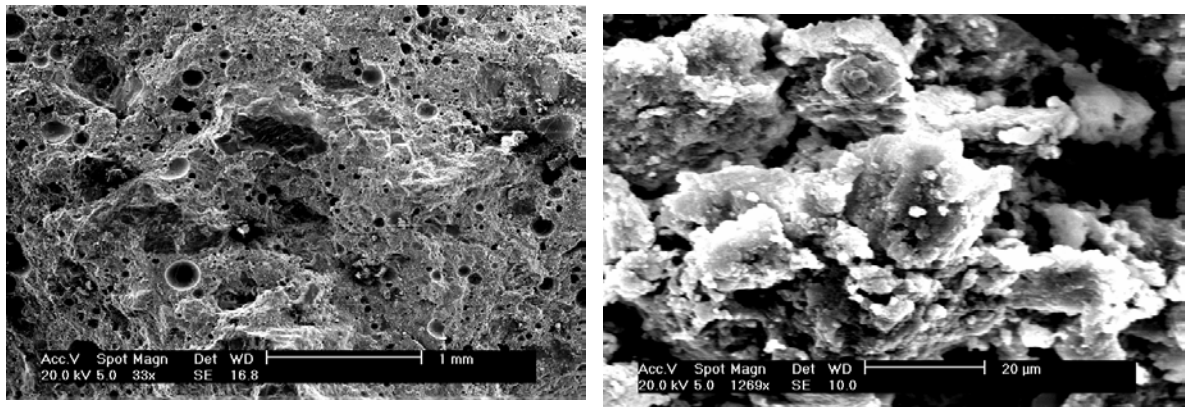


FIGURA 32 - MEV DO CONCRETO COM 4% DE LODO.

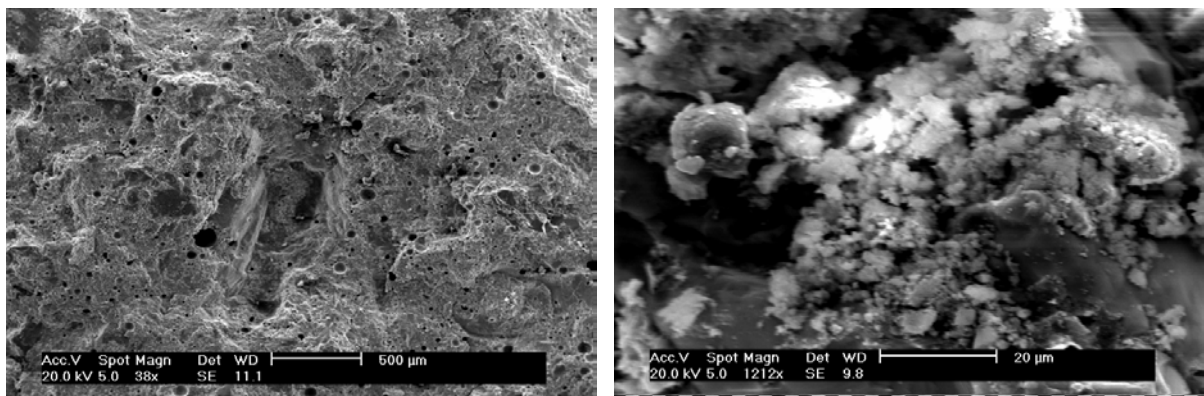


FIGURA 33 – MEV DO CONCRETO COM 8% DE LODO.

Nas Figuras 32 e 33, podem ser observadas as micrografias do concreto com dosagens de 4% e 8% de lodo, respectivamente.

Pela análise das imagens não se verificou a ocorrência de fases químicas e microestruturas diferentes no concreto, demonstrando que a incorporação do lodo não afetou sua estrutura.

Comparando as imagens da dosagem de 4% de lodo com a de 8% de lodo, observa-se uma maior porosidade no concreto com 4%, esta diferença de porosidade se acentua uma vez que o aumento realizado na Figura 32 (33x) é menor que o da Figura 33 (38x), demonstrando assim, uma maior quantidade de poros e em maior tamanho.

A porosidade é considerada como um grande fator de influência na permeabilidade do concreto (Scandiuzzi e Andriolo, 1986), a dosagem de 4% de lodo pode ser considerada a mais permeável, como comprovam os testes realizados e descritos no item 5.5.8, confirmando esta relação direta.

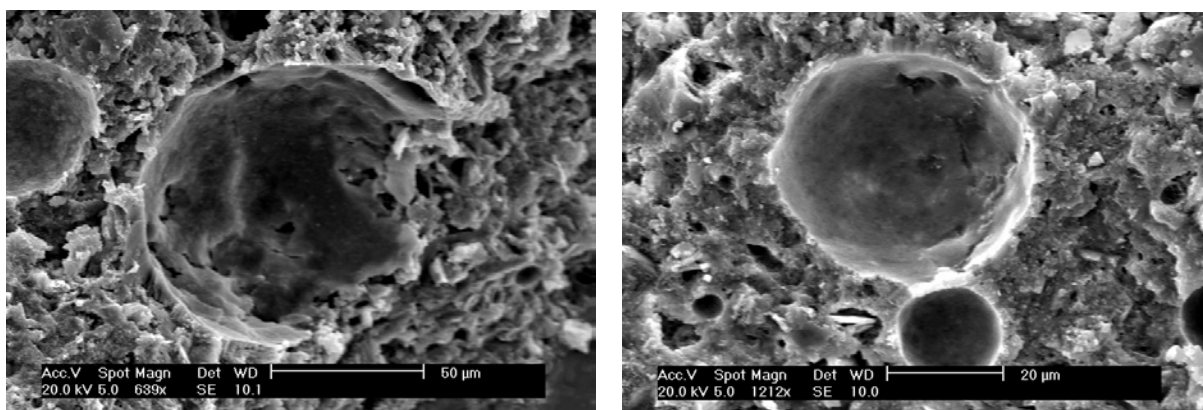


FIGURA 34 – PRESENÇA DE POROS NO CONCRETO COM ADIÇÃO DE 4% E 8% DE LODO, RESPECTIVAMENTE.

A Figura 34 confirma as observações anteriores sobre a maior porosidade atribuída à dosagem com 4% de lodo. Estes poros podem ter ocorridos devido a presença de ar incorporado na mistura e moldagem ou até mesmo bolhas d'água.

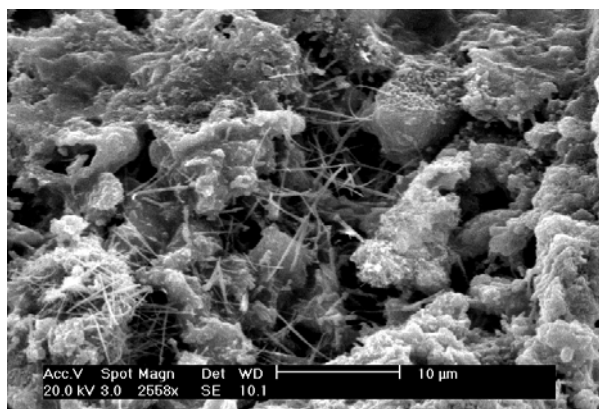


FIGURA 35 – MEV DO CONCRETO COM 4% DEMONSTRANDO PRESENÇA DE ETRINGITAS.

Na Figura 35, há a presença de etringitas, que segundo Kaefer (2002) são cristais prismáticos e aciculares formados pelo ataque de sulfatos a argamassa do concreto. Estas etringitas são consideradas prejudiciais à resistência do concreto por causarem tensões trativas no interior da massa e, conseqüentemente, facilidade de ruptura. As etringitas foram encontradas apenas no concreto com 4% de lodo em uma pequena parte e em alta resolução (2558x). No entanto, esta pequena presença não interferiu na resistência, uma vez que o concreto com 4% de lodo foi o que apresentou maior resistência.

Não há uma justificativa plausível para a presença desta fase de concreto com 4% e não no de 8%. Talvez uma inhomogeneidade do lodo, o que explicaria a presença de etringitas e, também, a maior concentração de poros, ou seja, a possível presença de sulfato de alumínio na massa de lodo.

5.5.7 Difração de Raios - X (DRX)

A análise de difração de raios - X (DRX) do concreto foi realizada para as dosagens de 4% e 8% e o concreto padrão, resultando no difratograma demonstrado na Figura 36.

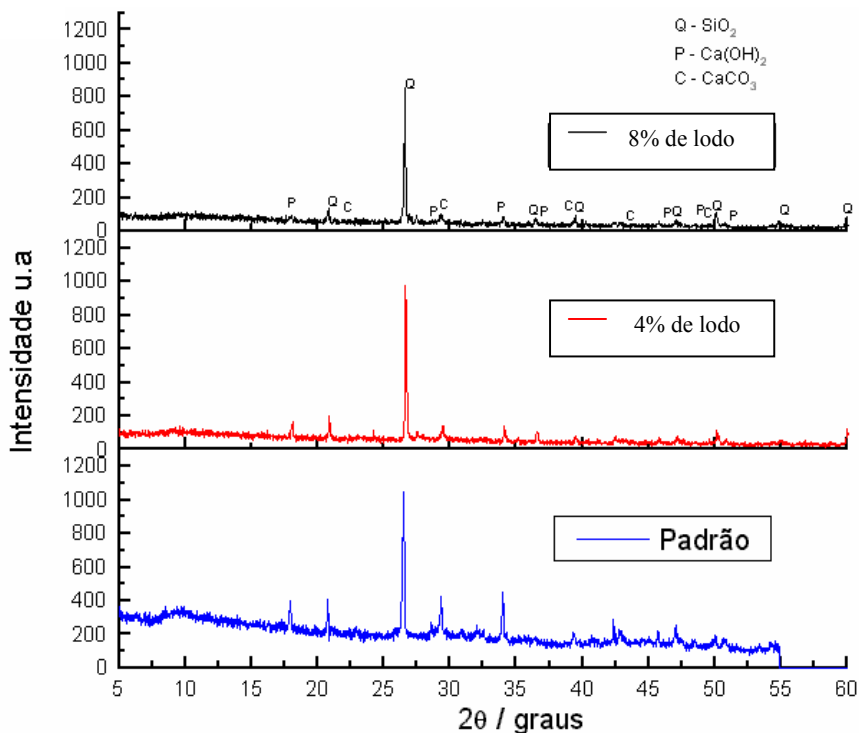


FIGURA 36 – DIFRATOGRAMA DAS AMOSTRAS DE CONCRETO COM E SEM A ADIÇÃO DE LODO.

Como pode ser observado pelos difratogramas obtidos, os principais picos representam a presença de quartzo (SiO_2), Portlandita (Ca(OH)_2), calcita (CaCO_3), hidrato silicato de cálcio ($\text{Ca}_{1,5}\text{SiO}_{3,5} \cdot n\text{H}_2\text{O}$) e etringita ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_2 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$).

Pela comparação dos três difratogramas verifica-se que não houve grandes alterações nos principais picos, o que demonstra que as fases químicas encontradas são pertencentes ao concreto. Neste caso, observa-se que não houve alteração química do concreto devido a incorporação de lodo.

Vale salientar, que a identificação ocorreu apenas para as fases de maior intensidade, e também, podem ter ocorridos sobreposições dos picos de cimento, o que pode resultar na presença de outros elementos não identificados.

5.5.8 Estudo da Permeabilidade e Lixiviação

No ensaio de permeabilidade, os CPs sofreram penetração forçada de água por, aproximadamente, 500 horas, anotando-se esta percolação de água em cm. Na Figura 37 observa-se o gráfico obtido com a percolação acumulada em cm³ pelas horas acumuladas, com duas amostras para cada dosagem e a amostra padrão.

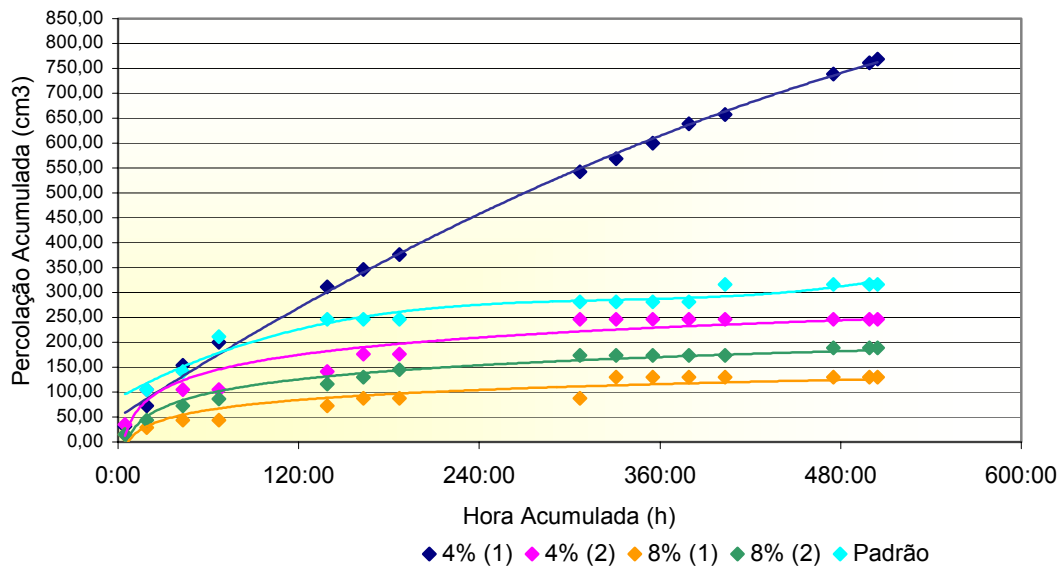


FIGURA 37 - PERMEABILIDADE: PEROLAÇÃO ACUMULADA X HORA ACUMULADA.

Pela análise gráfica, observa-se que o concreto com 4% de lodo obteve uma percolação maior que o concreto com 8% de lodo. No entanto, analisando a dosagem de 4%, observa-se que a amostra 1 obteve uma percolação muito maior que a amostra 2, cerca de 210% a mais. Este aumento drástico na percolação pode ter ocorrido por uma falha no estancamento entre o concreto e a campânula, fazendo com que a água não percolasse apenas pelo interior do concreto, mas também pelas laterais deste.

No gráfico, observa-se também que a amostra do concreto padrão (sem a adição do lodo) obteve uma percolação maior que o concreto com 8% de lodo e a amostra 2 do concreto com 4% de lodo.

Comparando a percolação ocorrida na dosagem de 4% (246,32 cm³) com a dosagem de 8% (em média 159,26 cm³) observa-se que houve um decréscimo nesta, em torno de 35%, com o incremento do lodo. Já, fazendo esta comparação do concreto padrão com as dosagens observa-se que em relação a percolação média da dosagem de 8%, houve um decréscimo de cerca de 50% e para a amostra 2 da dosagem de 4%, esse decréscimo diminui para 22%.

Pela percolação acumulada observa-se que o concreto com 8% de lodo foi o menos permeável, já o padrão se apresentou mais permeável que os concretos com 8% e 4% de lodo (amostra 2), ficando abaixo apenas da amostra 1 da dosagem de 4%, o qual devido a seus altos valores pode ter apresentado falhas nos testes.

Outra comparação a ser feita é pela análise do coeficiente de permeabilidade, demonstrado na Tabela 19.

TABELA 19 - COEFICIENTES DE PERMEABILIDADE.

	Padrão	4% (1)	4% (2)	8% (1)	8% (2)
Coeficiente de permeabilidade – k (cm/s)	$0,37 \times 10^{-10}$	$4,30 \times 10^{-10}$	$1,26 \times 10^{-10}$	$0,731 \times 10^{-10}$	$1,02 \times 10^{-10}$

Da análise dos coeficientes de permeabilidade, observa-se que estes decrescem com o aumento do teor de lodo, como já visto na percolação acumulada, ao contrário acontece com o concreto padrão (sem o incremento do lodo) que obteve o menor coeficiente.

Scandiuzzi e Andriolo (1986) e Mehta e Monteiro (1994) admitem que concretos de resistência moderada (mais comumente usados) apresentem coeficientes de permeabilidade da ordem de $0,1 \times 10^{-10}$ a 1×10^{-10} cm/s.

Analisando os coeficientes obtidos observa-se que apenas o traço 1 da dosagem de 8% de lodo apresentou valor dentro desta faixa mais utilizada, sendo o coeficiente de $0,73 \times 10^{-10}$ cm/s.

No entanto, Neville (1997) define como um limite arbitrário aceitável para o coeficiente de permeabilidade de $1,5 \times 10^{-9}$ cm/s (valor adotado em obras do Bureau Reclamation), ou seja, valores acima deste são considerados permeáveis. De acordo com este limite, observa-se que todos os coeficientes ficaram na ordem de 10^{-10} , bem abaixo do limite aceitável. A amostra padrão obteve o menor coeficiente de permeabilidade, ao contrário do demonstrado no gráfico de percolação acumulada x hora acumulada. Esse coeficiente obtido foi de $0,37 \times 10^{-10}$ cm/s, estando dentro da faixa mais usada pela literatura. No entanto, mesmo obtendo valores acima desta faixa mais utilizada, os coeficientes de permeabilidade dos concretos contendo lodo de ETA obtiveram valores aceitáveis, abaixo de $1,5 \times 10^{-9}$ cm/s, não sendo considerados permeáveis.

Após o término do teste de permeabilidade, a água percolada foi analisada por MEV verificando os materiais presentes nesta, sendo eles:

- carbono; oxigênio; cobalto; sódio; sílica; enxofre; cloro; potássio; cálcio e níquel.

Na Figura 38 é observado o espectro da água analisada com o picos referentes a cada metal presente nesta.

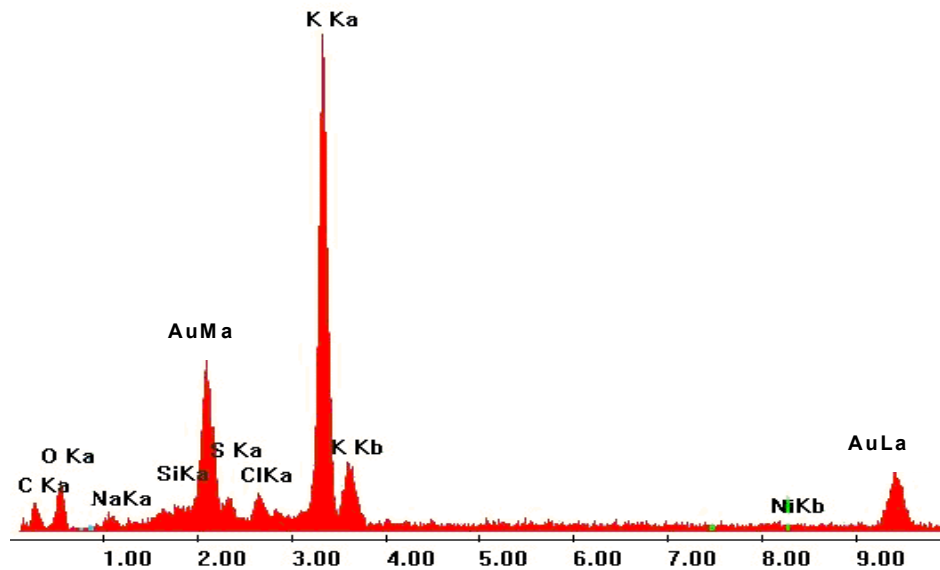


FIGURA 38 - ESPECTRO DO MATERIAL LIXIVIADO NO CONCRETO POR MICROSSONDA ANALÍTICA DE RAIOS - X.

Para o teste de lixiviação em meio ácido e básico foram encontrados os metais relacionados na Tabela 20.

TABELA 20 - METAIS PRESENTES NAS SOLUÇÕES ÁCIDAS E BÁSICAS DA LIXIVIAÇÃO DO CONCRETO.

Elementos (mg/L)	NaOH		Ácido Acético	
	4%	8%	4%	8%
Alumínio	47,00 (95,61%)	42,0 0 (94,57%)	91,00 (37,64%)	102,00 (42,12%)
Cádmio	0,01 (0,02%)	< 0,01 (<0,02%)	0,01 (0,004%)	0,01 (0,004%)
Chumbo	0,10 (0,20%)	0,85 (1,91%)	0,40 (0,16%)	0,45 (0,18%)
Cobre	0,60 (1,22%)	0,40 (0,90%)	2,90 (1,20%)	2,60 (1,07%)
Cromo	0,40 (0,81%)	0,20 (0,45%)	0,95 (0,39%)	0,70 (0,29%)
Ferro	0,70 (1,42%)	0,60 (1,35%)	140 (57,91%)	130,00 (53,68%)
Manganês	0,10 (0,20%)	0,10 (0,22%)	3,55 (1,47%)	3,75 (1,55%)
Níquel	0,10 (0,20%)	0,10 (0,22%)	0,65 (0,27%)	0,65 (0,27%)
Zinco	0,15 (0,30%)	0,15 (0,34%)	2,30 (0,95%)	2,00 (0,82%)

Observa-se que em meio ácido, os metais que foram liberados em maior quantidade nas duas dosagens foram o ferro e o alumínio, somando mais de 95% do total. A quantidade dos demais metais presentes na lixiviação foram inferiores a 3,75 mg/L, que

representam 1,55%. Na comparação entre os teores de 4% e 8% de lodo pode-se verificar uma semelhança na quantidade de metais liberados.

No caso do concreto com 4% de lodo, observa-se uma liberação maior de ferro que no concreto com 8% de lodo, ao contrário acontece com o alumínio, que é encontrado em maior quantidade na dosagem de 8%.

Na solução alcalina de NaOH, a concentração de metais presentes no lixiviado foi muito inferior ao meio ácido. Nesta solução observam-se altos teores de alumínio, o qual sozinho representa cerca de 95% do metais presentes.

Tanto nas soluções ácida como básica, o alumínio pode ser considerado um metal importante na lixiviação e para o ferro, este só é considerado frente a ambientes ácidos. A presença dos demais metais pode ser considerado insignificante, uma vez que estes foram encontrados em quantidades inferiores a 2%. O alumínio e o ferro podem ser resultantes da incorporação do lodo, mas vale lembrar, que estes compostos também são constituintes do concreto, o que justifica a sua alta presença. Nesse caso, a incorporação do lodo, não pode ser considerado um problema no concreto frente a ambientes ácidos e básicos, uma vez que não há a liberação de metais em grandes quantidades, pois houve o acréscimo do dobro de lodo e não houve alterações nas quantidades dos elementos detectados, demonstrando que esses valores são referentes ao conjunto (concreto + lodo).

Quando é feita a comparação dos valores obtidos com a NBR 10.004, norma de classificação de resíduos sólidos quanto ao risco ao meio ambiente e saúde, verifica-se que dos elementos analisados, apenas o cádmio, chumbo e cromo estão referenciados na norma. Salienta-se que não foi possível uma comparação quantitativa com a norma, uma vez que, os testes da norma devem ser realizados em lixiviação ácida por 48 horas e solubilização em água por 7 dias, e os testes realizados para o concreto ocorreram em meio ácido e básico por 7 dias. Neste caso, verificou-se apenas a presença dos elementos e não a sua quantidade.

Caso essa lixiviação ocorresse em ambiente natural e entrasse em contato com cursos d'água, pode-se verificar pelos limites aceitáveis pela legislação (Tabela 21) que

no meio básico, o alumínio, chumbo, níquel e cobre estão acima dos limites estabelecidos para rios de Classe 3 (maioria dos rios do estado do Paraná). No entanto, para os padrões de lançamento de acordo com o Conama nº20/86, apenas o chumbo, em uma das dosagens, estaria acima do permitido. Já, no meio ácido, a situação seria mais complicada, uma vez que para rios Classe 3 apenas o zinco e o cádmio estão dentro dos padrões permitidos. Para o lançamento, este também não poderia ocorrer, pois dos nove parâmetros analisados, quatro estão acima do permitido, sendo eles: chumbo, ferro, manganês e cobre, salientando, que para o lançamento não é exigido um teor máximo de alumínio. Esta situação deve ser considerada com cautela, já que, tal tipo de contaminação pode afetar solos locais e acontecer a dissolução das fases minerais contidos no mesmo.

TABELA 21 - LIMITES ESTABELECIDOS PELA LEGISLAÇÃO PARA A PRESENÇA DE METAIS

Limites dos elementos (mg/L)	Rio classe 3	Lançamento
Alumínio	0,1	-
Cádmio	0,01	0,2
Chumbo	0,05	0,5
Cobre	0,5	1
Cromo	0,5	2
Ferro	5	15
Manganês	0,5	1
Níquel	0,025	2
Zinco	5	5

FONTE: RESOLUÇÃO CONAMA N.º 20 (1986).

5.5.9 Ensaios de Durabilidade

Entre as Figuras 39 e 42 estão apresentadas curvas do potencial de corrosão, comparativas entre amostras contendo 4 e 8% de lodo e uma amostra considerada referência, sem lodo no traço, das barras metálicas dos CPs submetidas ao envelhecimento acelerado em solução salina e em função do tempo.

Para melhor visualização, três regiões dos gráficos foram destacadas, a primeira, com potenciais menos negativos do que - 0,125 mV, onde da literatura pesquisada

(ASTM C876), considerou-se como 90% de probabilidade de não haver corrosão; a segunda com potenciais intermediários entre -0,125 mV e - 0,275 mV, cuja probabilidade de corrosão é incerta; e, a última, com potenciais de corrosão mais negativos do que - 0,275 mV, onde é considerada a faixa de 90% de probabilidade de corrosão.

Como observado nos gráficos das Figuras 30 e 40, para as amostras com 4% de lodo, comparativamente à referência, não houve no período analisado alterações significativas no potencial de corrosão para estabelecer qualquer influência do lodo na diminuição do tempo de vida útil da estrutura. Ou seja, concentrações de lodo de até 4% não influenciaram no processo de envelhecimento precoce da estrutura.

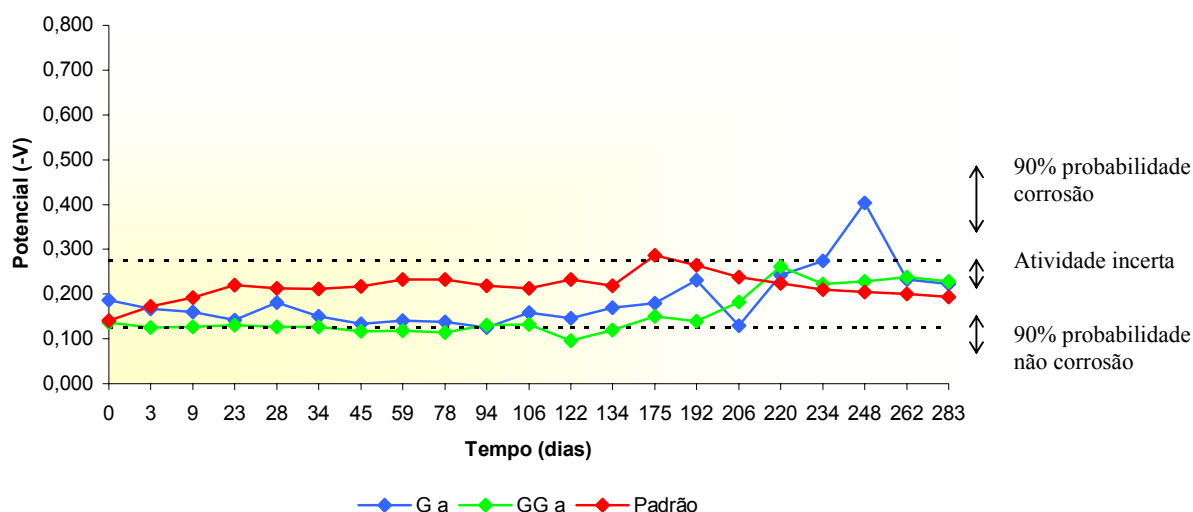


FIGURA 39 – CURVA POTENCIAL DE CORROSÃO X TEMPO DE ENVELHECIMENTO PARA O ELETRODO DE TRABALHO A DO CONCRETO COM 4% DE LODO.

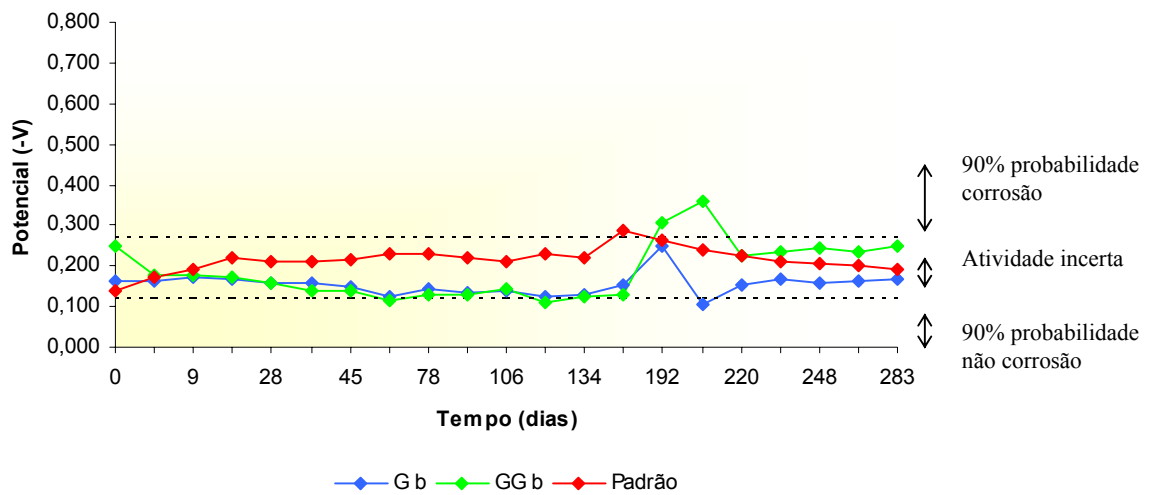


FIGURA 40 - CURVA POTENCIAL DE CORROSÃO X TEMPO DE ENVELHECIMENTO PARA O ELETRODO DE TRABALHO B DO CONCRETO COM 4% DE LODO.

Ambas as amostras com 8% de lodo, conforme pode ser verificado nos gráficos das Figuras 41 e 42, apresentaram alterações de potencial para a região de 90% de probabilidade de corrosão. Ou seja, esta concentração de lodo no concreto, parece influenciar na redução do tempo de vida útil da estrutura de concreto armado.

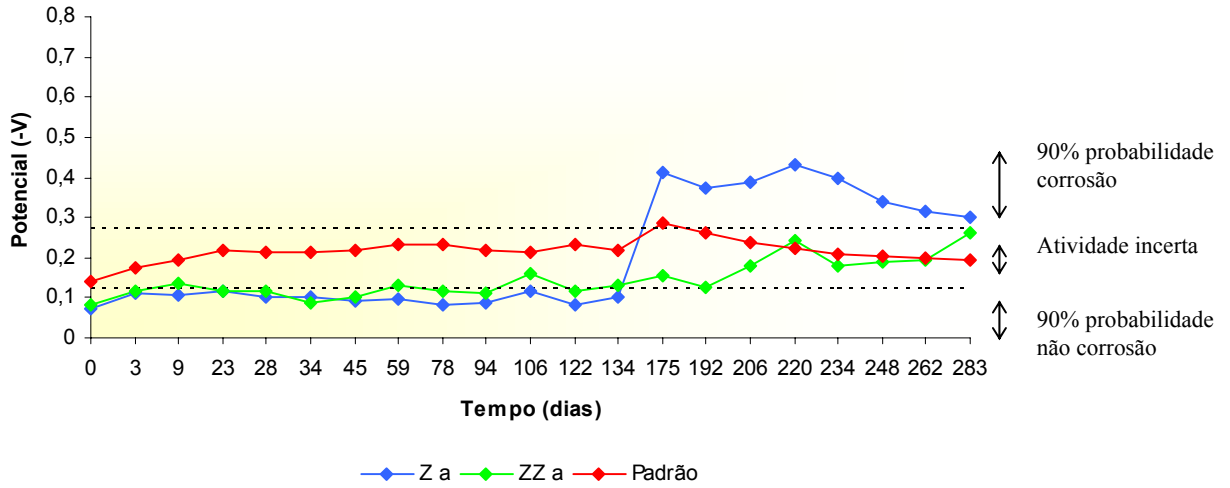


FIGURA 41 - CURVA POTENCIAL DE CORROSÃO X TEMPO DE ENVELHECIMENTO PARA O ELETRODO DE TRABALHO A DO CONCRETO COM 8% DE LODO.

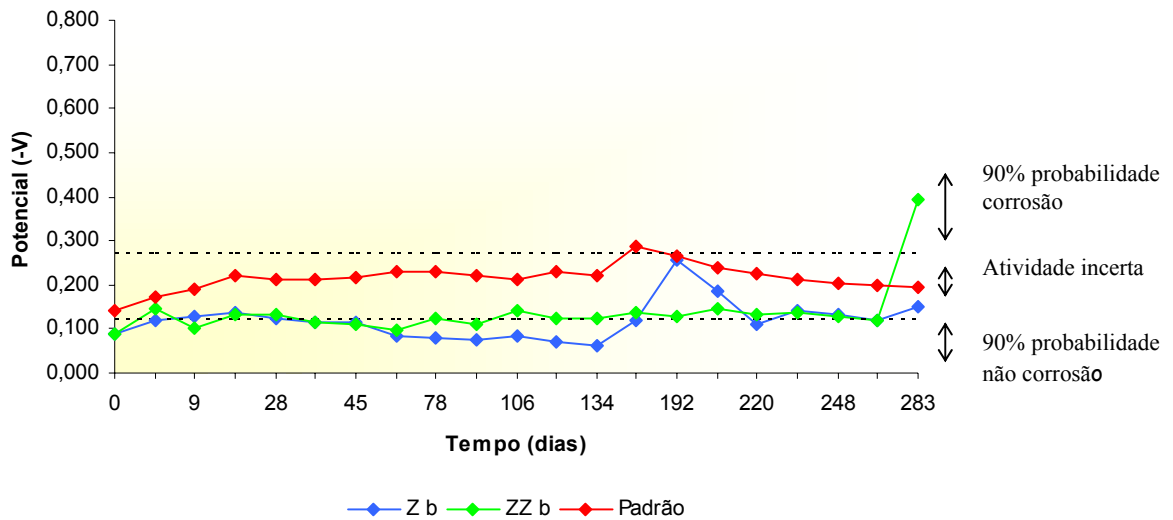


FIGURA 42 - CURVA POTENCIAL DE CORROSÃO X TEMPO DE ENVELHECIMENTO PARA O ELETRODO DE TRABALHO B DO CONCRETO COM 8% DE LODO.

De um modo geral, a incorporação de 4% de lodo de ETA no concreto não afetou sua durabilidade, ficando estes com potencial de corrosão similar ao do padrão de referência.

As amostras com 8% de lodo, apresentaram tendência de passagem do potencial de corrosão para a região de mais alta probabilidade (90% de probabilidade), porém não foi detectada nenhuma alteração, tais como trincas ou outros defeitos na cobertura do concreto no período analisado.

Isto não significa que este material apresentará diminuição de sua vida útil, mas sim, de que há esta tendência, uma vez que as barras metálicas, passando do potencial passivo do metal para o ativo, com corrosão, poderão gerar óxidos internos e, conseqüentemente, tensões trativas no concreto, causando a ruptura da sua camada de cobertura.

6. CONCLUSÃO

Os resultados dos experimentos realizados com o concreto confeccionado a partir da incorporação do lodo de ETA centrifugado, permitiram concluir que:

- o lodo utilizado nos concretos, obtido da ETA Passaúna, apresentou as características esperadas, com alta presença de sílica e alumínio devido a composição do material sedimentado e ao uso do coagulante sulfato de alumínio no tratamento da água;
- no estudo de dosagem de lodo de ETA em concreto observou-se que, com teores acima de 10% em relação ao peso seco da areia, o concreto não apresenta propriedades mecânicas para utilização, sendo a resistência inferior a 15 Mpa;
- através do estudo de dosagens determinou-se que os concretos devem ser confeccionadas com teores de lodo inferiores a 10%, para que possam atingir resistências moderadas;
- os valores obtidos para a resistência à compressão axial nos concretos com teores de 4% e 8% de lodo em relação ao peso seco da areia ficaram superiores a 27 MPa já aos 28 dias atendendo as exigências de fabricação;
- os resultados dos estudos de resistência à tração, absorção, módulo de deformação, permeabilidade dos concretos com a adição do lodo sugerem a possibilidade de utilização desses concretos para diversas aplicações na construção civil, permitindo o atendimento dos requisitos mínimos inerentes;
- a resistência à compressão axial aos 28 dias para o concreto com 4% de lodo foi 28 MPa, e 27,6 MPa para o concreto com a adição de 8% de lodo, estando acima dos

25 MPa requerido pela literatura, para uso em artefatos de concreto para redes de distribuição de energias (postes);

- no caso da resistência à tração por flexão, o concreto com lodo atingiu em média 11% da resistência à compressão, acima dos 10% requeridos. O mesmo acontece com a resistência à compressão diametral, que obteve em média 9% da resistência à compressão, sendo exigido pela literatura de 7 a 8%;

- o concreto atingiu resistência mecânica para a sua utilização em concreto estrutural, mas pelo não conhecimento das interações químicas existentes entre o lodo e o concreto, e principalmente, pela atividade incerta de corrosão, direciona-se sua utilização para concretos não – estruturais;

- entre as aplicações da utilização do concreto com lodo de ETA é possível citar: contrapisos, blocos e placas de vedação, peças decorativas em concreto, placas de estai para redes de distribuição de energia elétrica, tampas de concreto para coberturas de fossas e caixas de passagem, pedestais para apoio de equipamentos, calçadas e pavimentos residenciais, dentre outras;

- na comparação dos concretos com e sem a adição do lodo de ETA, observa-se uma redução nas propriedades mecânicas analisadas a medida que acontece a incorporação deste lodo, no entanto, estas propriedades não comprometem as exigências requeridas;

- a utilização do lodo reduz o consumo de matérias – primas naturais, tais como: areia e brita e, indiretamente, insumos para a fabricação de cimento, uma vez que o aglomerante usado, também, foi reduzido. Tais reduções quantitativas destes materiais minimizam o impacto ambiental pela diminuição da extração dos minérios nas jazidas, e pela redução dos poluentes atmosféricos advindos da produção de cimento clínquer, além

de reduzir drasticamente a quantidade do lodo lançado indiscriminadamente em rios e córregos, dispondo-os de forma correta;

- em termos de durabilidade, os corpos-de-prova do concreto com adições de lodo de 4% e 8%, no período analisado, foi similar ao do padrão de referência. Qualquer consideração posterior deverá ser analisada ampliando-se o tempo de análise; e

- de maneira geral, apesar de ocorrerem reduções na qualidade do concreto com a incorporação do lodo de ETA com teores de 4% e 8%, sua utilização como forma de disposição final pode ser considerada viável.

7. COMENTÁRIOS FINAIS

Para avaliar melhor o efeito da durabilidade das armaduras de concreto com a adição lodo, recomenda-se que sejam realizados estudos visando um tempo maior de análises e um estudo mais aprofundado, com a finalidade de verificação do tempo de envelhecimento em que o concreto atingirá uma área de 90% de probabilidade de corrosão. Estas análises devem ser realizadas em acompanhamento com uma amostra padrão, sem a adição do lodo, para futuras comparações.

A classificação dos resíduos sólidos é realizada seguindo a NBR 10.004, de acordo com isto, sugere-se a realização de análises de lixiviação e solubilização segundo a norma para possível classificação do concreto como resíduo. No entanto, após a vida útil, este resíduo de concreto pode ser reaproveitado como material reciclado novamente em construção civil.

Como cada lodo possui uma característica diferente, principalmente no que diz respeito as características químicas, devido à qualidade do manancial utilizado e tipo de coagulante utilizado (sulfato de alumínio ou cloreto férrico), sugere-se que antes da utilização do lodo de ETA em concreto sejam realizados ensaios de resistência para verificar se o concreto está de acordo com as especificações da construção civil.

8. REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM C 876 : Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete*. Philadelphia, 1991.

ÂNGULO, S. C.; ZORDAN, S. E.; JOHN, V. M. Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem de Resíduos na Construção Civil. In: SEMINÁRIO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A CONSTRUÇÃO CIVIL – MATERIAIS RECICLADOS E SUAS APLICAÇÕES, IV, 2001, São Paulo. *Anais eletrônicos...* Disponível em: <www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/artigo%20IV_CT206_2001.pdf> Acesso em: 18. jul. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10.004: Resíduos Sólidos - Classificação*. Rio de Janeiro: 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10786: Concreto Endurecido – Determinação do coeficiente de permeabilidade à água*. Rio de Janeiro: 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 11579: Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 micrômetros (número 200)*. Rio de Janeiro: 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 11581: Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega – Método de ensaio*. Rio de Janeiro: 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 11582: Cimento Portland Determinação da expansibilidade de Le Chatelier*. Rio de Janeiro: 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12142: Concreto – Determinação a resistência à tração na flexão de corpos-de-prova prismático*. Rio de Janeiro: 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12655: Concreto – Preparo, controle e recebimento*. Rio de Janeiro: 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5738: Moldagem e cura dos corpos-de-prova cilíndricos ou prismático de concreto*. Rio de Janeiro: 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndrico – Método de ensaio*. Rio de Janeiro: 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5743: Cimento Portland – Determinação de perda ao fogo*. Rio de Janeiro: 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5744: Cimento Portland – Determinação de resíduo insolúvel*. Rio de Janeiro: 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5745: Cimento Portland – Determinação do anidrido sulfúrico*. Rio de Janeiro: 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5747: Cimento Portland – Determinação de óxido de sódio e óxido de potássio por fotometria de chama*. Rio de Janeiro: 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7215: Cimento Portland – Determinação de resistência à compressão*. Rio de Janeiro: 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7217: Agregados – Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro: 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7218: Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis*. Rio de Janeiro: 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7219: Determinação de materiais pulverulentos nos agregados: Método de ensaio*. Rio de Janeiro: 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7220: Argamassa e Concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndrico*. Rio de Janeiro: 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7227: Cimento Portland – Determinação do óxido de cálcio livre pelo etileno glicol*. Rio de Janeiro: 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7251: Agregados em estado solto – Determinação da massa unitária*. Rio de Janeiro: 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7810: Agregado em estado compactado e seco – Determinação da massa unitária*. Rio de Janeiro: 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8522: Concreto – Determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão - deformação*. Rio de Janeiro: 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9202: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura por meio da peneira 0,044 mm (número 325)*. Rio de Janeiro: 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9203: Cimento Portland comum e clínquer – Análise química por compleximetria*. Rio de Janeiro: 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9776: Determinação da massa específica de agregado miúdo por meio do Frasco de Chapman*. Rio de Janeiro: 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9778: Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água por imersão*. Rio de Janeiro: 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9833: Concreto fresco – Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico*. Rio de Janeiro: 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9937: Determinação da absorção e da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico*. Rio de Janeiro: 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NB 1866: Cimento Portland pozolânico, cimento Portland comum e cimento Portland composto com adições de materiais pozolânicos: Análise química – Método de referência*. Rio de Janeiro: 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica*. Rio de Janeiro: 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 30: Agregado miúdo – Determinação da absorção de água*. Rio de Janeiro: 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 47: Concreto – Determinação do teor de ar em concreto fresco*. Rio de Janeiro: 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 49: Agregado miúdo – Determinação de impurezas orgânicas*. Rio de Janeiro: 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 67: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Rio de Janeiro: 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 76: Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine)*. Rio de Janeiro: 1998.

AWWA – American Water Works Association. *Landfilling of Water Treatment Plant Coagulant Sludge's*. USA: AWWARF, 1992.

AWWA – American Water Works Association. *An Assessment of Cropland Application of Water Treatment Residuals*. USA: AWWARF, 1995.

AWWA – American Water Works Association. *Land Application of Water Treatment Sludge's: Impact and Management*. USA: AWWARF, 1990.

BARBOSA, R. M.; POVINELLI, J.; ROCHA, O.; ESPÍNDOLA, E. L. G. A Toxicidade de Despejos (lodos) de Estações de Tratamento de Água à *daphnia similis* (ceadocera, crustacea). In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA, XXVII., 2000, Porto Alegre. *Anais...* Porto Alegre: AIDIS, 2000. 1 CD-ROM.

BARROSO, M. M.; CORDEIRO, J. S. Metais e Sólidos: Aspectos Legais dos Resíduos de Estação de Tratamento de Água. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21., 2001, João Pessoa. *Anais...* João Pessoa: ABES, 2001. 1 CD-ROM.

BARROSO, M. M.; CORDEIRO, J. S. Presença dos Metais no Tratamento da Água. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 22., 2003, Joinvile. *Anais...* Joinvile: ABES, 2003. 1 CD-ROM.

BARROSO, M. M.; CORDEIRO, J. S. Problemática dos Metais nos Resíduos Gerados em Estações de Tratamento de Água. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA, 21., 2001, João Pessoa. *Anais...* João Pessoa: ABES, 2001. 1 CD-ROM.

BIDONE, F. R. A.; CASTRO, C. M. B. de; ABOY, N. Monitoramento de Parâmetros Físico-Químicos de Lodos de ETAs durante a sua Desidratação em Leitos de Secagem com Diferentes Espessuras de Leito Drenante. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE

ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19., 1997, Foz do Iguaçu. *Anais...* Foz do Iguaçu: ABES, 1997. 1 CD-ROM.

BIDONE, F.; SILVA, A. P.; MARQUES, D. da M. Lodos Produzidos na Estações de Tratamento de Água (ETAs): Desidratação em Leitos de Secagem e Codisposição em Aterros Sanitários. In: ANDREOLI, C.V. (coord.) *Resíduos Sólidos do Saneamento: Processamento, Reciclagem e Disposição Final*. Rio de Janeiro: RiMa / ABES / PROSAB, 2001. p. 215 – 244.

BISOGENIN, J. L. M.; IDE, C. N.; IMOLENE, L. M. Secagem de Lodo de Estação de Tratamento de Água em Leito Convencional. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 20., 1999, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: ABES, 1999. 1 CD-ROM.

BRASIL. *Portaria nº 1469/GM, de 29 de dezembro de 2000*. Aprova a Norma de Qualidade da Água para Consumo Humano, que dispõe sobre procedimentos e responsabilidades inerentes ao controle e à vigilância da qualidade da água para consumo humano, estabelece o padrão de potabilidade da água para consumo humano, e dá outras providências. Brasília, 2000.

BROWN, M. E. *Introduction to Thermal Analysis: Techniques and Applications*. London: Chapman and Hall, 1988.

CASCUDO, O. *O controle da Corrosão de Armaduras em Concreto – Inspeção e Técnicas Eletroquímicas*. Goiânia: Editora UFG - Pini, 1997.

CENNI, R.; JANISCH, B.; SPLIETHOFF, H.; HEIN, K. R. G. Legislative and Environmental Issues on the Use of Ash from Coal and Municipal Sewage Sludge Co-firing as Construction Material. *Waste Management*. v. 21. p. 17-31. 2001.

COLLIVIGNARELLI, C.; SORLINI, S. Reuse of Municipal Solid Wastes Incineration Fly Ashes in Concrete Mixtures. *Waste Management*. v. 22. p. 909-912. 2002.

CONAMA 20/86. *Resolução CONAMA nº 20, de 18 de junho de 1986*. Dispõe sobre a classificação das águas doces, salobras e salinas do Território Nacional. Brasília, 1986.

CORDEIRO, J. S. *Disposição, Tratabilidade e Reuso de Lodos de Estações de Tratamento de Água*. São Carlos, 1981. 155 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, USP.

CORDEIRO, J. S. Gerenciamento de Lodo de ETAs – Remoção de água, através de leitos de secagem e codisposição da fase sólida em matrizes de cimento e resíduos da

construção civil. São Carlos: UFSCar / FINEP: 2000. 145 p. Relatório Técnico PROSAB 2.

CORDEIRO, J. S. Importância do Tratamento e Disposição Adequada dos Lodos de ETAs. In: REALI, M. A. P. (coord.) *Noções Gerais de Tratamento e Disposição Final de Lodos de ETA*. Rio de Janeiro: ABES / PROSAB, 1999. p. 1-19.

CORDEIRO, J. S. *O Problema dos Lodos Gerados nos Decantadores em Estações de Tratamento de Água*. São Carlos, 1993. 342 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, USP.

CORDEIRO, J. S. Processamento de Lodos de Estação de Tratamento de Água (ETA). In: ANDREOLI, C.V. (coord.) *Resíduos Sólidos do Saneamento: Processamento, Reciclagem e Disposição Final*. Rio de Janeiro: RiMa / ABES / PROSAB, 2001. p. 121 – 142.

CORDEIRO, J.S. Micro Propriedades de Lodos Gerados em Decantadores de Estações de Tratamento de Água. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL, XXVIII, 2002, Cancún – México. *Anais...* Cancún: AIDIS, 2002. 1 CD-ROM.

COSTA, A. B. da.; LIMA, L. R.; LOBO, E. A.; BRENTANO, D. M. Avaliação Física, Química e Toxicológica do Sedimento produzido em Estações de Tratamento de Água (ETAs) para Abastecimento Público. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 22, 2003, Joinville. *Anais...* Joinville: ABES, 2003. 1 CD-ROM.

COWLEY, J. M. *Diffraction Physics*. Amsterdam - Holland: North-Holland / American Elsevier, 1975.

DAVID, A. C.; MIKI, M. K.; SAMPAIO, A. de O.; BAPTISTA NETO, A. M. Incorporação do Lodo da ETA Cubatão na Indústria de Bloco Cerâmico. In: XIII ENCONTRO TÉCNICO AESABESP, 2002, São Paulo. *Anais...* São Paulo: SABESP, 2002. 1 CD-ROM.

DEMATOS, M.; COSTA, G. J.; FONSECA, D. A.; BRAGA, J. P. C.; JANZEN, W. Redução do Volume de Lodo Gerado em ETAs – A Proposta de Recuperação do Coagulante pelo Processo de Acidificação no Sistema Rio Manso. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA, 21., 2001, João Pessoa. *Anais...* João Pessoa: ABES, 2001. 1 CD-ROM.

DI BERNARDO, L.; CARVALHO, E. H. de; SCALIZE, P. S. Disposição de Resíduos Líquidos de ETAs em ETEs. In: REALI, M. A. P. (coord.) *Noções Gerais de Tratamento de Disposição Final de Lodos de ETA*. Rio de Janeiro: ABES / PROSAB, 1999. p. 169-202.

GEYER, A. L. B.; DAL MOLIN D.; CONSOLI, N. C.; GEYER, R. T. Reciclagem de Lodos de Estações de Tratamento de Esgotos na cidade de Porto Alegre e seus Usos na Construção Civil e em Obras de Geotécnica. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, VII, 1998, Florianópolis – SC. *Anais...* Florianópolis: ANTAC / UFSC, 1998.

GRANDIN, S. R.; ALEM SOBRINHO, P.; GARCIA JR., A. D. Desidratação de Lodos Produzidos em Estações de Tratamento de Água. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 17., 1993, Natal. *Anais...* Natal: ABES, 1993. v.2, p. 324-341.

HELENE, P. TERZIAN, P. *Manual de Dosagem e Controle do Concreto*. São Paulo: Editora Pini Ltda, 1992.

HIKISHIMA, M.; ANDREOLI, C. V.; BACKES, S. A.; CUQUEL, F. L. Avaliação de Composto de Lodo de Esgoto em Mistura com Lodo de Água em Diferentes Proporções como Substrato para a produção de Celósia e Tagetes. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, XXIX., 2003, Ribeirão Preto. *Anais...* Ribeirão Preto: SBCS, 2003. 1 CD-ROM.

JOHN, V. M. *Desenvolvimento Sustentável, Construção Civil, Reciclagem e Trabalho Multidisciplinar*. Disponível em: www.reciclagem.pcc.usp.br/des_suntentavel.htm. Acesso em: 30 de julho de 2003.

JOHN, V. M. *Reciclagem de Resíduos na Construção Civil: Contribuição à Metodologia de Pesquisa e Desenvolvimento*. São Paulo, 2000. 102 f. Tese (Livre Docência). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

KAEFER, L. F. *Considerações sobre a microestrutura do concreto*. Disponível em: www.lmc.ep.usp.br/people/lfk/download/pef5736.pdf. Acesso em: 16 de dezembro de 2003.

KRINSLEY, D. H. et. al. *Backscattered Scanning Electrons Microscopy and Image Analysis of Sediments and Sedimentary Rocks*. United Kingdom: Cambridge University Press, 1998.

Lei Estadual n.º 12.493, de 22 de janeiro de 1999. Estabelece princípios, procedimentos, normas e critérios referentes a geração, acondicionamento, armazenamento, coleta, transporte, tratamento e destinação final dos resíduos sólidos no Estado do Paraná, visando controle da poluição, da contaminação e a minimização de seus impactos ambientais e adota outras providências. *Diário Oficial*, Curitiba, 05 fev. 1999. p. 9.

LEITE, M. B. *Avaliação de Propriedades Mecânicas de Concretos Produzidos com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição*. Porto Alegre, 2001. 236f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

LENZI, E.; NOGAMI, E. M.; GALLI, D.; MORALES, M. M. Estudo do Lodo da ETA Maringá (PR) e seu Possível Destino. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 22, 2003, Joinville. *Anais...* Joinville: ABES, 2003. 1 CD-ROM.

LORETTO, M. H. *Electron Beam Analysis of Materials*. 2. ed. London: Chapman and Hall, 1994.

LUCIANO, S. Y. et. al. Tratabilidad de los lodos producidos em la potabilización del água. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITÁRIA Y AMBIENTAL, XXVI, 1998, Lima – Peru. *Anais...* Lima: AIDIS, 1998. 1 CD-ROM.

MACHADO, L. C. G. T.; PEREIRA, J. A. R.; CUNHA, M. V. P. de O.; SILVA, M. de N. A. da; SOUSA, E. C. M. de. Caracterização do Lodo Gerado nos Decantadores da ETA Bolonha. In: SIMPÓSIO ÍTALO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, VI., 2002, Vitória. *Anais...* Vitória: ABES, 2002. 1 CD-ROM.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: Estruturas, Propriedades e Materiais*. São Paulo: Pini, 1994.

NEVILLE, A. M. *Propriedades do Concreto*. 2.ed. Tradução de: Salvador E. Giammusso. São Paulo: Pini, 1997.

NUVOLARI, A. *Inertização de Lodo de Esgoto em Tijolos Cerâmicos Maciços: Aspectos Tecnológicos e Ambiental*. Campinas, 2002. 174 f. Tese (Doutorado em Saneamento). Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas.

PADILHA, A. F. *Materiais de Engenharia: microestrutura e propriedades*. São Paulo: Hemus Editora, 1997.

PADILHA, A. F.; AMBROZIO FILHO, F. *Técnicas de Análise Micro Estrutural*. São Paulo: Hemus Editora, 1985.

PETRUCCI, E. G. R. *Concreto de Cimento Portland*. 12. ed. São Paulo: Globo, 1993.

PRIM, E. C. C.; CHERIAF, M.; CASTILHOS JR., A. B.; ROCHA, J. C.; LUIZ, C. A. Valorização do Lodo da Indústria Têxtil como Novo Material de Construção Civil. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, VII, 1998, Florianópolis – SC. *Anais...* Florianópolis: ANTAC / UFSC, 1998.

REALI, M. A. P. Principais Características Quantitativas e Qualitativas do Lodo de ETAs. In: REALI, M. A. P. (coord.) *Noções Gerais de Tratamento de Disposição Final de Lodos de ETA*. Rio de Janeiro: ABES / PROSAB, 1999. p. 21-39.

REED, S. J. B. *Electrons Microscope Analysis*. 2. ed. United Kingdom: Cambridge University Press, 1997.

RICHTER, C.A. *Tratamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água*. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 2001.

SABOGAL-PAZ, L.P. OLIVEIRA, H. R. de; CARRIJO, I. B.; PRADO, G. da S. Lodo Gerados em Estações de Tratamento de Água – Situação no Brasil. In: I SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO SOBRE BIODÉTRITOS / III SIMPÓSIO SOBRE BIODÉTRITOS DO MERCOSUL, 2003, São Paulo. *Anais...* São Paulo: AIDIS, 2003. 1 CD-ROM.

SALES, A.; CORDEIRO, J. S. Imobilização da Fase Sólida de Lodo de Estações de Tratamento de Água (ETAs). In: ANDREOLI, C.V. (coord.) *Resíduos Sólidos do Saneamento: Processamento, Reciclagem e Disposição Final*. Rio de Janeiro: RiMa / ABES / PROSAB, 2001. p. 245 – 257.

SARON, A.; LEITE, V. M. B. Quantificação de Lodo em Estação de Tratamento de Água. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21., 2001, João Pessoa. *Anais...* João Pessoa: ABES, 2001. 1 CD-ROM.

SARTORI, H. J. F; NUNES, M. S. Caracterização Geotécnica de Lodos Provenientes de Estação de Tratamento de Água e Esgotos Sanitários. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19., 1997, Foz do Iguaçu. *Anais...* Foz do Iguaçu: ABES, 1997. 1 CD-ROM.

SCANDIUZZI, L.; ANDRIOLO, F. R. *Concreto e seus Materiais: Propriedades e Ensaios*. São Paulo: Pini, 1986.

SILVA JR., A. P. da; ISAAC, R. de L. Adensamento por Gravidade de Lodo de ETA Gerado em Decantador Convencional e Decantador Laminar. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL, XXVIII, 2002, Cancún – México. *Anais...* Cancún: AIDIS, 2002. 1 CD-ROM.

SILVA, A. P. da; BIDONE, F. R. A.; MARQUES, D. M. L da M. Avaliação da Lixiviação de Alumínio e da Produção de Ácidos Graxos Voláteis em Reatores Anaeróbios Utilizados para Estudar a Disposição Final de Lodos de ETAs em Aterros Sanitários. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA, XXVII., 2000, Porto Alegre. *Anais...* Porto Alegre: AIDIS, 2000. 1 CD-ROM.

SILVA, M. R. *Materiais de Construção*. 2. ed. revisada. São Paulo: Pini, 1991.

SIQUEIRA, C. J. de M. *Desenvolvimento de Equipamento para Análise Térmica Diferencial*. Uberlândia, 1988. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Uberlândia.

SOBRAL, H. S. *Propriedades do Concreto Endurecido*. 4. ed. São Paulo: ABCP, 1997.

STANDARD METHODS: *For the Examination of water and wastewater*. 18.ed. USA: American Public Health Association – APHA, 1993.

TARTUCE, R.; GIOVANNETTI, E. *Princípios Básicos sobre Concreto de Cimento Portland*. São Paulo: Pini – IBRACON, 1990.

TAVARES, R. G.; KATO, M. T. Caracterização Quantitativa e Qualitativa dos Resíduos Sólidos Gerados nas ETAs da Região Metropolitana do Recife. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 22, 2003, Joinvile. *Anais...* Joinvile: ABES, 2003. 1 CD-ROM.

TAYLOR, H. F. W. *Cement Chemistry*. London: Academic Press, 1992.

TEIXEIRA, S. R.; SOUZA, S. A. de; SOUZA, N. R de; JOB, A. E.; GOMES, H. M.; HEITZMANN NETO, J. F. Caracterização de Resíduo de Estação de Tratamento de Água (ETA) e de Esgoto (ETE) e o Estudo da Viabilidade de seu Uso pela Indústria Cerâmica. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL, XXVIII, 2002, Cancún – México. *Anais...* Cancún: AIDIS, 2002. 1 CD-ROM.

TRIOLA, M. F. *Introdução à Estatística*. 7.ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 1999.

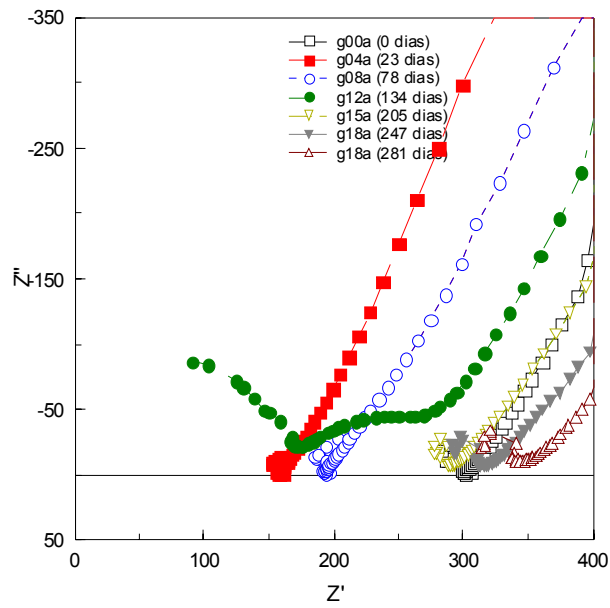
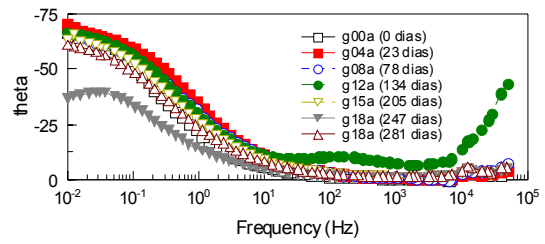
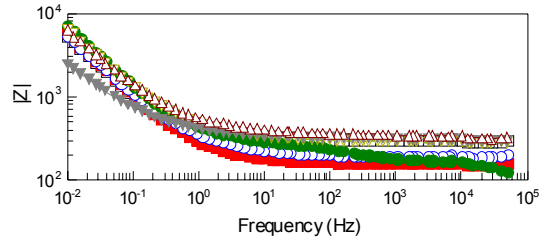
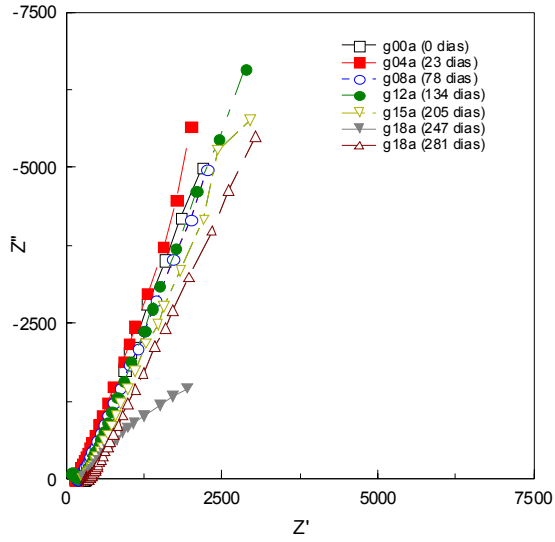
TSUTUYA, M. T.; HIRATA, A. Y. Aproveitamento e Disposição Final de Lodos de Estação de Tratamento de Água do Estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21., 2001, João Pessoa. *Anais...* João Pessoa: ABES, 2001. 1 CD-ROM.

VALLE, C. E. *Como se Preparar para as Normas ISO 14000: Qualidade Ambiental – O Desafio de Ser Competitivo Protegendo o Meio Ambiente*. São Paulo: Editora Pioneira, 2000.

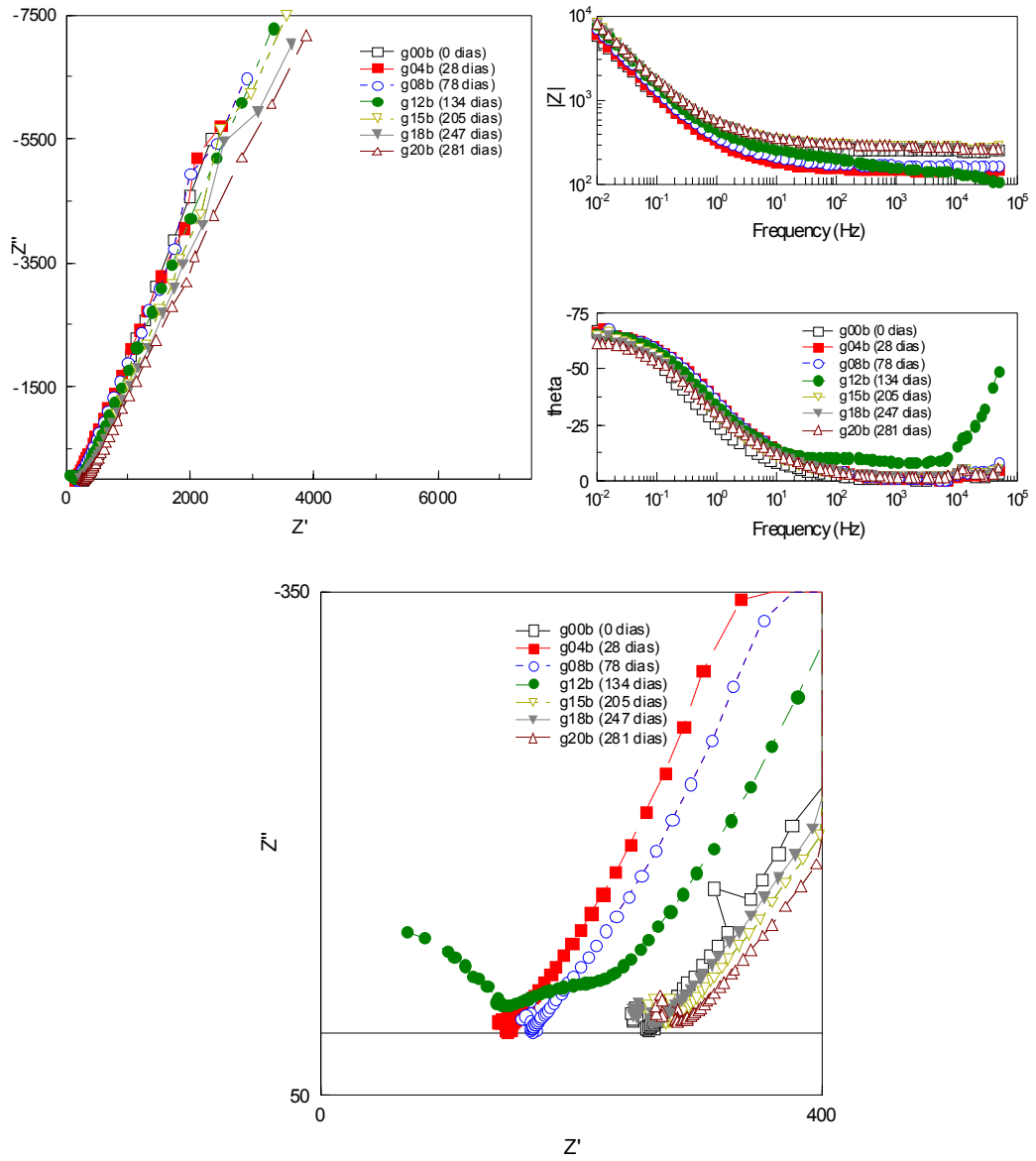
ZORDAN, S. E. *A Utilização do Entulho como Agregado, na Confeção de Concreto*. Campinas, 1997. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil na área de Saneamento). Universidade Estadual de Campinas.

ANEXO 1 – DIAGRAMA DE NYQUIST E BODE DAS AMOSTRAS DE
CONCRETO COM LODO

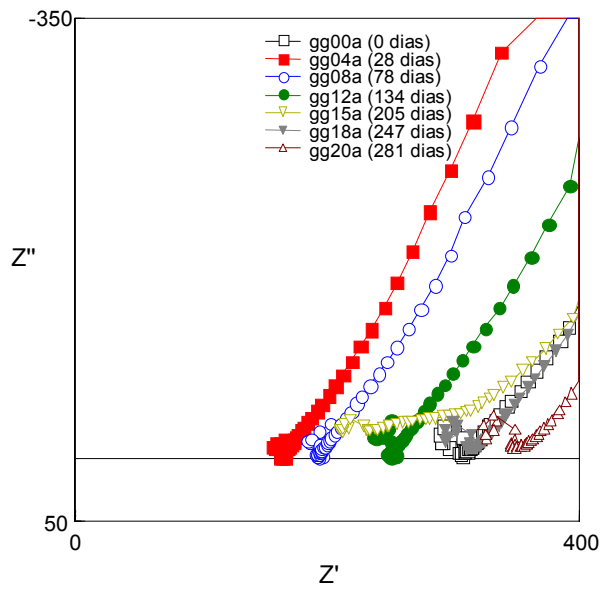
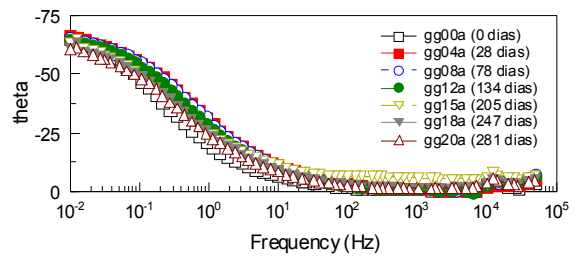
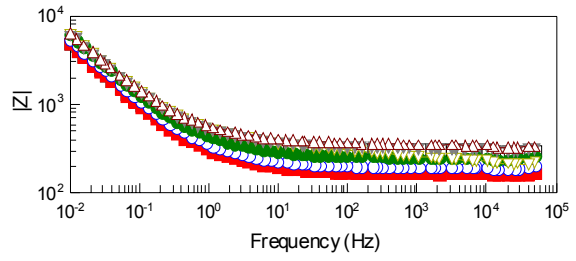
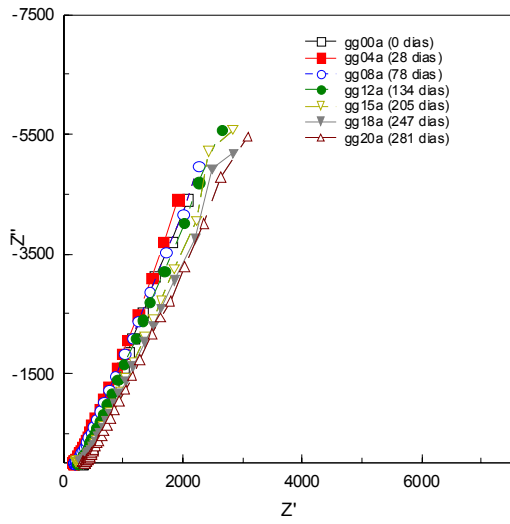
Amostra Ga



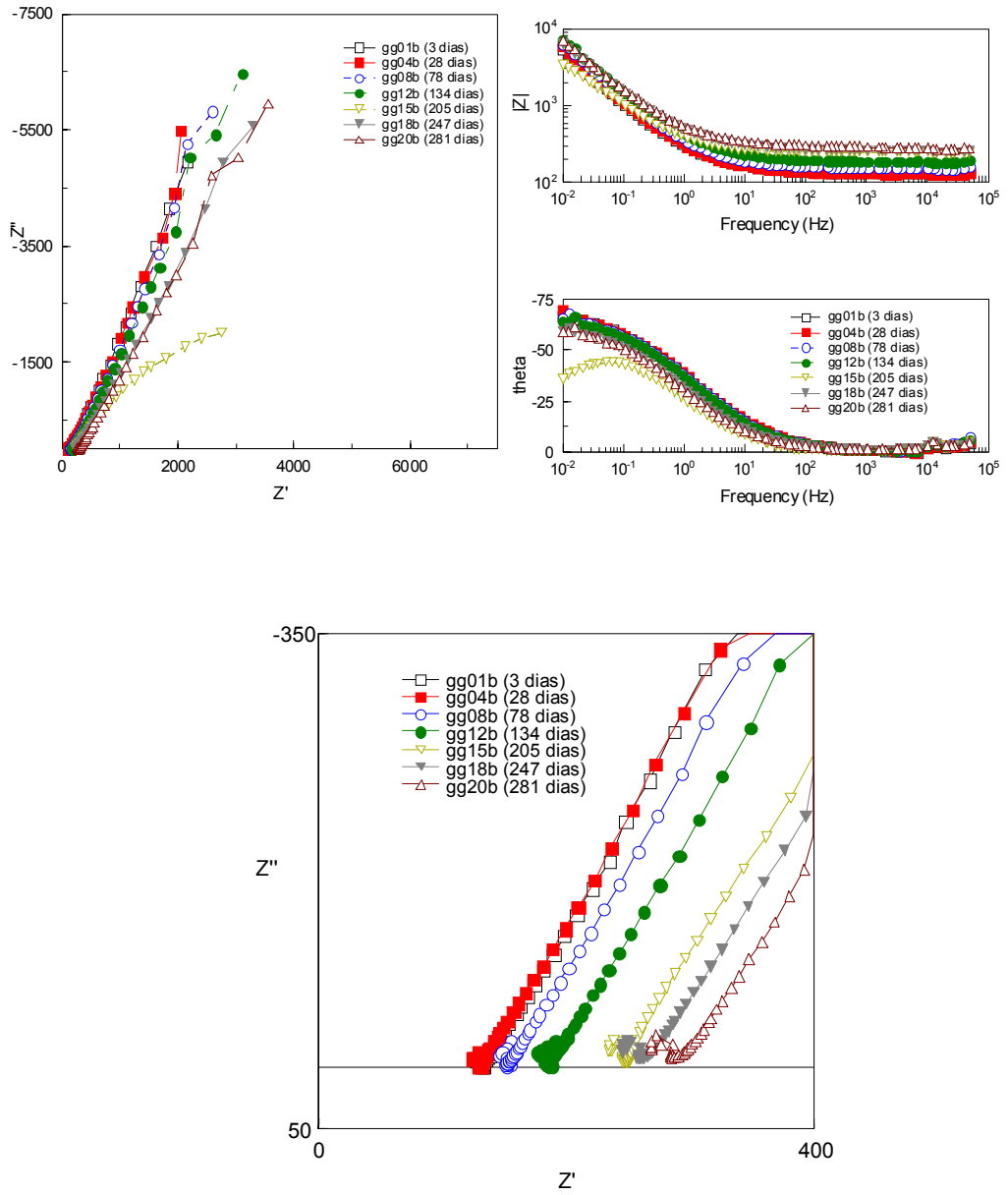
Amostra Gb



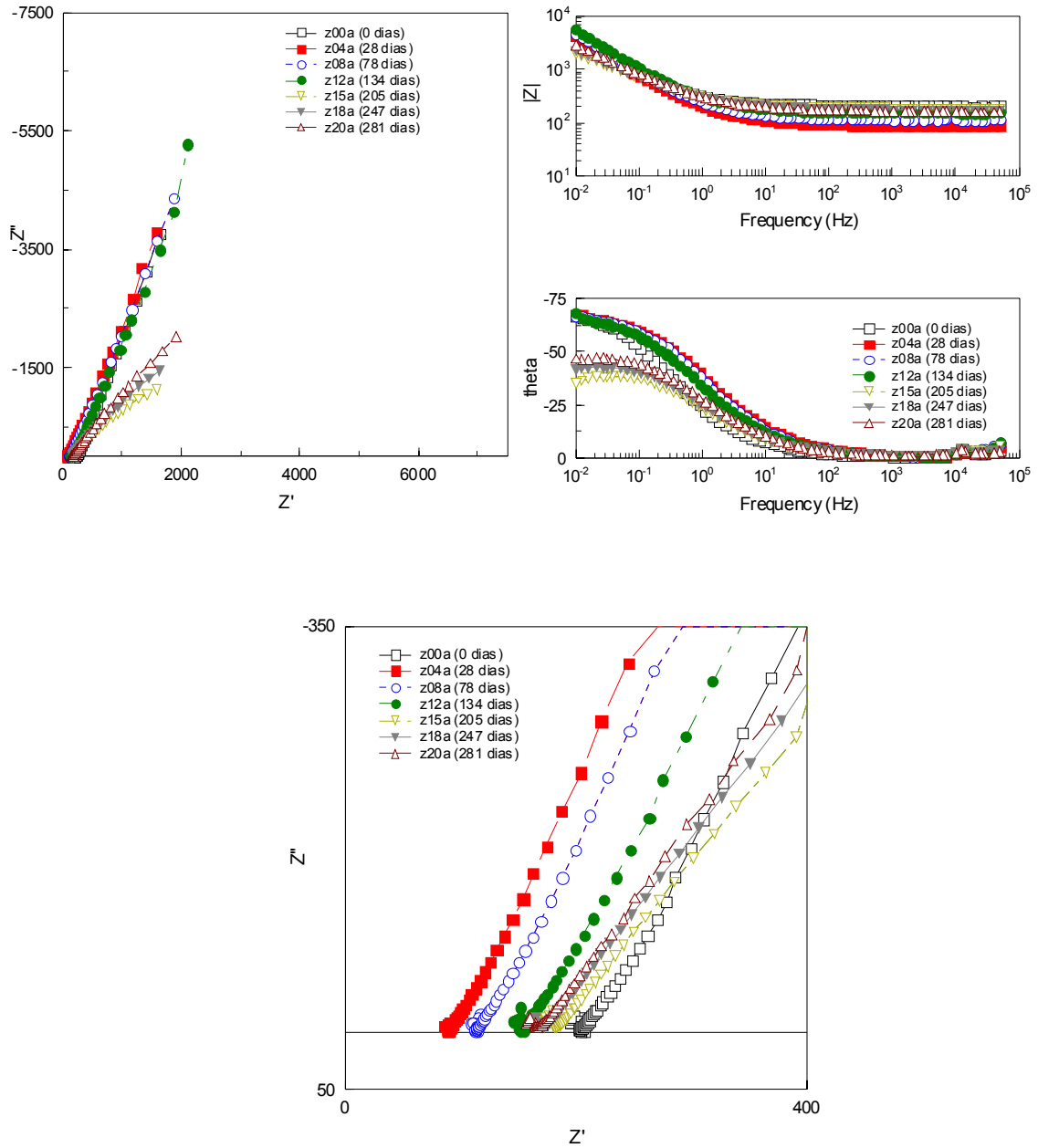
Amostra GGa



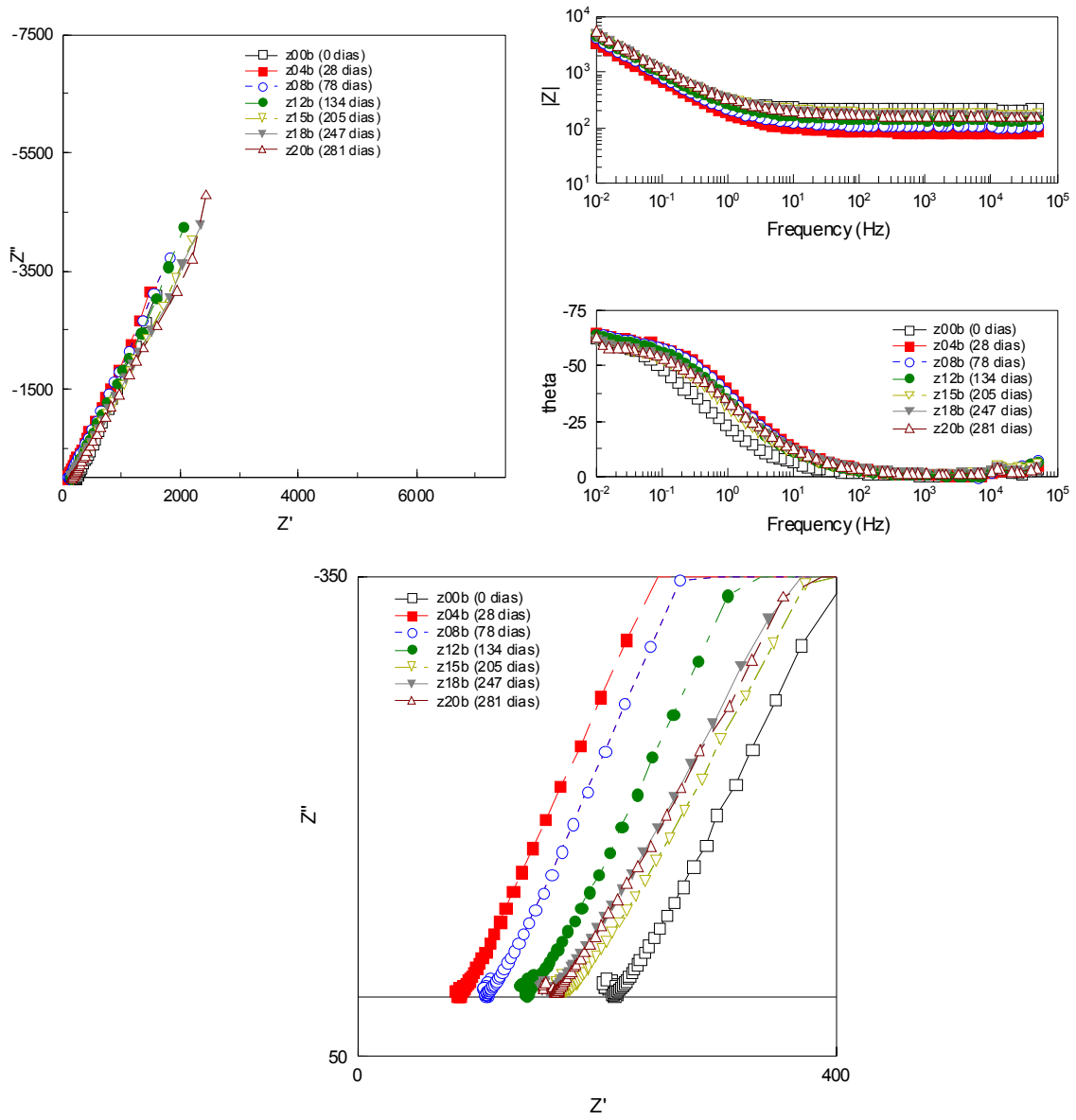
Amostra GGb



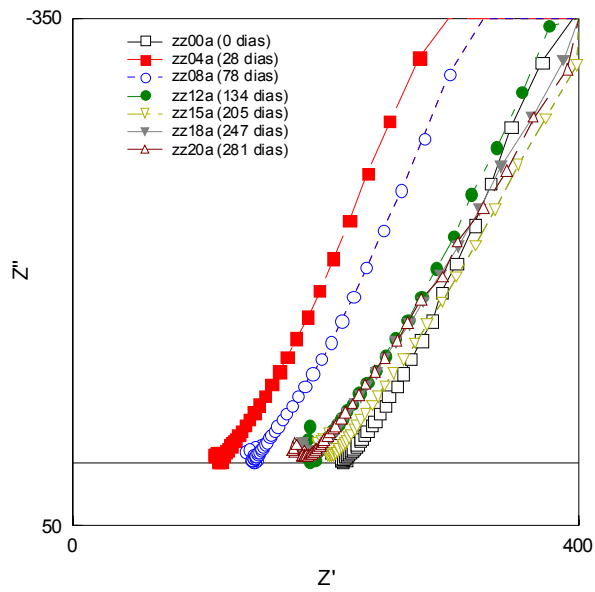
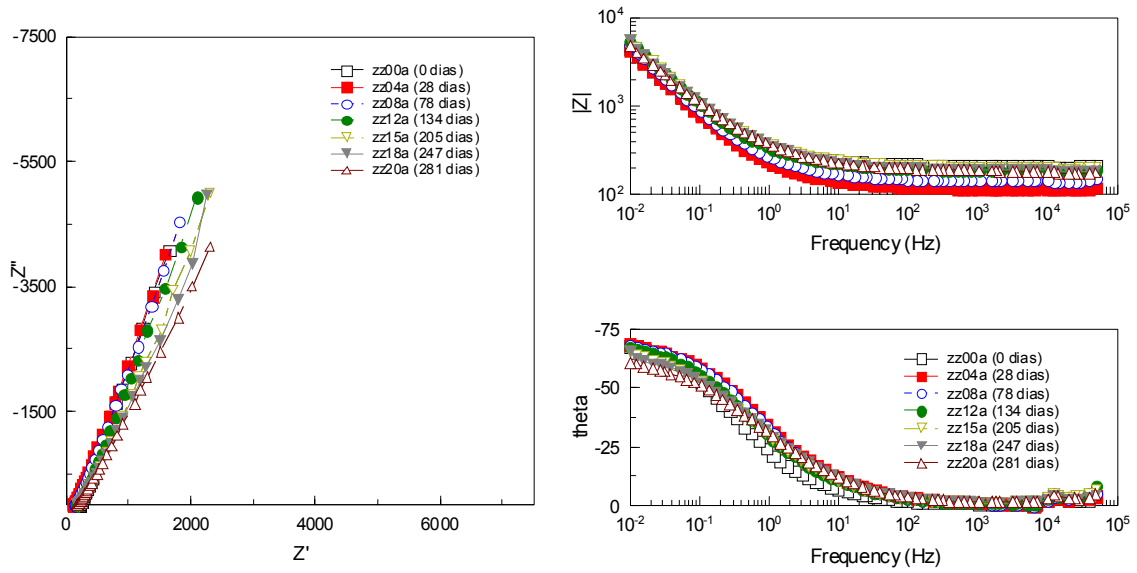
Amostra Za



Amostra Zb



Amostra ZZa



Amostra ZZb

