

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS – UFSCar**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL – DECiv  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

**ESTUDO DA ECO-EFICIÊNCIA DE ARGAMASSAS E CONCRETOS  
RECICLADOS COM RESÍDUOS DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA E  
DE CONSTRUÇÕES E DEMOLIÇÕES**

**FRANCIS RODRIGUES DE SOUZA**

**SÃO CARLOS**

2006

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS – UFSCar**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL – DECiv

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

**ESTUDO DA ECO-EFICIÊNCIA DE ARGAMASSAS E CONCRETOS  
RECICLADOS COM RESÍDUOS DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA E  
DE CONSTRUÇÕES E DEMOLIÇÕES**

**FRANCIS RODRIGUES DE SOUZA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Construção Civil do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Livre Docente em Construção Civil da Engenharia Civil.

**Orientador:** Dr. Almir Sales

**SÃO CARLOS**

2006

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

S729ee

Souza, Francis Rodrigues de.

Estudo da eco-eficiência de argamassas e concretos reciclados com resíduos de estações de tratamento de água e de construções e demolições / Francis Rodrigues de Souza. -- São Carlos : UFSCar, 2006.

91 p.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2006.

1. Construção civil. 2. Resíduos de construção e demolição. 3. Iodo. 4. Água – estações de tratamento. I. Título.

CDD: 690 (20<sup>a</sup>)



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**Programa de Pós-Graduação em Construção Civil**

Via Washington Luís, Km 235 - Caixa Postal 676 - Fone (16) 3351-8262 - Fax (16) 3351-8259 - CEP 13565-905 - São Carlos - SP - Brasil

---

**“ESTUDO DA ECO-EFICIÊNCIA DE ARGAMASSAS E CONCRETOS  
RECICLADOS COM RESÍDUOS DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE  
ÁGUA E DE CONSTRUÇÕES E DEMOLIÇÕES”.**

**FRANCIS RODRIGUES DE SOUZA**

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 23 de fevereiro de 2006,  
pela Banca Examinadora constituída pelos seguintes professores:

---

Prof. Dr. Almir Sales - DECiv/PPGCIV/UFSCar  
**Orientador**

---

Prof. Dr. Kleber Franke Portella – UFPR/LACTEC/PR  
**Examinador Externo**

---

Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Fabiana Goia Rosa de Oliveira - DECiv/UFSCar  
**Examinadora Interna**

## AGRADECIMENTOS

A todos os professores, técnicos e funcionários do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos, pela forma com que se dedicam à formação profissional, científica e pessoal de seus alunos.

Ao Dr. Almir Sales, professor do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos, por sua amizade e orientação neste trabalho.

À Dr.(a) Lúcia H. Mascaro Sales, professora do Departamento de Química da Universidade Federal de São Carlos, pela ajuda na realização dos ensaios de determinação da concentração de alumínio no extrato lixiviado resultante do processo de solubilização do concreto em estudo.

Ao técnico do Laboratório de Materiais e Componentes do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos, Carlos Roberto da Costa, pela ajuda durante os ensaios de caracterização e determinação das propriedades dos materiais.

A diretoria e a todos os funcionários da Estação de Tratamento de Água e da Usina de Reciclagem de Resíduos de São Carlos, pela colaboração no fornecimento dos resíduos que foram a matéria-prima deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela bolsa de estudo concedida, sem a qual eu não teria condições de me dedicar integralmente à realização desta pesquisa.

À minha mãe, Aparecida Rodrigues de Souza.

À Deus, por ter me permitido realizar e concluir este trabalho.

*“Quem vive grato a tudo e a todos, triunfa na vida”.*

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>I</b>
<b>LISTA DE QUADROS.....</b>	<b>II</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>III</b>
<b>LISTA DE GRÁFICOS.....</b>	<b>V</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>VI</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>VII</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>4</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>6</b>
<b>3.1. OS LODOS DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA.....</b>	<b>6</b>
3.1.1. DEFINIÇÕES GERAIS.....	6
3.1.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS.....	6
3.1.3. QUANTIDADE GERADA EM UMA ETA .....	9
3.1.4. CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO A NBR 10.004.....	10
3.1.5. IMPACTO AMBIENTAL CAUSADO PELA DISPOSIÇÃO IRREGULAR.....	11
3.1.6. ASPECTOS LEGAIS VIGENTES .....	12
3.1.7. MÉTODOS DE TRATAMENTO E RECICLAGEM .....	13
3.1.7.1. Recuperação do alumínio .....	13
3.1.7.2. Codisposição em aterros sanitários .....	14
3.1.7.3. Espargimento no solo para fins agrícolas e recuperação de áreas degradadas.....	14
3.1.7.4. Fabricação de solo-cimento e pigmentos para argamassas.....	14
3.1.7.5. Fabricação de tijolos e materiais cerâmicos .....	15
3.1.7.6. Incineração seguida de fabricação de artefatos de concreto e tijolos .....	15
3.1.7.7. Aplicação na produção de argamassas e concretos .....	15

<b>3.2. OS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO CIVIL (RCDs)</b> .....	<b>16</b>
3.2.1. QUANTIDADE GERADA NO BRASIL E NO MUNDO .....	16
3.2.2. VANTAGENS POTENCIAIS DA RECICLAGEM DE RESÍDUOS.....	17
3.2.3. BARREIRAS PARA A RECICLAGEM DE RCDs .....	17
3.2.4. RECICLAGEM DE RCDs NO BRASIL.....	19
3.2.5. CLASSIFICAÇÃO .....	20
3.2.6. CARACTERIZAÇÃO E COMPOSIÇÃO.....	20
3.2.7. A LEGISLAÇÃO ATUAL.....	22
3.2.8. TÉCNICAS PARA A RECICLAGEM EM CONCRETOS.....	24
3.2.8.1. Demolição seletiva ou desconstrução.....	24
3.2.8.2. Homogeneização do agregado reciclado.....	24
3.2.9. A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM AGREGADOS DE ENTULHO .....	26
3.2.10. A CORROSÃO EM ARMADURAS DE CONCRETOS RECICLADOS COM AGREGADOS DE ENTULHO .....	27
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>29</b>
<b>4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS CONVENCIONAIS</b> .....	<b>29</b>
4.1.1. COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS NATURAIS.....	30
4.1.2. DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA DOS AGREGADOS NATURAIS .....	31
4.1.3. MÓDULO DE FINURA DOS AGREGADOS NATURAIS .....	31
4.1.4. MASSA UNITÁRIA DOS AGREGADOS NATURAIS .....	31
4.1.5. CARACTERIZAÇÃO DO AGLOMERANTE.....	32
<b>4.2. COLETA, CARACTERIZAÇÃO E PREPARO DOS RESÍDUOS</b> .....	<b>32</b>
4.2.1. O LODO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA DE SÃO CARLOS.....	32
4.2.1.1. A Estação de Tratamento de Água de São Carlos.....	32

4.2.1.2.	O processo de limpeza dos decantadores da ETA de São Carlos .....	33
4.2.1.3.	A coleta e o transporte do lodo .....	35
4.2.1.4.	O preparo e a caracterização do lodo.....	37
4.2.2.	O ENTULHO DE CONCRETO DA USINA DE RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE SÃO CARLOS.....	39
4.2.2.1.	A Usina de Reciclagem de Resíduos de São Carlos.....	39
4.2.2.2.	A coleta e o transporte do entulho de concreto.....	40
4.2.2.3.	O preparo e caracterização do entulho de concreto.....	41
<b>4.3.</b>	<b>ESTUDO DA APLICAÇÃO DO LETA EM CONCRETOS ESTRUTURAIS DE RESISTÊNCIA MODERADA PRODUZIDOS COM AGREGADOS NATURAIS E COM AGREGADOS DE ENTULHO DE CONCRETO.....</b>	<b>42</b>
4.3.1.	PREPARO DOS CONCRETOS DE RESISTÊNCIA MODERADA.....	43
4.3.1.1.	Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone .....	43
4.3.1.2.	A moldagem e a cura dos corpos-de-prova .....	44
4.3.2.	DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DOS CONCRETOS DE RESISTÊNCIA MODERADA.....	46
4.3.3.	DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS CONCRETOS DE RESISTÊNCIA MODERADA.....	46
<b>4.4.</b>	<b>ESTUDO DA APLICAÇÃO DO LETA EM CONCRETOS DE CONTRAPISO PRODUZIDOS COM AGREGADOS NATURAIS E COM AGREGADOS RECICLADOS DE ENTULHO DE CONCRETO.....</b>	<b>47</b>
4.4.1.	O PREPARO DOS CONCRETOS DE CONTRAPISO .....	47
4.4.1.1.	Determinação do fator (a/c) dos concretos de contrapiso .....	48
4.4.1.2.	A moldagem e a cura dos corpos-de-prova dos concretos de contrapiso .....	48
4.4.2.	DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DOS CONCRETOS DE CONTRAPISO .....	48
4.4.3.	DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS CONCRETOS DE CONTRAPISO .....	49

<b>4.5. ESTUDO DA APLICAÇÃO DO LETA EM ARGAMASSAS DE ASSENTAMENTO PRODUZIDAS COM AGREGADOS NATURAIS E COM AGREGADOS RECICLADOS DE ENTULHO DE CONCRETO.....</b>	<b>49</b>
4.5.1. O PREPARO DAS ARGAMASSAS DE ASSENTAMENTO .....	49
4.5.1.1. Determinação do fator (a/c) das argamassas de assentamento .....	50
4.5.1.2. Determinação do índice de consistência das argamassas de assentamento.....	50
4.5.1.3. A moldagem e a cura das argamassas de assentamento.....	52
4.5.2. DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DAS ARGAMASSAS DE ASSENTAMENTO.....	53
4.5.3. DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA DAS ARGAMASSAS DE ASSENTAMENTO .....	54
<b>4.6. ESTUDO DA CONCENTRAÇÃO DE ALUMÍNIO PRESENTE NOS CONCRETOS PRODUZIDOS COM AGREGADOS DE ENTULHO DE CONCRETO E LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA.....</b>	<b>55</b>
<b>5. RESULTADOS.....</b>	<b>58</b>
<b>5.1. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS NATURAIS.....</b>	<b>58</b>
5.1.1. CARACTERIZAÇÃO DA AREIA FINA DO RIO MOGI.....	58
5.1.2. CARACTERIZAÇÃO DA AREIA GROSSA DO RIO MOGI.....	59
5.1.3. CARACTERIZAÇÃO DA BRITA 1 DA PEDREIRA BANDEIRANTES.....	60
<b>5.2. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS.....</b>	<b>61</b>
5.2.1. CARACTERIZAÇÃO DO LETA SÃO CARLOS.....	62
5.2.2. CARACTERIZAÇÃO DO ENTULHO DE CONCRETO .....	63
<b>5.3. RESULTADOS DO ESTUDO DA APLICAÇÃO DO LETA EM CONCRETOS DE RESISTÊNCIA MODERADA.....</b>	<b>63</b>

5.3.1. RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO LETA EM CONCRETOS CONVENCIONAIS DE RESISTÊNCIA MODERADA.....	63
5.3.2. RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO LETA EM CONCRETOS DE RESISTÊNCIA MODERADA RECICLADOS COM AGREGADOS GRAÚDOS DE ENTULHO DE CONCRETO.	67
<b>5.4. RESULTADOS DO ESTUDO DA APLICAÇÃO DO LETA EM CONCRETOS DE CONTRAPISO.....</b>	<b>71</b>
<b>5.5. RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO LETA EM ARGAMASSAS DE ASSENTAMENTO .....</b>	<b>74</b>
<b>5.6. DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE ALUMÍNIO NO EXTRATO LIXIVIADO RESULTANTE DO PROCESSO DE SOLUBILIZAÇÃO DO CRE3L.....</b>	<b>77</b>
5.6.1. DETERMINAÇÃO DO pH E DA CONDUTIVIDADE DO EXTRATO LIXIVIADO DO CONCRETO RECICLADO.....	77
5.6.2. DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE ALUMÍNIO NO EXTRATO LIXIVIADO POR ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ÓPTICA COM PLASMA INDUTIVAMENTE ACOPLADO (ICP-OES). .....	81
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>83</b>
<b>6.1. SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE DOS ESTUDOS.....</b>	<b>83</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>85</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>TABELA 3.1</b> – Densidade do LETA em relação à concentração de sólidos. ....	8
<b>TABELA 3.2</b> – Variáveis físico-químicas dos LETAs de Araraquara, Rio Claro e São Carlos. .....	8
<b>TABELA 3.3</b> – Estimativa da parcela mineral dos RCDs em insumos.....	21
<b>TABELA 3.4</b> – Resistências médias dos ensaios de compressão axial de concretos produzidos com agregados de entulho.....	26
<b>TABELA 5.1</b> – Ensaio granulométrico da areia fina do rio Mogi.....	58
<b>TABELA 5.2</b> – Ensaio granulométrico da areia grossa do rio Mogi.....	59
<b>TABELA 5.3</b> – Ensaio granulométrico da pedra britada 1 da pedreira Bandeirantes. ....	61
<b>TABELA 5.4</b> – Características físico-químicas do LETA de São Carlos. ....	62
<b>TABELA 5.5</b> – Determinação da resistência à compressão axial e da absorção de água dos concretos convencionais de resistência moderada.....	64
<b>TABELA 5.6</b> – Determinação da resistência à compressão axial e da absorção de água dos concretos de resistência moderada reciclados com agregados graúdos de entulho de concreto. .....	68
<b>TABELA 5.7</b> – Determinação da resistência à compressão axial e da absorção de água dos concretos de contrapiso.....	71
<b>TABELA 5.8</b> – Resultados dos ensaios de determinação da resistência à compressão axial e da absorção de água das argamassas de assentamento. ....	75
<b>TABELA 5.9</b> – Resultados da condutividade e do pH do extrato lixiviado resultante do processo de solubilização do CRE3L. ....	78
<b>TABELA 5.10</b> – Valores de condutividade em função da concenração KCl g/l. ....	81
<b>TABELA 5.11</b> – Concentração de alumínio (mg/l) presente no extrato lixiviado resultante do processo de solubilização do CRE3L. ....	81

## LISTA DE QUADROS

<b>QUADRO 3.1</b> – Classificação dos RCDs (CONAMA, 2002). .....	22
<b>QUADRO 3.2</b> – Etapas dos Projetos Municipais de Gerenciamento de Resíduos (CONAMA, 2002). .....	23
<b>QUADRO 3.3</b> – Disposição final dos RCDs em função de sua classificação (CONAMA, 2002). .....	23
<b>QUADRO 3.4</b> – Prazos, a partir de 02/01/2003, para a elaboração de Projetos de Gerenciamento de RCDs (CONAMA, 2002). .....	23
<b>QUADRO 4.1</b> – Concretos produzidos com o objetivo de avaliar a possibilidade de aplicação do LETA de São Carlos em concretos estruturais de resistência moderada. ....	42
<b>QUADRO 4.2</b> – Concretos de contrapiso produzidos para o estudo. ....	47
<b>QUADRO 4.3</b> – Argamassas de assentamento produzidas para o estudo. ....	49
<b>QUADRO 5.1</b> – Descrição, consistência e fator (a/c) dos concretos convencionais de resistência moderada. ....	64
<b>QUADRO 5.2</b> – Descrição, consistência e fator (a/c) dos concretos de resistência moderada reciclados com agregados graúdos de entulho de concreto. ....	67
<b>QUADRO 5.3</b> – Descrição, consistência e fator (a/c) dos concretos de contrapiso em estudo. ....	71
<b>QUADRO 5.4</b> – Descrição, consistência e fator (a/c) das argamassas de assentamento. ....	74

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 1.1</b> – Descarregamento do lodo da Estação de Tratamento de Água do município São Carlos no córrego Monjolinho. ....	1
<b>FIGURA 1.2</b> – Degradação do ambiente urbano causada pela deposição irregular dos RCDs.2	
<b>FIGURA 4.1</b> – Peneirador automático de agregados miúdos. ....	30
<b>FIGURA 4.2</b> – Peneirador automático de agregados graúdos. ....	31
<b>FIGURA 4.3</b> – Esquema da Estação de Tratamento de Água de São Carlos. ....	33
<b>FIGURA 4.4</b> – Fechamento das comportas de entrada de água e abertura das adufas de fundo do decantador para o escoamento do lodo. ....	34
<b>FIGURA 4.5</b> – Funcionários da limpeza no interior do decantador forçando o escoamento do lodo com jatos de água. ....	35
<b>FIGURA 4.6</b> – Visão do fundo do decantador praticamente limpo. ....	35
<b>FIGURA 4.7</b> – Descarregamento do LETA de São Carlos no córrego Monjolinho. ....	36
<b>FIGURA 4.8</b> – Nível do lodo no decantador no momento escolhido para a coleta. ....	36
<b>FIGURA 4.9</b> – Lodo em repouso em bandeja metálica logo após ter sido coletado na Estação de Tratamento de Água de São Carlos. ....	37
<b>FIGURA 4.10</b> – Lodo após pré-secagem por 48 horas ao ar livre à temperatura ambiente. ....	38
<b>FIGURA 4.11</b> – Fase sólida do lodo após secagem em estufa por 24 h à temperatura de 110°C. ....	38
<b>FIGURA 4.12</b> – Triturador de agregados miúdos usado para moer o lodo seco. ....	38
<b>FIGURA 4.13</b> – Agregado graúdo reciclado produzido na Usina de Reciclagem de São Carlos. ....	40

<b>FIGURA 4.14</b> – Agregado miúdo reciclado produzido na Usina de Reciclagem de São Carlos.....	40
<b>FIGURA 4.15</b> – RCD entulhado como chega na Usina de Reciclagem de Entulho de São Carlos.....	41
<b>FIGURA 4.16</b> – Triturador de agregado graúdo utilizado na produção dos agregados reciclados.....	41
<b>FIGURA 4.17</b> – Betoneira utilizada para a mistura dos componentes do concreto. ....	43
<b>FIGURA 4.18</b> – Equipamentos utilizados no ensaio de determinação da consistência do concreto.....	44
<b>FIGURA 4.19</b> – Moldes de aço cilíndricos de (10 x 20) cm. ....	45
<b>FIGURA 4.20</b> – Prensa utilizada no ensaio de compressão axial de corpos de prova cilíndricos. ....	46
<b>FIGURA 4.21</b> – Misturador mecânico. ....	50
<b>FIGURA 4.22</b> – Aparelho para a determinação do índice de consistência das argamassas. ....	51
<b>FIGURA 4.23</b> – Argamassa sobre a mesa do aparelho de determinação do índice de consistência normal. ....	52
<b>FIGURA 4.24</b> – Moldes cilíndricos de (50 x 100) mm dos corpos de prova das argamassas.....	53
<b>FIGURA 4.25</b> – Prensa digital utilizada para a realização dos ensaios de compressão axial das argamassas de assentamento. ....	54
<b>FIGURA 4.26</b> – pHmetro utilizado na determinação do pH do extrato lixiviado do processo de solubilização do CRE3L. ....	56
<b>FIGURA 4.27</b> – Condutivímetro utilizado na determinação da condutividade iônica do extrato lixiviado do processo de solubilização do CRE3L. ....	56

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>GRÁFICO 3.1</b> – Composição média dos RCDs depositados no aterro de Itatinga na cidade de São Paulo (BRITO FILHO, 1999 apud JOHN, 2000). .....	21
<b>GRÁFICO 5.1</b> – Análise granulométrica da areia fina do rio Mogi. ....	59
<b>GRÁFICO 5.2</b> – Análise granulométrica da areia grossa do rio Mogi. ....	60
<b>GRÁFICO 5.3</b> – Análise granulométrica da pedra britada 1 da pedreira Bandeirantes. ....	61
<b>GRÁFICO 5.4</b> – Análise da resistência à compressão axial dos concretos convencionais de resistência moderada. ....	66
<b>GRÁFICO 5.5</b> – Análise da absorção de água dos concretos convencionais de resistência moderada. ....	66
<b>GRÁFICO 5.6</b> – Análise da resistência à compressão axial dos concretos de resistência moderada reciclados com entulho de concreto. ....	70
<b>GRÁFICO 5.7</b> – Análise da absorção de água nos concretos de resistência moderada reciclados com agregados de entulho de concreto. ....	70
<b>GRÁFICO 5.8</b> – Análise da resistência à compressão axial nos concretos de contrapiso. ....	73
<b>GRÁFICO 5.9</b> – Análise da absorção de água nos concretos de contrapiso. ....	73
<b>GRÁFICO 5.10</b> – Análise da resistência à compressão axial das argamassas de assentamento. ....	76
<b>GRÁFICO 5.11</b> – Análise da absorção de água das argamassas de assentamento. ....	77
<b>GRÁFICO 5.12</b> – Análise do pH do extrato lixiviado resultante do processo de solubilização do CRE3L. ....	79
<b>GRÁFICO 5.13</b> – Análise da condutividade iônica do extrato lixiviado resultante do processo de solubilização do CRE3L. ....	80

## RESUMO

SOUZA, F. R. (2006). **Estudo da Eco-Eficiência de Argamassas e Concretos Reciclados com Resíduos de Estações de Tratamento de Água e de Construções e Demolições.**

Argamassas e concretos convencionais e reciclados com agregados de entulho de concreto e lodo de estação de tratamento de água foram produzidos e os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial e absorção de água foram comparados. Foi determinada a quantidade de alumínio presente no extrato lixiviado resultante do processo de solubilização dos concretos produzidos com a adição conjunta dos resíduos de construção e demolição civil e lodo de estação de tratamento de água. Em termos de resistência à compressão axial, a adição de até 4 % em massa de lodo substituindo o agregado miúdo natural possibilitou a obtenção de concretos com características similares as dos concretos convencionais. Embora a absorção de água dos concretos e das argamassas produzidas com a adição conjunta de lodo de estação de tratamento de água e agregados reciclados de entulho de concreto seja muito maior que a absorção de água dos concretos e argamassas convencionais, os resultados não impediram o uso, apenas o restringiu a lugares livres de umidade e da ação de intempéries. O extrato lixiviado resultante do processo de solubilização do concreto produzido com adição conjunta de lodo de estação de tratamento de água e agregado reciclado de entulho de concreto apresentou concentração de alumínio superior ao padrão de potabilidade da água definido pelo Anexo H da NBR 10.004, mas não em teor que torne perigoso o possível resíduo do produto assim reciclado.

**Palavras-chave:** lodo de estação de tratamento de água, entulho de concreto, concretos, argamassas.

## ABSTRACT

**SOUZA, F. R. (2006). Study of eco-efficiency of mortar and concrete recycled from sludge from water treatment plants and rubble from construction and demolition.**

Traditional and recycled mortar and concrete have been produced and the results from simple compression strength and water absorption tests have been compared. Recycled mortar and concrete have been produced out of sludge from water treatment plants and rubble from construction and demolition. The amount of aluminum present in the leached extract from the solubilization process of the concrete produced with the addition of both sludge from water treatment plants and rubble from construction and demolition has been determined. In terms of simple compression strength, the addition of up to 4 % of sludge in mass in place of natural sand has made it possible to obtain recycled concrete with similar characteristics to traditional concrete. Although water absorption of concrete and mortar produced from both sludge from water treatment plants and rubble from construction and demolition is much higher than water absorption of traditional mortar and concrete, the results have not made it impossible to use them; it has just restricted their application to places free from moist resulting from weather conditions or use characteristics. The leached extract resulting from the solubilization of the concrete produced out of both sludge from water treatment plants and rubble from construction and demolition has shown aluminum concentration higher than the drinkability standard defined by the Brazilian standards agency (ABNT), but not in such a level to turn the rubble from the recycled product dangerous to human health.

**Keywords:** sludge from water treatment plants, rubble from construction and demolition, concrete, mortar.

## 1. INTRODUÇÃO

No Brasil existem cerca de 7.500 ETAs (Estações de Tratamento de Água) que geram seus rejeitos nos decantadores e nos filtros e os lançam diretamente nos cursos d'água mais próximos, agravando o impacto ambiental e poluindo os mesmos córregos e rios de onde é retirada a água para o tratamento (CORDEIRO, 2001).

Na **Figura 1.1**, observa-se o descarregamento do lodo da Estação de Tratamento de Água do município de São Carlos no córrego Monjolinho, ao lado da avenida Francisco Pereira Lopes no bairro Jardim Paraíso.



**FIGURA 1.1** – Descarregamento do lodo da Estação de Tratamento de Água do município de São Carlos no córrego Monjolinho.

O descarregamento irregular do lodo de estações de tratamento de água em cursos d'água proporciona a redução do oxigênio dissolvido pela decomposição da matéria orgânica contida neste resíduo e, ainda, faz aumentar a concentração de alumínio no corpo receptor pelo fato de grande parte das estações de tratamento de água utilizarem o sulfato de alumínio como coagulante.

Segundo ONIWANWA, IKADEH, NWEZE (1997), o alumínio no corpo humano pode acarretar várias disfunções neurológicas, inclusive o Mal de Alzheimer.

Nos últimos cinco anos, principalmente após a Resolução nº 307 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), a CETESB (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental) ligada à Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, tem

intensificado a fiscalização sobre o lançamento de lodos gerados em estações de tratamento em corpos d'água, o que tem exigido das concessionárias de saneamento a busca de alternativas para a solução desse problema.

No Japão, devido à falta de área apropriada para a disposição do LETA (Lodo de Estação de Tratamento de Água), estes resíduos são comumente incinerados. Na Europa, os LETAs são dispostos em aterros sanitários, em áreas agrícolas e de reflorestamento e utilizados no controle de sulfetos em sistemas de tratamento de esgoto.

Já existem alternativas de reciclagem para o LETA, como a incorporação parcial em materiais cerâmicos, concretos e argamassas, porém, essas alternativas são recentes, pouco conhecidas e carecem de maior aprofundamento científico.

Outro grave problema ambiental está relacionado à disposição irregular dos RCDs (Resíduos de Construção e Demolição Civil). Esses resíduos são geralmente lançados nos terrenos baldios e nas margens dos cursos d'água próximos aos centros urbanos onde são gerados e, além de degradarem o ambiente urbano, colaboram com as enchentes, com a proliferação de vetores nocivos à saúde e com o desprendimento substancial de recursos do poder público.

Na **Figura 1.2**, observa-se a degradação do ambiente urbano do município de São Carlos, causada pela disposição irregular dos RCDs (Foto retirada em 2002, na rua 13 de Maio, no bairro Jd. Gilbertone).



**FIGURA 1.2** – Degradação do ambiente urbano causada pela deposição irregular dos RCDs.

A implantação de usinas de reciclagem foi iniciada no Brasil na década de 90 pelas administrações de municípios das regiões Sul e Sudeste, entretanto, só recentemente a operação de centrais de reciclagem de RCDs começou a chamar a atenção do setor privado e as prefeituras municipais começaram a investir na produção de materiais com esses resíduos.

Baseado nos problemas decorrentes da disposição irregular desses dois resíduos, o presente trabalho pretende estudar, por meio de ensaios de resistência à compressão axial e de absorção de água, a possibilidade de produção de concretos e argamassas com a adição conjunta dos mesmos, visando incentivar a reciclagem e colaborar para que, em um futuro próximo, as mesmas centrais, que hoje reciclam o resíduo da construção e demolição civil, também reciclem o lodo de estação de tratamento de água.

## 2. OBJETIVOS

Utilizando o LETA de São Carlos / SP seco e moído e o entulho de concreto gerado no mesmo município na forma de agregado miúdo e graúdo, o presente trabalho tem como objetivos:

- Produzir concretos e argamassas reciclados com adição exclusiva do lodo e com adição conjunta do lodo e do entulho de concreto, a partir de traços convencionais utilizados na produção de concreto estrutural de resistência moderada, de concreto de contrapiso e de argamassa de assentamento.
- Comparar a resistência à compressão axial das argamassas e concretos reciclados com a resistência à compressão axial das argamassas e concretos convencionais.
- Comparar a absorção de água das argamassas e concretos reciclados com a absorção de água das argamassas e concretos convencionais.
- Definir as conseqüências da adição dos resíduos na resistência à compressão axial e na absorção de água.
- Em função dos resultados de resistência à compressão axial e de absorção de água, definir a quantidade ideal de aplicação dos resíduos na produção das argamassas e dos concretos em estudo.
- Determinar a quantidade de alumínio presente nos produtos reciclados e, desta forma, avaliar a eco-eficiência de sua produção.

A partir destes objetivos:

- Disponibilizar para as agências de saneamento uma nova alternativa de disposição final para o lodo das estações de tratamento de água. Alternativa que aproveite nos municípios existentes as atuais estruturas voltadas para a reciclagem dos resíduos de construção e demolição civil.

- Incentivar as administrações municipais a investirem na reciclagem de resíduos de construção e demolição civil e lodo de estação de tratamento de água.

Vale salientar que:

- Não é objetivo deste trabalho servir de manual de dosagem e/ou produção de argamassas e concretos reciclados com LETA e RCD, uma vez que, para que uma argamassa ou concreto possa ser produzido e aplicado, diversas outras propriedades, além da resistência à compressão axial e da absorção de água, devem ser avaliadas, como a resistência à tração, a retração de secagem, a retração térmica, a fluência, a capacidade de deformação elástica, a capacidade de deformação plástica etc.
- A resistência à compressão axial foi escolhida pelo fato de essa propriedade estar relacionada à principal função dos concretos que é resistir a uma determinada força aplicada. A absorção de água foi escolhida por estar relacionada à durabilidade do material sob determinadas condições ambientais. Se um material não garantir a sua principal função e/ou não ter vida útil suficiente, o mesmo não deve ser produzido.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo estão apresentados os conceitos científicos mais relevantes sobre os lodos de estações de tratamento de água e os resíduos de construção e demolição civil. Conceitos relacionados ao tema que completam a pesquisa como base e justificativa para a mesma.

#### **3.1. OS LODOS DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA**

Para transformar a água bruta em água potável para o consumo humano, as estações de tratamento de água convencionais utilizam-se de processos de coagulação, floculação, sedimentação e filtração e geram resíduos que são denominados lodos de estações de tratamento de água (TSUTUYA & HIDRATA, 2001).

Para CORDEIRO (2002), a geração desses resíduos ocorre, principalmente, nos decantadores por desestabilização química podendo as partículas ser de natureza química, física e biológica.

##### **3.1.1. DEFINIÇÕES GERAIS**

De acordo com RICHTER (2001), o lodo de estação de tratamento de água é um resíduo composto de água e sólidos suspensos contidos na fonte, acrescido dos produtos aplicados durante o processo de tratamento da água.

SILVA, BIDONE, MARQUES (2000) acrescentam na definição da composição do lodo a presença de hidróxidos de alumínio e, em alguns casos, polímeros condicionantes provenientes dos produtos químicos utilizados nos processos de tratamento da água.

##### **3.1.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS**

Os LETAs são compostos de partículas do solo, material orgânico carregado para a água bruta, subprodutos gerados da adição de produtos químicos e água. As partículas presentes na água a ser tratada são colóides que lhe conferem cor e turbidez. Os colóides têm

tamanho que varia de nanômetro a milímetro, característica que dificulta a remoção da água livre dos lodos (CORDEIRO; 2001).

Segundo HSIEH & RAGHU (1997), a água presente nos LETAs pode ser classificada em quatro categorias:

- Água livre – parcela de água que se move livremente por gravidade e que pode ser removida com relativa facilidade por meio de sistemas mecânicos ou, naturalmente, por drenabilidade e evaporação. É importante lembrar que o tempo de remoção dessa água é o fator decisivo para a definição da forma de remoção a ser adotada.
- Água de floco – essa parcela está intimamente ligada à partícula floculada. Para a sua remoção é necessária uma quantidade relativa de energia.
- Água capilar – a água capilar está fortemente ligada à partícula sólida por intermédio de pontes de hidrogênio. A diferença entre esta parcela e a do floco é que esta está livre para se mover, enquanto a capilar se move com a partícula. Assim, para a remoção dessa partícula, há a necessidade de aplicação de força mecânica, se o floco for quebrado.
- Água adsorvida – parcela ligada quimicamente à partícula sólida coloidal. A remoção dessa água só será possível com a aplicação de altas temperaturas ou com aplicação de elevada quantidade de energia elétrica.

De acordo com RICHTER (2001), o teor de sólidos totais presentes em um LETA varia de 1.000 a 40.000 mg/l (0,1 a 4 %), dos quais, de 75 a 90 % são sólidos suspensos e de 20 a 35 % são compostos voláteis, uma pequena porção biodegradável que pode ser prontamente oxidável.

REALI (1999) afirma que as características do lodo de ETA podem variar com o tipo de coagulante, com os auxiliares utilizados no processo de tratamento da água e com a própria qualidade da água bruta que varia sazonalmente.

Para SARON & LEITE (2001), as características do lodo de ETA também podem variar em função da tecnologia usada no tratamento de água.

Na **Tabela 3.1**, desenvolvida por RICHTER (2001), observa-se que a massa específica do lodo de ETA varia de acordo com as concentrações de sólidos presentes, oscilando de 1.002kg/m<sup>3</sup>, para lodos com teores de sólidos de 1 %, até 1.236 kg/m<sup>3</sup>, para lodos com teores de sólidos de 30 %, após o processo de desidratação.

**TABELA 3.1** – Densidade do LETA em relação à concentração de sólidos.

Concentração de Sólidos (%)	Variação da densidade (kg/m <sup>3</sup> )
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).

CORDEIRO (2001), ao estudar as características físico-químicas do lodo das Estações de Tratamento de Água de São Carlos, Araraquara e Rio Claro, mostradas na **Tabela 3.2**, destaca o sistema de remoção dos lodos dos decantadores e flotores como o responsável por parte de suas características finais, principalmente no que se refere à concentração de partículas.

**TABELA 3.2** – Variáveis físico-químicas dos LETA's de Araraquara, Rio Claro e São Carlos.

Variáveis	Características do Lodo Bruto		
	Araraquara	Rio Claro	São Carlos
Concentração de sólido em %	0,14	5,49	4,68
pH	8,93	7,35	7,2
Cor (uC)	10.650	-	-
Turbidez (uT)	924	-	-
	<b>mg.L<sup>-1</sup></b>		
DQO	140	5.450	4.800
Sólidos Totais	1.620	57.400	58.630
Sólidos Suspensos	775	15.330	26.520
Sólidos Dissolvidos	845	42.070	32.110
Alumínio	2,16	30	11.100
Zinco	0,10	48,53	4,25
Chumbo	0,00	1,06	1,60
Cádmio	0,00	0,27	0,02
Níquel	0,00	1,16	1,80
Ferro	2,14	4.200	5.000
Manganês	3,33	30	60,00
Cobre	1,70	0,91	2,06
Cromo	0,19	0,86	1,58

Observação. Os valores de turbidez e de cor para lodos mais concentrados não têm sentido (CORDEIRO, 2001).

Enquanto na Estação de Tratamento de Água de Araraquara, o lodo é removido até três vezes ao dia, nas Estações de Tratamento de Água de São Carlos e de Rio Claro a sua remoção é realizada em intervalos de tempo de até 3 meses, dependendo da qualidade da água bruta que varia durante o ano, por exemplo, pela ação de intempérie.

As concentrações de metais são mais elevadas nos sistemas que efetuam limpezas em grandes intervalos de tempo, como as de São Carlos e Rio Claro, evidenciando o prejuízo que o acúmulo de lodos nos tanques de decantação pode acarretar quando descartados (CORDEIRO, 2001).

### 3.1.3. QUANTIDADE GERADA EM UMA ETA

Segundo HOPPEN (2004), uma estação de tratamento de água convencional com capacidade de tratar 2.400 l/s produz cerca de 1,8 t/dia de lodo. Vale salientar que no Brasil a quantidade de lodo produzido em estações de tratamento de água não é comumente mensurada devido ao não-gerenciamento dos resíduos produzidos.

Segundo CORNWELL *et al.* (1987), a concentração de sólidos que entram no decantador pode ser relacionada à turbidez da água bruta, sendo multiplicada por um valor que pode variar de 1,5 a 2,2. Dessa forma, a concentração de partículas que entram no decantador pode ser dada por:

$$C_e = 1,5.T$$

Em que :

$C_e$  = Concentração de partículas que entram no decantador.

T = Turbidez da água bruta.

Em relação à dosagem de coagulante, considerando-se que seja aplicado o sulfato de alumínio, estequiometricamente, cerca de 44 % da dosagem utilizada fica sob a forma de sólido. Assim, CORNWELL *et al.* (1987) mostram a equação que melhor representa o balanço da produção de sólidos em decantadores, dada por:

$$W = 0,0864.Q.(0,44.D + 1,5.T + A)$$

Em que :

W = Quantidade de lodo (kg/d).

Q = Vazão de adução de água (l/s).

D = Dosagem de sulfato de alumínio (mg/l).

T = Turbidez da água bruta (uT).

A = Dosagem de “auxiliares” ou outros produtos adicionados (mg/l).

### 3.1.4. CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO A NBR 10.004

Segundo a NBR 10.004 (ABNT, 1987), são denominados resíduos sólidos os resíduos nos estados sólido e semi-sólido que resultam de atividades da comunidade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola e de serviços de varrição, incluindo os lodos provenientes de estações de tratamento de água, os resíduos gerados em equipamentos e instalações de poluição e os líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou que exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis diante da melhor tecnologia disponível.

A NBR 10.004 (ABNT, 1987) ainda classifica os resíduos sólidos em três classes:

- Resíduos Classe I – Perigosos.
- Resíduos Classe II – Não-Inertes.
- Resíduos Classe III – Inertes.

Um resíduo é enquadrado na Classe I se apresentar periculosidade ou uma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade. Dentre os critérios citados na norma para caracterizar um resíduo como tóxico, é comumente utilizada a comparação dos resultados obtidos no ensaio de lixiviação de resíduos descrito na NBR 10.005 (ABNT, 1987) com a Listagem nº 7 da NBR 10.004 (ABNT, 1987), em que constam os limites máximos de concentração para alguns poluentes. Se o extrato contiver qualquer um dos poluentes em concentrações superiores aos valores da Listagem nº 7, o resíduo será classificado como tóxico.

São enquadrados na Classe III – Inertes, os resíduos que, quando amostrados segundo a NBR 10.007 (ABNT, 1987) e submetidos a um contato estático ou dinâmico com água destilada ou deionizada à temperatura ambiente, conforme teste de solubilização da NBR 10.006 (ABNT, 1987), não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, conforme Listagem nº 8 da NBR 10.004 (ABNT, 1987), excetuando-se os padrões de aspecto, cor, turbidez e sabor.

Os Resíduos Classe II – Não-Inertes são aqueles que não se enquadram nas classificações de Resíduos Classe I – Perigosos, ou de Resíduos Classe III – Inertes, nos termos da NBR 10.004 (ABNT, 1987). Esses resíduos podem ter propriedades como combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.

ABOY (1999) realizou alguns ensaios recomendados pela NBR 10.004 (ABNT, 1987) para classificar os lodos de estações de tratamento de água e concluiu que os lodos de ETA's são Resíduos Sólidos Classe II.

### 3.1.5. IMPACTO AMBIENTAL CAUSADO PELA DISPOSIÇÃO IRREGULAR

Segundo BARBOSA (2000), a disposição irregular do LETA em corpos d'água pode provocar diversas alterações prejudiciais ao meio ambiente, entre elas a redução do oxigênio dissolvido pela decomposição da matéria orgânica contida neste resíduo e a consequente destruição da fauna e flora.

Outro grave problema está relacionado ao aumento da concentração de alumínio nos cursos d'água receptores do lodo, pelo fato de grande parte das estações de tratamento de água utilizar sulfato de alumínio como coagulante durante o processo de tratamento.

O alumínio é o terceiro elemento mais abundante da crosta terrestre, sendo precedido apenas pelo silício e pelo oxigênio (ROCHOW, 1987). No homem, sua toxicidade está reconhecidamente associada a várias complicações clínicas, destacando-se disfunções neurológicas como o mal de Alzheimer (ROBERTS *et al.*, 1998) e a mobilização do fosfato ósseo (ONIWANWA *et al.*, 1997).

### 3.1.6. ASPECTOS LEGAIS VIGENTES

Segundo CORDEIRO (2001), a questão dos LETA's, diante dos aspectos legais vigentes, deve ser analisada criteriosamente, uma vez que as características desses rejeitos ainda são pouco conhecidas e difundidas. No entanto, alguns aspectos devem ser verificados, os quais poderão em um futuro próximo, enquadrar criminalmente os responsáveis pelos serviços de água pelo lançamento desses rejeitos em coleções de água.

Em 31 de agosto de 1981, foi promulgada a Lei nº 6.938 que “Dispõe sobre Política Nacional de Meio Ambiente”, que deu legitimidade ao Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) e aos órgãos estaduais e municipais de meio ambiente. (BRASIL, 1981).

Em 12 de fevereiro de 1998, foi promulgada a Lei nº 9.605, chamada “Lei da Vida” ou “Lei dos Crimes Ambientais”, que, em seu Capítulo V “Dos Crimes Contra o Meio Ambiente”, na Seção III “Da Poluição e Outros Crimes Ambientais”, no artigo 54 define como crime ambiental: “Causar poluição de qualquer natureza que resulte ou possam resultar danos à saúde humana, ou que provoque a morte de animais ou a destruição significativa da flora”, e no parágrafo 2º, inciso V, prescreve: “Se o crime ocorrer por lançamento de resíduos sólidos, líquidos ou gasosos... em desacordo com as exigências estabelecidas em leis e regulamentos, a pena prevista é de reclusão de um a cinco anos”. (BRASIL, 1998).

O Decreto-Lei nº 8.468, de 8 de setembro de 1976, nos artigos 3º e 4º, estabelece as condições gerais sobre poluição, e, no artigo 19-B, em parágrafo único, consta: “Os lodos provenientes das fontes de poluição industrial, bem como o material proveniente de limpeza de fossas sépticas, a critério e mediante a autorização expressa da entidade responsável pela operação do sistema, poderão ser recebidos pelo sistema público de esgotos, entretanto fica proibida sua disposição em galerias de águas pluviais ou em corpos d'água”. (SÃO PAULO, 1976).

Nos Estados Unidos da América, o “Clean Water Act” classificou as estações de tratamento de água como indústrias e estabeleceu que elas devem ter seus rejeitos tratados e dispostos convenientemente. Após essa definição, várias outras regulamentações surgiram, estabelecendo condições de tratamento e disposição de rejeitos de ETAs em coleções de águas e no solo (CORDEIRO, 2001).

### 3.1.7. MÉTODOS DE TRATAMENTO E RECICLAGEM

À medida que a descarga direta dos lodos resultantes do tratamento da água nos corpos receptores passou a ser proibida, em muitos países foram desenvolvidos e aplicados métodos para reduzir os volumes a serem dispostos, para tratar e reciclar o lodo.

Entre os métodos comumente utilizados para melhorar as condições dos LETAs antes de sua disposição final, destacam-se a desidratação natural em lagoas e leitos de secagem e o adensamento mecânico em centrífugas, concentradores por gravidade de dupla célula, filtros a vácuo, filtros-prensa de placas ou de esteiras e leitos de secagem à vácuo (BIDONE, SILVA, MARQUES, 2001).

Entre os métodos de tratamento, destacam-se a recuperação do alumínio (III), a disposição em aterros sanitários e o espargimento no solo para fins agrícolas e para a recuperação de áreas degradadas por atividades de mineração.

Os métodos de reciclagem conhecidos são: a fabricação de solo-cimento e pigmentos de argamassa, a fabricação de tijolos e materiais cerâmicos, a incineração seguida da fabricação de artefatos de concreto e tijolos, e a aplicação na produção de argamassas e concretos.

#### 3.1.7.1. Recuperação do Alumínio

A recuperação do Al (III) do lodo por acidificação, para reutilização como coagulante, apresenta as vantagens de tornar o lodo mais concentrado (menor volume), facilitar a posterior desidratação e possibilitar a utilização do Al (III) também para a remoção do fósforo no tratamento de efluentes domésticos. Entretanto, em condições extremamente ácidas, a matéria orgânica coloidal e alguns metais pesados, como o cádmio, o cobre e o chumbo, podem ser recuperados com o alumínio e, após sua reutilização como coagulante, aumentar a formação de trialomitanos na água tratada (SENGUPTA & SHI, 1992).

SENGUPTA & SHI (1992) obtiveram alta eficiência na recuperação de Al (III) do lodo utilizando membranas seletivas compostas trocadoras de íons, sem recuperar conjuntamente matéria orgânica, metais pesados ou manganês.

### 3.1.7.2. Codisposição em Aterros Sanitários

CANTANHEDE & FERREIRA (1989) definiram codisposição como a disposição de resíduos industriais perigosos com o lixo doméstico em aterros sanitários, com condições preestabelecidas, a fim de que a capacidade de assimilação do efeito de contaminação seja garantida pelo meio.

Essa técnica fundamenta-se no fato de, durante o processo, embora os contaminantes dos resíduos industriais perigosos diluídos e dispersos na massa total do aterro atinjam concentrações elevadas, não alterarem as reações biológicas de decomposição e estabilização dos resíduos domésticos (DE DEUS, 1996).

O aterro sanitário é um método de tratamento e disposição final de resíduos sólidos que apresenta vantagens sobre outros métodos, como a incineração e a compostagem, que exigem grandes investimentos para sua construção, operação e manutenção (SCHALCH & CAMPOS, 1992).

### 3.1.7.3. Espargimento no Solo para fins Agrícolas e Recuperação de Áreas Degradadas.

O espargimento no solo para fins agrícolas e para a recuperação de áreas degradadas por atividades de mineração constitui uma alternativa que deve levar em consideração a possibilidade de modificar a retenção da água e as propriedades estruturais do solo, além da presença de metais pesados que podem causar impactos ambientais no sistema solo-planta (BIDONE, SILVA, MARQUES; 2001).

### 3.1.7.4. Fabricação de Solo-cimento e Pigmentos para Argamassas

SARTORI & NUNES (1997) caracterizaram o lodo da Estação de Tratamento de Água do Rio das Velhas por meio dos ensaios utilizados pela mecânica dos solos, verificaram que ele se enquadra na categoria dos siltes e das argilas e que apresenta características de materiais plásticos como pesos específicos entre 27 e 28 KN/m<sup>3</sup>, além de altos valores de umidade ótima e valores de peso específico aparente seco de 1,33 g/cm<sup>3</sup> e 1,28 g/cm<sup>3</sup> para o ensaio de compactação Proctor Normal. Com base nessas características, os

pesquisadores afirmaram que o LETA podia servir para a fabricação de solo-cimento, materiais cerâmicos e pigmentos para argamassas.

#### 3.1.7.5. Fabricação de Tijolos e Materiais Cerâmicos

MORITA *et al.* (2002), em estudo com o objetivo de avaliar a possibilidade de incorporar o lodo da Estação de Tratamento de Água de Cubatão (SP) em blocos cerâmicos produzidos em indústria localizada no município de Tatuí (SP), constatou a possibilidade de aplicação de até 12,5 % de lodo na produção de blocos cerâmicos de paredes retas.

#### 3.1.7.6. Incineração seguida de Fabricação de Artefatos de Concreto e Tijolos

A incineração precisa de um teor maior de sólidos obtido por processos mecânicos e acondicionamento e, geralmente, não é viável em termos de custos. No Japão, utilizam-se as cinzas da incineração do lodo na fabricação de artefatos de concreto e tijolos e no condicionamento de solos (KAWAMURA & TRUSSELL, 1991).

#### 3.1.7.7. Aplicação na Produção de Argamassas e Concretos

Segundo SALES & CORDEIRO (2001), a adição de 3 % em massa de lodo em relação ao agregado miúdo natural possibilita a obtenção de concretos com características mecânicas similares às do concreto usual. Com relação às argamassas, as adições de LETA com melhor desempenho localizaram-se na faixa entre 1 % e 5 % de lodo seco em relação ao agregado miúdo.

### **3.2. OS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO CIVIL (RCDs)**

O macrocomplexo da construção civil gera resíduos em todas as suas etapas: na produção dos materiais e componentes, nas diversas atividades do canteiro, na manutenção, na modernização e, principalmente, na demolição da obra. Entretanto, são conhecidos por resíduos de construção e demolição (RCDs) somente os resíduos originários de perdas e desperdícios das atividades de construção, manutenção e demolição de obras. Os resíduos oriundos da produção dos materiais e componentes são classificados como resíduos industriais em função de sua origem (JOHN, 2000).

#### **3.2.1. QUANTIDADE GERADA NO BRASIL E NO MUNDO**

A quantidade de resíduos de construção e demolição civil gerada é elevada em muitos países do mundo, variando de 136 a 3359 kg/hab.ano (JOHN, 2000) e estima-se que os mesmos representem de 13 a 80 % em massa dos resíduos sólidos urbanos gerados (ANGULO, 2000).

PINTO (1999) propôs uma metodologia para estimar a geração de RCD em centros urbanos e, nas 10 cidades por ele estudadas, constatou que a geração de RCD variava de 230 a 760 kg/hab.ano, representando entre 41 % e 70 % do resíduo sólido municipal em aderência.

Uma exceção parece ser os Estados Unidos, onde a geração estimada de resíduo de construção é inferior à do resíduo municipal: 463 kg/hab.ano de RCD contra 720 kg/hab.ano de resíduo municipal (EPA, 1998).

Essa disparidade da taxa de geração de resíduos per capita na economia norte-americana pode ser atribuída a uma menor geração de resíduos nas atividades de construção, ou mesmo, ao menor peso da construção na economia norte-americana, cerca de 6,5 % do PIB (HENDRICKSON & HARVOATH, 2000).

### 3.2.2. VANTAGENS POTENCIAIS DA RECICLAGEM DE RESÍDUOS

A reciclagem de resíduos apresenta várias vantagens potenciais, entre as quais, JOHN (2000) destaca:

- A preservação de recursos naturais pela substituição por resíduos, prolongando a vida útil das reservas naturais e reduzindo a destruição da paisagem, flora e fauna.
- A redução do volume de aterros e da prática de incineração, especialmente dos aterros com resíduos perigosos ou não-inertes, que concentram substâncias químicas em teores que se tornam perigosos e podem contaminar o lençol freático.
- A redução do consumo energético para a produção de um determinado bem.
- O aumento da durabilidade da construção em determinadas situações, como já comprovado por inúmeros estudos na área de adições de escórias de alto forno e pozolanas ao cimento.
- A redução da poluição emitida para a fabricação de um mesmo produto.
- A redução dos custos da proteção ambiental, pois a reciclagem permite gerar valor a partir de um produto que antes constituía em despesas.
- O aumento da geração de empregos e da competitividade da economia.
- A economia de divisas, na eventualidade da importação de alguma das matérias-primas recicladas.

### 3.2.3. BARREIRAS PARA A RECICLAGEM DE RCDs

Existem várias barreiras a serem vencidas para a introdução na construção civil de novos produtos contendo resíduos. Entre as quais, juntamente com propostas de superação, JOHN & AGOPYAN (2001) destacam:

- No país, a única tecnologia consagrada capaz de consumir os grandes volumes de resíduos gerados é a pavimentação, que possui praticamente um cliente, as municipalidades, cuja descontinuidade entre gestões e a incerteza quanto a pagamentos torna o negócio pouco atrativo ao setor privado. Assim sendo, é fundamental o desenvolvimento de mercados alternativos.
- A introdução de um novo produto no mercado de construção civil é sempre difícil, pois envolve o desenvolvimento de aplicações onde os produtos contendo agregado reciclado apresentem não só vantagens tecnológicas sobre os produtos tradicionais, mas também preço bastante compatível, uma vez que sempre existe o temor de que os clientes considerem um produto contendo resíduos como de menor qualidade. Limitação que somente pode ser enfrentada por uma política consistente e prolongada de educação ambiental. Para tanto, o desenvolvimento de marcas de qualidade ambiental de produto, que são essencialmente diferentes da certificação ambiental de empresas, serão certamente importantes no processo.
- As aplicações de resíduos na produção de concretos, componentes de baixa resistência, pavimentação e argamassas ainda necessitam ser desenvolvidas, adequadamente testadas e amplamente divulgadas.
- As centrais de reciclagem precisam estar localizadas nas zonas urbanas o mais próximo possível do local de geração dos resíduos e encontram dificuldades para sua localização, pois enfrentam problemas de licenciamento ambiental, zoneamento urbano e oposição de moradores.
- Os RCDs chegam totalmente misturados às centrais de reciclagem aumentando significativamente os custos de sua operação e inviabilizando a produção de concretos que utilizam agregado reciclado, sendo necessário melhorar o manejo dos RCDs em sua geração para que eles cheguem às centrais de reciclagem classificados conforme sua natureza.
- Falta uma normalização adequada que seja capaz de abrir o mercado, não só aos agregados reciclados, mas também aos produtos com eles confeccionados.

### 3.2.4. RECICLAGEM DE RCDs NO BRASIL

Segundo dados do IBGE, a população brasileira atual é de, aproximadamente, 170 milhões de pessoas, das quais 137 milhões de pessoas vivem no meio urbano. Com uma população de 137 milhões de habitantes, teríamos um montante de resíduos por estimativa na ordem de  $68,5 \times 10^6$  t/ano. Em torno de 95% desses resíduos ( $65,0 \times 10^6$  t/ano) são de interesse para a reciclagem (natureza mineral inorgânica). A região metropolitana de São Paulo, com concentração de mais de 17 milhões de pessoas, gera, aproximadamente,  $8,5 \times 10^6$  t/ano de RCD (ANGULO *et al.*, 2002).

A implantação de usinas de reciclagem foi iniciada no Brasil na década de 90, pelas administrações de municípios das regiões Sul e Sudeste. No entanto, só recentemente a operação de centrais de reciclagem de RCD's começou a chamar a atenção do setor privado e as prefeituras passaram realmente a aplicar fundos nesta atividade.

Segundo dados da PREFEITURA MUNICIPAL DE BELO HORIZONTE (2006), cerca de 40 % dos resíduos coletados diariamente em Belo Horizonte são entulho da construção civil. O Programa de Reciclagem de Entulho objetiva promover a recuperação da qualidade do meio ambiente urbano e gerar material de construção reaproveitando o entulho. O material reciclado serve para aplicações na construção civil, em substituição à areia e brita, ou ao minério de ferro, na execução de sub-base de vias de trânsito.

Segundo MAIS INTERIOR (2006), a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (Cetesb) concedeu à Prefeitura Municipal de São Carlos uma licença de autorização para operar a Usina de Reciclagem de Entulho, projeto desenvolvido pela Secretaria Municipal de Desenvolvimento Sustentável, Ciência e Tecnologia e Progresso Habitação de São Carlos (Prohab).

A cidade de São Carlos gera cerca de 400 t/dia de resíduos sólidos urbanos, sendo originados de construção civil, capina, materiais orgânicos e produtos tóxicos. A usina possui capacidade de produção de triagem/britagem de 160 t/dia. (MAIS INTERIOR, 2006).

### 3.2.5. CLASSIFICAÇÃO

JOHN & AGOPYAN (2001) destacam que, pela NBR 10.004 (ABNT, 1987), o resíduo da construção e demolição civil pode ser enquadrado como resíduo inerte, porém, nele podem existir elementos que o torna não-inerte ou perigoso, como por exemplo, o amianto.

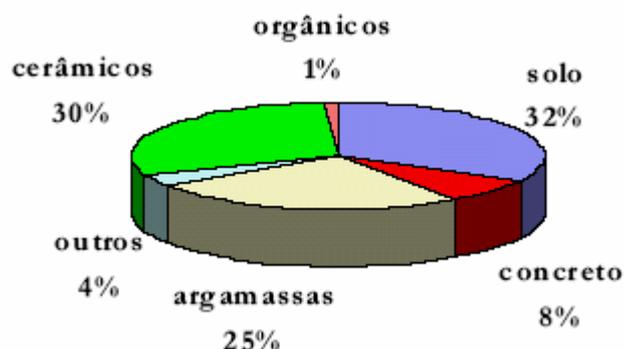
FUJIKAWA (2002) descreve os ensaios de lixiviação (NBR 10.005) e solubilização (NBR 10.006), utilizados para a classificação dos resíduos segundo a NBR 10.004, como:

- O ensaio de lixiviação é realizado imergindo em água destilada um corpo de prova moldado de forma cilíndrica com 3,3 cm de diâmetro e 7,1 cm de altura e submetendo-o por 24 h à agitação realizada em “jar-test”. Durante esse período, o líquido extrator é mantido com pH de  $5,0 \pm 0,2$  pela adição de ácido acético e a seguir ele é filtrado em membrana de 0,45  $\mu\text{m}$ . Após a filtração, a amostra é preservada pela acidificação com ácido nítrico concentrado, e o ensaio é finalizado com a determinação da concentração dos metais presentes no extrato pelo espectrofotômetro de absorção atômica.
- O ensaio de solubilização é realizado mantendo-se imerso em um volume conhecido de água destilada um corpo-de-prova moldado de forma cilíndrica com 3,3 cm de diâmetro e 7,1 cm de altura. Decorrido esse período, o líquido é filtrado em membrana de 0,45  $\mu\text{m}$ , a amostra é preservada pela acidificação com ácido nítrico concentrado e é realizada a determinação da concentração dos metais presentes no extrato pelo espectrofotômetro de absorção atômica.

### 3.2.6. CARACTERIZAÇÃO E COMPOSIÇÃO

O RCD tem constituição variável dependendo da fonte geradora, da fase, da natureza da obra, da tecnologia construtiva empregada etc. Embora sejam vários os dados disponíveis, ainda não se dispõe de um estudo nacional mais abrangente, sabendo-se, no entanto, que os valores medidos no Brasil da composição dos resíduos de construção e demolição são similares aos da Europa, porém muito diferentes dos valores norte americanos. (PINTO, 1999 *apud* JOHN, 2000).

O **Gráfico 3.1** destaca a composição média dos RCDs depositados no aterro de Itatinga na cidade de São Paulo.



**GRÁFICO 3.1** – Composição média dos RCDs depositados no aterro de Itatinga na cidade de São Paulo (BRITO FILHO, 1999 *apud* JOHN, 2000).

Segundo ANGULO *et al.* (2002), a variação em massa da composição do RCD é geralmente estimada em termos de seus materiais, entretanto, a partir dos mesmos dados, pode ser estimada em função dos insumos presentes. Na **Tabela 3.3** observa-se a estimativa realizada por ANGULO *et al.* (2002) da parcela mineral dos RCDs em função dos insumos cimento, cal, areia, rocha e cerâmica.

**TABELA 3.3** – Estimativa da parcela mineral dos RCDs em insumos.

RCD (% em massa)	Cimento		Cal		Areia		Rochas		Cerâmica	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
<b>Concreto</b> <sup>1</sup>	3,3	10,3	-	-	6,7	20,7	10,0	31,0	-	-
<b>Argamassa</b> <sup>2</sup>	0,7	4,2	0,8	4,6	8,5	52,2	-	-	-	-
<b>Rochas</b>	-	-	-	-	-	-	3,0	50,0	-	-
<b>Cerâmica</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0	30,0
<b>Total</b>	4,0	14,5	0,8	4,6	15,3	72,8	3,0	50,0	0,0	30,0

1 Traço adotado em massa 1: 2: 3

2 Traço adotado em volume 1: 2: 9 e, em massa 1: 1,1: 12,3

Fonte: ANGULO *et al.* (2002).

### 3.2.7. A LEGISLAÇÃO ATUAL

A Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) estabelece, além dos responsáveis pela destinação final e pelo gerenciamento dos resíduos, a classificação dos RCDs (**Quadro 3.1**), as etapas dos Projetos Municipais de Gerenciamento de Resíduos (**Quadro 3.2**), a disposição final em função da classificação estabelecida (**Quadro 3.3**) e os prazos a serem cumpridos pelas administrações municipais a partir de 02/01/2003 (**Quadro 3.4**).

Segundo a Resolução nº 307 do CONAMA, são responsáveis pela destinação final e pelo gerenciamento dos resíduos da construção e demolição civil, o proprietário do imóvel ou do empreendimento, o construtor ou empresa construtora, bem como qualquer pessoa que tenha poder de decisão na construção ou reforma, além das empresas e das pessoas que prestam serviços de coleta e/ou disposição de RCDs no município (CONAMA, 2002).

**QUADRO 3.1** – Classificação dos RCDs (CONAMA, 2002).

<b>Classes</b>	<b>Características</b>
<b>A</b>	Resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados: <ul style="list-style-type: none"> <li>a) resíduos de construção, demolição e reformas de obras de pavimentação e infraestrutura;</li> <li>b) resíduos de construção, demolição e reformas de edificações como componentes cerâmicos, argamassa e concreto;</li> <li>c) resíduos do processo de fabricação ou demolição de peças pré-moldadas em concreto como blocos, tubos, meios-fios, etc, e produzidas nos canteiros de obras.</li> </ul>
<b>B</b>	Resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papelão, metais, madeira etc.
<b>C</b>	Resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias e aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem como os resíduos oriundos do gesso.
<b>D</b>	Resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como: tintas, solventes, óleos e outros, e aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos em clínicas radiológicas, instalações industriais etc.

**QUADRO 3.2** – Etapas dos Projetos Municipais de Gerenciamento de Resíduos (CONAMA, 2002).

<b>Etapa</b>	<b>Objetivos</b>
<b>Caracterização</b>	Identificar e quantificar os resíduos
<b>Triagem</b>	A triagem dos resíduos deverá ser realizada na origem ou nas áreas de destinação licenciadas para essa finalidade.
<b>Acondicionamento</b>	O confinamento dos resíduos após a geração até o transporte deverá assegurar a sua reutilização ou reciclagem.
<b>Transporte</b>	O transporte deverá ser realizado de acordo com as normas vigentes para o transporte de resíduos.
<b>Destinação</b>	A destinação ou disposição final dos resíduos deverá ser realizada em função de sua classificação.

**QUADRO 3.3** – Disposição final dos RCDs em função de sua classificação (CONAMA, 2002)

<b>Classe</b>	<b>Destinação e disposição final</b>
<b>A</b>	Reutilizados ou reciclados da forma de agregados ou encaminhados a áreas de aterros de resíduos da construção e demolição civil, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura.
<b>B</b>	Reutilizados, reciclados ou encaminhados a áreas de armazenamento temporário, sendo dispostos de forma a permitir a sua utilização ou reciclagem futura.
<b>C</b>	Armazenados, transportados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas.
<b>D</b>	Armazenados, transportados, reutilizados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas.

**QUADRO 3.4** – Prazos, a partir de 02/01/2003, para a elaboração de Projetos de Gerenciamento de RCDs (CONAMA, 2002).

<b>Prazos</b>	<b>Obrigações dos municípios e do Distrito Federal</b>
12 meses	Os municípios e o Distrito Federal deverão elaborar seus planos integrados de gerenciamento de resíduos da construção e demolição civil.
18 meses	A implementação do plano deverá ser realizada.
18 meses	Os municípios e Distrito Federal deverão cessar a disposição de RCDs em aterros domiciliares e áreas de “bota fora”.
24 meses	Os geradores deverão incluir os projetos de gerenciamento de resíduos nos projetos de obras a serem submetidos à aprovação ou licenciamento dos órgãos competentes.

### 3.2.8. TÉCNICAS PARA A RECICLAGEM EM CONCRETOS

MESTERS & KURKOWSKI (1997) destacam que o uso dos agregados reciclados em concretos exige mudanças não só nos procedimentos e nos equipamentos das instalações de reciclagem, como também na gestão dos resíduos e na normalização vigente e afirmam que aplicações em concretos em larga escala somente são conseguidas pela demolição seletiva e técnicas de homogeneização do agregado reciclado.

#### 3.2.8.1. Demolição seletiva ou desconstrução

Segundo HENDRIKS (2000), as técnicas de demolição seletiva ou desconstrução vêm ganhando importância pela maximização da reciclagem, pela reutilização dos RCDs e pela minimização da destinação dos resíduos em aterros na Europa. A demolição seletiva consiste na remoção ou desmontagem de diversos tipos de componentes na demolição para a reutilização, por exemplo, telhas, vidros, caixilhos..., seguida da demolição de fases não desmontáveis separadamente.

FREIRE & BRITO (2001) relatam que uma versão simplificada deste tipo de procedimento já é praticada no Brasil por demolidoras que alimentam lojas de materiais de construção usados, principalmente pela demolição de residências e imóveis mais antigos, e que, esse processo, por ser controlado, reduz a contaminação do resíduo e contribui para a melhora da qualidade do RCD reciclado, mas apresenta, como desvantagens, a morosidade da execução, a necessidade de uso de equipamento especializado e o custo, principalmente devido ao uso de mão-de-obra intensiva.

#### 3.2.8.2. Homogeneização do agregado reciclado

Segundo ANGULO (2000), a homogeneização de matérias-primas naturais é técnica consagrada na indústria de mineração que pode ser adaptada para RCDs, sendo praticada por indústrias como a de cimento e a de cerâmica. Apesar de o uso da homogeneização dos reciclados não garantir aplicações de maior valor ao agregado, ela reduz a variabilidade da composição e de outras propriedades, sendo fundamental para a produção em larga escala. Como desvantagens, ANGULO (2000) destaca a necessidade de formação de estoques maiores, que implicam em custos em capital imobilizado e em área.

- Processamento mineral a seco

Entre os equipamentos de processamento mineral a seco destacam-se os peneiradores e os classificadores de resíduos por fluxo de ar ou mecânicos (KOHLER & KURKOWSKI, 2002).

Algumas instalações de reciclagem na Holanda realizam o peneiramento dos resíduos que chegam à central antes da atividade de cominuição. Neste peneiramento, a fração fina contida no resíduo de demolição, passando na peneira de abertura entre 8 e 10 mm, é retirada do processo devido ao alto teor de contaminação por hidrocarbonetos e dioxinas, que, além de causarem um aumento muito grande do teor de finos dos agregados, afetam o seu uso em concretos (HENDRIKS, 2000).

- Processamento mineral a úmido

Segundo MESTERS & KURKOWSKI (1997), o jigge consiste em um processamento de separação a úmido em que a água em regime turbulento faz que as partículas se reorganizem em camadas em função de sua densidade, as mais leves saíam pelo *overflow* e as mais pesadas saíam pelo *underflow*.

O processamento a úmido com jigge pode trazer alguns benefícios como melhorar a separação qualitativa dos resíduos minerais, menor quantidade de contaminação (íons solúveis). Entre as desvantagens do processo estão o alto consumo de água, a geração de água contaminada e a necessidade de tratamento posterior (MESTERS & KURKOWSKI, 1997).

- Otimização da britagem

Um outro tipo de operação unitária para a reciclagem de RCDs em concretos é a otimização de britagem de impacto por canhão pneumático. Este equipamento, usando um valor não tão significativo de energia, aproximadamente 1 KWh/t, acelera as partículas da alimentação de tal forma que uma separação mais eficiente entre as rochas naturais e argamassa dos agregados de concreto reciclados é obtida. Com isso, além de menor quantidade de argamassa aderida aos grãos, há um aumento da massa específica média, com melhoria da qualidade do produto final. (TOMAS et al., 1999).

### 3.2.9. A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM AGREGADOS DE ENTULHO

ALTHEMAN, GIUSEPPONI, PAULON (2003) estudaram o comportamento de concretos produzidos com agregados de entulho quanto à resistência à compressão axial. Na **Tabela 3.4**, podem ser observados os resultados dos ensaios realizados pelos pesquisadores, que fixaram o abatimento do tronco de cone em  $(80 \pm 10)$  mm e variaram a relação a/c nas amostras dos concretos produzidos com baixos teores de cimentos (inferiores a  $350 \text{ kg/m}^3$ ).

**TABELA 3.4** – Resistências médias dos ensaios de compressão axial de concretos produzidos com agregados de entulho.

Amostra		a/c	Resistência à Compressão Axial (MPa)		
			7 dias	28 dias	60 dias
Concretos com Agregados Reciclados	CR 180	1,46	3,6	6,0	6,7
	CR 242	1,03	7,3	10,1	11,7
	CR 300	0,90	12,1	15,5	18,7
	CR 366	0,77	11,6	16,5	20,9
Concretos com Agregados Convencionais	CC 180	1,10	4,8	7,3	8,4
	CC 230	0,86	7,7	11,1	12,4
	CC 282	0,72	11,0	14,6	16,4
	CC 340	0,60	18,0	23,1	26,1

Fonte: ALTHEMAN, GIUSEPPONI, PAULON (2003).

Com base nos ensaios realizados, ALTHEMAN, GIUSEPPONI, PAULON (2003) notaram que:

- a relação a/c dos concretos de agregados reciclados foi superior à relação a/c de todas as amostras de concretos convencionais;
- mesmo as amostras pobres em cimento ( $180$  e  $232 \text{ kg/m}^3$ ) apresentaram plasticidade satisfatória, resultado da grande quantidade de material pulverulento presente nos agregados reciclados;

- nos concretos produzidos com agregados naturais convencionais, a ruptura é influenciada pela zona de transição e pela porosidade da matriz, enquanto, nos concretos produzidos com agregados reciclados, ela acontece nos agregados de RCDs que geralmente apresentam menor resistência;
- a resistência à compressão axial aos 60 dias foi em média 13 % maior que a resistência à compressão axial aos 28 dias nos concretos convencionais e em média 19 % maior nos concretos com agregados de RCDs.

E concluíram que:

- concretos de agregados reciclados com baixo consumo de cimento e alto consumo de água podem apresentar resistências superiores aos convencionais de consumos iguais, devido ao fato de o material reciclado absorver maior quantidade de água que os agregados convencionais, deixando menos vazios no concreto;
- os concretos com agregados de RCDs possuem resistência à compressão axial satisfatória e podem ser usados em peças estruturais de menor solicitação mediante controle de fabricação.

### 3.2.10. A CORROSÃO EM ARMADURAS DE CONCRETOS RECICLADOS COM AGREGADOS DE ENTULHO

A probabilidade de corrosão da armadura aumenta proporcionalmente à idade do concreto e à relação água/cimento devido a maior porosidade desses concretos, uma vez que a quantidade de poros comunicantes favorece o contato de agentes agressivos com a armadura provocando a despassivação desta (VIEIRA, DAL MOLIN, LIMA, 2003).

Baseado nessa afirmação, VIEIRA, DAL MOLIN, LIMA (2003) fizeram um estudo comparativo entre amostras de concreto com agregado reciclado e concreto convencional para verificarem a corrosão da armadura em cada caso. Os pesquisadores variaram os teores de substituição dos agregados graúdos reciclados (AGR) e dos agregados miúdos reciclados (AMR) em 0,50 e 100 %, num total de 9 diferentes traços de concreto para 3 diferentes relações a/c (0,4, 0,6 e 0,8) e observaram que:

- o concreto com 100 % de AMR e 0 % de AGR teve o melhor desempenho entre os traços, inclusive com relação ao concreto referência produzido totalmente com agregados convencionais;
- a substituição total ou parcial do agregado miúdo natural por AMR resultou em menores valores absolutos do potencial de corrosão na presença de relação a/c igual a 0,8;
- a substituição total ou parcial do agregado graúdo natural por AGR apresentou os piores desempenhos dos ensaios;
- para baixos valores da relação a/c, a substituição dos agregados não foi significativa quanto ao potencial de corrosão.

VIEIRA, DAL MOLIN, LIMA (2003) também mediram a velocidade ou taxa de corrosão, que é um parâmetro de maior veracidade que o potencial de corrosão e constataram que as amostras com 100 % de AMR e 0 % de AGR demonstraram velocidade de corrosão inferior à velocidade de corrosão das amostras de referência e que os corpos-de-prova apresentaram diferentes taxas de corrosão para valores próximos de potenciais de corrosão.

Ao final dos experimentos, VIEIRA, DAL MOLIN, LIMA (2003) concluíram que:

- o melhor desempenho do concreto com substituição de agregados miúdos ocorreu devido maior percentual de grãos finos presentes no agregado reciclado, que preencheram os vazios do concreto e diminuíram a porosidade do material;
- a substituição de agregados naturais por agregados reciclados, sem afetar significativamente a durabilidade e a resistência do concreto, pode ser realizada desde que o material seja corretamente dosado e o RCD seja convenientemente tratado durante o beneficiamento, a caracterização e o emprego no concreto como agregado.

## **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

Neste capítulo estão descritos os materiais, os equipamentos e os métodos utilizados no trabalho experimental desta pesquisa, a qual foi dividida nas seguintes etapas:

- Caracterização dos materiais convencionais utilizados na produção dos concretos e argamassas em estudo: o Cimento Portland CII-E32, a areia grossa e a areia fina do Rio Mogi e a pedra britada 1 da pedra Bandeirantes.
- Coleta, transporte, caracterização e preparo do lodo da Estação de Tratamento de Água de São Carlos e do entulho de concreto da Usina de Reciclagem de Resíduos de São Carlos.
- Estudo da aplicação do LETA em concretos estruturais de resistência moderada produzidos com agregados convencionais e com agregados de entulho de concreto.
- Estudo da aplicação do LETA em concretos de contrapiso produzidos com agregados convencionais e com agregados de entulho de concreto.
- Estudo da aplicação do LETA em argamassas de assentamento produzidas com agregados convencionais e com agregados de entulho de concreto.
- Estudo da concentração de alumínio no extrato lixiviado dos concretos produzidos com agregados de entulho de concreto e LETA.

### **4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS CONVENCIONAIS**

Com o objetivo de estabelecer padrões para a produção de todos os concretos e argamassas em estudo, os agregados naturais foram caracterizados pela sua composição granulométrica, pela sua dimensão máxima característica, pelo seu módulo de finura e por sua massa unitária.

#### 4.1.1. COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS NATURAIS

As composições granulométricas dos agregados naturais foram determinadas segundo a NBR 7217, de agosto de 1987.

Assim que chegaram ao laboratório, os agregados naturais foram estendidos e expostos à temperatura ambiente por 24 horas para uma pré-secagem. A seguir, foram completamente secos em estufa, à temperatura de 110 °C.

Seguindo as especificações da NBR 7216, de agosto de 1987, foram coletadas 10 amostras de 1 kg de diversas partes das areias e 20 amostras de 2,5 kg de diversas partes da pedra britada 1.

As amostras das areias foram peneiradas por 10 min no peneirador automático de agregados miúdos mostrado na **Figura 4.1**, com a seguinte série de peneiras de malha quadrada: (9,5; 6,3; 4,8; 2,4; 1,2; 0,6; 0,3 e 0,15) mm.

As amostras de pedra britada foram peneiradas por 10 min no peneirador automático de agregados graúdos mostrado na **Figura 4.2**, com a seguinte série de peneiras de malha quadrada: (25; 19; 9,5; 6,3; 4,8 e 2,4) mm.

As porções retidas nas peneiras foram pesadas e, a seguir, foram calculadas as porcentagens retidas e acumuladas delas.

As composições granulométricas dos agregados foram comparadas aos limites granulométricos estabelecidos pela NBR 7211, de maio de 1983.



**FIGURA 4.1** – Peneirador automático de agregados miúdos.



**FIGURA 4.2** – Peneirador automático de agregados graúdos.

#### 4.1.2. DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA DOS AGREGADOS NATURAIS

A dimensão máxima característica dos agregados naturais foi determinada segundo a NBR 7211, de maio de 1983, que define esta grandeza como a abertura da malha quadrada, em mm, da peneira correspondente a uma porcentagem em massa retida e acumulada igual ou imediatamente inferior a 5 %.

#### 4.1.3. MÓDULO DE FINURA DOS AGREGADOS NATURAIS

O módulo de finura dos agregados naturais foi determinado segundo a NBR 7211, de maio de 1983, que define essa grandeza como a soma das porcentagens retidas e acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100.

#### 4.1.4. MASSA UNITÁRIA DOS AGREGADOS NATURAIS

As massas unitárias dos agregados naturais foram determinadas segundo a NBR 7251, de abril de 1982, que define a massa unitária de um agregado no estado solto como o quociente da massa do agregado, lançado de uma altura de 10 a 12 cm em um recipiente paralelepípedo com dimensões definidas em função da dimensão máxima característica do agregado, e o volume desse recipiente.

#### 4.1.5. CARACTERIZAÇÃO DO AGLOMERANTE

As características do cimento não foram conseguidas com o fabricante, entretanto, somente foi aceito e aplicado nesta pesquisa o Cimento Portland Composto CPII-E-32 que atendeu as condições exigíveis pela EB-2138, de julho de 1991, registrada no INMETRO como NBR 11578.

## 4.2. COLETA, CARACTERIZAÇÃO E PREPARO DOS RESÍDUOS

Esta etapa teve como objetivo a coleta, a caracterização e o preparo do lodo da Estação de Tratamento de Água de São Carlos e do entulho de concreto da Usina de Reciclagem de Resíduos de São Carlos.

### 4.2.1. O LODO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA DE SÃO CARLOS

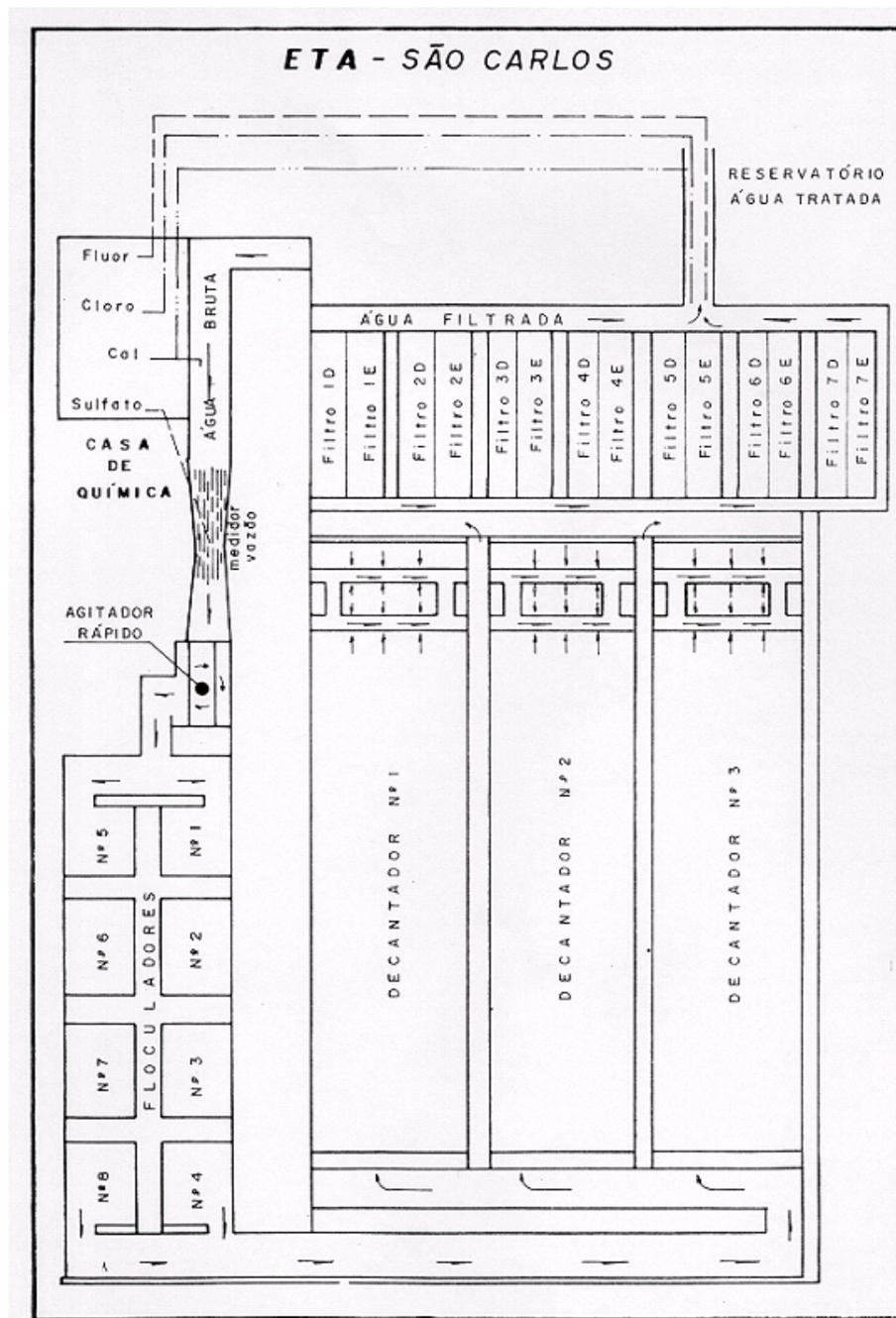
O lodo adicionado aos concretos e argamassas foi coletado na Estação de Tratamento de Água de São Carlos, em dias de limpeza dos decantadores.

#### 4.2.1.1. A Estação de Tratamento de Água de São Carlos

A estação de tratamento de água de São Carlos trata atualmente cerca de 580 l/s de água bruta captada em três pontos: a captação do Ribeirão do Feijão de 360 l/s, a captação do córrego Monjolinho de 180 l/s e a captação do córrego Santa Maria do Leme de 40 l/s.

O sistema de tratamento da água é o tradicional, composto das etapas de floculação, sedimentação e filtração. O coagulante utilizado é o sulfato de alumínio.

Na **Figura 4.3**, observa-se o esquema da Estação de Tratamento de Água de São Carlos, que é composta de: duas câmaras de floculação de 24 m de comprimento por 6 m de largura e 4 m de profundidade, três decantadores de 32 m de comprimento por 12,8 m de largura e 4 m de profundidade, e 14 filtros rápidos de gravidade.



**FIGURA 4.3** – Esquema da Estação de Tratamento de Água de São Carlos.

#### 4.2.1.2. O processo de limpeza dos decantadores da ETA de São Carlos

Quando é constatada a necessidade de limpeza dos decantadores, inicia-se o processo operacional padrão de limpeza com a verificação visual de qual dos três decantadores encontra-se mais sujo. Como a limpeza é executada em pleno funcionamento da estação, os decantadores são limpos em intervalos de tempo diferentes.

Essa limpeza é realizada atualmente em um intervalo de tempo de, aproximadamente, 60 dias, intervalo que, segundo os próprios funcionários da limpeza, reduziu-se bastante nos últimos anos, pelo fato de a água captada chegar cada vez mais suja.

Após a determinação do decantador que será limpo, são fechadas as comportas de entrada da água vinda das câmaras de floculação e são abertas as adufas de fundo para que o lodo comece a escoar.

Na **Figura 4.4**, observa-se o exato momento que os funcionários da limpeza estão fechando as comportas de entrada da água vinda das câmaras de floculação e abrindo as adufas de fundo do decantador. Enquanto o lodo escoar pela adufa, os funcionários ligam a bomba de lavagem, esticam as mangueiras de borracha e começam a lavar as paredes e canaletes do decantador. A limpeza das paredes e dos canaletes com jatos de água favorece o escoamento do lodo à medida que a água o dilui.



**FIGURA 4.4** – Fechamento das comportas de entrada de água e abertura das adufas de fundo do decantador para o escoamento do lodo.

Neste sistema de limpeza, a entrada dos funcionários no decantador é obrigatória. Na **Figura 4.5**, observa-se os funcionários de limpeza no interior do decantador forçando o escoamento do lodo com jatos d'água, visando reduzir o tempo de limpeza, o aumento da turbidez da água nos decantadores laterais e o gasto de água, que aliás já foi tratada.

O processo completo de limpeza dura 2 h e 30 min aproximadamente.



**FIGURA 4.5** – Funcionários da limpeza no interior do decantador forçando o escoamento do lodo com jatos de água.

Na **Figura 4.6**, observa-se o fundo do decantador que, para facilitar o escoamento do lodo, é inclinado na direção de seu centro onde apresenta um canaleta.



**FIGURA 4.6** – Visão do fundo do decantador praticamente limpo.

#### 4.2.1.3. A coleta e o transporte do lodo

Optou-se pela coleta do lodo durante o processo de limpeza do decantador porque, caso ela fosse realizada no ponto de descarregamento do lodo mostrado na **Figura 4.7**, haveria a necessidade de ser coletado um volume muito maior de lodo pelo fato de ele encontrar-se bastante diluído, além do que o processo posterior de caracterização, preparo e incorporação do resíduo em matrizes de concretos e argamassas seria ainda mais complexo.



**FIGURA 4.7** – Descarregamento do LETA de São Carlos no córrego Monjolinho.

Na **Figura 4.8**, observa-se o nível do lodo no decantador no momento escolhido para a coleta.



**FIGURA 4.8** – Nível do lodo no decantador no momento escolhido para a coleta.

O lodo coletado foi transportado em vazios de plástico fechados até o Laboratório de Materiais e Componentes do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos.

#### 4.2.1.4. O preparo e a caracterização do lodo

Ao chegar ao Laboratório de Materiais e Componentes do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos, imediatamente, uma pequena parcela do lodo foi separada para análise e caracterização química. Na **Figura 4.9**, observa-se o lodo em repouso em bandeja metálica logo após a sua coleta na Estação de Tratamento de Água de São Carlos.



**FIGURA 4.9** – Lodo em repouso em bandeja metálica logo após ter sido coletado na Estação de Tratamento de Água de São Carlos.

Devido à grande quantidade de água, a parte do lodo destinada aos concretos e argamassas foi colocada em bandejas metálicas e exposta ao ar livre, à temperatura ambiente, para uma pré-secagem, por 48 horas. Na **Figura 4.10**, observa-se o lodo após o período de pré-secagem.

Após a pré-secagem, o lodo foi completamente seco em estufa na temperatura de 110 °C por 24 h. Na **Figura 4.11**, observa-se o lodo após a sua completa secagem em estufa.

Após totalmente seco, ele foi moído em um triturador de agregados miúdos até que suas partículas atingissem dimensão menor ou igual à dimensão máxima característica da areia grossa do Rio Mogi. Na **Figura 4.12**, observa-se o triturador de agregados miúdos utilizado para moer o lodo.



**FIGURA 4.10** – Lodo após pré-secagem por 48 horas ao ar livre à temperatura ambiente.



**FIGURA 4.11** – Fase sólida do lodo após secagem em estufa por 24 h à temperatura de 110 °C.



**FIGURA 4.12** – Triturador de agregados miúdos usado para moer o lodo seco.

#### 4.2.2. O ENTULHO DE CONCRETO DA USINA DE RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE SÃO CARLOS

Os resíduos da indústria da construção civil são tão variados quanto aos materiais que são nela empregados. O que utilizado nesta pesquisa como material na produção dos concretos e argamassas foi o entulho de concreto coletado na Usina de Reciclagem de Resíduos de São Carlos.

##### 4.2.2.1. A Usina de Reciclagem de Resíduos de São Carlos

A usina recebe, além do resíduo de construção e demolição civil, o resíduo resultante da coleta seletiva do lixo doméstico e pode ser dividida em 8 áreas ou espaços funcionais:

- a entrada onde o resíduo é classificado em função de sua origem;
- a área de descarga do lixo doméstico resultante da coleta seletiva onde seus componentes são separados em: papel, vidro, plástico e metal;
- a área de descarga do resíduo de obras e demolições onde seus componentes são separados em material cerâmico, material cimentado, metal, madeira, vidro, plástico etc;
- a área onde os materiais cerâmicos e cimentados são triturados e depositados;
- a Fábrica de Artefatos de Cimento onde são produzidos tijolos, blocos vazados e briquetes;
- a área de depósito dos artefatos produzidos;
- a área de administração e gerência;
- a área de saída dos produtos e entrada dos funcionários.

#### 4.2.2.2. A coleta e o transporte do entulho de concreto

Nas **Figuras 4.13** e **4.14**, observam-se, respectivamente, os agregados graúdos e os agregados miúdos produzidos na Usina de Resíduos de São Carlos a partir de entulho de concreto.

Como esses agregados apresentavam grande quantidade de resíduos cerâmicos, optou-se por coletar o entulho de concreto da forma como ele chega na usina.



**FIGURA 4.13** – Agregado graúdo reciclado produzido na Usina de Reciclagem de São Carlos.



**FIGURA 4.14** – Agregado miúdo reciclado produzido na Usina de Reciclagem de São Carlos.

Na **Figura 4.15**, observa-se o RCD entulhado da forma como chega à Usina de Reciclagem de Resíduos de São Carlos. Por ela conclui-se o quão difícil é o processo de separação realizado manualmente pelos funcionários.



**FIGURA 4.15** – RCD entulhado como chega na Usina de Reciclagem de Entulho de São Carlos.

#### 4.2.2.3. O preparo e caracterização do entulho de concreto

Ao chegar ao laboratório, o entulho de concreto foi inicialmente estendido e exposto à temperatura ambiente por 24 h para pré-secagem. A seguir, teve suas dimensões reduzidas e foi completamente seco em estufa à temperatura de 110 °C.

Na **Figura 4.16**, observa-se o triturador de agregados graúdos utilizado na produção dos agregados graúdos e miúdos reciclados.

Após triturados, os agregados foram peneirados e tiveram sua granulometria montada a partir da granulometria dos agregados naturais.



**FIGURA 4.16** – Triturador de agregado graúdo utilizado na produção dos agregados reciclados.

#### 4.3. ESTUDO DA APLICAÇÃO DO LETA EM CONCRETOS ESTRUTURAIS DE RESISTÊNCIA MODERADA PRODUZIDOS COM AGREGADOS NATURAIS E COM AGREGADOS DE ENTULHO DE CONCRETO

Com o objetivo de avaliar, em função da resistência à compressão axial e da absorção de água, a possibilidade de aplicação do lodo de Estação de Tratamento de Água em concretos estruturais de resistência moderada, produzidos com agregados naturais e com agregados de entulho de concreto, foram produzidos os seguintes concretos descritos no **Quadro 4.1**:

**QUADRO 4.1** – Concretos produzidos com o objetivo de avaliar a possibilidade de aplicação do LETA de São Carlos em concretos estruturais de resistência moderada.

<b>Concreto Tipo</b>	<b>Descrição</b>
<b>CC</b>	Concreto convencional - Traço (em massa) 1:2:3.
<b>CCR1L</b>	CC com 1% em massa de LETA substituindo o agregado miúdo natural.
<b>CCR2L</b>	CC com 2% em massa de LETA substituindo o agregado miúdo natural.
<b>CCR3L</b>	CC com 3% em massa de LETA substituindo o agregado miúdo natural.
<b>CCR4L</b>	CC com 4% em massa de LETA substituindo o agregado miúdo natural.
<b>CCR5L</b>	CC com 5% em massa de LETA substituindo o agregado miúdo natural.
<b>CRE</b>	Concreto reciclado produzido com agregado miúdo natural e agregado graúdo de entulho de concreto - Traço (em massa) 1:2:3.
<b>CRE1L</b>	CRE com 1% em massa de LETA substituindo o agregado miúdo natural.
<b>CRE2L</b>	CRE com 2% em massa de LETA substituindo o agregado miúdo natural.
<b>CRE3L</b>	CRE com 3% em massa de LETA substituindo o agregado miúdo natural.
<b>CRE4L</b>	CRE com 4% em massa de LETA substituindo o agregado miúdo natural.
<b>CRE5L</b>	CRE com 5% em massa de LETA substituindo o agregado miúdo natural.

#### 4.3.1. PREPARO DOS CONCRETOS DE RESISTÊNCIA MODERADA

O primeiro passo na produção dos concretos em estudo foi a montagem granulométrica dos agregados graúdos e miúdos em função da composição granulométrica dos agregados naturais.

O segundo passo foi a determinação do fator ( $a/c$ ) em função da consistência que, para todos os concretos, foi padronizada em  $(60 \pm 10)$  mm, medida pelo ensaio de abatimento do tronco de cone.

##### 4.3.1.1. Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone

A determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone foi realizada seguindo-se as especificações da NBR 7223, de fevereiro de 1982.

Na **Figura 4.17**, observa-se a betoneira utilizada para a mistura dos componentes do concreto e na **Figura 4.18**, observam-se os equipamentos utilizados no ensaio de determinação da consistência do concreto: a placa metálica de base, o molde em forma de tronco de cone, a haste de socamento, a régua metálica graduada e a concha metálica para o enchimento do molde.



**FIGURA 4.17** – Betoneira utilizada para a mistura dos componentes do concreto.



**FIGURA 4.18** – Equipamentos utilizados no ensaio de determinação da consistência do concreto.

O molde foi inicialmente umedecido internamente, colocado sobre a placa metálica da base e fixado pelas suas aletas pelos pés do operador.

Em seguida, foi totalmente preenchido de concreto em três camadas aproximadamente iguais, que foram adensadas, cada uma, com 25 golpes uniformemente distribuídos e aplicados com haste de socamento.

Após o preenchimento total do molde, o excesso de concreto foi removido com auxílio da própria haste de socamento, e a desmoldagem foi realizada elevando-se o molde pelas alças na direção vertical com velocidade constante e uniforme.

O abatimento do tronco de cone de concreto foi determinado pelo valor da distância entre o plano correspondente à base superior do molde e o centro da base superior da amostra abatida, medida com régua metálica graduada.

#### 4.3.1.2. A moldagem e a cura dos corpos-de-prova

Para cada matriz de concreto em estudo, foram moldados seis corpos-de-prova cilíndricos de concreto, para que três fossem rompidos aos 7 dias e três, aos 28 dias.

A moldagem e a cura dos corpos-de-prova cilíndricos de concreto foram realizadas seguindo-se a NBR 5738, de abril de 1994.

Na **Figura 4.19**, observam-se os moldes de aço cilíndricos de (10 x 20) cm, que antes de receberem o concreto, foram untados internamente com uma fina camada de óleo mineral e, para evitar vazamentos, tiveram suas juntas vedadas com uma mistura de cera virgem e óleo mineral.



**FIGURA 4.19** – Moldes de aço cilíndricos de (10 x 20) cm.

Imediatamente após o amassamento do concreto, os moldes foram preenchidos totalmente com duas camadas de espessuras aproximadamente iguais, que receberam, cada uma, como forma de adensamento, 15 golpes uniformemente distribuídos e aplicados com haste de socamento.

Após a moldagem, os corpos-de-prova foram imediatamente cobertos com material não-reativo e não-absorvente, com a finalidade de evitar a perda de água e proteger o concreto da ação das intempéries.

Os corpos-de-prova cilíndricos permaneceram nas formas em processo de cura inicial ao ar por 24 horas.

Após esse período, eles foram desformados e tiveram sua face superior e inferior capeadas com uma camada de argamassa de cimento e areia fina de 3 mm, com o intuito de se obter superfície lisa e isenta de riscos e falhas de planicidade superiores a 0,5 mm. A argamassa utilizada no capeamento foi produzida com 50% de cimento, 50% de areia fina e água suficiente para se obter boa trabalhabilidade.

Após a desforma e o capeamento, os corpos-de-prova foram conservados em câmara úmida com temperatura de  $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$  e com 95 % de umidade relativa do ar, até a data dos ensaios de resistência a compressão axial.

#### 4.3.2. DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DOS CONCRETOS DE RESISTÊNCIA MODERADA

A resistência à compressão axial dos concretos em estudo foi determinada seguindo-se o método descrito pela NBR 5739, de julho de 1994.

Para a execução dos ensaios, utilizou-se a prensa do Laboratório de Materiais e Componentes do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos, mostrada na **Figura 4.20**.

Antes do ensaio, limpou-se a base da máquina e calçou-se o corpo-de-prova, de forma que ele ficasse rigorosamente centrado em relação ao eixo de carregamento.

A resistência à compressão axial de cada corpo-de-prova foi determinada dividindo-se a carga de ruptura especificada pelo aparelho de leitura da prensa pela área da secção transversal do corpo-de-prova.



**FIGURA 4.20** – Prensa utilizada no ensaio de compressão axial de corpos-de-prova cilíndricos.

#### 4.3.3. DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS CONCRETOS DE RESISTÊNCIA MODERADA

O ensaio de determinação da absorção de água foi realizado com a parte mais representativa dos corpos-de-prova rompidos aos 28 dias.

As partes escolhidas foram inicialmente colocadas na câmara úmida por 24 h e tiveram seu peso úmido determinado. A seguir, foram colocadas na estufa a 110 °C por 24 h e tiveram seu peso seco determinado.

De posse desses resultados, a absorção de cada corpo-de-prova foi determinada por meio da seguinte equação:

$$\text{Absorção (\%)} = \frac{(\text{Massa Úmida} - \text{Massa Seca}) \cdot 100}{\text{Massa Seca}}$$

#### 4.4. ESTUDO DA APLICAÇÃO DO LETA EM CONCRETOS DE CONTRAPISO PRODUZIDOS COM AGREGADOS NATURAIS E COM AGREGADOS RECICLADOS DE ENTULHO DE CONCRETO

Com o objetivo de avaliar, em função da resistência à compressão axial e da absorção de água, a possibilidade de aplicação do LETA em concretos de contrapiso produzidos com agregados naturais e com agregados de entulho de concreto, foram produzidos os seguintes concretos descritos no **Quadro 4.2**.

**QUADRO 4.2** – Concretos de contrapiso produzidos para o estudo.

Concreto Tipo	Descrição
CCC	Concreto de contrapiso convencional, traço (em massa) 1:4,6:5,96.
CCCR3L	CCC produzido com 3% em massa de LETA substituindo o agregado miúdo natural.
CCRE3L	Concreto de contrapiso reciclado, Traço (em massa) 1:4,6:5,96, produzido com agregado graúdo de entulho de concreto e com 3% em massa de LETA seco e moído substituindo o agregado miúdo natural.

##### 4.4.1. O PREPARO DOS CONCRETOS DE CONTRAPISO

Para que fossem realizadas melhores comparações com maior poder de avaliação, a granulometria dos agregados miúdos e dos agregados graúdos foi mantida para todas as matrizes dos concretos de contrapiso em estudo.

#### 4.4.1.1. Determinação do fator (a/c) dos concretos de contrapiso

As quantidades de água a serem aplicadas no preparo dos concretos de contrapiso em estudo foram determinadas como as menores quantidades de água necessárias para que os concretos apresentassem consistência de  $(40 \pm 10)$  mm medida pelo ensaio de abatimento do tronco de cone, especificado pela NBR 7223, de fevereiro de 1982.

#### 4.4.1.2. A moldagem e a cura dos corpos-de-prova dos concretos de contrapiso

Para cada tipo de concreto de contrapiso em estudo, foram moldados e curados seis corpos-de-prova cilíndricos de (10 x 20) cm seguindo-se as especificações da NBR 5738, de abril de 1994: três para serem rompidos aos 7 dias e três aos 28 dias.

#### 4.4.2. DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DOS CONCRETOS DE CONTRAPISO

A determinação da resistência à compressão axial dos concretos de contrapiso em estudo foi realizada seguindo-se as especificações da NBR 5739, de julho de 1994.

Com a prensa limpa e devidamente regulada, os corpos-de-prova que foram mantidos em processo de cura úmida até a idade dos ensaios, foram fixados por calçamento nos pratos da prensa, de forma que ficassem rigorosamente centrados em relação ao eixo de carregamento, e receberam a aplicação de carga de compressão a uma velocidade de 0,3 MPa/s a 0,8 MPa/s, não sendo feito nenhum ajuste nos controles da máquina quando os corpos-de-prova estavam se deformando rapidamente ao se aproximarem de suas rupturas.

A resistência à compressão axial de cada corpo-de-prova foi calculada em MPa dividindo-se a carga total aplicada até o momento de sua ruptura pela área de sua seção transversal, e o valor foi expresso com aproximação de 0,1 MPa.

#### 4.4.3. DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS CONCRETOS DE CONTRAPISO

A absorção de água dos concretos de contrapiso em estudo foi determinada medindo-se a massa úmida e a massa seca da parte mais representativa dos corpos-de-prova rompidos aos 28 dias e aplicando-se os resultados na seguinte equação:

$$\text{Absorção (\%)} = \frac{(\text{Massa Úmida} - \text{Massa Seca}) \cdot 100}{\text{Massa Seca}}$$

#### 4.5. ESTUDO DA APLICAÇÃO DO LETA EM ARGAMASSAS DE ASSENTAMENTO PRODUZIDAS COM AGREGADOS NATURAIS E COM AGREGADOS RECICLADOS DE ENTULHO DE CONCRETO

Com o objetivo de avaliar, em função da resistência à compressão axial e da absorção de água, a possibilidade de aplicação do lodo de Estação de Tratamento de Água em argamassas de assentamento produzidas com agregados naturais e com agregados de entulho de concreto, foram produzidas os seguintes argamassas descritas no **Quadro 4.3**.

**QUADRO 4.3** – Argamassas de assentamento produzidas para o estudo.

<b>Argamassa Tipo</b>	<b>Descrição</b>
<b>AAC</b>	Argamassa de assentamento convencional traço (em massa) 1:8.
<b>AACR2L</b>	AAC produzida com 2% em massa de LETA substituindo o agregado miúdo natural.
<b>AARE2L</b>	Argamassa de assentamento reciclada, Traço (em massa) 1:8, produzida com agregado miúdo de entulho de concreto e com 2% em massa de LETA substituindo o agregado miúdo reciclado.

##### 4.5.1. O PREPARO DAS ARGAMASSAS DE ASSENTAMENTO

A granulometria dos agregados miúdos naturais e artificiais foi mantida para todas as matrizes de argamassas de assentamento em estudo.

#### 4.5.1.1. Determinação do fator água cimento (a/c) das argamassas de assentamento

As quantidades de água aplicadas no preparo das argamassas de assentamento em estudo foram determinadas com as menores quantidades de água necessárias para que as argamassas apresentassem consistência de  $(250 \pm 10)$  mm medida pelo ensaio de determinação de consistência realizado segundo o anexo B da NBR 7215, de dezembro de 1996.

#### 4.5.1.2. Determinação do índice de consistência das argamassas de assentamento

Para misturar os materiais, utilizou-se o misturador mecânico mostrado na **Figura 4.21**, o qual consta de uma cuba de aço inoxidável com volume de 5 litros e de uma pá de metal que gira em torno de si mesma e, no sentido oposto a este com movimento planetário, em torno do eixo da cuba.



**FIGURA 4.21** – Misturador mecânico.

Para a determinação do índice de consistência das argamassas, utilizou-se o aparelho mostrado na **Figura 4.22**, o qual é constituído por uma mesa horizontal, lisa e plana, de metal não corrosível e de  $(500 \pm 10)$  mm de diâmetro, com uma haste fixada em seu centro, que por uma guia conveniente, recebe, de um movimento excêntrico, um movimento vertical ascendente de  $(125 \pm 0,2)$  mm de curso, e dessa altura cai.



**FIGURA 4.22** – Aparelho para a determinação do índice de consistência das argamassas.

Inicialmente, colocou-se toda a água e todo o cimento na cuba e realizou-se a mistura por 30 s em velocidade baixa. Sem paralisar ou alterar o processo de mistura, adicionou-se durante 30 s o agregado miúdo e, imediatamente após a término dessa operação, mudou-se para a velocidade alta e misturou-se todo o material por mais 30 s.

Após este tempo, desligou-se o misturador e nos próximos 15 segundos, com o auxílio de uma espátula, foi retirada toda a argamassa aderida às paredes da cuba e à pá e que não foi suficientemente misturada, e foi colocada no interior da cuba. Assim, por 1 min e 15 s a argamassa ficou em repouso coberta com pano limpo e úmido e imediatamente após este intervalo, por 1 min, foi novamente misturada na velocidade alta.

Com a mesa do aparelho devidamente lubrificada com óleo mineral e com a fôrma troncônica bem centrada sobre ela, colocou-se a argamassa misturada dentro da fôrma em três camadas de mesma altura, e com um soquete normal aplicaram-se, respectivamente, nas três camadas, 15, 10 e 5 golpes uniformes e homogeneamente distribuídos.

Após a colocação das três camadas dentro da fôrma troncônica e da aplicação dos golpes acima descritos, alisou-se o topo da forma com uma régua, removeu-se o material que ultrapassou sua borda superior e limpou-se a mesa em volta sem remover o óleo mineral.

A seguir, a fôrma foi imediatamente levantada verticalmente com cuidado e, movendo-se a manivela do aparelho, fez-se que a mesa do aparelho caísse por 30 vezes em aproximadamente 30 s provocando o abatimento do tronco de cone da argamassa.

O índice de consistência normal foi determinado pela média aritmética das medidas de dois diâmetros ortogonais da argamassa sobre a mesa, as quais foram obtidas com o auxílio de um paquímetro e que, para a validade do ensaio, não tiveram diferença maior que 5 mm.

Na **Figura 4.23**, observa-se a argamassa sobre a mesa do aparelho de determinação do índice de consistência normal, no momento da retirada das medidas.



**FIGURA 4.23** – Argamassa sobre a mesa do aparelho de determinação do índice de consistência normal.

#### 4.5.1.3. A moldagem e a cura das argamassas de assentamento

A preparação dos corpos-de-prova, para a determinação da resistência à compressão axial e determinação da absorção de água das argamassas em estudo, foi realizada seguindo-se as recomendações da norma NBR 7215, de dezembro de 1996.

Foram moldadas ao todo 18 peças, seis para cada tipo de argamassa, sendo três para serem rompidas aos 7 dias e três aos 28 dias, no ensaio de determinação da resistência à compressão axial.

Os moldes cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, mostrados na **Figura 4.24**, tiveram suas fendas verticais e divisórias base/forma vedadas com proporção adequada de cera virgem e óleo mineral, e suas superfícies internas capeadas com óleo mineral.



**FIGURA 4.24** – Moldes cilíndricos de (50 x 100) mm dos corpos-de-prova das argamassas.

A moldagem dos corpos-de-prova foi feita imediatamente após o amassamento e com a maior rapidez possível. A colocação da argamassa na fôrma foi realizada com o auxílio de uma espátula em quatro camadas de alturas aproximadamente iguais que receberam, com um soquete normal, cada uma 30 golpes uniformes e homogeneamente distribuídos. A operação de moldagem foi terminada com o rasadura do topo da fôrma com uma régua metálica não flexível e com a remoção da argamassa que ultrapassou sua borda.

Os corpos-de-prova assim moldados passaram por um processo de cura inicial ao ar seguido por um processo de cura final em água.

Logo após a moldagem, eles, ainda nos moldes, foram colocados na câmara úmida do laboratório, onde permaneceram durante 24 h com a face superior protegida por uma placa de vidro plano.

Terminado o período inicial de cura, os corpos-de-prova foram retirados das formas, identificados e colocados em um tanque de água (não corrente) saturada de cal, onde permaneceram até o momento de ensaio de resistência a compressão axial.

#### 4.5.2. DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL DAS ARGAMASSAS DE ASSENTAMENTO

A determinação da resistência à compressão axial das argamassas de assentamento em estudo foi realizada de acordo com as especificações da NBR 7215, de dezembro de 1996.

Os corpos-de-prova devidamente capeados com mistura de enxofre a quente com camada de espessura máxima de 2 cm, foram rompidos na prensa digital mostrada na **Figura 4.25** aos 7 e aos 28 dias de idade, sendo obedecidas as tolerâncias de tempo para a ruptura:  $\pm 2$  h para os corpos de prova rompidos aos 7 dias e  $\pm 4$  h para os corpos-de-prova rompidos aos 28 dias.

A idade de cada corpo-de-prova é contada a partir do instante em que o cimento é posto em contato com a água da mistura.

Antes da realização dos ensaios, os pratos da prensa foram completamente limpos e a operação foi realizada em escala dinamométrica, tal que a carga de ruptura prevista seja maior que 10 % e menor que 90 % da leitura máxima de escala.

Assim, a carga de compressão foi aplicada a uma velocidade de  $(0,25 \pm 0,05)$  MPa/s, e a resistência à compressão axial de cada corpo-de-prova foi calculada em MPa dividindo-se a carga total aplicada até o momento de sua ruptura pela área de sua seção transversal, e o valor foi expresso com aproximação de 0,1 MPa.



**FIGURA 4.25** – Prensa digital utilizada para a realização dos ensaios de compressão axial das argamassas de assentamento.

#### 4.5.3. DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA DAS ARGAMASSAS DE ASSENTAMENTO

A determinação da absorção de água das argamassas de assentamento foi realizada com a parte mais representativa dos corpos-de-prova rompidos aos 28 dias, aplicando-se o mesmo procedimento utilizado para os concretos (*sub-item 4.4.3*).

#### 4.6. ESTUDO DA CONCENTRAÇÃO DE ALUMÍNIO PRESENTE NOS CONCRETOS PRODUZIDOS COM AGREGADOS DE ENTULHO DE CONCRETO E LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA.

A eco-eficiência dos concretos reciclados foi determinada em função da concentração de alumínio presente no extrato lixiviado resultante do processo de solubilização do CRE3L – concreto de resistência moderada, traço em massa 1:2:3, produzido com agregado graúdo de entulho de concreto e com 3 % em massa de lodo de estação de tratamento de água.

A parte mais representativa do CRE3L, rompido aos 28 dias, foi inicialmente colocada em contato estático com água deionizada, à temperatura ambiente, conforme teste de solubilização definido pela NBR 10.006 (ABNT, 1987).

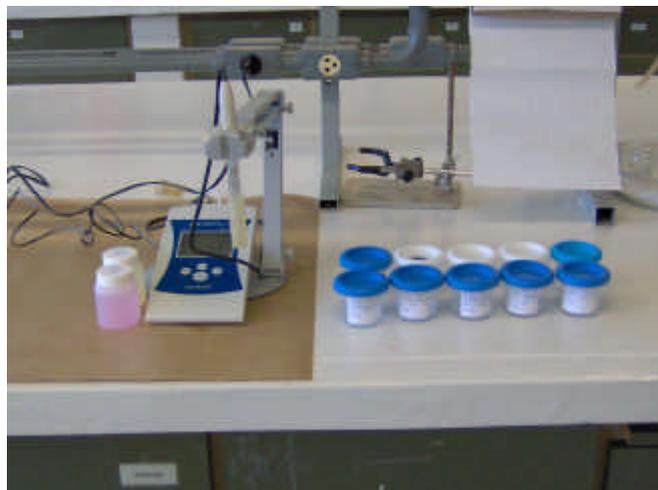
A seguir, foram coletadas com o auxílio de uma pipeta volumétrica 10 alíquotas de 20 ml do extrato lixiviado do processo de solubilização, respectivamente após 2, 8, 24, 72, 96, 120, 216, 316, 416 e 656 h, e estas amostras foram armazenadas em frascos de polipropileno para os ensaios de condutividade iônica e pH.

O pH de uma solução aquosa está relacionado com a concentração hidrogeniônica, ou seja, a concentração de íons  $H_3O^+$  presentes. A escala de pH varia de 0 a 14 e, quanto maior o pH, menor a concentração de íons  $H_3O^+$ . Deste modo, os ensaios de pH foram realizados com o objetivo de verificar se a solução com o tempo de imersão se tornaria ácida ou básica e se iria inferir nas espécies que estariam sendo lixiviadas.

As medidas de pH foram realizadas com o auxílio do pHmetro da Micronal mod. Trohm, mostrado na **Figura 4.26**, o qual foi previamente calibrado com os tampões 4,0 e 7,0.

A condutividade iônica de uma solução está relacionada com uma série de parâmetros como temperatura, viscosidade, concentração, carga do íon etc. Quando se faz uma medida de condutividade iônica de uma solução utilizando-se um condutímetro, o que se está medindo é proporcional ao número de espécies carregadas com capacidade de transportar corrente elétrica. Deste modo, as medidas de condutividade iônica foram realizadas com o objetivo de verificar se a quantidade ou a concentração de espécies carregadas aumentariam com o tempo de imersão das amostras e assim relacionar estes resultados com o processo de lixiviação.

As medidas de condutividade iônica foram realizadas com o auxílio do condutímetro mostrado na **Figura 4.27**.



**FIGURA 4.26** – pHmetro utilizado na determinação do pH do extrato lixiviado do processo de solubilização do CRE3L.



**FIGURA 4.27** – Condutímetro utilizado na determinação da condutividade do extrato lixiviado do processo de solubilização do CRE3L.

Após as medições, foi montada a **Tabela 5.9** contendo os valores do pH e da condutividade em função do tempo de imersão dos corpos-de-prova na água deionizada.

Com base nos resultados de pH e da condutividade, foram escolhidas duas amostras para a realização do ensaio de determinação da concentração de alumínio – as

amostras com 72 e 656 h de imersão em água deionizada. Escolha realizada com base nas curvas obtidas a partir dos resultados dos ensaios de pH e condutividade, ou seja, nos pontos que representavam uma alteração significativa do comportamento destes parâmetros. O ideal seria a escolha de todas as amostras, bem como a determinação da concentração de alumínio no extrato lixiviado de concretos convencionais, para se ter idéia se a concentração de alumínio e de íons aumentou com a substituição parcial dos agregados naturais. Entretanto, devido aos recursos financeiros disponíveis, não foi possível tal procedimento.

A concentração de alumínio foi determinada na Central Analítica da UNICAMP por Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES) com o auxílio do equipamento Perkin Elmer – 3000 DV.

Utilizou-se uma solução padrão de alumínio 1,0000mg/g, marca TEC LAB rastreável ao material de referência 3101a – NIST – USA, Lote F506165. Efetuou-se a leitura das amostras sem diluição ou tratamento prévio contra a curva desse padrão.

## 5. RESULTADOS

Neste capítulo, encontram-se os resultados dos ensaios experimentais descritos no capítulo 4 – Materiais e Métodos.

### 5.1. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS NATURAIS

Neste item, estão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais naturais utilizados na produção dos concretos e argamassas em estudo.

#### 5.1.1. CARACTERIZAÇÃO DA AREIA FINA DO RIO MOGI

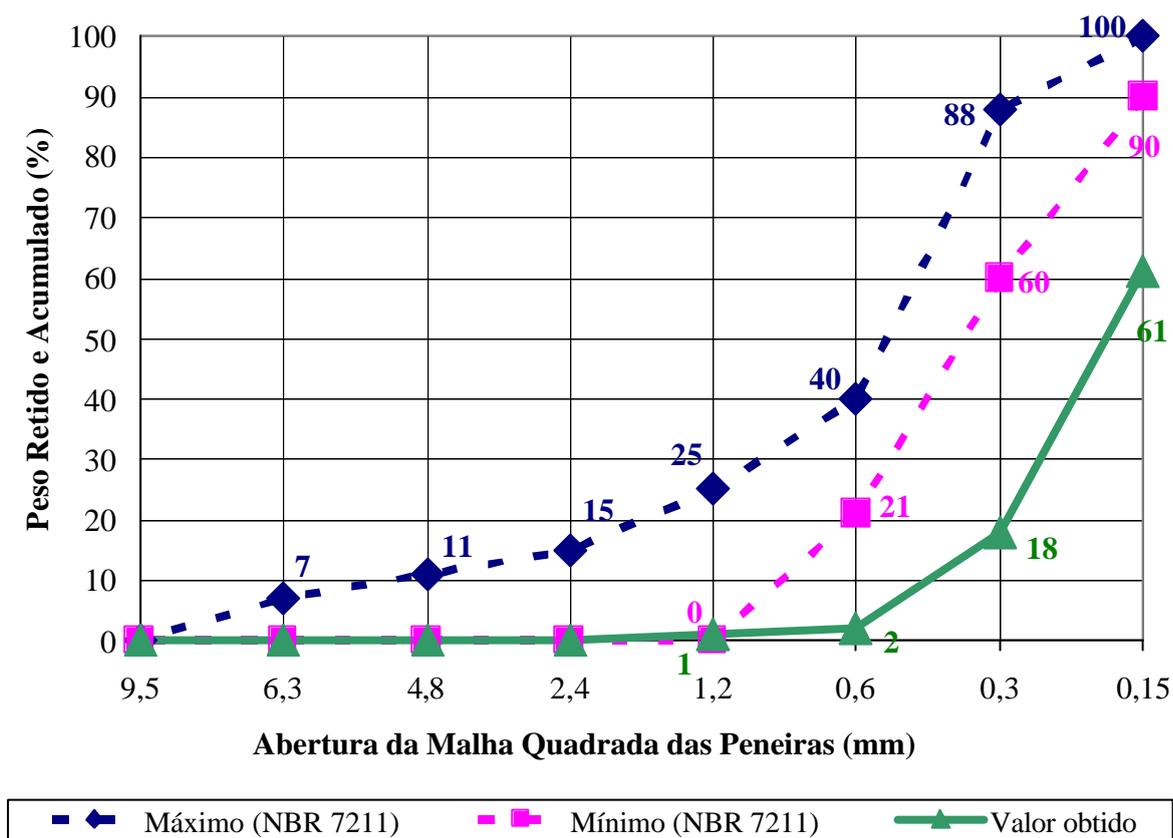
A areia fina do rio Mogi foi utilizada nesta pesquisa no capeamento dos corpos de prova preparados para os ensaios de resistência à compressão axial.

A partir dos resultados do ensaio granulométrico mostrado na **Tabela 5.1**, foram determinados a dimensão máxima característica = 0,6 e o módulo de finura = 0,82 da areia fina e, a seguir, foi montado o **Gráfico 5.1** com os limites granulométricos estabelecidos pela NBR 7211.

**TABELA 5.1** – Ensaio granulométrico da areia fina do rio Mogi

Peneira (mm)	9,5	6,3	4,8	2,4	1,2	0,6	0,3	0,15	Resíduo
Peso Retido (g)	0	0	0	0	4	7	79	216	194
Peso Retido (%)	0	0	0	0	1	1	16	43	39
Peso Retido e Acumulado (%)	0	0	0	0	1	2	18	61	100

Embora a areia fina do rio Mogi não tenha se enquadrado nos limites granulométricos estabelecidos pela NBR 7211, ela foi aplicada por ter uso consagrado na região.



**GRÁFICO 5.1** – Análise granulométrica da areia fina do rio Mogi.

### 5.1.2. CARACTERIZAÇÃO DA AREIA GROSSA DO RIO MOGI

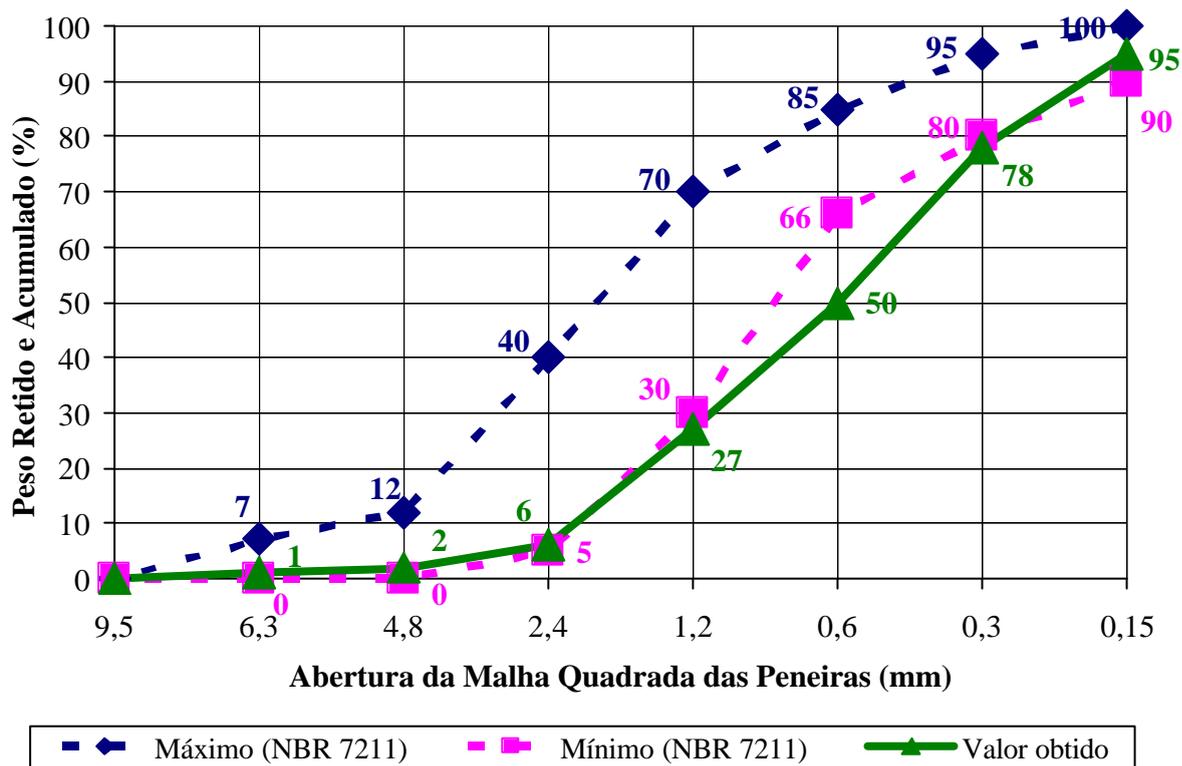
A areia grossa do rio Mogi foi utilizada nesta pesquisa na produção dos concretos e argamassas.

A partir dos resultados do ensaio granulométrico, mostrado na **Tabela 5.2**, foram determinados a dimensão máxima característica = 4,8 e o módulo de finura = 2,58 da areia grossa e, a seguir, foi montado o **Gráfico 5.2** com os limites granulométricos estabelecidos pela NBR 7211.

**TABELA 5.2** – Ensaio granulométrico da areia grossa do rio Mogi.

Peneiras (mm)	9,5	6,3	4,8	2,4	1,2	0,6	0,3	0,15	Resíduo
Peso Retido (g)	0	5	7	36	207	234	287	176	48
Peso Retido (%)	0	1	1	4	21	23	28	17	5
Peso Retido e Acumulado (%)	0	1	2	6	27	50	78	95	100

A areia grossa do rio Mogi, assim como a areia fina do rio Mogi, também não se enquadrou nos limites granulométricos estabelecidos pela NBR 7211, mas foi aplicada por ter uso consagrado na região.



**GRÁFICO 5.2** – Análise granulométrica da areia grossa do rio Mogi.

### 5.1.3. CARACTERIZAÇÃO DA BRITA 1 DA PEDREIRA BANDEIRANTES

A brita 1 da pedreira Bandeirantes foi utilizada nesta pesquisa na produção dos concretos.

A partir dos resultados do ensaio granulométrico, mostrado na **Tabela 5.3**, foram determinados a dimensão máxima característica = 19 e o módulo de finura = 7,53 da pedra britada e, a seguir, foi elaborado o **Gráfico 5.3** com os limites granulométricos estabelecidos pela NBR 7211.

TABELA 5.3 – Ensaio granulométrico da pedra britada 1 da pedreira Bandeirantes.

Peneiras (mm)	25	19	9,5	6,3	4,8
Peso Retido (g)	0	0	8413	1521	66
Peso Retido (%)	0	0	84	15	1
Peso Retido e Acumulado (%)	0	0	84	99	100

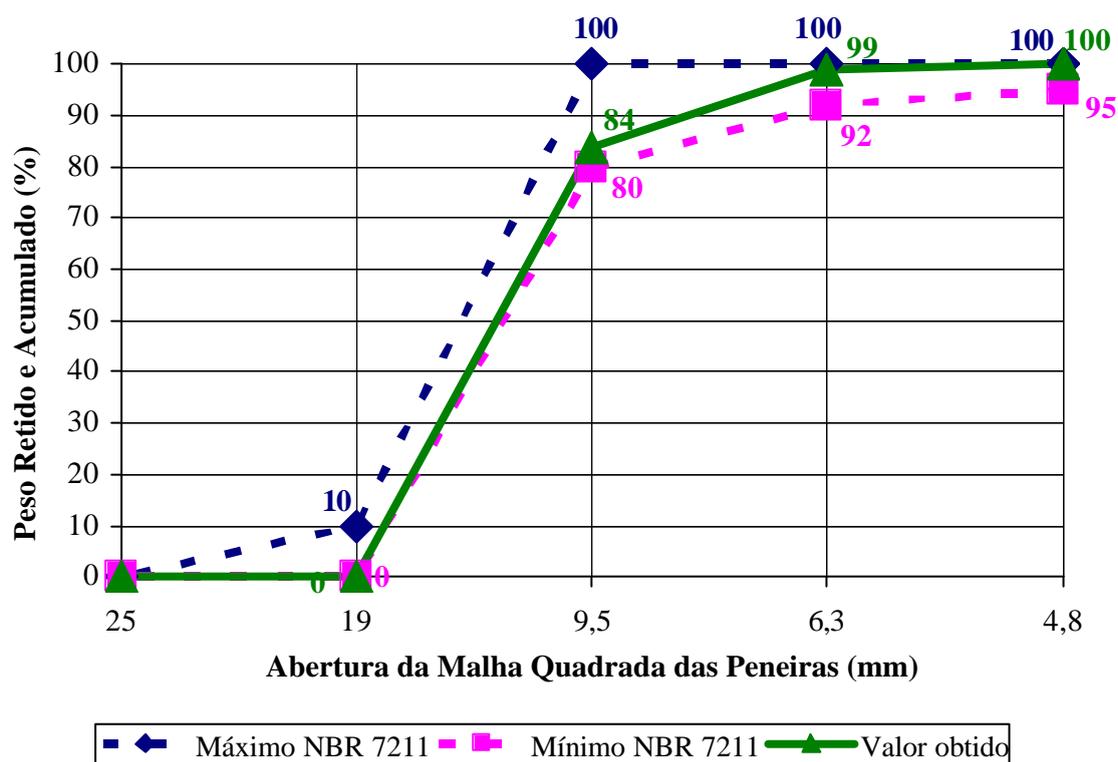


GRÁFICO 5.3 – Análise granulométrica da pedra britada 1 da pedreira Bandeirantes.

A pedra britada da Pedreira Bandeirantes enquadrou-se perfeitamente nos limites granulométricos estabelecidos pela NBR 7211 para a graduação como brita 1.

## 5.2. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS

Os resíduos utilizados nesta pesquisa foram o LETA de São Carlos e o entulho de concreto da Usina de Reciclagem de Resíduos de São Carlos.

### 5.2.1. CARACTERIZAÇÃO DO LETA DE SÃO CARLOS

O LETA de São Carlos, depois de seco e moído, teve sua granulometria enquadrada na granulometria da areia grossa do rio Mogi, uma vez que a substituiu na produção dos concretos e argamassas em estudo.

A **Tabela 5.4** contém os resultados dos ensaios de caracterização físico-química do LETA de São Carlos.

**TABELA 5.4** – Características físico-químicas do LETA de São Carlos.

<b>Variáveis</b>	<b>Valores</b>
Concentração de Sólido em %	4,68
pH	7,20
	<b>mg/l</b>
DQO	4800
Sólidos Totais	58630
Sólidos Suspensos	26520
Sólidos Dissolvidos	32110
Alumínio	11100
Zinco	4,25
Chumbo	1,60
Cádmio	0,02
Níquel	1,80
Ferro	5000
Manganês	60
Cobre	2,06
Cromo	1,58

O LETA de São Carlos apresenta elevadas concentrações de metais, principalmente de alumínio, devido à aplicação do sulfato de alumínio como coagulante no processo de tratamento da água.

### 5.2.2. CARACTERIZAÇÃO DO ENTULHO DE CONCRETO

O entulho de concreto utilizado como agregado graúdo teve sua granulometria enquadrada na da pedra britada 1 da pedreira Bandeirantes e o entulho de concreto utilizado como agregado miúdo teve sua granulometria enquadrada na da areia grossa do rio Mogi.

## 5.3. RESULTADOS DO ESTUDO DA APLICAÇÃO DO LETA EM CONCRETOS DE RESISTÊNCIA MODERADA

O estudo da aplicação do LETA em concretos de resistência moderada foi realizado com agregados convencionais e com agregados reciclados de entulho de concreto.

### 5.3.1. RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO LETA EM CONCRETOS CONVENCIONAIS DE RESISTÊNCIA MODERADA

No **Quadro 5.1**, encontram-se a descrição, a consistência e o fator (a/c) dos concretos convencionais de resistência moderada em estudo. Nele observa-se que, mantendo-se a consistência dos concretos produzidos em 50 mm, para cada 2 % de LETA aplicado substituindo o agregado miúdo natural, houve um acréscimo de 1 % no fator (a/c). Fato que é justificado pelo maior poder de absorção de água do LETA em relação ao agregado miúdo natural.

A **Tabela 5.5** contém os resultados dos ensaios de determinação da resistência à compressão axial e de determinação da absorção de água dos concretos convencionais de resistência moderada.

O **Gráfico 5.4** e o **Gráfico 5.5** apresentam a análise da aplicação do LETA nos concretos convencionais de resistência moderada em função da resistência à compressão axial e da absorção de água respectivamente.

**QUADRO 5.1** – Descrição, consistência e fator (a/c) dos concretos convencionais de resistência moderada.

<b>Concreto Tipo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Consistência (mm)</b>	<b>Fator a/c</b>
<b>CC</b>	Concreto convencional, traço em massa 1:2:3, composto de cimento, areia e brita 1.	<b>50</b>	<b>0,53</b>
<b>CCR1L</b>	CC produzido com 1% em massa de LETA substituindo o agregado miúdo natural.	<b>50</b>	<b>0,53</b>
<b>CCR2L</b>	CC produzido com 2% em massa de LETA substituindo o agregado miúdo natural.	<b>50</b>	<b>0,54</b>
<b>CCR3L</b>	CC produzido com 3% em massa de LETA substituindo o agregado miúdo natural.	<b>50</b>	<b>0,54</b>
<b>CCR4L</b>	CC produzido com 4% em massa de LETA substituindo o agregado miúdo natural.	<b>50</b>	<b>0,55</b>
<b>CCR5L</b>	CC produzido com 5% em massa de LETA substituindo o agregado miúdo natural.	<b>50</b>	<b>0,55</b>

**TABELA 5.5** – Determinação da resistência à compressão axial e da absorção de água dos concretos convencionais de resistência moderada.

<b>Concreto Tipo</b>	<b>Determinação da Resistência à Compressão Axial</b>				<b>Determinação da Absorção de Água</b>			
	<b>Idade (dias)</b>	<b>Carga de Ruptura (kgf)</b>	<b>f<sub>cj</sub> (MPa)</b>	<b>f<sub>cj</sub> Médio (MPa)</b>	<b>Peso Seco (g)</b>	<b>Peso Úmido (g)</b>	<b>Absorção (%)</b>	<b>Absorção Média (%)</b>
<b>CC</b>	7	15.200	19,36	<b>17,58</b>				<b>5,40</b>
	7	15.200	19,36					
	7	11.000	14,01					
	28	20.200	25,73	<b>24,71</b>	1.654,0	1.751,0	5,54	
	28	19.200	24,46		1.711,5	1.753,0	2,37	
	28	18.800	23,95		1.658,5	1.808,5	8,29	
<b>CCR1L</b>	7	18.300	23,31	<b>21,70</b>				<b>5,15</b>
	7	15.300	19,49					
	7	17.500	22,29					
	28	24.400	31,08	<b>29,64</b>	1.645,0	1.736,0	5,24	
	28	22.800	29,04		1.929,0	2.034,5	5,19	
	28	22.600	28,79		1.640,5	1.727,0	5,01	

TABELA 5.5 – Continuação:

CCR2L	7	21.200	26,98	26,22				3,97
	7	21.100	26,86					
	7	19.500	24,82					
	28	24.700	31,46	31,38	1.810,0	1.886,0	4,03	
	28	26.600	33,89		1.626,0	1.694,0	4,01	
	28	22.600	28,79		1.909,0	1.986,0	3,88	
CCR3L	7	16.000	20,38	21,49				4,99
	7	18.400	23,44					
	7	16.200	20,64					
	28	20.400	25,99	29,17	1.144,5	1.202,5	4,82	
	28	23.400	29,81		1.736,5	1.829,0	5,06	
	28	24.900	31,72		1.795,0	1.891,5	5,10	
CCR4L	7	13.100	16,69	18,34				4,32
	7	16.300	20,76					
	7	13.800	17,58					
	28	20.500	26,11	25,52	1.923,0	2.005,5	4,11	
	28	19.000	24,20		1.761,5	1.838,4	4,18	
	28	20.600	26,24		1.678,0	1.760,0	4,66	
CCR5L	7	10.400	13,25	15,80				4,44
	7	14.000	17,83					
	7	12.800	16,31					
	28	23.900	30,45	29,00	1.836,5	1.925,5	4,62	
	28	22.800	29,04		1.936,0	2.024,0	4,35	
	28	21.600	27,52		2.101,0	2.196,5	4,35	

No **Gráfico 5.4**, observa-se que as adições de LETA menores ou iguais a 4 % proporcionaram um acréscimo, tanto na resistência à compressão axial inicial (7 dias), como na resistência à compressão axial final (28 dias) e que o concreto convencional produzido com 5 % de lodo apresentou um decréscimo de resistência somente nas primeiras idades.

Os resultados observados no **Gráfico 5.5** mostram que a durabilidade dos concretos convencionais de resistência moderada, se afetada, não será pela adição do LETA em função da absorção de água, uma vez que, para todas as adições estudadas, houve um decréscimo na porcentagem de absorção de água da parte mais representativa dos concretos convencionais rompidos aos 28 dias.

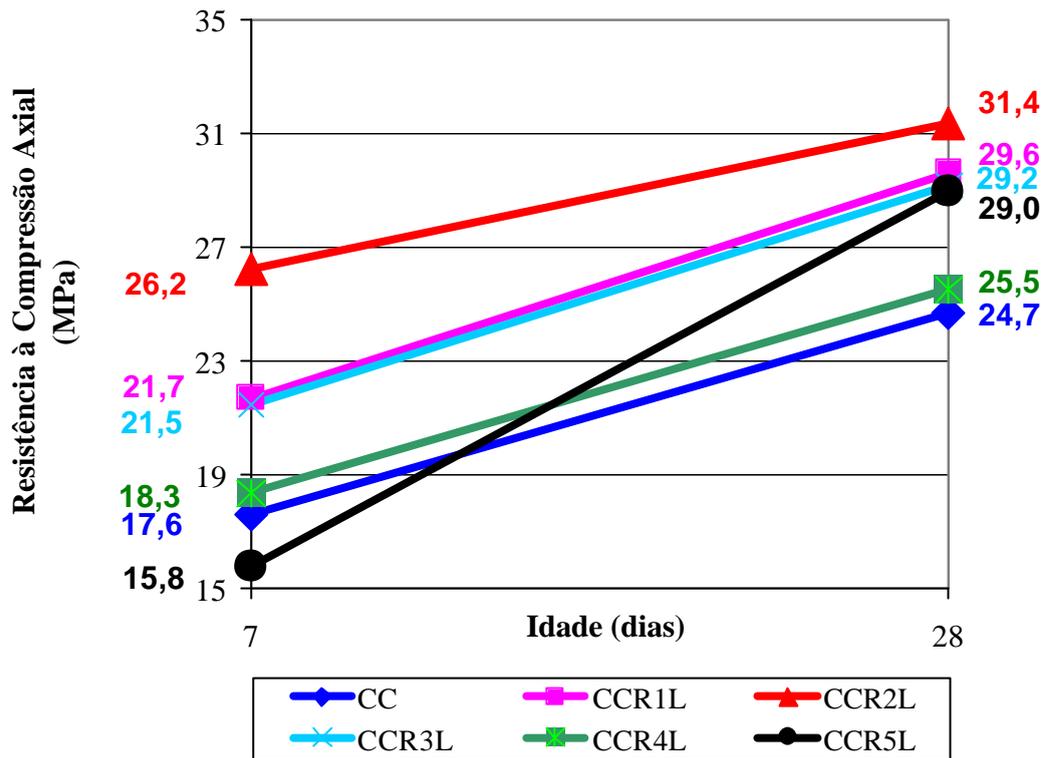


GRÁFICO 5.4 – Análise da resistência à compressão axial dos concretos convencionais de resistência moderada.

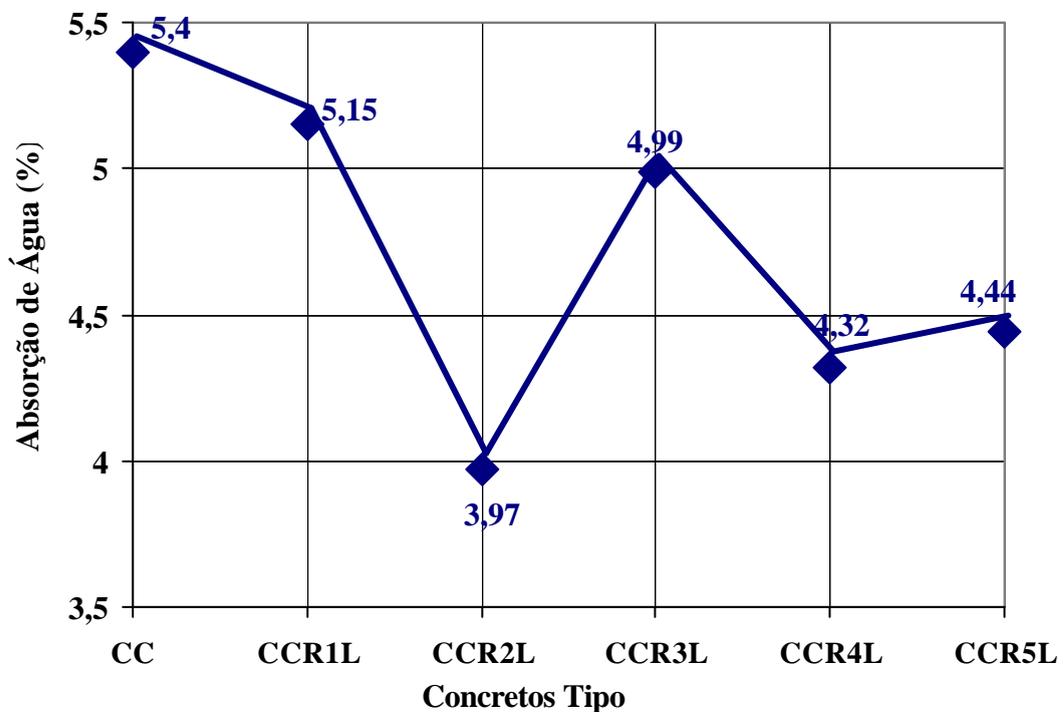


GRÁFICO 5.5 – Análise da absorção de água dos concretos convencionais de resistência moderada.

### 5.3.2. RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO LETA EM CONCRETOS DE RESISTÊNCIA MODERADA RECICLADOS COM AGREGADOS GRAÚDOS DE ENTULHO DE CONCRETO

O **Quadro 5.2** contém a descrição, a consistência e o fator (a/c) dos concretos de resistência moderada reciclados com agregados graúdos de entulho de concreto. Nele observa-se que, mantendo-se a consistência dos concretos produzidos em 60 mm, para cada 2 % de LETA aplicado substituindo o agregado miúdo natural, houve um acréscimo de 1% no fator (a/c). Fato que é justificado pelo maior poder de absorção de água do LETA em relação ao agregado miúdo natural.

**QUADRO 5.2** – Descrição, consistência e fator (a/c) dos concretos de resistência moderada reciclados com agregados graúdos de entulho de concreto.

<b>Concreto Tipo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Consistência (mm)</b>	<b>Fator a/c</b>
<b>CRE</b>	Concreto, traço em massa 1:2:3, reciclado com agregado graúdo de entulho de concreto.	60	0,77
<b>CRE1L</b>	CRE com 1% em massa de LETA substituindo o agregado miúdo natural.	60	0,77
<b>CRE2L</b>	CRE com 2% em massa de LETA substituindo o agregado miúdo natural.	60	0,78
<b>CRE3L</b>	CRE com 3% em massa de LETA substituindo o agregado miúdo natural.	60	0,78
<b>CRE4L</b>	CRE com 4% em massa de LETA substituindo o agregado miúdo natural.	60	0,79
<b>CRE5L</b>	CRE com 5% em massa de LETA substituindo o agregado miúdo natural.	60	0,79

Os concretos reciclados com agregados graúdos de entulho de concreto foram preparados com maior consistência que os concretos convencionais, devido ao fato de exigirem maior quantidade de água durante o amassamento, resultado da maior absorção de água do agregado graúdo de entulho de concreto com relação ao agregado graúdo natural.

A **Tabela 5.6** contém os resultados dos ensaios de determinação da resistência à compressão axial e de determinação da absorção de água dos concretos de resistência moderada reciclados.

**TABELA 5.6** – Determinação da resistência à compressão axial e da absorção de água dos concretos de resistência moderada reciclados com agregados graúdos de entulho de concreto.

Concreto Tipo	Determinação da Resistência à Compressão Axial				Determinação da Absorção de Água			
	Idade (dias)	Carga de Ruptura (kgf)	$f_{cj}$ (MPa)	$f_{cj}$ Médio (MPa)	Peso Seco (g)	Peso Úmido (g)	Absorção (%)	Absorção Média (%)
CRE	7	14.000	17,83	17,79				8,54
	7	14.500	18,47					
	7	13.400	17,07					
	28	16.800	21,40	22,00	1.351,1	1.481,0	8,77	
	28	17.800	22,68		1.530,0	1.665,5	8,14	
	28	17.200	21,91		1.525,5	1.671,0	8,71	
CRE1L	7	6.400	8,15	9,17				7,43
	7	8.000	10,19					
	7	7.200	9,17					
	28	13.000	16,56	16,01	1.753,5	1.900,0	7,71	
	28	13.200	16,82		1.578,5	1.707,0	7,53	
	28	11.500	14,65		1.580,5	1.700,5	7,06	
CRE2L	7	8.400	10,70	9,89				8,39
	7	7.200	9,17					
	7	7.700	9,81					
	28	13.800	17,58	16,94	1.593,5	1.749,5	8,92	
	28	14.100	17,96		1.627,0	1.772,0	8,18	
	28	12.000	15,29		1.544,0	1.679,5	8,07	
CRE3L	7	9.300	11,85	12,91				8,50
	7	8.700	11,08					
	7	12.400	15,80					
	28	17.300	22,04	19,92	1.605,5	1.760,5	8,80	
	28	15.500	19,75		1.429,5	1.559,5	8,34	
	28	14.100	17,96		1.420,5	1.550,0	8,35	

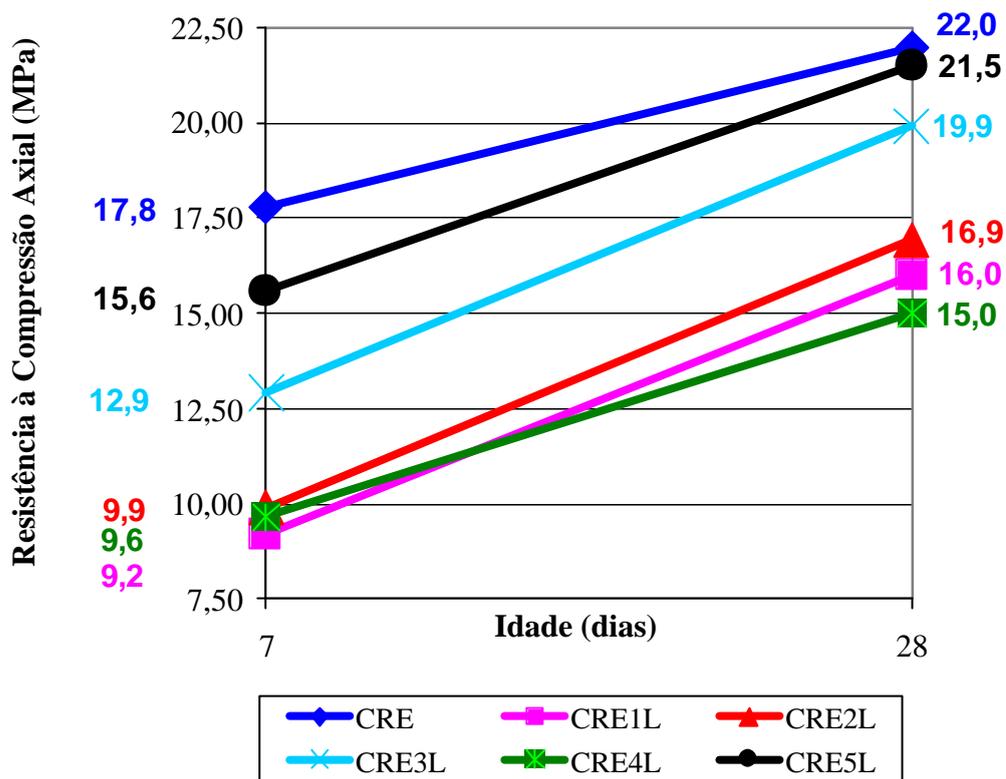
**TABELA 5.6** – Continuação:

<b>CRE4L</b>	7	7.900	10,06	<b>9,64</b>				<b>8,29</b>
	7	7.200	9,17					
	7	7.600	9,68					
	28	13.000	16,56	<b>14,99</b>	1.615,0	1.764,0	8,45	
	28	9.000	11,46		1.630,0	1.783,0	8,58	
	28	13.300	16,94		1.525,0	1.655,0	7,85	
<b>CRE5L</b>	7	12.800	16,31	<b>15,59</b>				<b>8,50</b>
	7	13.200	16,82					
	7	10.700	13,63					
	28	17.300	22,04	<b>21,49</b>	1.520,0	1.660,0	8,43	
	28	16.500	21,02		1.532,5	1.667,5	8,10	
	28	16.800	21,40		1.443,5	1.586,0	8,98	

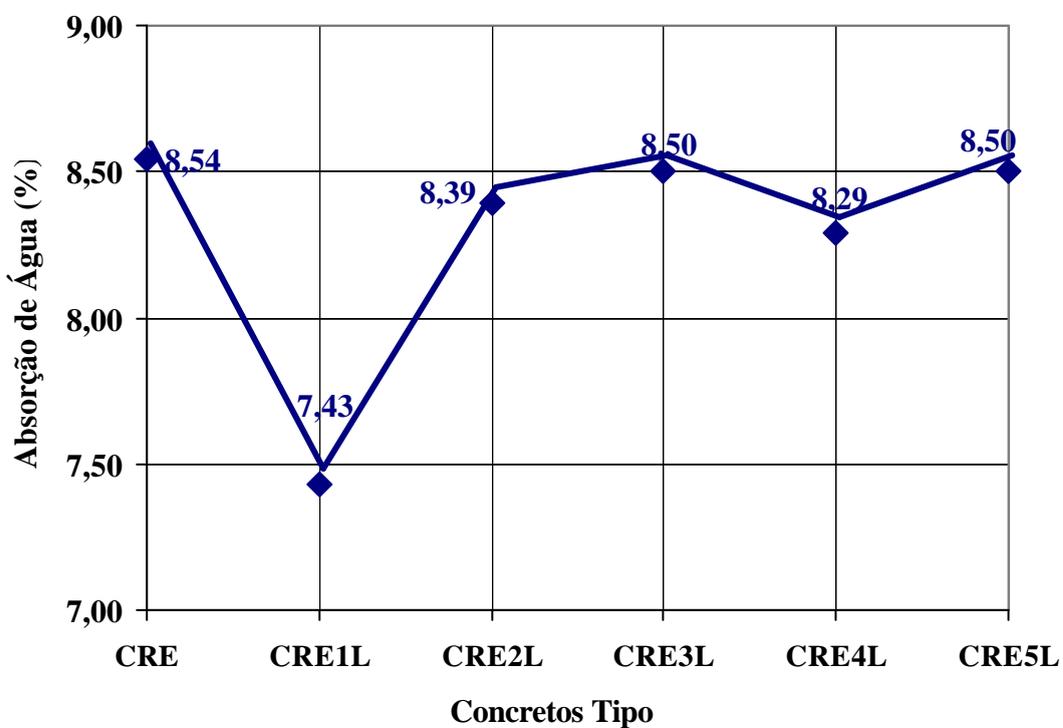
A comparação dos resultados apresentados na **Tabela 5.6** com os resultados da **Tabela 5.5** ratifica a reciclagem do entulho de concreto como agregado graúdo na produção de concretos, uma vez que os concretos reciclados apresentaram valores de resistência à compressão axial próximos dos valores obtidos com os concretos convencionais.

O **Gráfico 5.6** mostra que a aplicação do LETA nos concretos reciclados com agregados graúdos de entulho de concreto causou um decréscimo na resistência à compressão axial em todos os concretos em estudo.

Os resultados de absorção de água, apresentados na **Tabela 5.6** e analisados no **Gráfico 5.7**, mostram que a durabilidade dos concretos reciclados com agregados graúdos, se afetada, não será pela adição do LETA em função da absorção de água, uma vez que, para todas as adições estudadas, não houve um acréscimo da absorção de água.



**GRÁFICO 5.6** – Análise da resistência à compressão axial dos concretos de resistência moderada reciclados com entulho de concreto.



**GRÁFICO 5.7** – Análise da absorção de água dos concretos de resistência moderada reciclados com agregados de entulho de concreto.

#### 5.4. RESULTADOS DO ESTUDO DA APLICAÇÃO DO LETA EM CONCRETOS DE CONTRAPISO

O estudo da aplicação do LETA em concretos de contrapiso foi realizado para concretos produzidos com agregados convencionais e com agregados de RCD.

O **Quadro 5.3** contém a descrição, a consistência e o fator a/c dos concretos de contrapiso em estudo.

**QUADRO 5.3** – Descrição, consistência e fator (a/c) dos concretos de contrapiso em estudo.

Concreto Tipo	Descrição	Consistência (mm)	Fator a/c
CCC	Concreto de contrapiso convencional composto de cimento, areia e brita 1 no traço em massa 1: 4,6: 5,96.	40	0,95
CCCR3L	CCC produzido com 3% em massa de LETA seco e moído substituindo o agregado miúdo natural.	40	0,97
CCRE3L	Concreto de Contrapiso Reciclado, traço em massa 1: 4,6: 5,96, produzido com agregado graúdo de entulho de concreto e com 3% em massa de LETA seco e moído substituindo o agregado miúdo natural.	40	1,38

A **Tabela 5.7** contém os resultados dos ensaios de determinação da resistência à compressão axial e de determinação da absorção de água dos concretos de contrapiso.

**TABELA 5.7** – Determinação da resistência à compressão axial e da absorção de água dos concretos de contrapiso.

Concreto de Contrapiso	Idade (dias)	$f_{cj}$ (MPa)	$f_{cj}$ Médio (MPa)	Peso Seco (g)	Peso Úmido (g)	Absorção (%)	Absorção Média (%)
CCC	7	4,38	4,39				5,29
	7	4,91					
	7	3,87					
	28	9,00	8,79	1879,0	1781,5	5,47	
	28	9,37		2049,0	1951,6	4,99	
	28	8,01		1776,5	1685,0	5,43	

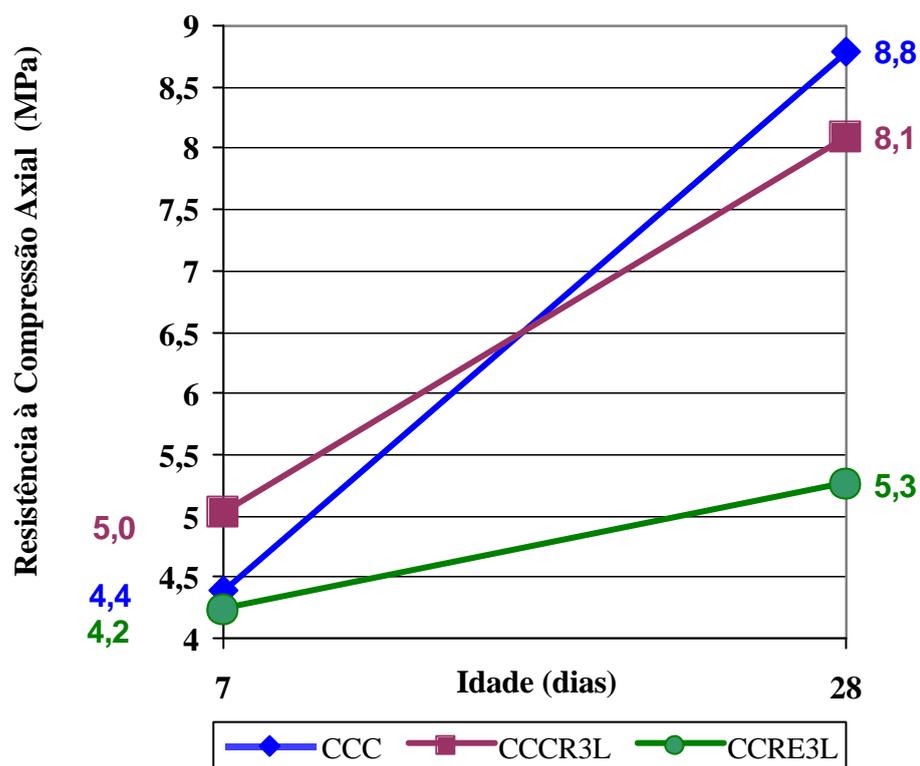
TABELA 5.7 – Continuação:

CCCR3L	7	5,92	5,02				6,08
	7	4,48					
	7	4,67					
	28	8,15	8,09	2041,5	1935,0	5,50	
	28	7,38		1768,5	1665,0	6,21	
	28	8,75		1354,0	1271,0	6,53	
CCRE3L	7	4,29	4,22				12,27
	7	4,18					
	7	4,20					
	28	5,48	5,26	1671,0	1492,0	11,99	
	28	5,22		1258,0	1116,9	12,63	
	28	5,09		1336,0	1190,9	12,18	

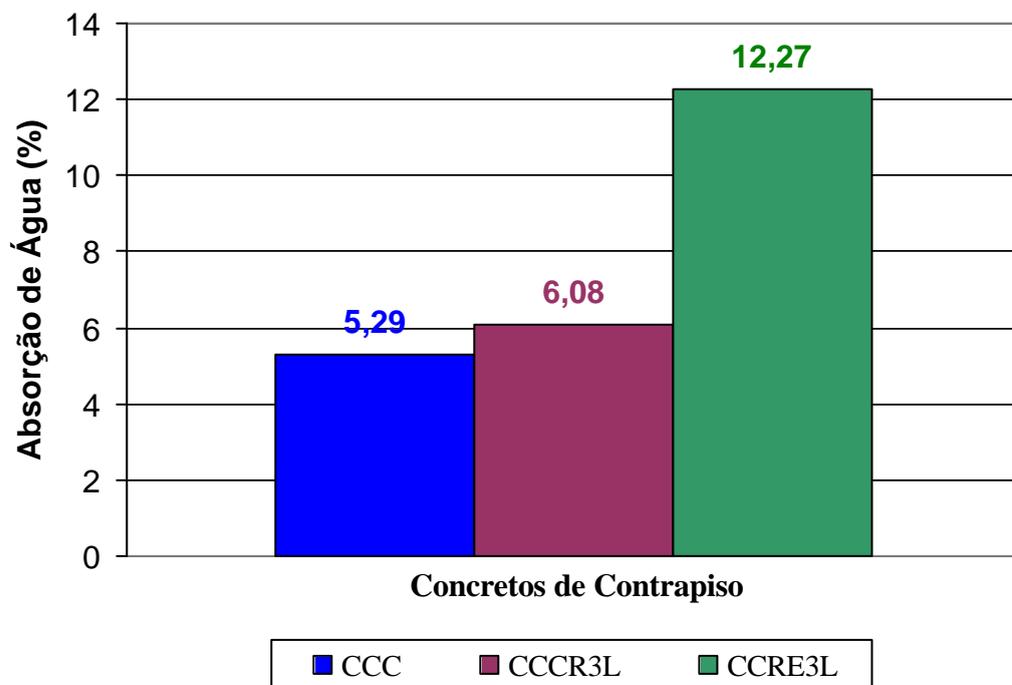
O **Gráfico 5.8** e o **Gráfico 5.9** contém, respectivamente, a análise da resistência à compressão axial e da absorção de água nos concretos de contrapiso.

No **Gráfico 5.8**, observa-se que a aplicação de 3 % de LETA no concreto de contrapiso reciclado com agregado graúdo de entulho de concreto proporcionou resistência à compressão axial aos 7 dias bastante próxima da resistência à compressão axial encontrada para o concreto de contrapiso convencional. Entretanto, resultou em uma perda na resistência à compressão axial aos 28 dias de 40,2 % em relação ao mesmo concreto. Resultado que, embora não descarte a possibilidade de aplicação deste concreto para a execução de contrapiso, sugere uma diminuição na porcentagem de aplicação do lodo.

No **Gráfico 5.9**, observa-se que a adição de 3 % de LETA substituindo o agregado miúdo natural proporcionou um aumento de apenas 0,79 % na absorção de água do concreto de contrapiso convencional. Entretanto, o concreto de contrapiso reciclado com agregado graúdo de entulho de concreto e 3 % de LETA apresentou absorção de água 7 % maior que a do concreto de contrapiso convencional. Resultado que não impede a aplicação deste concreto, mas que a restringe a lugares sem a presença de umidade ou a exposição a intempéries.



**GRÁFICO 5.8** – Análise da resistência à compressão axial dos concretos de contrapiso.



**GRÁFICO 5.9** – Análise da absorção de água dos concretos de contrapiso.

## 5.5. RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO LETA EM ARGAMASSAS DE ASSENTAMENTO

O estudo da aplicação do LETA em argamassas de assentamento foi realizado para argamassas produzidas com agregados convencionais e com agregados reciclados de entulho de concreto.

O **Quadro 5.4** contém a descrição, a consistência e o fator (a/c) das argamassas de assentamento produzidas para fins deste estudo. Nele observa-se que, devido ao maior poder de absorção do agregado miúdo de entulho de concreto com relação ao agregado miúdo natural, a argamassa de assentamento reciclada com agregado miúdo de entulho de concreto e com 2 % de LETA necessitou para o amassamento uma quantidade de água muito maior que as outras argamassas.

**QUADRO 5.4** – Descrição, consistência e fator (a/c) das argamassas de assentamento.

<b>Argamassa Tipo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Consistência (mm)</b>	<b>Fator a/c</b>
<b>AAC</b>	Argamassa de assentamento convencional composta de cimento e areia no traço 1:8 em massa.	<b>242</b>	<b>1,76</b>
<b>AACR2L</b>	AAC com 2% em massa de LETA substituindo o agregado miúdo natural.	<b>250</b>	<b>1,73</b>
<b>AARE2L</b>	Argamassa de assentamento (traço 1:8 em massa) reciclada com agregado miúdo de entulho de concreto e com 2% em massa de LETA substituindo o agregado miúdo reciclado	<b>260</b>	<b>2,52</b>

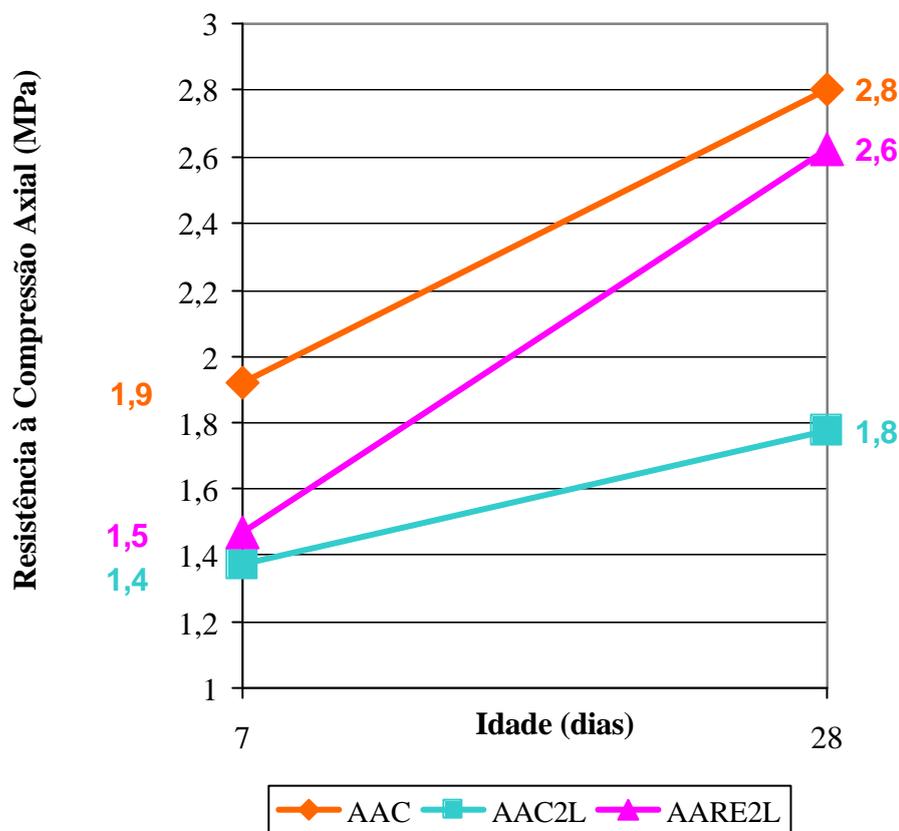
A **Tabela 5.8** contém os resultados dos ensaios de determinação da resistência à compressão axial e de determinação da absorção de água das argamassas de assentamento produzidas para fins do estudo da aplicação do LETA.

O **Gráfico 5.10** e o **Gráfico 5.11** apresentam, respectivamente, a análise da resistência à compressão axial e da absorção de água das argamassas de assentamento.

**TABELA 5.8** – Resultados dos ensaios de determinação da resistência à compressão axial e da absorção de água das argamassas de assentamento.

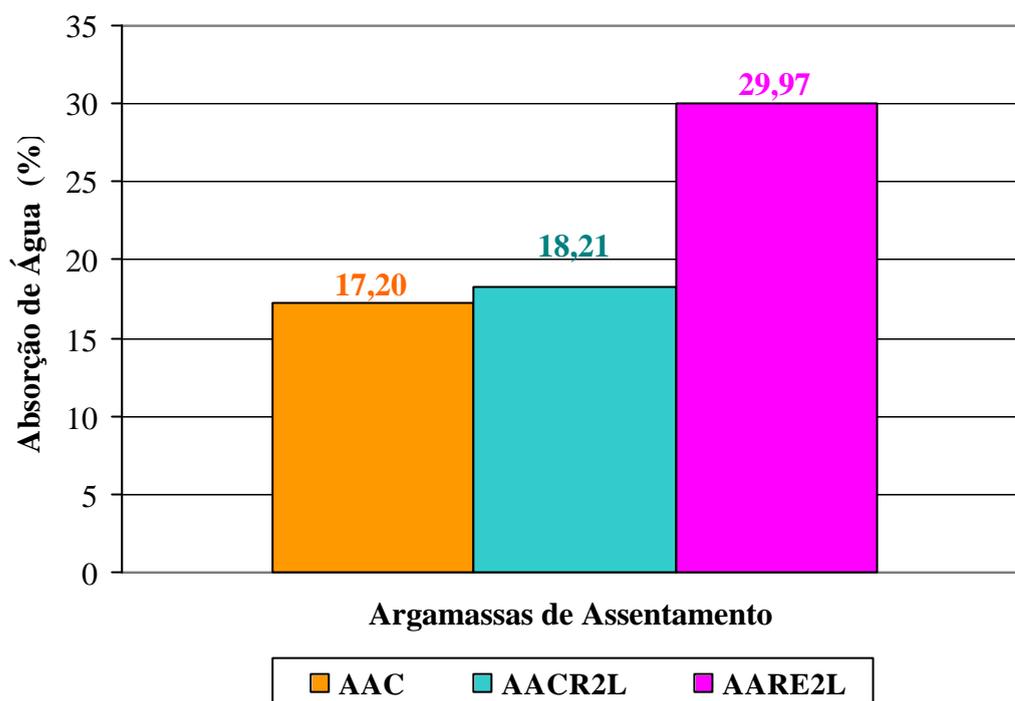
Argamassa Tipo	Idade (dias)	$f_{cj}$ (MPa)	$f_{cj}$ Médio (MPa)	Peso Seco (g)	Peso Úmido (g)	Absorção (%)	Absorção Média (%)
AAC	7	2,01	<b>1,92</b>				<b>17,20</b>
	7	1,90					
	7	1,85					
	28	2,93	<b>2,80</b>	251,0	214,4	17,07	
	28	2,80		243,0	207,7	17,00	
	28	2,67		130,7	111,2	17,54	
AACR2L	7	1,49	<b>1,37</b>				<b>18,21</b>
	7	1,26					
	7	1,36					
	28	1,90	<b>1,78</b>	154,7	131,0	18,09	
	28	1,78		135,5	114,6	18,24	
	28	1,66		300,0	253,6	18,30	
AARE2L	7	1,37	<b>1,47</b>				<b>29,97</b>
	7	1,43					
	7	1,60					
	28	2,46	<b>2,62</b>	309,0	238,0	29,80	
	28	2,77		249,0	190,5	30,70	
	28	2,62		277,0	214,0	29,40	

No **Gráfico 5.10**, observa-se que a argamassa de assentamento produzida com agregado miúdo natural e 2 % de LETA apresentou menor resistência à compressão axial que a argamassa de assentamento reciclada com o agregado miúdo de entulho de concreto e 2 % de LETA. Resultado que pode ser explicado pelo fato de a argamassa de assentamento produzida com agregado miúdo natural e 2 % de LETA ter sido amassada com aproximadamente a mesma quantidade de água que a argamassa de assentamento convencional e pelo fato de a argamassa de assentamento reciclada com entulho de concreto ter sido produzida com maior quantidade de água que as outras duas. O LETA, devido ao seu maior poder de absorção que a areia grossa do rio Mogi, reteve a água reduzindo o poder de pega do cimento.



**GRÁFICO 5.10** – Análise da resistência à compressão axial das argamassas de assentamento.

O **Gráfico 5.11** mostra que a argamassa de assentamento convencional produzida com 2 % de LETA substituindo a areia grossa do rio Mogi apresentou absorção de água apenas 1 % maior que a da argamassa de assentamento convencional. Entretanto, a argamassa de assentamento reciclada com agregado miúdo de entulho de concreto e 2 % de LETA apresentou absorção de água 12,8% maior do que a da argamassa de assentamento convencional. Resultado que não impede a aplicação desta argamassa, mas que a restringe a lugares sem a presença de umidade ou exposição a intempéries.



**GRÁFICO 5.11** – Análise da absorção de água das argamassas de assentamento.

## 5.6. DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE ALUMÍNIO NO EXTRATO LIXIVIADO RESULTANTE DO PROCESSO DE SOLUBILIZAÇÃO DO CRE3L

Para verificar a eco-eficiência dos concretos reciclados estudados no presente trabalho, foi necessária a determinação da concentração de alumínio presente no extrato lixiviado resultante do processo de solubilização do concreto assim produzido. A partir das amostras resultantes do processo de lixiviação em diversos tempos, foram realizados ensaios de condutividade e pH, e, posteriormente, ensaios de Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES).

### 5.6.1. DETERMINAÇÃO DO pH E DA CONDUTIVIDADE DO EXTRATO LIXIVIADO DO CONCRETO RECICLADO

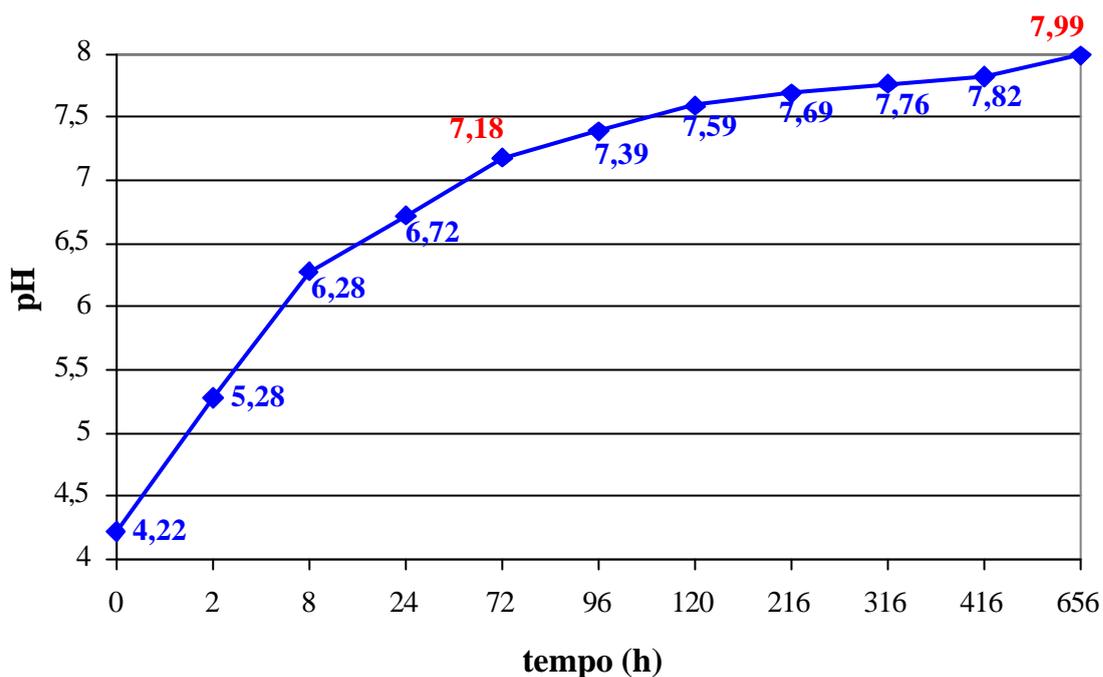
A **Tabela 5.9** contém os resultados dos ensaios de pH e de condutividade das amostras do extrato lixiviado resultante do processo de solubilização do CRE3L – concreto de resistência moderada, traço em massa 1:2:3, produzido com agregado graúdo de entulho de

concreto e com 3% em massa de lodo de estação de tratamento de água substituindo o agregado miúdo natural.

**TABELA 5.9** – Resultados da condutividade e do pH do extrato lixiviado resultante do processo de solubilização do CRE3L.

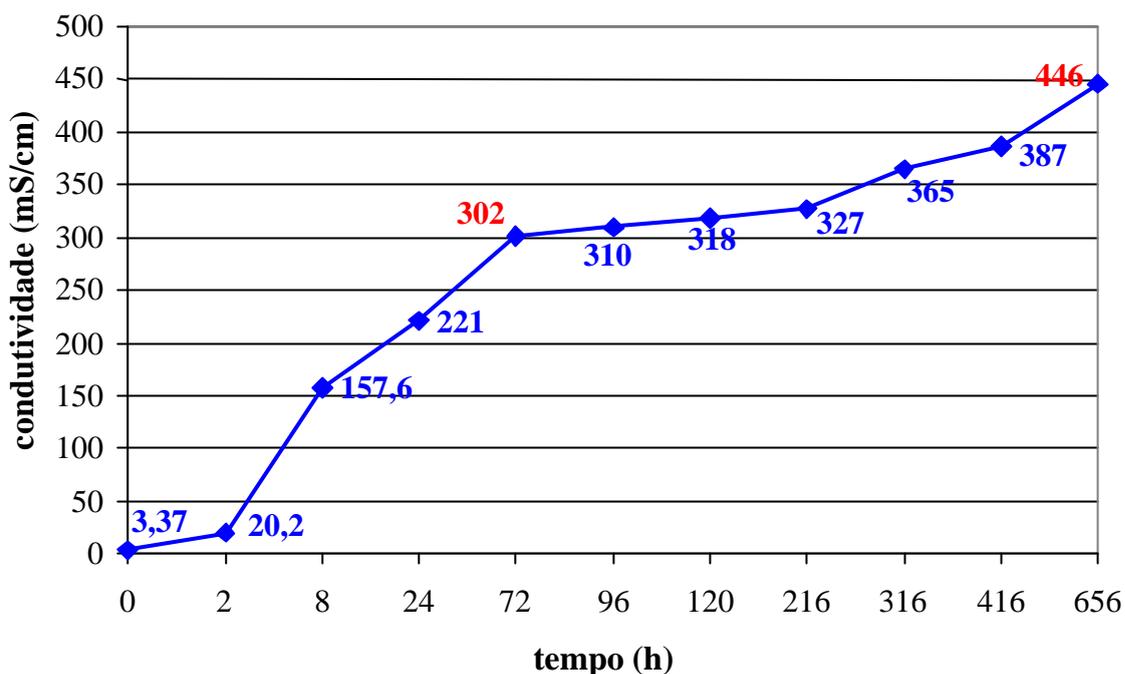
Nº Amostra	Data (dd/mm/aa)	Horário (24 h)	Tempo (h)	Temperatura (°C)	pH	Condutividade (mS/cm)
0	01/09/2005	9:00	0	23,0	4,22	3,4
1	01/09/2005	11:00	2	23,9	5,28	20,2
2	01/09/2005	17:00	8	23,9	6,28	157,6
3	02/09/2005	09:00	24	23,9	6,72	221,0
4	04/09/2005	09:00	72	24,1	7,18	302,0
5	05/09/2005	09:00	96	24,1	7,39	310,0
6	06/05/2005	09:00	120	24,1	7,59	318,0
7	10/09/2005	09:00	216	24,1	7,69	327,0
8	15/09/2005	09:00	316	24,1	7,76	365,0
9	20/09/2005	09:00	416	24,1	7,82	387,0
10	30/09/2005	09:00	656	24,1 °C	7,99	446,0

O **Gráfico 5.12** e o **Gráfico 5.13** apresentam, respectivamente, a análise do pH e da condutividade, em função do tempo de imersão dos corpos-de-prova na água deionizada. Em vermelho, destacam-se os resultados da 4ª e da 10ª amostra, que foram escolhidas para a determinação da concentração de alumínio por Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES).



**GRÁFICO 5.12** – Análise do pH do extrato lixiviado resultante do processo de solubilização do CRE3L.

Até 72 h, há um aumento significativo do pH com relação ao tempo de imersão. Isso permite afirmar que no início há um processo de lixiviação mais acelerado que carrega espécies com caráter alcalino para a água. Elas podem ser provenientes da hidratação do cimento (hidróxidos). Após 72 h, o pH varia numa taxa muito menor e tem uma tendência a se estabilizar, o que leva à conclusão de que o processo de lixiviação tende a atingir um equilíbrio com o tempo.



**GRÁFICO 5.13** – Análise da condutividade iônica do extrato lixiviado resultante do processo de solubilização do CRE3L.

Inicialmente, a condutividade iônica é baixa, entretanto, ela aumenta com o tempo, indicando que espécies carregadas estão sendo inseridas na solução. O comportamento é similar ao do pH e coerente com aquele resultado. Até 72 h, há um aumento significativo da condutividade em função do tempo de imersão das amostras. Após 72 h de imersão, a variação da condutividade iônica em função do tempo de imersão diminuiu gradualmente.

Considerando-se que a condutividade está relacionada com a quantidade das espécies carregadas em solução, pode-se afirmar que a concentração ou o número de espécies carregadas aumentou com o tempo de imersão; entretanto, não se pode determinar a concentração das espécies carregadas.

Para elucidar a ordem de grandeza de concentração a que os valores obtidos se referem, estes podem ser comparados com os dados de uma solução de KCl (**Tabela 5.10**), que é considerada padrão para as medidas de condutividade iônica, e que, por este motivo, é utilizada para calibrar condutivímetros.

**TABELA 5.10** – Valores de condutividade em função da concentração KCl g/l.

Concentração (KCl g/l)	Condutividade (mS/cm) a 25 °C
74,2460	111,34
7,4365	12,86
0,7440	1,409
0,0744	0,147

Se existirem íons monovalentes em solução, a concentração desta espécie estará acima de 74,2460 g/l para uma condutividade de 111,34 mS/cm a 25 °C. Quando se consideram espécies bivalentes e trivalentes, esta concentração é ainda menor, pois o valor de condutividade aumenta com a carga do íon, e a condutividade é um valor referente ao total de espécies carregadas. Comparando-se os valores da **Tabelas 5.10** com os valores da **Tabela 5.9**, e sabendo-se que existe mais de uma espécie proveniente da hidratação do cimento (como carbonatos de cálcio e aluminatos), pode-se afirmar que a concentração de cada espécie é ainda menor.

#### 5.6.2. DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE ALUMÍNIO NO EXTRATO LIXIVIADO POR ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ÓPTICA COM PLASMA INDUTIVAMENTE ACOPLADO (ICP-OES).

A concentração de alumínio presente no extrato lixiviado resultante do processo de solubilização do CRE3L foi determinada por ICP-OES para as amostras coletadas após 72 e 656 h de imersão em água deionizada, representando, respectivamente, as regiões de crescimento maior e menor do pH e da condutividade iônica. Os resultados obtidos estão apresentados na **Tabela 5.11**.

**TABELA 5.11** – Concentração de alumínio (mg/l) presente no extrato lixiviado resultante do processo de solubilização do CRE3L.

Amostra	Concentração de Alumínio (mg/l)
4	1,92
10	< LD (0,13)

A partir dos resultados obtidos, observa-se que a concentração de alumínio diminuiu para um maior tempo de imersão, chegando a uma concentração tão baixa que não pode ser detectada pelo equipamento.

Os resultados denotam concentrações de alumínio no extrato lixiviado resultante do processo de solubilização do CRE3L superiores aos padrões de potabilidade da água, porém, que não torna o resíduo deste concreto perigoso, conforme listagem nº 8 do Anexo – H da NBR 10.004.

Vale salientar a importância deste estudo no sentido de ratificar o cuidado em não dispor os LETAs diretamente em corpos de água, pois os valores apresentados podem representar problemas caso esta água seja descartada ou utilizada sem o devido tratamento para a diminuição do teor de alumínio.

A determinação da concentração de alumínio e de outras espécies nos demais tempos de imersão do CRE3L em água deionizada, bem como para uma amostra de referência (concreto convencional) deve ser objeto de futuros trabalhos, com o intuito de confirmar as hipóteses consideradas na discussão anterior.

## **6. CONCLUSÕES**

Em termos de resistência à compressão axial, a adição de até 4 % em massa de LETA substituindo o agregado miúdo natural possibilitou a obtenção de concretos com características similares às dos concretos convencionais.

Devido à maior porosidade dos agregados graúdos de entulho de concreto com relação aos agregados graúdos naturais, para uma mesma consistência, os concretos produzidos com os agregados reciclados exigiram maior quantidade de água para o amassamento que os concretos produzidos com agregados convencionais, proporcionando menor resistência à compressão axial.

A produção de concretos e argamassas com a adição conjunta do LETA e de agregados reciclados de entulho de concreto mostrou ser alternativa viável com relação à resistência à compressão axial e à absorção de água. Embora a absorção de água nas argamassas e nos concretos assim produzidos tenha sido muito maior que a dos concretos e das argamassas convencionais, os resultados não impediram a sua aplicação; apenas a restringiu a ambientes livres de umidade.

Os resultados denotam concentrações de alumínio no extrato lixiviado resultante do processo de solubilização do CRE3L superiores aos padrões de potabilidade da água, porém que não torna o resíduo deste concreto perigoso, conforme listagem nº 8 do Anexo – H da NBR 10.004.

As estruturas municipais que fazem a reciclagem dos resíduos de construção e demolição civil podem ser aproveitadas para reciclarem os lodos de estações de tratamento de água e eliminarem o problema ambiental do descarte irregular desses dois resíduos. Para tanto, são feitas algumas sugestões para a continuidade deste trabalho.

### **6.1. SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE DOS ESTUDOS**

Para que uma argamassa ou um concreto possam ser produzidos e aplicados em diversos campos da construção civil, torna-se necessário o estudo de diversas outras propriedades, além da resistência à compressão axial e à absorção de água. Neste sentido,

sugere-se, para a continuidade dos estudos, a partir das dosagens aqui estabelecidas, a avaliação de outras propriedades, tais como: a resistência à tração, a retração de secagem, a retração térmica, a fluência, a capacidade de deformação elástica, a capacidade de deformação plástica, entre outras.

Para que se possa especificar o quanto a adição do LETA em concreto aumenta a concentração de metais no seu resíduo, sugere-se que, além da determinação da concentração de alumínio, seja feita a determinação da concentração de outras espécies, tanto no extrato lixiviado resultante do processo de solubilização do CRE3L, como no extrato lixiviado de um concreto convencional referência.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOY, N. **Secagem natural e disposição final de lodos de estações de tratamento de água. Porto Alegre.** 1999, 101p. Dissertação apresentada à Universidade Federal do Rio Grande do Sul para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

ALTHEMAN, D.; GIUSEPPONI, S. C.; PAULON, V. A. A resistência à compressão com agregados de entulho de concreto. In: VI SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 12p., 2003, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2003. CD-ROM.

ANGULO, S. C. **Variabilidade de agregados graúdos reciclados de resíduos de construção e demolição reciclados.** São Paulo, 2000, 155p. Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Mestre.

ANGULO, S. C.; MIRANDA, L. F. R.; JOHN, V. M. **Construction and demolition waste, its variability and recycling in Brazil.** In: SUSTAINABLE BUILDINGS 2002. Oslo, Noruega. 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738.** Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Abril/1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739.** Concreto: Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Julho/1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211.** Agregado para Concreto: Especificação. Maio/1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215.** Cimento Portland: Determinação da resistência à compressão. Dezembro/1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7216.** Amostragem de Agregados: Procedimento. Agosto/1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7217**. Agregados: Determinação da composição granulométrica. Método de Ensaio. Agosto/1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7223**. Concreto: Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Método de Ensaio. Fevereiro/1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7251**. Agregado em estado solto: Determinação da massa unitária. Abril/1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578**. Cimento Portland Composto: Especificação. Julho/1994.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.005**. Lixiviação de Resíduos: Procedimento. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.006**. Solubilização de Resíduos: Procedimento. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.007**. Amostragem de Resíduos: Procedimento. Rio de Janeiro, 1987.

BARBOSA, R. M. **Avaliação do impacto de efluentes (lodos) de ETA's à biota aquática através de testes de toxicidade**. São Carlos, 199p. 2000. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

BIDONE, F.; SILVA, A. P.; MARQUES, D. M. Lodos Produzidos nas Estações de Tratamento de Água (ETAs): Desidratação em Leitões 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. cap. 9, p. 215-244.

BRASIL. Casa Civil. **Lei nº 6.938**. 31 de Agosto de 1981. Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/Leis/L6938org.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L6938org.htm)>. Acesso em: 4 fev. 2006.

BRASIL. Casa Civil. **Lei nº 9.605**. 12 de Fevereiro de 1998. Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/LEIS/L9605.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9605.htm)>. Acesso em: 4 fev. 2006.

BRITO FILHO, J. A. Cidade versus entulho. In: II SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL. p.56-67. 1999. São Paulo. **Anais...** São Paulo: IBRACON. 1999. CD ROM.

CANTANHEDE, A. L. G.; FERREIRA, J. A. Codisposição de resíduos perigosos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 15., Belém, 1989. **Anais...** Rio de Janeiro: ABES, v.2, t.2, p.557-579.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 307**. 5 de julho de 2002. <[http://www.cetesb.sp.gov.br/licenciamentoo/legislacao/federal/resolucoes/2002\\_Res\\_CONAMA\\_307.pdf](http://www.cetesb.sp.gov.br/licenciamentoo/legislacao/federal/resolucoes/2002_Res_CONAMA_307.pdf)>. Acesso em: 4 fev. 2006.

CORDEIRO, J. S. Processamento de Lodos 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. cap. 5, p. 121-142.

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

CORNWELL, D. A.; BISHOP, M. M.; GOULD, R. R.; VANDERMEYDEN, C. **Handbook on water treatment plant wastes management**. Denver, AWWA Research Foundation, 461p. 1987.

DE DEUS, A. B. S. **Codisposição de resíduos domésticos e industriais perigosos**. Porto Alegre. IPH/UFRGS. 1996, 26f.

DUPAS, M. A. Referências. In: \_\_\_\_\_. **Pesquisando e Normalizando: Noções Básicas e Recomendações Úteis para a Elaboração de Trabalhos Científicos** (Incorporando a NBR 14724/2002 – Informação e documentação – Trabalhos Acadêmicos – Apresentação). São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, EdUFSCar, 2004. p.29-43.

**EPA Characterization of building-related construction and demolition debris in the United States.** EPA, Report nº EPA530-R-98-010. 1998. 100p.

FREIRE, L.; BRITO, J. Custos e benefícios da demolição seletiva. **In:** Construção Sustentável. Lisboa. Portugal. 2001. p.863-870.

FUJIKAWA, E. S. **Incorporação do Resíduo “Serragem Cromada” em Materiais de Construção Civil.** Bauru/SP, 2002, 88p. Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da UNESP para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Industrial.

HENDRIKS, C. F. **The building cycle.** Ed. Aeneas. Holanda. 2000. 231p.

HENDRICKSON, C.; HARVOATH, A. Resource use and environmental emission of U.s. construction sectors. **J Construct Engineering and Management.** v.126, nº1, Jan-Feb. 2000 p.38-44.

HOPPEN, C. **Reciclagem de Lodo de ETA Centrifugado na Construção Civil, Método Alternativo para Preservação Ambiental.** Curitiba/PR, 2004, 132p. Dissertação apresentada à Universidade Federal do Paraná para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

HSIEH, H. N.; RAGHU, D. **Criteria dewatering for water treatment plant residual monofill.** Denver, AWWARF. 1997, 199p.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento.** São Paulo, 2000, 102p. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. Reciclagem de resíduos da construção. In: SEMINÁRIO NACIONAL SOBRE RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES. São Paulo. **Anais...** Secretaria de Estado do Meio Ambiente / CETESB, 2001.

KAWAMURA, S.; TRUSSELL, R. R. Main features of large water treatment plants in Japan. **Journal, American Water Works Association**. Denver, v.83, n.6, p.56-62, Jun.

KOHLER, G.; KURKOMSKI, H. **Optimizing the use of RCA**. Disponível em: <[http://www.b-i-m.de/public/deutag\\_remex/kohlerkurkomski.htm](http://www.b-i-m.de/public/deutag_remex/kohlerkurkomski.htm)> Acessado em 21/07/2002.

MAIS INTERIOR. **Cetesb autoriza operação de Usina de Reciclagem de Entulho de São Carlos**. Agência Mais Interior. Publicado em: 18 jan. 2006. Disponível em: <[http://www.maisinterior.com.br/v4\\_ler.asp?id=106022&secao=Cidades](http://www.maisinterior.com.br/v4_ler.asp?id=106022&secao=Cidades)>. Acesso em: 4 fev. 2006.

MESTERS, K.; KURKOMSKI, H. **Density separation of recycling building materials by means of jig technology**. *Aufbereitungs technik*, n. 38, 1997. p.536-542.

MORITA, D. M.; SAMPAIO, A. O.; MIKI, M. K.; DAVID, A. C. Incorporação de lodos de estações de tratamento de água em blocos cerâmicos In: X ENCONTRO NACIONAL DE SANEAMENTO BÁSICO. SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. Braga. 2002. **Anais...** Braga: X ENaSB 2002. CD ROM.

ONIWANWA, P.C., IKADEH, G.C., NWEZE, S.E. **Aluminium contents of some raw and processed Nigerian foods**. *Food Chemistry*, Barking, v.58, n.4, p.351-353, 1997.

PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. São Paulo, 1999, 189p. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

PREFEITURA MUNICIPAL DE BELO HORIZONTE. **Reciclagem de Entulho da Construção Civil**. Disponível em: Limpeza Urbana, Reciclagem de Entulho <[http://portal1.pbh.gov.br/pbh/index.html?id\\_conteudo=701&id\\_nivel1=-1](http://portal1.pbh.gov.br/pbh/index.html?id_conteudo=701&id_nivel1=-1)>. Acesso em: 4 fev. 2006.

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

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

ROBERTS, N.S., CLOUGH, A., BELLIA, J.P., KIM, J.Y. Increased absorption of aluminium from a normal dietary intake in dementia. **Journal of Inorganic Biochemistry**. New York, v.69, n.3, p.171-176, 1998.

ROCHOW, E. G. **Silicon and Silicones: about stone-age tools, antique pottery, modern ceramics, computers, space, materials and how they all got that way**. Berlim: Springer-Verlog, 1987. p.180.

SALES, A.; CORDEIRO, J. S. Imobilização da Fase Sólida de Lodos 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. cap. 10, p. 245-258.

SÃO PAULO. **Decreto Lei nº 8.468**. 8 de Setembro de 1976. Disponível em: <[http://www.controleambiental.com.br/decreto\\_8468.htm](http://www.controleambiental.com.br/decreto_8468.htm)> Acesso em: 4 fev. 2006.

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.; NUNES, M. S. Caracterização geotécnica de lodos provenientes de estações de tratamento de água e de esgotos sanitários. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19. Foz do Iguaçu, 1997. **Anais...** Rio de Janeiro, ABES. Tema II, n.22. p.1151-1156.

SCHALCH, V.; CAMPOS, R. Digestão anaeróbica e recuperação de materiais presentes nos resíduos sólidos urbanos. In: SIMPÓSIO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 1. Rio de Janeiro, 1992. **Anais...** Rio de Janeiro. v.2, t.2, p.3-10.

SENGUPTA, A. K.; SHI, B. Selective aluminum recovery from clarifier sludge. **Journal, American Water Works Association** Lancaster, Oct. 1992, v.64, n.10, p.96-103.

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 SANITÁRIA Y AMBIENTAL, XXVIII, 2002, Cancun – México. **Anais...** Cancun. 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 Anaeróbicos 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.

TOMAS, J.; SCHREIER, M.; GRÖGER, T. **Liberation and separation of valuables from building material waste.** In: GLOBAL SYMPOSIUM ON RECYCLING, WASTE TREATMENT AND CLEAN TECHNOLOGY. San Sebastian. Espanha. 1999.

TSUTUYA, M. T.; HIDRATA, 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.

VIEIRA, G. L.; DAL MOLIN, D. C. C.; LIMA, F.B. Corrosão em armaduras de concretos obtidos com agregados reciclados da construção civil. In: VI SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL. 11p., 2003, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2003. CD-ROM.