

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
AMBIENTAL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E  
AMBIENTAL**

Franciele Fedrizzi

**APROVEITAMENTO DE LODO DE ESGOTO NA PRODUÇÃO  
DE ARTEFATOS DE CONCRETO – Tubo de Concreto de Seção  
Circular**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Sebastião Roberto Soares

Co-orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Alexandra Rodrigues Finotti

Florianópolis/SC  
2012



Franciele Fedrizzi

**APROVEITAMENTO DE LODO DE ESGOTO NA PRODUÇÃO DE  
ARTEFATOS DE CONCRETO – Tubo de Concreto de Seção Circular**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre, e aprovada em sua forma final pelo Programa Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 24 de Fevereiro de 2012.

---

Prof., Dr. Flávio Rubens Lapolli,  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Prof., Dr. Sebastião Roberto Soares,  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof.<sup>a</sup>, Dr.<sup>a</sup> Alexandra Rodrigues Finotti,  
Co-Orientadora  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof., Dr. Paulo Belli Filho,  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof., Dr. Cátia Carvalho Pinto,  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof., Dr. Luiz Roberto Prudêncio Júnior,  
Universidade Federal de Santa Catarina



Aos meus pais,  
por todo amor, incentivo e compreensão.



## AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos a todos que *contribuíram*, direta ou indiretamente, para o desenvolvimento desta pesquisa, principalmente:

Aos órgãos de fomento, CAPES e FAPESC, pela concessão da bolsa de bolsa de mestrado e financiamento da pesquisa acadêmica, respectivamente.

À CASAN, em especial ao Alexandre Trevisan, pela colaboração, assistência e parceria durante a execução do projeto.

Ao ENS e PPGEA pela estrutura e assistência durante a execução do projeto.

Ao LMC pelo auxílio e estrutura cedida durante a execução de parte da pesquisa.

Ao Prof. Sebastião pela confiança e orientação durante o mestrado. Pela estrutura e pelas ferramentas que facilitaram o desenvolvimento da pesquisa.

À Prof. Alexandra pela incentivo, aprendizado e orientação durante o mestrado.

Ao Prof. Prudêncio por suas contribuições e orientação durante a pesquisa.

Ao Prof. Paulo Belli Filho pelo apoio ao desenvolvimento da pesquisa.

Aos colegas do GPACV: Guilherme, Edivan, Bruno, Cristiane, Francieli e Camile pela *força* (literalmente!), pelo apoio e ajuda nos momentos mais complicados.

Aos bolsistas que acompanharam do desenvolvimento da pesquisa: Catherine, Joana, Augusto, Morgana e Gabriela, por toda a dedicação. Por terem aguentado firme em todos os momentos, principalmente quando o trabalho era pesado, a temperatura muito alta e o odor “*desagradável*”.

Aos amigos que fiz em Floripa: Débora, Juliana, Pilar, Deise, Karina, Lorena, Guilherme, Jorge, Wanderli, Cássio, Edivan, Tiago Vitor, Tiago Belli, Francisco, Naiara, Jamile e Bárbara, pelos momentos de descontração e diversão, pela companhia e apoio. À quem interessar possa....eieeeh quadrilhaaaaa!!!

Ao Chico, pela ajuda em todos os momentos *difíceis* com lodo, pela amizade e pelo aprendizado. Mas principalmente por ser uma pessoa tão calma!

À *uma argentina que fez a alegria do lugar...* à Pilar pela amizade desde o início, compreensão, paciência, companhia em casa e por me ajudar a manter a calma nos momentos *complicados*!

À Deise, pela amizade, por todas as conversas e conselhos, pelo apoio e ajuda em todos os momentos difíceis. Por se preocupar e nunca deixar de fazer companhia!

Ao Gui, pelo bom humor matutino, pelos momentos de descontração com suas dicas musicais e piadas sempre bem formuladas e apropriadas! Valeu pela amizade, paciência, companhia e incentivo.

À Ju, que com toda sua insignificância conseguiu ser umas das pessoas mais significantes durante esse período. Obrigada pela amizade, pela ajuda em todos os momentos, companhia nos dias solitários e por tudo mais!

À Beda, por me ajudar a realmente gostar de Floripa, pela amizade, sinceridade, companhia e ajuda em todos os momentos (bons e ruins – festas e mudanças), pelos almoços de domingo, pela compreensão e *paciência típica* (rs) nas minhas crises...e por tudo mais!

À minha irmã, Gabi, por me aguentar e me apoiar mesmo sem entender a grandiosidade das coisas!

Aos meus pais, Valdemar e Roseli, por tudo...simplesmente não teria conseguido sem o seu amor, incentivo e compreensão! Obrigada por me apoiar incondicionalmente.

*There are places I remember all my life,  
Though some have changed,  
Some forever, not for better,  
Some have gone and some remain.  
All these places had their moments  
With lovers and friends I still can recall.  
Some are dead and some are living.  
In my life I've loved them all.*

*John Lennon e Paul McCartney  
(1965)*



## RESUMO

Esta dissertação trata do aproveitamento do lodo produzido na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Insular, localizada em Florianópolis/SC, através da sua incorporação ao concreto para a fabricação de tubos de drenagem. Na maioria dos países desenvolvidos, os sistemas de tratamento esgoto já foram ajustados para o gerenciamento do lodo. No Brasil, o resíduo começa a ter maior atenção devido à necessidade de atender as orientações da legislação ambiental. Considerando que, sua produção anual é estimada em 372.000 toneladas e que, aproximadamente metade do lodo gerado tem destino indefinido, o seu gerenciamento passou a ser uma atividade de grande importância e complexidade. Tendo em vista estes aspectos, objetivou-se definir uma metodologia adequada para a estabilização e higienização do lodo, definir uma alternativa para o seu aproveitamento e mistura ao concreto, e avaliar os artefatos produzidos sob o aspecto técnico. No que tange ao desenvolvimento da pesquisa, efetuou-se a estabilização e higienização por dois métodos distintos, caleação e processo térmico. De cada processo de tratamento, obteve-se um subproduto para incorporação ao concreto. Realizaram-se análises de parâmetros físico-químicos e bacteriológicos para comprovar a eficiência do tratamento do lodo de esgoto, e aplicaram-se ensaios de compressão axial e diametral para avaliar a resistência dos artefatos de concreto produzidos experimentalmente. Com relação à etapa de tratamento do resíduo, todos objetivos foram plenamente alcançados, atingindo-se níveis apropriados para sua aplicação em artefatos de concreto. Com relação ao aproveitamento do resíduo no concreto, um traço para a mistura dos materiais foi definido com sucesso, contudo, a sua utilização em tubos de drenagem mostrou-se inviável tecnicamente, dado que os pré-moldados suportaram apenas um carregamento que variou de 7 a 9 kN/m. A expectativa desta dissertação relacionava-se ao gerenciamento sustentável do lodo de esgoto. Ainda que para tubos de drenagem os resultados não tenham se mostrado positivos, o resíduo tem potencial de valorização em concreto sem função estrutural, cuja resistência requerida é baixa.

**Palavras-chave:** Lodo de Esgoto. Estabilização e Higienização. Aproveitamento. Artefatos de Concreto. Tubo de Concreto de Seção Circular.



## ABSTRACT

This dissertation approaches the valuation of the sludge produced at Insular Sewage Treatment Plant (STP), located at Florianópolis/SC, through the incorporation of it to drain pipes' concrete. In most developed countries, sewage treatment systems are already suitable for the management of sludge. In Brazil, the sludge from STP began to receive more attention because of the need to adapt their management in accordance with the guidelines of environmental legislation. Considering that the annual sludge production is estimated in 372,000 tons and approximately half of the sludge generated has undefined destination, its management has become an activity of great concern and complexity. Therefore, the purpose of this dissertation was to develop a proper method for stabilizing and hygienization the sludge, defining an alternative to its use by mixing it with concrete and evaluate the artifacts produced from the technical aspect. Regarding the stabilization and hygienization of sludge was performed by two different methods, quicklime and thermal process. Both processes yielded a byproduct which was incorporated to the concrete. Physico-chemical and bacteriological analysis were performed to assess the efficiency of the sewage sludge treatment and tests of axial and diametrical compression were applied to evaluate the resistance of concrete artifacts produced. Regarding the residue treatment step, all objectives were fully accomplished, reaching levels appropriated for the application in concrete artifacts. The mixture of concrete and sludge contents was successfully set, however, its use in drain pipes proved to be technically unfeasible, since the specimens resisted to only charges which ranged from 7 to 9 kN/m. The purpose of this dissertation was based on the sustainable management of sewage sludge. Despite the fact that for drain pipes the results proved to be negative, this residue has potential to be used in concrete with no structural function with low resistance features.

**Keywords:** Sewage Sludge. Stabilization and Hygienization. Use. Concrete Artifacts. Concrete Pipe of Circular Section.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Principais processos de estabilização de lodo de esgoto.....	35
Figura 2. Gabarito – verificação do acabamento de tubos de concreto. 53	
Figura 3. Localização da ETE Insular. ....	62
Figura 4. Processo de tratamento de esgoto doméstico. ....	63
Figura 5. Processo de tratamento do lodo de esgoto <i>in natura</i> .....	67
Figura 6. Coleta de lodo de esgoto <i>in natura</i> .....	68
Figura 7. Processo de caleação.....	69
Figura 8. Processo de caleação.....	70
Figura 9. Moagem do lodo caleado. ....	71
Figura 10. Processo térmico. ....	73
Figura 11. Determinação do IAP.....	75
Figura 12. Localização da fábrica de tubos de concreto.....	77
Figura 13. Processo de fabricação de tubos de concreto. ....	78
Figura 14. Variações do teste de dosagem com o <i>Subproduto A</i> . ....	80
Figura 15. Variações do teste de dosagem com o <i>Subproduto B</i> . ....	82
Figura 16. Imagens da moldagem dos CPs. ....	84
Figura 17. Processo de fabricação de tubos de concreto. ....	88
Figura 18. Fabricação experimental de tubos de concreto.. ....	88
Figura 19. Transporte e armazenamento dos tubos de concreto.....	89
Figura 20. Panorama Geral – lodo de esgoto <i>in natura</i> .....	90
Figura 21. Panorama Geral – tubos de concreto.....	91
Figura 22. Variação temporal da umidade e SV/ST – lodo de esgoto <i>in natura</i> . ....	98
Figura 23. Variação temporal do pH – lodo de esgoto <i>in natura</i> . ....	99
Figura 24. Variação da temperatura ao longo do dia.....	104
Figura 25. Variação temporal da relação SV/ST.....	105
Figura 26. Variação da umidade de acordo com cada período experimental. ....	106
Figura 27. Variação do pH de acordo com cada período experimental. ....	107
Figura 28. Variação temporal de <i>Escherichia coli</i> – 1º experimento. .	108
Figura 29. Variação temporal de <i>Escherichia coli</i> – 2º experimento. .	109
Figura 30. Média não ponderada da umidade – teste de Tukey. ....	116

Figura 31. Resistência dos CPs – metodologia NBR 5.752 (ABNT, 1992). .....	119
Figura 32. Resistência dos CPs – metodologia Gava (1999). .....	120
Figura 33. IAP – metodologia NBR 5.752 (ABNT, 1992). .....	121
Figura 34. IAP – metodologia Gava (1999). .....	121
Figura 35. Difração por raio-x do <i>Subproduto A</i> . .....	124
Figura 36. Difração por raio-x do <i>Subproduto B</i> . .....	125
Figura 37. Resultados do MEV. ....	126
Figura 38. Resultados do MEV. ....	127
Figura 39. Resultados do MEV/EDS. ....	129
Figura 40. Corpos de prova. ....	131
Figura 41. Média e desvio padrão para traço 1:7. ....	132
Figura 42. Média e desvio padrão para traço 1:8,5. ....	133
Figura 43. Média e desvio padrão para traço 1:10. ....	133
Figura 44. Média e desvio padrão para traço 1:7. ....	134
Figura 45. Média e desvio padrão para traço 1:8,5. ....	134
Figura 46. Média e desvio padrão para traço 1:10. ....	135
Figura 47. Média não ponderada – resultado ANOVA. ....	137
Figura 48. Média não ponderada – resultado ANOVA. ....	137
Figura 49. Ensaio de compressão diametral dos tubos de concreto. ...	140
Figura 50. Carga de ruptura para os tubos fabricados. ....	141

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores de referência para lodo de esgoto.....	31
Tabela 2. Características gerais do lodo de esgoto.....	32
Tabela 3. Classes enquadramento e valores de referência para lodo de esgoto. ....	41
Tabela 4. Principais usos do lodo de ETE na construção civil.....	46
Tabela 5. Resistência a compressão de argamassas com cinza de lodo de ETE. ....	47
Tabela 6. Resistência a compressão de argamassas com cinza de lodo de ETE. ....	47
Tabela 7. Classificação de pozolanas segundo a sua origem. ....	59
Tabela 8. Parâmetros avaliados na caracterização simples. ....	64
Tabela 9. Parâmetros da caracterização físico-química.....	65
Tabela 10. Parâmetros da caracterização microbiológica. ....	66
Tabela 11. Parâmetros complementares da caracterização. ....	66
Tabela 12. Parâmetros analisados no monitoramento da caleação.....	71
Tabela 13. Características do tubo de concreto.....	79
Tabela 14. Características do tubo de concreto.....	79
Tabela 15. Parâmetros complementares da caracterização do lodo <i>in natura</i> . ....	85
Tabela 16. Configuração selecionada para compor o concreto. ....	86
Tabela 17. Composição do concreto – detalhamento do traço. ....	86
Tabela 18. Composição do concreto – detalhamento das quantidades..	87
Tabela 19. Número de eventos realizados no período experimental. ....	93
Tabela 20. Descrição das variáveis independentes e dependentes. ....	94
Tabela 21. Configuração estatística descritiva. ....	96
Tabela 22. Descrição variáveis independentes e dependentes.....	97
Tabela 23. Resultados médios de cada parâmetro analisado.....	101
Tabela 24. Lixiviação e solubilização – lodo de esgoto <i>in natura</i> . ....	102
Tabela 25. Temperaturas registradas no período experimental. ....	104
Tabela 26. Compilação dos resultados dos experimentos de caleação. ....	111
Tabela 27. Resultados da caracterização final do lodo caleado. ....	112

Tabela 28. Resultado ANOVA – interceptação dos dois experimentos. .....	114
Tabela 29. Resultados do teste de Tukey. ....	115
Tabela 30. Resultado da caracterização final – amostras do processo térmico. ....	117
Tabela 31. Exigências físicas para um material pozolânica. ....	122
Tabela 32. Lixiviação e solubilização – <i>Subprodutos A e B</i> . ....	130
Tabela 33. Resultado da ANOVA – comparação das réplicas. ....	131
Tabela 34. Resultado da ANOVA. ....	136
Tabela 35. Configuração selecionada para o concreto .....	138
Tabela 36. Lixiviação e solubilização – blocos de concreto. ....	139

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ETE	Estação de Tratamento de Esgotos
NBR	Norma Brasileira
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CASAN	Companhia Catarinense de Água e Saneamento
n°	Número
km	Quilometro
m <sup>3</sup>	Metro Cúbico
ENS	Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental
CCA	Centro de Ciências Agrárias
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
FAPESC	Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina
NMP	Número Mais Provável
ST	Sólidos Totais
g	Grama
kcal	Kilocaloria
ATP	Adenosina Trifosfato
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
COT	Carbono Orgânico Total
UFP	Unidade Formadora de Placa
UFF	Unidade Formadora de Foco
SV	Sólidos Voláteis
SV/ST	Relação entre Sólidos Voláteis e Sólidos Totais
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
ETA	Estação de Tratamento de Água
°C	Grau Célsius
etc	Outras coisas mais
mm	Milímetro
DN	Diâmetro Nominal
kN	Quilo Newton
m	Metro
MPa	Mega Pascal
CP V ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
ex	Exemplo
NM	Norma Mercosul
L	Litro
s	Segundo
LIMA	Laboratório Integrado de Meio Ambiente

LABEFLU	Laboratório de Efluentes Líquidos e Gasosos
kg	Quilograma
cm <sup>3</sup>	Centímetro cúbico
mg	Miligrama
$M_{CaO}$	Quantidade de cal virgem a ser adicionada
$M_{lodo}$	Quantidade inicial de lodo de esgoto
h	Umidade do lodo de esgoto
$p_{CaO}$	Percentual de cal virgem requerido para a mistura
$P_{CaO}$	Grau de pureza da cal virgem
SANEPAR	Companhia de Saneamento do Paraná
IAP	Índice de Atividade Pozolanica
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
EDS	Energia Dispersiva
≈	Aproximadamente
cm	Centímetro
CP	Corpo de Prova
LMC	Laboratório de Materiais da Construção Civil
mL	Miligrama
ANOVA	Análise de Variância
C. Totais	Coliformes Totais
E. Coli	<i>Escherichia Coli</i>
USEPA	Uneted States Environmental Protection Agency
µg	Micrograma
h	Hora
EPA	Environmental Protection Agency
MAPA	Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento
SDA	Secretaria de Defesa Agropecuária

## LISTA D E SÍMBOLOS

%	Porcentagem
<	Menor
N	Nitrogênio Total
C	Carbono Total
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Fósforo Total
CaO	Cálcio Total
MgO	Magnésio Total
pH	Potencial Hidrogenionico
Ca(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de Cálcio
H <sub>2</sub> O	Água
OH <sup>-</sup>	Íon Hidroxila
Ca <sup>2+</sup>	Íon carbonato
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Íon amônio
NH <sub>3</sub> <sup>+</sup>	Amônia livre
H <sup>+</sup>	Íon Hidrogênio
C <sub>3</sub> S	Silicato tricálcico
C <sub>2</sub> S	Silicato bicálcico
C <sub>3</sub> A	Aluminato tricalcico
C <sub>4</sub> AF	Ferroaluminato tetracálcico
C-S-H	Cálcio hidratados
R\$	Reais
CaCl <sub>2</sub>	Cloreto de cálcio
Ca	Cálcio
Mg	Magnésio
Zn	Zinco
Fe	Ferro
Cu	Cobre
Ba	Bário
Ni	Níquel
Cd	Cádmio
Pb	Chumbo
Cr	Cromo
Se	Selênio
Mo	Molibdênio
As	Arsênio
Hg	Mercúrio
K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	Dicromato de potássio
As	Arsênio
Ba	Bário

Al	Alumínio
F <sup>-1</sup>	Fluoreto
Ag	Prata
+	Mais
±	Mais ou menos
/	Divisão
X	Multiplicação
PO <sub>4</sub>	Fósforo Total
K	Potássio
O	Oxigênio
P	Fósforo

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO</b>	<b>25</b>
<b>1.1</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>27</b>
1.1.1	Objetivo Geral	27
1.1.2	Objetivos Específicos	27
<b>1.2</b>	<b>JUSTIFICATIVA</b>	<b>28</b>
<b>2</b>	<b>CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>29</b>
<b>2.1</b>	<b>LODO DE ESGOTO</b>	<b>29</b>
2.1.1	Características Gerais	30
2.1.2	Processos de Tratamento	33
2.1.3	Processos de Estabilização e Higienização	34
2.1.1.1	Caleação	36
2.1.1.2	Tratamento Térmico	39
2.1.4	Aspectos Legais	41
<b>2.2</b>	<b>APROVEITAMENTO DE LODO DE ESGOTO</b>	<b>43</b>
2.2.1	Aproveitamento na construção civil – panorama geral	44
2.2.2	Aproveitamento na construção civil – panorama nacional	50
<b>2.3</b>	<b>TUBO DE CONCRETO</b>	<b>52</b>
2.3.1	Concreto	55
2.3.2	Atividade Pozolânica	59
<b>3</b>	<b>CAPÍTULO III – MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>61</b>
<b>3.1</b>	<b>LODO DE ESGOTO</b>	<b>61</b>
3.1.1	Caracterização	63
3.1.1.1	Caracterização Simples	64
3.1.1.2	Caracterização Geral	65
3.1.2	Estabilização e Higienização	66
3.1.2.1	Coleta	68
3.1.2.2	Caleação	68
3.1.2.3	Tratamento Térmico	72
<b>3.2</b>	<b>TUBOS DE CONCRETO</b>	<b>74</b>
3.2.2	Dosagem do Concreto	76
2.3.2	Fabricação Experimental de Tubos de Concreto	85
<b>3.3</b>	<b>PANORAMA GERAL</b>	<b>89</b>
<b>3.4</b>	<b>TRATAMENTO DE DADOS</b>	<b>91</b>

3.4.1	Caleação .....	92
3.4.2	Dosagem do Concreto .....	95
<b>4</b>	<b>CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>98</b>
<b>4.1</b>	<b>LODO DE ESGOTO .....</b>	<b>98</b>
4.1.1	Caracterização .....	98
4.1.1.1	Caracterização Simples.....	98
4.1.1.2	Caracterização Geral.....	100
4.1.2	Estabilização e Higienização.....	103
4.1.2.1	Caleação .....	103
4.1.2.2	Tratamento Térmico .....	116
<b>4.2</b>	<b>TUBOS DE CONCRETO .....</b>	<b>119</b>
4.2.1	Índice de Atividade Pozolânica.....	119
4.2.2	Dosagem do Concreto .....	131
4.2.3	Fabricação Experimental de Tubos de Concreto.....	140
<b>5</b>	<b>CAPÍTULO V – CONCLUSÕES.....</b>	<b>143</b>
<b>6</b>	<b>CAPÍTULO VI – RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>145</b>
<b>7</b>	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>146</b>
<b>8</b>	<b>APÊNDICES .....</b>	<b>161</b>
<b>9</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>195</b>

## CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

---

O surgimento de novas tecnologias, o crescimento no número de indústrias, o aumento populacional em centros urbanos e a diversificação do consumo de bens e serviços, são alguns dos fatores que têm contribuído para o aumento demasiado na produção de resíduos. O incremento na geração e, conseqüentemente, na destinação inadequada de resíduos sólidos é sinônimo de impactos ambientais, que transformam-se em graves problemas urbanos, com gerenciamento oneroso e complexo. Contudo, essa problemática é frequentemente negligenciada pelas autoridades e órgãos responsáveis.

De acordo com Tchobanoglous, Burton e Stensel (2003), entre os produtos resultantes do tratamento de esgoto, o lodo tem o maior volume, requer difícil tratamento e destinação final de elevado rigor técnico. Assim, o gerenciamento dos resíduos sólidos gerados diariamente em ETEs constitui-se como uma exigência atual da sociedade sobre o setor de saneamento. Embora a maioria dos países desenvolvidos já tenha adequado seus sistemas para gerenciar os resíduos produzidos em tais processos, os países em desenvolvimento ainda apresentam deficiência neste aspecto (ANDREOLI *et al.*, 1999). No Brasil, os lodos provenientes de ETEs começam a ter atenção devido à necessidade de adequar o seu gerenciamento conforme orientações da legislação ambiental. Assim, o destino final do lodo de esgoto torna-se uma atividade de grande importância e complexidade, sendo possível afirmar que trata-se de um problema emergente, que tende a se agravar rapidamente à medida que se implantam e efetivamente se operam os sistemas de tratamento de esgoto, em função da meta brasileira de universalização deste serviço de saneamento nas próximas duas décadas.

Quanto ao tratamento do lodo de esgoto, sabe-se que visa corrigir características indesejáveis do resíduo, tais como a instabilidade biológica, baixa qualidade higiênica e grande volume (ANDREOLI, 2001; TCHOBANOGLIOUS, BURTON e STENSEL, 2003). Já com relação à sua destinação final, é sabido que existem inúmeras possibilidades, desde as alternativas que o consideram apenas como um resíduo a ser confinado até as opções que primam pelo seu aproveitamento (ANDREOLI, VON SPERLING e FERNANDES, 2001; FONTES, 2003; KIM, CHO e YIM, 2005; ANDREOLI, 2006; COUTAND, CYR e CLASTRES, 2006; SASAOKA, YOKOI e YAMANAKA, 2006).

Segundo o *Global Atlas of Excreta, Wastewater Sludge, and Biosolids Management* (2008), três linhas básicas se destacam com relação ao aproveitamento e destino final do lodo de esgoto: a reciclagem agrícola, a disposição em aterros sanitários e a incineração. No Brasil, a produção anual de lodo foi estimada em 372.000 toneladas de ST e deste montante, 49,5 % tem destino indefinido, 44,9 %<sup>1</sup> é disposto em aterro sanitário e 5,6 %<sup>1</sup> passa por processo de valorização, através da reciclagem agrícola (MACHADO, 2001; LEBLANC, MATTHEWS e RICHARD, 2008). Contudo, à medida que aumentam os custos econômicos e ambientais de sua disposição em aterros sanitários, e que diminuem as áreas apropriadas para o seu confinamento, a valorização deste resíduo torna-se extremamente vantajosa.

O uso do lodo tratado como material alternativo na construção civil tem demonstrado sucesso em pesquisas de caráter mundial, no sentido de viabilizar a sua aplicação na produção de argamassas (MONZÓ *et al.*, 1996; PAN *et al.*, 2003; COUTAND, CYR e CLASTRES, 2006), na fabricação de cimento (TARRUYA, OKUNO e KANAYA, 2002; RODRÍGUES *et al.*, 2011), em camadas de cobertura de aterro sanitário (KIN, CHO e YIM, 2005), como agregado miúdo (CHEESEMAN e VIRDI, 2005; CHIOU *et al.*, 2006), na produção de concreto (SASAKA, YOKOI e YAMANAKA, 2005), entre outras aplicações. Em linhas gerais, os benefícios provenientes desta prática relacionam-se com a redução do consumo de recursos naturais não renováveis, quando substituídos por resíduos reciclados; com a redução de áreas necessárias para aterramento, pela minimização de volume de resíduos destinados a este fim; e com a redução da poluição, como no caso da indústria cimenteira que reduz a emissão de gás carbônico através da utilização de resíduos em substituição ao cimento Portland (ÂNGULO, ZORDAN e JOHN, 2001; TARUYA, OKUNO e KANAYA, 2002; RODRÍGUES *et al.*, 2011).

Assim, a realização de pesquisas no sentido de viabilizar o aproveitamento do lodo de esgoto é justificada pela necessidade de desenvolvimento e implementação de métodos alternativos e eficientes, em substituição ao simples descarte desses resíduos em aterros. Tendo em vista estes aspectos e a necessidade de adequação atual e futura do gerenciamento deste subproduto, a Companhia Catarinense de Água e

---

<sup>1</sup> Percentual de lodo de esgoto úmido.

Saneamento (CASAN) tem se empenhado na busca por novas alternativas para o gerenciamento do resíduo da Estação de Tratamento de Esgotos Insular, localizada em Florianópolis, Santa Catarina. Atualmente, todo lodo produzido na ETE Insular é destinado para aterro sanitário ignorando o potencial produtivo deste material, conflitando com os conceitos modernos de desenvolvimento sustentável, que encontram-se em implantação na maioria dos países desenvolvidos e em desenvolvimento.

Neste sentido, o presente projeto de pesquisa refere-se ao estudo da incorporação do lodo de esgoto, produzido na ETE Insular, no concreto para a fabricação de tubos de seção circular de drenagem.

## 1.1 OBJETIVOS

Buscou-se, com o desenvolvimento desta pesquisa científica, obter a resposta para a seguinte pergunta: A incorporação do lodo de esgoto ao concreto para a fabricação de tubos de drenagem configura-se como uma alternativa viável, do ponto de vista técnico?

Com base no referido questionamento, os objetivos deste estudo são apresentados a seguir, sendo que foram separados em objetivo geral e objetivos específicos.

### 1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a incorporação do lodo de esgoto ao concreto e testar sua aplicação especificamente para fabricação de tubos de seção circular de drenagem.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Definir uma metodologia adequada para a estabilização e higienização do lodo de esgoto em estudo, de tal forma que sua incorporação ao concreto fosse viabilizada;
- Definir um traço adequado para a mistura do lodo, estabilizado e higienizado, ao concreto;
- Avaliar os tubos de concreto produzidos experimentalmente sob o foco técnico.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O lodo produzido na ETE Insular é destinado para confinamento em um aterro sanitário localizado no Município de Biguaçu, região metropolitana da Capital de Santa Catarina. Os custos de disposição por massa de lodo (reais/tonelada de lodo) e transporte (38 km percorridos) são onerosos, visto que, diariamente é produzido o volume médio de 35 m<sup>3</sup> de lodo desidratado. Uma vez que, inúmeras alternativas para a valorização do resíduo têm-se consolidado como opções adequadas de gerenciamento, a disposição final atualmente adotada é questionável.

Outra consideração importante faz-se no sentido do alto grau de periculosidade associado à disposição inadequada do lodo de esgoto. O controle de sua destinação é essencial na proteção da saúde pública, sem mencionar outros riscos oriundos do contato com esta classe de resíduos. Sua adequada destinação é um fator fundamental para que os objetivos de um sistema de tratamento sejam plenamente alcançados. Assim, a efetivação do tratamento e aproveitamento do lodo da ETE Insular, pode possibilitar redução do volume a ser transportado e depositado em aterro sanitário, fator que possivelmente resultará na redução de gastos e otimização do gerenciamento para a CASAN. Nessas condições, a companhia teria condições de expandir seu sistema de coleta e tratamento de esgoto em Florianópolis, garantindo o cumprimento de tal serviço básico infra-estrutural com qualidade, para a população do município.

Esta pesquisa esta inserida no projeto *Estudos Sobre Gerenciamento de Lodos Produzidos na Estação de Tratamento de Esgotos Insular – CASAN*, cujo foco é apresentar alternativas viáveis para o tratamento e destinação final do resíduo gerado pela ETE. Atualmente, outras quatro pesquisas acadêmicas estão sendo desenvolvidas, em paralelo, no Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – ENS e no Centro de Ciências Agrárias – CCA da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. A viabilidade financeira deste projeto foi dada pelo financiamento da Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC) e da Companhia Catarinense de Água e Saneamento (CASAN).

Neste contexto, o ganho para a sociedade em geral é considerável, dado que a importância de estudos dessa grandeza esta fundamentada nas questões sociais, ambientais e econômicas que circundam a alternativa de disposição do lodo de esgoto em aterros sanitários, ignorando seu potencial de aproveitamento. Além disso, questões de cunho legal também fomentam esta linha de pesquisa.

## CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

Consta a seguir um levantamento de bibliografias que servirão de base para a estruturação desse estudo, associado a um panorama da relevância do mesmo. São descritas considerações sobre o lodo de esgoto, sobre as alternativas de valorização do resíduo no âmbito da construção civil e sobre artefatos de concreto, principalmente tubos de concreto de seção circular.

### 2.1 LODO DE ESGOTO

Dentre os resíduos resultantes do tratamento de efluentes domésticos, o lodo de esgoto é merecedor de atenção, em função da problemática que envolve o enquadramento de sua destinação final no processo operacional das estações de tratamento. Face à isto, breves considerações teóricas são descritas relativamente ao processo de tratamento de esgoto e geração de lodo.

O efluente doméstico bruto constitui-se de 99,9 % de água e 0,1 % de matéria sólida, esse percentual corresponde aos sólidos orgânicos e inorgânicos, em suspensão e dissolvidos, bem como micro-organismos, e constitui a causa da necessidade de tratamento para os esgotos (VON SPERLING, 1996, TSUTIYA *et al.*, 2001; TCHOBANOGLIOUS, BURTON e STENSEL, 2003; SANTOS, 2003). Durante as várias etapas do processo de tratamento do esgoto, em fase líquida, ocorre a geração de um resíduo que por convenção é designado como um material em fase sólida, apesar de ser constituído, em peso, por 25 % a 12 % de sólidos, dependendo das operações e processos utilizados. Faz-se esta configuração visando à distinção entre o material sólido e o fluxo do líquido em tratamento (VON SPERLING e GONÇALVES, 2001; TCHOBANOGLIOUS, BURTON e STENSEL, 2003).

Os resíduos sólidos oriundos do tratamento de efluentes domésticos são compostos pelo material gradeado, areia, espuma, lodo primário, lodo secundário e lodo químico (quando da existência da etapa físico-química) (TCHOBANOGLIOUS, BURTON e STENSEL, 2003). Lembrando que todos os processos de tratamento biológico geram lodo e que este é considerado um subproduto que na maioria das vezes têm destino incerto, ficando exposto ao ambiente e contaminando-o (VON SPERLING e ANDREOLI, 2001; TCHOBANOGLIOUS, BURTON e STENSEL, 2003; SCHLINDWEIN, 2009, LIMA, 2010). Estes lodos são classificados pela NBR 10.004 (ABNT, 2004d) como resíduos

sólidos e, portanto, devem ser tratados e dispostos conforme exigência dos órgãos reguladores (MARQUES *et al.*, 2005). Apesar de não ser o único subproduto gerado em uma estação de tratamento de esgotos, o lodo tem uma importância maior por ser um resíduo de difícil tratamento e destinação final, face, principalmente, às grandes quantidades que são geradas (JORDÃO e PESSÓA, 2005; SCHLINDWEIN, 2009).

Este estudo está direcionado para o lodo biológico aeróbio, originado de um processo de lodos ativados com aeração prolongada. O lodo resultante deste processo é constituído, predominantemente, por micro-organismos aeróbios que crescem e se multiplicam às custas da matéria orgânica do esgoto bruto. Nesse caso, a biomassa permanece mais tempo no sistema (18 a 30 dias) ocorrendo, então, a respiração endógena, que consiste na utilização, pelos micro-organismos, das próprias reservas de matéria orgânica contidas no protoplasma celular. Com isso, o lodo apresenta-se digerido com menor teor de matéria orgânica e maior teor de sólidos inorgânicos, não necessitando de uma etapa posterior de estabilização (VON SPERLING, 1996; VON SPERLING e GONÇALVES, 2001; LIMA, 2010).

Segundo Lima (2010), apesar das diferentes condições de geração dos lodos, após o tratamento das águas residuárias, alguns componentes são incorporados a eles, proporcionando características específicas. O conhecimento dessas características é muito importante para o manejo e gerenciamento do subproduto, pois estabelece condições e possibilidades adequadas para o seu tratamento, e posterior aproveitamento, reciclagem ou disposição final.

### **2.1.1 Características Gerais**

As características químicas, físicas e microbiológicas dos lodos dependem fundamentalmente dos processos adotados no seu tratamento, e podem variar anualmente, sazonalmente, ou até mesmo diariamente, devido à variação do esgoto afluente e à variação no desempenho do processo de tratamento (VON SPERLING e GONÇALVES, 2001; SILVA *et al.*, 2001; TCHOBANOGLIOUS, BURTON e STENSEL, 2003).

Alguns componentes das águas residuárias, ao passarem pelo sistema de tratamento, concentram-se em proporções variáveis no lodo, e assim ele passa a ser composto por nutrientes, matéria orgânica (40% a 80 %), nitrogênio (2 % a 6 %), fósforo (1 % a 3,7 %), potássio (< 1 %), cálcio, magnésio, ferro, metais pesados (cobre, zinco, mercúrio, cádmio,

romo, níquel e chumbo), micro-organismos patogênicos (coliformes fecais, bactérias, vírus, fungos e parasitas) (GONÇALVES, 1999) e água (TSUTIYA, 2001).

Na Tabela 1 consta o resultado relativamente a uma caracterização físico-química e microbiológica típica para o lodo de esgoto produzido no Brasil, segundo a pesquisa de Machado (2001). Esses valores referem-se aos dados mais atuais, em nível nacional, cujos registros foram encontrados. Adicionalmente, constam os resultados típicos para lodos ativados, em nível mundial, de acordo com Tchobanoglous, Burton e Stensel (2003).

Tabela 1. Valores de referência para lodo de esgoto.

<b>Parâmetro</b>	<b>Machado (2001)</b>	<b>Tchobanoglous, Burton e Stensel (2003)</b>
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	-	1,02
Sólidos Totais (% (m/m))	-	0,83 – 1,16
Sólidos Voláteis (% ST (m/m))	-	59 – 88
Matéria Orgânica (%)	56,19	-
Cinza (%)	38,98	-
Nitrogênio Total (% N)	5,75	-
Carbono Total (% C)	28,16	-
Fósforo Total (% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	1,82	-
Cálcio Total (% CaO)	4,27	-
Magnésio Total (% MgO)	0,22	32 – 9.870
pH	7,33	7,0
Cobre (mg/kg)	255,39	84 – 17.000
Zinco (mg/kg)	688,83	101 – 49.000
Cádmio (mg/kg)	10,75	1 – 3.410
Chumbo (mg/kg)	80,37	13 – 26.000
Cromo (mg/kg)	143,72	10 – 99.000
Ovos de Helminthos (NMP/g de ST)	13,47	-
Salmonella SP (NMP/g de ST)	1,00	-
<i>Streptococos fecais</i> (NMP/g de ST)	100,00	-
Coliformes Fecais (NMP/g de ST)	20.312,67	-

As principais propriedades a serem estudadas com relação aos lodos de esgoto são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Características gerais do lodo de esgoto.

Características Gerais do Lodo de Esgoto	
Quantidade Produzida	A quantidade de lodo gerada em uma ETE varia com o tipo de esgoto e de tratamento, tanto do efluente sanitário como do lodo (VON SPERLING e GONÇALVES, 2001; TCHOBANOGLIOUS, BURTON e STENSEL, 2003). Pode referir-se ao lodo úmido ou seco.
Sólidos Totais	Tem influência direta no volume, armazenamento, transporte e destinação final do lodo de esgoto (SILVA <i>et al.</i> , 2001; TCHOBANOGLIOUS, BURTON e STENSEL, 2003).
Sólidos Voláteis	É indicativo de maus odores e atração de vetores. O lodo bruto, por conter alto teor de SV, possui alto potencial de putrefação e conseqüente produção de aminas, diaminas, gás sulfídrico, mercaptanas e amônia, principais gases responsáveis pelos odores desagradáveis (FERNANDES e SOUZA, 2001).
Matéria Orgânica	Sua presença pode ser um fator positivo, haja vista que uma quantidade relativamente elevada permite sua utilização como condicionante do solo para melhorar as propriedades físicas (FERREIRA, ANDREOLI e LARA, 1999; SILVA <i>et al.</i> , 2001).
Nutrientes	Sua presença é positiva quando do uso agrícola, pois nutrientes como o nitrogênio, o fósforo e o potássio são essenciais para o crescimento dos vegetais. Contudo, o nitrogênio orgânico contido no lodo não está prontamente disponível para as plantas. Outra desvantagem relaciona-se ao fato de que taxas elevadas de nitrogênio podem representar grande impacto na qualidade da água subterrânea (FERREIRA, ANDREOLI e LARA, 1999).
Potencial Hidrogeniônico (pH)	Com um pH menor do que 6,5 tem-se a lixiviação de metais pesados, enquanto que, com um pH maior do que 11 tem-se destruição de muitas bactérias (MACHADO, 2001). Os níveis de micro-organismos patogênicos e o controle de vetores são outras razões importantes para o controle do pH do lodo. A atividade biológica também é reduzida em pH elevado, resultando na redução da descontaminação do material orgânico (FERNANDES e SOUZA, 2001).
Metais Pesados	A presença de metais no esgoto está associada principalmente ao lançamento de despejos nas redes coletoras públicas por parte das indústrias de galvanoplastia, formulação de compostos orgânicos e inorgânicos, curtumes, formulação de corantes e pigmentos, farmacêutica, fundição, lavanderias e petróleo. Além destes, em menor escala, também contribuem os rejeitos domésticos oriundos de canalizações, fezes e águas de lavagem, sendo que as águas de escoamento de superfícies metálicas ou das ruas carregam tipos específicos de metais dispersos na fumaça dos veículos (FERREIRA, ANDREOLI e LARA, 1999; SILVA <i>et al.</i> , 2001; EPSTEIN, 2002; SANTOS, 2003). Os metais que podem estar presentes no lodo têm a sua disponibilidade influenciada por reações como adsorção, complexação, precipitação, oxidação e redução (SILVA <i>et al.</i> , 2001). A presença dos metais pesados é vista como um empecilho para o seu aproveitamento em processos produtivos (FERREIRA, ANDREOLI e LARA, 1999).
Micro-organismos patogênicos	Os cinco grupos que podem estar presentes no lodo são: helmintos, protozoários, fungos, bactérias e vírus. Sua presença é indesejada em função dos possíveis males a serem causados às pessoas que efetuam a sua manipulação, sendo que o risco à saúde humana e animal é devido à alta frequência de parasitismo na população, ao longo tempo da sobrevivência de alguns micro-organismos no meio externo, e à baixíssima dose infectante (SILVA <i>et al.</i> , 2001). Os perigos eminentes quando da incorreta destinação final do lodo, relacionam-se ao fato dos patogênicos ficarem na superfície do solo e dos vegetais, já que o seu tempo de permanência varia conforme sua própria capacidade de sobrevivência, textura e pH do solo, incidência de luz solar, temperatura ambiente, método de aplicação do lodo no solo, capacidade de retenção de água, e fauna microbiana do solo (FERREIRA, ANDREOLI e LARA, 1999; SILVA <i>et al.</i> , 2001). A quantidade de patógenos no lodo não é estática e pode variar em função do tempo, da amostragem, da região, do processo de tratamento a que o esgoto é submetido e de outros fatores. Vale lembrar que, para o desenvolvimento de uma doença decorrente da contaminação por micro-organismos presentes no lodo de esgoto, vários fatores devem ser considerados, tais como a dose infectante, a patogenicidade, fatores ambientais e susceptibilidade dos hospedeiros entéricos (SILVA <i>et al.</i> , 2001).
Compostos Orgânicos Tóxicos	Além do risco potencial à saúde humana, as preocupações com compostos orgânicos perigosos relacionam-se com sua baixa solubilidade em água, estabilidade relativa no solo devido à sua resistência a degradação microbiana, e solubilidade, possibilidade de acumular no tecido e passar através da cadeia alimentar (FERREIRA, ANDREOLI e LARA, 1999; EPSTEIN, 2002). Mesmo com sua baixa dissolução em água, sua presença é preocupante, sendo que há poluentes que ficam adsorvidos, concentrando-se no floco biológico e podem causar inibição na digestão do lodo ou gerar lodo com características perigosas (SANTOS, 2003).

Da mesma maneira que alguns componentes orgânicos e minerais conferem características positivas ao lodo, outros podem ser indesejáveis do ponto de vista sanitário e ambiental. Os lodos podem ser desinfectados através de diversos processos de higienização reduzindo seus níveis de micro-organismos patogênicos. Já os poluentes orgânicos e metais pesados requerem métodos de remoção onerosos, sendo a melhor estratégia evitar tal contaminação nos esgotos brutos. O maior interesse no conhecimento da composição do lodo de esgoto relaciona-se à escolha de um tratamento adequado, vislumbrando uma destinação coerente, seja pelo seu aproveitamento ou pela sua disposição final.

### 2.1.2 Processos de Tratamento

O tipo de tratamento do lodo pode interferir na sua qualidade final, assim, definir o tipo de destinação é fundamental para o gerenciamento do lodo no planejamento das etapas, dos processos e dos equipamentos que serão utilizados na fase de tratamento (LIMA, 2010). De acordo com Von Sperling e Gonçalves (2001), os principais processos envolvidos são:

- **Adensamento:** processo físico que visa reduzir o teor de umidade do lodo e, conseqüentemente, seu volume, facilitando as etapas seguintes;
- **Estabilização:** remoção da matéria orgânica biodegradável (redução de sólidos voláteis). Visa atenuar os maus odores no tratamento e no manuseio do lodo;
- **Condicionamento:** preparação do lodo para a desidratação (normalmente para processos mecânicos). Utilizam-se produtos químicos (coagulantes, polieletrólitos) para melhorar a captura de sólidos e facilitar o desaguamento;
- **Desaguamento:** pode ser processo natural ou mecânico. Objetiva reduzir ainda mais o volume com a remoção de água livre, produzindo lodo com comportamento próximo aos dos sólidos, facilitando o manuseio e diminuindo custos com transporte e destinação final;
- **Higienização:** o seu principal objetivo é reduzir o nível de patógenos a valores aceitáveis;
- **Destinação Final:** etapa final do tratamento. Dependendo da alternativa escolhida para destinação final, algumas das etapas supracitadas poderão ser suprimidas.

A implantação ou não de cada unidade vai depender das características do lodo gerado e do produto final que se deseja obter. Além da questão financeira, pois os custos representam em torno de 20 a 60 % do total gasto com a operação de uma ETE (FERNANDES *et al.*, 1999; VON SPERLING e GONÇALVES, 2001; TSUTIYA *et al.*, 2001).

### **2.1.3 Processos de Estabilização e Higienização**

O processo de estabilização consiste na redução da matéria orgânica, volume, potencial de geração de odores e atração de vetores. Trata-se de estabilizar a fração biodegradável da matéria orgânica presente no lodo, reduzindo o risco de putrefação, bem como diminuindo a concentração de patógenos (ANDREOLI, FERNANDES e VON SPERLING, 2001; MIKI, SOBRINHO e VAN HAANDEL, 2006). Já o processo de higienização busca reduzir a patogenicidade a níveis que não venham a causar riscos à saúde da população, de acordo com as exigências para cada utilização a ser dada ao lodo de esgoto (PINTO, 2001).

Na França, é feita uma distinção entre lodo tratado, que significa lodo estabilizado (referindo-se principalmente ao lodo digerido) e lodo higienizado, referindo-se ao lodo que passou por processo específico, visando à grande redução em seu conteúdo de patógenos (caleação, compostagem e outros) (FERNANDES e SOUZA, 2001). No que diz respeito ao Brasil, nenhuma definição foi estabelecida visando essa distinção. Neste trabalho, o processo de higienização é tratado como uma fase avançada do processo de estabilização do lodo de esgoto. Algumas categorias destes tipos de processos são apresentadas na Figura 1.

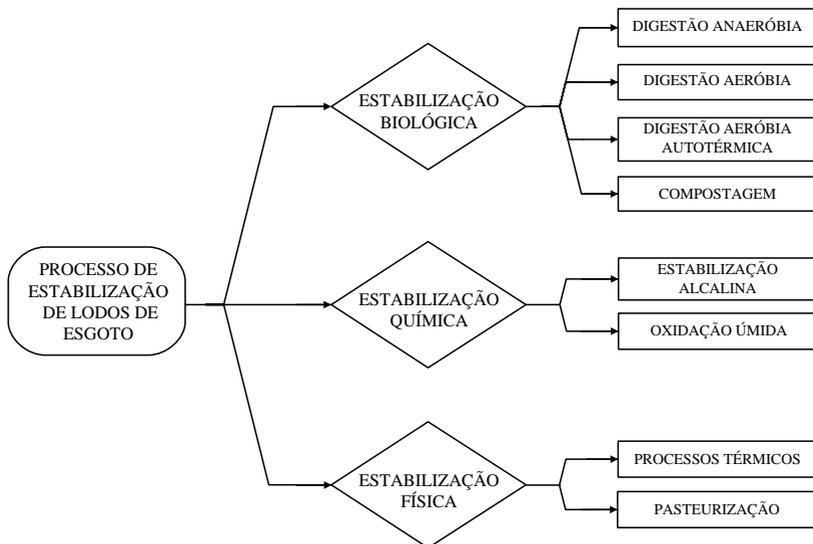


Figura 1. Principais processos de estabilização de lodo de esgoto.

Com relação aos processos biológicos de estabilização, no Brasil o principal processo é a digestão anaeróbia mesofílica (MIKI, SOBRINHO e VAN HAANDEL, 2006). Para a higienização do lodo, a compostagem, a caleação e os processos térmicos são os processos comumente utilizados (ANDREOLI, PEGORINI e FERNANDES, 2001; FERNANDES e SOUZA, 2001; ANDREOLI *et al.*, 2001; EPSTEIN, 2002). Segundo Lima (2010), além desses, podem ser empregados a hidrólise térmica e a digestão termofílica, como sendo processos avançados da digestão aeróbia e anaeróbia.

A sanidade do lodo é caracterizada pela ausência de agentes patogênicos como ovos de helmintos, cistos de protozoários, colônias de bactérias, hifas de fungos e alguns vírus (ANDREOLI *et al.*, 2001). Portanto, o grau de tratamento do lodo ao deixar um sistema de tratamento de esgotos, depende da tecnologia utilizada e dos objetivos requeridos para o resíduo.

Dentre os indicadores que podem ser utilizados para avaliar o grau de estabilização e higienização do lodo de esgoto, destacam-se: odor, nível de redução de patógenos, nível de redução de sólidos voláteis, toxicidade, taxa de absorção de oxigênio, ATP, atividade enzimática, DBO, DQO, COT, teor de nitrogênio (amoniacoal e nítrico),

teor de ortofosfato, teor de carboidratos, proteínas e lipídios, teor de cinzas, aptidão à desidratação, presença de protozoários e rotíferos, viscosidade, valor calorífico e a combinação de vários parâmetros.

Os processos de caleação e térmico foram os selecionados para o tratamento do lodo produzido na ETE Insular, pois sua utilização é amplamente difundida no Brasil e no mundo. Tal escolha foi fundamentada no sucesso das pesquisas de , Fernandes *et al.* (1996), Fernandes e Souza, (2001), Andreoli *et al.*, (2001), Gonçalves *et al.*, (2001), Capizzi-Banas *et al.*, (2004), Czechowski e Marcinkowski (2006), Aarab *et al.* (2006), Samaras *et al.*, (2008), Lima (2010) e Prim (2011) pelo uso de caleação para a estabilização e higienização do lodo de esgoto. E das pesquisas de Monzó *et al.* (1996), Geyer (2001), Fontes (2003), Coutand, Cyr e Clastres (2006), Sasaoka, Yokoi e Yamanaka (2006), Chiou *et al.* (2006), Montero *et al.* (2009), entre outras, pela aplicação de altas temperaturas de queima para o tratamento do resíduo. Neste sentido, algumas considerações relacionadas às duas técnicas são descritas nos itens a seguir.

#### 2.1.1.1 Caleação

Esse processo envolve a adição de aglutinantes alcalinos, tais como a cal virgem (CaO) e a cal hidratada (Ca(OH)<sub>2</sub>) (FERNANDES e SOUZA, 2001; ANDREOLI *et al.*, 2001; EPSTEIN, 2002). A adição desse material alcalino ao lodo possibilita a desintegração de compostos orgânicos e a solubilização de células microbiológicas (AKERLUND, 2008). Em termos gerais, efetua-se a destruição de micro-organismos patogênicos, a diminuição do odor gerado pelo lodo e a fixação de metais pesados (FERNANDES e SOUZA, 2001; ANDREOLI *et al.*, 2001). Este método possibilita a secagem e a higienização do lodo de esgoto por quatro maneiras: pela elevação da temperatura em função da reação exotérmica entre o CaO e a água; pelo aumento do pH a valores próximos a 12; pela formação de amônia gasosa; e pela redução da umidade (FERNANDES e SOUZA, 2001; ANDREOLI *et al.*, 2001; EPSTEIN, 2002; TCHOBANOGLIOUS, BURTON e STENSEL, 2003). O produto comumente utilizado é a cal virgem (CaO), e promove a redução de agentes patogênicos pela evolução das seguintes reações:

- A reação exotérmica entre o óxido de cálcio e a água contido no lodo, pode elevar a temperatura a 50 °C ou mais (Equação 1) e deste modo ocorre inativação de ovos de vermes e agentes

patogênicos resistentes (FERNANDES e SOUZA, 2001; TCHOBANOGLIOUS, BURTON e STENSEL, 2003);



- A formação de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), produto da hidratação da cal virgem (Equação 1), promove elevação do pH devido a formação de íons hidroxila ( $\text{OH}^-$ ) (Equação 2). Quando atinge valores próximos de 12, cria-se um ambiente impróprio para os micro-organismos patogênicos, pois alteram seu protoplasma celular de forma letal. Além disso, a caleação reduz a emissão de odores do lodo e gera a fixação de metais pesados (FERNANDES *et al.*, 2001);



- O *stripping* da amônia que relaciona-se a transferência deste composto, da fase líquida (íon amônio –  $\text{NH}_4^+$ ) para a gasosa (amônia livre –  $\text{NH}_3$ ), em função da elevação do pH, acontece devido a redução da concentração dos íons  $\text{H}^+$  e deslocamento da reação para a direita (Equação 3). A amônia livre é tóxica para diversos organismos e micro-organismos e por isso ela atua como desinfectante (ANDREOLI *et al.*, 2001).



Este efeito depende da qualidade e da proporção da cal utilizada em relação à quantidade de lodo (GONÇALVES *et al.*, 2001). Economicamente, trata-se de uma técnica viável e assim, a caleação configura-se como um método com grande potencial de consolidação no processo de desinfecção do lodo de esgoto.

Em pesquisas sobre a eficiência da caleação como método de desinfecção do lodo, Fernandes *et al.* (1996) testaram doses de 30 %, 40 % e 50 % de cal em relação à massa seca de lodo, os resultados obtidos indicaram que a estabilização e a higienização com cal são bastante eficientes na eliminação de patógenos e indicadores, sendo que, quanto maior a percentagem de cal, mais elevado é o grau de desinfecção. Outro fator importante é o tempo de contato, pois o efeito desinfectante da cal não é imediato e o período de contato tem reflexos sobre o dimensionamento das instalações, pois após a realização da mistura o

lodo deve permanecer estocado. Fernandes e Souza (2001) mostraram que o período de três meses é o ideal para a melhor eficiência do processo.

É importante salientar que a caleação reduz a contagem de ovos de helmintos, sendo que os ovos remanescentes não apresentam viabilidade biológica, ou seja, são ovos mortos que não apresentam potencial infectivo (GONÇALVES *et al.*, 2001). As pesquisas de Capizzi-Banas *et al.* (2004) que utilizam a calagem (mistura de 22 a 26 % de CaO p/p) como um tratamento avançado para a higienização do lodo, confirmam que o processo destrói os patógenos do lodo pelo aumento do pH (superior a 12 durante o estudo em grande escala) e aumento da temperatura (entre 50 e 60 °C durante o estudo em grande escala), comprovando o efeito de desinfecção pela aplicação da técnica.

Alterações das propriedades físico-químicas foram registradas por Czechowski e Marcinkowski (2006) em seus estudos com utilização de 3, 6, 9, 12 e 24 % de hidróxido de cálcio (p/p) e armazenamento da mistura por período de 1 a 35 dias. Algumas características físicas e químicas do lodo são alteradas pela adição da cal, essas alterações decorrem de reações como hidrólises, saponificações, neutralização de ácidos e outras. Basicamente, é possível mencionar modificações como (FERNANDES e SOUZA, 2001; GONÇALVES *et al.*, 2001): formação de uma capa mais dura e branca, quando da exposição do lodo ao ar livre; redução de sólidos voláteis (10 % a 35 %), devido à perda de orgânicos voláteis para a atmosfera; aumento de sólidos totais, resultantes da adição de sólidos da cal e da precipitação de sólidos dissolvidos; fixação dos metais pesados; perdas de nitrogênio por volatilização da amônia; e redução nos níveis de fósforo solúvel devido à reação com o ortofosfato para formar o precipitado de fosfato de cálcio.

Os estudos de Aarab *et al.* (2006), cujo tratamento do resíduo foi fundamentado na mistura de 10 % CaO (p/p) ao lodo, seguido do seu armazenamento por quatro meses, afirmam que o processo de caleação traz modificações importantes para o resíduo, entre elas o aumento da matéria seca e a diminuição do teor de matéria orgânica. Constatações semelhantes foram obtidas por Samaras *et al.* (2008), que utilizaram o tratamento alcalino para investigar o potencial de estabilização do resíduo, e concluíram que a mistura de CaO na proporção 1:1 (lodo: cal virgem) aumenta o teor de sólidos totais para cerca de 50 % e reduz a fração orgânica dos sólidos, além de apresentar menor toxicidade em seus lixiviados. Para Gonçalves *et al.* (2001), a principal desvantagem do uso da cal em relação aos outros métodos de higienização de lodo de

esgoto, é a agregação de volume (sólidos) e a limitação do uso do lodo tratado com a cal em solos com pH elevado.

Os estudos realizados por Lima (2010) com adição de 13,5 % de CaO ao lodo de esgoto, seguido do armazenamento em estufa agrícola, demonstraram a eficiência da técnica para o tratamento do resíduo. Tanto quanto as pesquisas de Prim (2011), cuja adição foi de 15 % de CaO e o armazenamento também foi efetuado em estufa agrícola. Para Comparini (2001), a estabilização do lodo de esgoto foi atingida apenas pelo uso de estufa agrícola. Outros estudos já foram realizados no sentido de promover a estabilização e higienização do lodo de esgoto por via alcalina, e de modo geral seus objetivos foram alcançados pela aplicação da técnica (TARRUYA, OKUNO e KANAYA, 2002; KIM, CHO e YIM, 2005; RODRÍGUES *et al.*, 2011). Contudo, estes não estão associados ao uso de estufa agrícola para elevação da temperatura do resíduo ou ao armazenamento da mistura resultante, respeitando o tempo de contato necessário para o efeito desinfectante da cal.

#### 2.1.1.2 Tratamento Térmico

Os processos térmicos consistem na aplicação de calor ao lodo. Este tipo de tratamento pode envolver desde a secagem ao ar até a exposição do resíduo a temperaturas elevadas, favorecendo a eliminação dos patógenos e o bloqueio dos odores emanados. A redução da umidade a ser atingida pode ser controlada e o teor de sólidos do produto final depende da rota de destinação escolhida (GONÇALVES *et al.*, 2001). Os principais benefícios dos processos térmicos relacionam-se á redução significativa no volume de lodo, preservação de suas propriedades agrícolas, redução no custo de transporte e estocagem (quando for o caso), além de que, o produto final apresenta-se praticamente livre de patógenos, é facilmente estocado, manuseado e transportado (FERNANDES e SOUZA, 2001).

Na fase inicial do tratamento térmico, geralmente em leitos de secagem, é importante que o lodo seja estabilizado e desaguado até atingir uma concentração de sólidos em torno de 20 % a 35 %, vislumbrando a minimização dos custos referentes ao seu tratamento posterior (PINTO, 2001), assim como, a viabilização de alguns requisitos técnicos. Por exemplo, os lodos destinados à incineração necessitam de teor de sólidos entre 30 % e 35 % a fim de garantir a operação autotérmica do incinerador, e nessas condições o lodo de esgoto pode ser fonte de energia ou combustível já que, segundo

Pegorini e Andreoli (2006), o poder calorífico da fração volátil do lodo pode chegar a 3,3 kWh/kg, semelhante ao da lenha.

As pesquisas de ANDREOLI *et al.* (2001) indicam que a prática da incineração vem se tornando crescente em vários países. Na efetivação desse processo, os sólidos voláteis são convertidos em gás carbônico e água, na presença de oxigênio, e os sólidos fixos são transformados em cinza. A incineração tem como principal vantagem a redução do volume de lodo que chega a ser na faixa de 10 a 20 % do volume total. Em contrapartida, durante o processo de decomposição, apesar dos organismos patogênicos e compostos orgânicos tóxicos serem eliminados, os metais pesados continuam presentes nas cinzas e, portanto, torna-se necessário uma destinação final adequada para este subproduto (TSUTIYA *et al.*, 2001). Contudo, a utilização da técnica é considerada positiva em muitos aspectos, pela necessidade de menor área quando da disposição do resíduo, pela possibilidade da utilização da cinza na construção civil devido à eliminação da matéria orgânica, bem como pela possibilidade de geração de energia (FONTES, 2003). Como ponto negativo, salienta-se o fator econômico, pois a incineração é uma alternativa que apresenta elevado custo por tonelada tratada.

Atualmente existem dois tipos de incineradores que são utilizados para o tratamento do lodo de ETE: incinerador de câmaras múltiplas e incinerador de leito fluidizado, sendo que sua capacidade de incineração depende do porte de cada equipamento (GREYER, 2001). Independentemente do tipo de aparelhagem utilizada, deve possibilitar a instalação de dispositivos de controle das emissões atmosféricas, já que existe uma polêmica vinculada a essa questão, que, para ANDREOLI *et al.* (2001), é considerada como sendo o principal fator de impacto da técnica. Para outros pesquisadores, o maior impacto ambiental relaciona-se à formação de uma cinza com alta carga de poluentes. Com base nisso, salienta-se a importância da destinação adequada deste subproduto, dado que muitas são as alternativas frequentemente estudadas com o objetivo de viabilizar o aproveitamento desse material, a exemplo destaca-se as pesquisas de Morales e Dantas (1995), Monzó *et al.* (1996), Morales (1999), Geyer (2001), Fontes (2003), Pan *et al.* (2003), Coutand, Cyr e Clastres (2006), Sasaoka, Yokoi e Yamanaka (2006), Chiou *et al.* (2006) e Montero *et al.* (2009) que viabilizam o uso do lodo de esgoto, após processo de queima a temperaturas que variam de 600 °C a 1000 °C e períodos de exposição que variam de 1 a 3 horas, na manufatura de produtos de aplicação na construção civil.

## 2.1.4 Aspectos Legais

Considerando o constante crescimento da produção de lodo de esgoto, resultante da elevada geração de efluentes pela população, o cumprimento de exigências legais já existentes torna-se fundamental. Em termos mundiais, existe um consenso com relação ao princípio do poluidor pagador. Assim, quem produz o resíduo é responsável por providenciar a sua correta destinação, de tal forma a garantir que este não venha causar danos à saúde pública e impactos negativos ao ambiente.

No Brasil, são poucos os instrumentos legais que indicam aspectos sanitários adequados para uma determinada alternativa de destinação final de lodo de esgoto. A exemplo temos a Resolução CONAMA nº 375 (BRASIL, 2006), que define critérios e procedimentos para o uso agrícola do resíduo. No escopo geral da resolução, o lodo é tratado como um produto que, em virtude dos seus riscos, deve ser gerenciado adequadamente para que seus constituintes atendam a padrões específicos, a fim de que esses riscos sejam minimizados e até mesmo eliminados (LIMA, 2010). Este instrumento legal classifica os lodos de esgoto em classes de aptidão.

Na Tabela 3 são descritos os limites máximos de concentrações de agentes patogênicos (entende-se por agentes patogênicos todas as bactérias, protozoários, fungos, vírus e helmintos, capazes de provocar doenças ao hospedeiro) para as classes de lodo de esgoto, assim como as concentrações máximas permitidas das substâncias inorgânicas, de acordo com os preceitos na Resolução CONAMA nº 375 (BRASIL, 2006).

Tabela 3. Classes enquadramento e valores de referência para lodo de esgoto.

Agente Patogênico	Tipo de Lodo	Número de Patógenos	Elemento Químico	Concentração Máxima Permitida (mg/kg)
Ovos Viáveis de Helmintos	Classe A	< 0,25 ovo/g de ST	Arsênio	41
			Bário	1300
	Classe B	< 10 ovos/g de ST	Cádmio	39
			Cromo	1000
Coliformes Termotolerantes	Classe A	< 10 <sup>5</sup> NMP/g de ST	Cobre	1500
			Chumbo	300
	Classe B	< 10 <sup>6</sup> NMP/g de ST	Mercurio	17
			Molibdênio	50
Salmonella	Classe A	Ausência em 10 g de ST	Níquel	420
Vírus	Classe A	<0,25 UFP ou UFF/g ST	Selênio	100
			Zinco	2800

FONTE: BRASIL (2006).

As classes de lodo mencionadas na Tabela 3 referem-se ao tipo de uso que pode ou não ser dado a este subproduto. Lembrando que esta Resolução do CONAMA destina-se à regulamentar o uso agrícola do lodo, o enquadrado na *Classe A* poderá ser utilizado para quaisquer culturas, sendo proibido o uso do material, não importando a classificação, em pastagens e cultivo de olerícolas, tubérculos e raízes e culturas inundadas, bem como as demais culturas cuja parte comestível entre em contato com o solo. Já o uso do material enquadrado como *Classe B* fica restrito ao cultivo de café, silvicultura, culturas para produção de fibras e óleos, com a aplicação mecanizada, em sulcos ou covas, seguida de incorporação.

Com relação às substâncias orgânicas potencialmente tóxicas, a resolução apresenta no Anexo V uma lista de substâncias que devem ser determinadas para a caracterização química do lodo. Para a condição de estabilidade do lodo, referente à digestão dele, é levada em consideração a relação entre o teor de sólidos voláteis e o de sólidos totais (SV/ST), que deve ser menor que 0,7. De acordo com Lima (2010), valores superiores poderiam gerar problemas de maus odores e atração de vetores.

O CONAMA, através da Resolução nº 375 (BRASIL, 2006), estabelece, para os processos de estabilização química, a adição ao lodo de esgoto ou produto derivado uma quantidade de álcali suficiente para que o pH seja elevado, pelo menos até 12 por um período mínimo de 2 horas, mantendo-se acima de 11,5 por mais 22 horas, sem que seja feita uma aplicação adicional de álcali. Já para os processo térmicos, a concentração de sólidos deve alcançar, no mínimo, 90 % da matéria seca, sem que haja a mistura de nenhum aditivo.

A resolução em questão configura-se como o instrumento legal mais específico em termos de gerenciamento de lodo de esgoto. Assim, para fins de pesquisa, adotou-se os valores de referência nela contidos. Como descrito nos objetivos específicos deste trabalho, pretende-se enquadrar o lodo, foco deste estudo, de acordo com a *Classe B*. Sem mais, salienta-se que a legislação brasileira, a despeito de suas imperfeições, assegura níveis mínimos para o lodo de esgoto, e também pune os geradores quando da sua disposição inadequada, de acordo com o princípio do poluidor pagador, através da Lei nº 12.305 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010).

## 2.2 APROVEITAMENTO DE LODO DE ESGOTO

O destino final dos resíduos produzidos nos sistemas de tratamento de esgotos é uma preocupação mundial (ANDREOLI e PINTO, 2001). No Brasil, o aumento na produção de lodo acompanha a expansão dos serviços de coleta e tratamento dos esgotos sanitários (HAANDEL e ALEM SOBRINHO, 2006), sendo que não existem dados consistentes relacionados à produção e a destinação final deste resíduo. O que existe são estimativas, em geral, realizadas com base na produção per capita de lodo e na taxa de coleta e tratamento de águas residuais do país. A exemplo destacam-se as pesquisas de Machado (2001) e Leblanc, Matthews e Richard (2008), que estimam a produção de lodo em 372.000 toneladas de ST por ano. Porém, este valor pode estar subestimado, principalmente, em função das políticas implantadas pelo governo através da Lei Federal nº 11.445 (BRASIL, 2007), que estabelece diretrizes para o saneamento básico no País, e pelo Programa de Aceleração de Crescimento (PAC), que prevê investimentos vultuosos na área de saneamento, o que ressalta a meta brasileira de universalização do serviço de saneamento nas próximas duas décadas.

Contudo, o gerenciamento do lodo de esgoto no Brasil é incerto e muitas vezes negligenciado, dado que grande parte do resíduo gerado tem seu destino indefinido (49,5 %) ou é disposto em aterro sanitário (44,9 %<sup>1</sup>), e apenas 5,6 % é valorizado pela reciclagem agrícola (MACHADO, 2001; LEBLANC, MATTHEWS e RICHARD, 2008). Em termos mundiais, de acordo com as pesquisas de Leblanc, Matthews e Richard (2008) três linhas básicas vêm se destacando com relação ao aproveitamento e destino final do lodo de esgoto: a reciclagem agrícola, a disposição em aterros sanitários e a incineração.

Historicamente, o método mais aplicado é o uso agrícola (ANDREOLI *et al.*, 2001). Não obstante, outras técnicas também são utilizadas, tais como o aproveitamento do subproduto na construção civil, na produção de substrato vegetal, na recuperação de áreas degradadas, a compostagem, o uso em plantações florestais, a aplicação em *landfarming* e a disposição em aterros sanitários (FERNANDES *et al.*, 2001; GOMES *et al.*, 2001; ANDREOLI, 2006). Ainda assim, segundo Fernandes *et al.* (2001), na ótica da sustentabilidade a eliminação final do lodo de esgoto através de técnicas como incineração, aplicação em *landfarming* e disposição em aterros sanitários somente deve ser adotada quando sua valorização for impossível.

O gerenciamento de resíduos não é apenas uma questão ambiental. Atualmente, envolve diversas questões sociais, políticas,

econômicas e de saúde. A abordagem do aproveitamento de resíduos sólidos gerados em ETEs visa modificar a situação atual de disposição de lodo em aterro sanitário, ignorando seu potencial como subproduto para outros processos produtivos e tornou-se uma tendência que está ganhando espaço por oferecer muitos retornos e vantagens. Dentro desta seqüência de prioridades no gerenciamento, considerações mais detalhadas são descritas a seguir relativamente à aplicação de lodos de esgoto em processos produtivos no âmbito da construção civil.

### **2.2.1 Aproveitamento na construção civil – panorama geral**

O aproveitamento de resíduos na construção civil surgiu de forma efetiva na década de 80, nos países industrializados, e com objetivo de dar um destino final ambientalmente adequado para aqueles resíduos que, através de procedimentos simples de segurança, não causariam danos ao meio ambiente e sociedade em geral (INGUZA *et al.*, 2006). Os primeiros estudos relacionados ao lodo foram direcionados ao seu aproveitamento como matéria-prima secundária na fabricação de produtos cerâmicos (ALLEMAN e BERMAN, 1984), pois este resíduo, quando submetido a processos de tratamento adequados, apresenta acentuada reatividade pozolânica e assim a sua incorporação na construção civil é viabilizada (MORALES, 1999; INGUZA *et al.*, 2006).

O concreto é um material que, por utilizar insumos e processos produtivos não muito complexos, também apresenta potencial para receber resíduos, e como é considerado o material mais utilizado na construção civil, a adição mineral tornou-se satisfatória em aspectos técnicos, econômicos e ambientais (TAY e SHOW, 1991; MORALES, 1999). Nessas condições, considera-se o lodo tratado como um produto mineral, lembrando que, segundo Mehta e Monteiro (1994), adições minerais relacionam-se a materiais silicosos finamente moídos, no estado natural ou como subprodutos, podendo ter reações pozolânica e/ou cimentante. Dentre as adições minerais existentes, têm-se as que possuem atividade pozolânica (ex.: fumo de sílica, cinza volante com baixo teor de cálcio e cinza de casca de arroz), as que possuem atividade cimentante (ex.: cinza volante com alto teor de cálcio), as que possuem tanto atividade cimentante como pozolânica (ex.: escória granulada de alto forno) e as que não possuem nenhum tipo de atividade, denominados fílers (ex.: pó de quartzo, pó de pedra) (MEHTA e MONTEIRO, 1994; GONÇALVES, 2000).

Na Tabela 4 apresenta-se um resumo das metodologias comumente utilizadas para a estabilização e higienização do lodo de ETE e ETA, associadas aos principais usos na construção civil. Em seguida apresenta-se uma abordagem sucinta de cada pesquisa.

Tabela 4. Principais usos do lodo de ETE na construção civil.

Pesquisas	Tipo de Lodo	Tipo de Estabilização/Higienização	% de Substituição e Insumo Substituído	Aplicação
Monzó <i>et al.</i> (1996)	ETE	Incineração (temperatura e período de queima não especificado)	Substituição do cimento Portland por 15 % (em massa) de lodo	Produção de Argamassas
Taruya, Okuno e Kanaya (2002)	ETE	Processo alcalino e incineração	-	Cimento c/ Pozolana
Pan <i>et al.</i> (2003)	ETE	Incineração a 700 °C por 3 horas	Substituição do cimento Portland por 20 % (em massa) de cinza	Produção de Argamassas
Kin, Cho e Yim (2005)	ETE	Processo alcalino, adição de CaO (5 a 10 %) e escória (30 %)	-	Camada de Cobertura de Aterro Sanitário
Lin, Luo e Sheen (2005)	ETE	Incineração a 800 °C por 20 horas	Mistura da argila com 0, 15, 30 e 45 % (em massa) de cinza	Telhas
Cheeseman e Virdi (2005)	ETE	Incineração a 1020 °C a 1080°C (período de queima não especificado)	-	Agregado Miúdo
Sasaoka, Yokoi, Yamanaka (2005)	ETE	Incineração com temperatura na faixa de 700 °C a 1.000 °C (período de queima não especificado)	Substituição do agregado miúdo por 0, 5, 10, 15 e 20 % (em massa) de cinza	Produção de Concreto
Chen, Chiou e Wang (2006)	ETE	Incineração a 900°C por 3 horas	Substituição parcial do cimento nas relações 20:80, 30:70 e 40:60 (cimento:cinza)	Cimento c/ Pozolana
Coutand, Cyr e Clastres (2006)	ETE	Incineração a 850 °C (período de queima não especificado)	Substituição do cimento por 25% (em massa) de cinza	Produção de Argamassas
Chiou <i>et al.</i> (2006)	ETE	Incineração a 900°C por 3 horas	-	Agregado Miúdo
Sales e Souza (2009)	ETA	Secagem em estufa a 110 °C por 24 horas	Substituição da areia por lodo, numa faixa que variou de 1 a 5 %	Concreto e Argamassa.
Montero <i>et al.</i> (2009)	ETE	Não especificado	Mistura da argila com 1, 2, 3, 4, 5 e 10 % (em massa) de resíduo	Telhas
Rodríguez <i>et al.</i> (2011)	ETE	Processo alcalino	-	Cimento c/ Pozolana
Yen, Tseng e Lin (2011)	ETA, ETE e outros	Não especificado	-	Cimento c/ Pozolana

Para Monzó *et al.* (1996) a produção de argamassas foi realizada pela incorporação de 15 % de cinza de lodo de esgoto em substituição ao cimento Portland. O processo de cura foi realizado com temperatura mantida fixa em 40 °C, e os resultados obtidos para a resistência a compressão são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Resistência a compressão de argamassas com cinza de lodo de ETE.

Período de cura (dias)	3	7	14	28
Argamassa com 15 % de cinza de lodo de ETE	27,1	39,6	45	47,7
Argamassa referência	33,2	34,8	36	41,4

FONTE: Adaptado de MONZÓ *et al.* (1996).

Os valores evidenciaram o elevado potencial para o resíduo apresentar atividade pozolânica, dado que a resistência foi maior para as argamassas produzidas com adição de cinza de lodo de ETE, do que para a argamassa referência, nas maiores idades. Outra consideração importante refere-se à forma das partículas da cinza, que os autores afirmam não ser esférica, fator que pode ter influência negativa sobre a trabalhabilidade das argamassas contendo o resíduo.

Nos estudos de Pan *et al.* (2003), o lodo de esgoto foi incinerado a 700 °C, por um período de três horas. Com a cinza resultante os pesquisadores produziram argamassas com substituição de 20 % do cimento Portland. Na Tabela 6 apresentam-se as resistências obtidas no ensaio de compressão, variando de acordo com o tempo de moagem da cinza e período de cura das argamassas.

Tabela 6. Resistência a compressão de argamassas com cinza de lodo de ETE.

Período de cura (dias)	Tempo de moagem da cinza de lodo de ETE (min.)							Argamassa referência (MPa)
	10	20	30	60	120	180	360	
7	11,5	14,1	11,5	12,5	20,4	19,7	19,2	27,9
28	18,4	22,0	22,3	27,9	26,7	27,5	29,5	38,1

FONTE: Adaptado de PAN *et al.* (2003).

Estes autores concluíram que, tanto a atividade pozolânica como a resistência a compressão aumentam com a finura da cinza. A resistência das argamassas também aumentou com o maior período de cura. Contudo, a argamassa referência apresentou resistência superior, em comparação às produzidas com a incorporação da cinza.

Os estudos de Coutand, Cyr e Clastres (2006), que testaram argamassas com substituição de 25 % do cimento Portland por cinza de lodo de esgoto (incinerado à 850 °C), afirmam que o aumento da resistência a longo prazo pode estar relacionado com atividade pozolânica de cinza. Neste estudo os autores concluíram que as partículas da cinza são compostas por grãos irregulares que apresentam elevada superfície específica, fator que resultou em um alta demanda por água (entre 110 % e 120 %) e consequente aumento na relação água/aglutinante. Considerando que a demanda por água está relacionada com alta porosidade dos grãos, esta exigência pode levar a uma diminuição no desempenho mecânico das argamassas.

Outra conclusão cabível refere-se a lixiviação dos metais pesados, na comparação entre argamassas com e sem a adição da cinza de lodo de ETE, os resultados indicaram que as concentrações dos elementos estão na mesma ordem de magnitude. E que, os valores registrados na lixiviação dos metais pesados estão dentro dos limites estabelecidos pela Organização Mundial de Saúde (OMS).

A cinza em estudo, é composta principalmente por fosfatos de cálcio, quartzo e vidro, sendo que o teor de sílica é baixo e isso provavelmente limita a atividade pozolânica do resíduo. Na comparação da cinza de lodo de ETE com os padrões americanos e europeus, os autores concluíram que o material não preenche os requisitos para ser considerado um material mineral (COUTAND, CYR e CLASTRES, 2006).

Pela avaliação dos três estudos a cima descritos (MONZÓ *et al.*, 1996; PAN *et al.*, 2003; COUTAND, CYR e CLASTRES, 2006), foi possível visualizar a influência da temperatura de queima e finura das cinzas nas características das argamassas produzidas. As pesquisas de Morales (1999), realizadas com adições minerais, indicam haver diferenças significativas na atividade pozolânica de cinzas submetidas à diferentes temperaturas de queima, e que, diferentes meios podem ser utilizados para acelerar as reações pozolânicas e aumentar a resistência inicial de argamassas e concretos, sendo possível citar a ativação térmica, a ativação mecânica (processo de moagem) e a ativação química.

Para Sasaoka, Yokoi, Yamanaka (2005), a cinza de lodo de ETE (incineração a 700 °C – 1000 °C) foi utilizada na produção de concreto, as porcentagens de substituição foram de 0, 5, 10, 15 e 20 % em relação ao agregado miúdo. Os pesquisadores constaram que a matéria orgânica que compunha 80 % do lodo desapareceu quando da aplicação de altas pressões e temperaturas, e o resíduo tornou-se um sólido inofensivo. A

resistência do concreto produzido com incorporação de 5 % de cinza foi de 55 MPa, com 0 % (concreto referência) a resistência foi de 45 MPa, e para os concretos produzidos com as demais percentagens de mistura, a resistência à compressão foi mais baixa, mas não foi inferior a 40 MPa. Os autores concluíram que, a incorporação de baixa percentagem de cinza melhorou a resistência do concreto. A massa específica da cinza do lodo de ETE foi de 2,66 g/cm<sup>3</sup> e a superfície específica foi determinada em 5,40 m<sup>2</sup>/g.

Sales e Souza (2009) utilizaram lodo de ETA, submetido a processo de secagem a 110 °C por 24 horas, para a produção de concretos e argamassas. O resíduo foi utilizado em substituição ao agregado fino em frações que variaram de 1 a 5 %. Os resultados indicaram que para os concretos produzidos, a resistência a compressão axial variou de 24,7 a 31,4 MPa aos 28 dias de cura, sendo que a melhor resistência registrada foi para o concreto com substituição de 2 % da areia pelo lodo de ETA. Relativamente às argamassas, as resistências obtidas no ensaio de compressão axial foram significativamente inferiores às dos concretos. Os autores concluíram que os concretos e argamassas produzidos, não geram lixiviados nocivos.

Lin, Luo e Sheen (2005) confirmaram a viabilidade da adição de cinza de lodo de ETE na fabricação de telhas. Os benefícios desta adição relacionaram-se a menor fissuração na queima, leveza da peça após a queima e abrasão satisfatória. Além disso, há um aumento, diretamente proporcional à temperatura de ignição do lodo, na estabilização dos metais pesados. As desvantagens relacionam-se a menor resistência à flexão e maior absorção de água. Resultados semelhantes foram registrados por Montero *et al.* (2009), pois concluíram que a adição de resíduos (mistura de 1, 2, 3, 4, 5 e 10 % em massa) na fabricação de telhas, aumenta a absorção de água e diminui a resistência à flexão das peças produzidas.

Cheeseman e Virdi (2005) realizaram um estudo com o intuito de obter materiais alternativos aos agregados naturais, os resultados obtidos indicaram que os pellets fabricados com cinza de lodo de esgoto podem ser produzidos com as propriedades fundamentais (massa específica, absorção de água e resistência à compressão) similares ou superiores aos agregados comerciais, utilizando métodos usuais como peletização e temperatura de sinterização relativamente baixa. Na pesquisa de Chiou *et al.* (2006) a influência das cinzas de lodo de esgoto (SSA) e de lodo de esgoto (SS) foram avaliadas na produção de agregado miúdo. Os resultados indicam que o SSA apresenta características semelhantes à

argila expandida, e que a quantidade adicionada de SS deve ser menor que 20 % na mistura ao agregado leve.

Nas pesquisas de Chen, Chiou e Wang (2006) para a produção de cimento com pozolana, o lodo foi incinerado a 900 °C durante três horas e posteriormente, passou por processo de trituração por duas horas. Os resultados obtidos indicaram relação água/cimento entre 0,5 e 0,8 para os corpos de prova produzidos com mistura de 20:80, 30:70 e 40:60 (cimento:resíduo). O tempo de cura foi de 28 dias à uma temperatura de 25 °C ± 2 °C. Basicamente, os objetivos da pesquisa foram atingidos e as desvantagens relacionaram-se à alta absorção da água e a baixa resistência, sendo que esta última foi melhorada pela sinterização da mistura de cimento. No estudo de Yen, Tseng e Lin (2011), o lodo foi utilizado como matéria prima na fabricação de cimento, sendo que na avaliação dos resultados, os principais constituintes do cimento Portland foram encontrados no *eco-cimento*. Para outras pesquisas realizadas com objetivo de fabricar cimento os resultados confirmaram a viabilidade técnica e do produto produzido (TARUYA, OKUNO e KANAYA, 2002; RODRÍGUES *et al.*, 2011).

No trabalho de Kin, Cho e Yim (2005) o lodo de esgoto foi tratado com processo alcalino (mistura de 5 a 10 % de CaO e 30 % de escória), e submetido à processo de cura em condições herméticas, a 20 °C, durante 1, 7 e 28 dias. O material resultante foi valorizado em camadas de cobertura de aterro sanitário. Os autores concluíram que as propriedades geotécnicas do lodo solidificado são apropriadas para o seu objetivo e que sua utilização é apropriada. A análise de difração por raio-x indicou presença abundante de compostos hidratados (C-S-H) no lodo solidificado, resultado da estimulação da atividade pozolânica oferecida pelos produtos alcalinos. Com relação ao formato das partículas, foram observados cristais em formato de agulha e produtos hidratados em formato de favo de mel, para o lodo solidificado. Com relação a lixiviação de metais pesados, foi insignificante para o lodo solidificado, sendo que o processo de solidificação do resíduo com CaO, eliminou as bactérias contidas no lodo.

## **2.2.2 Aproveitamento na construção civil – panorama nacional**

No Brasil existem pesquisas sobre o assunto, mas o aproveitamento de resíduos ainda não exerce um papel significativo na indústria da construção civil (INGUZA *et al.*, 2006). Os estudos efetuados por Pereira (2008) viabilizam o aproveitamento de lodo de ETA para a fabricação de elementos construtivos estruturais

estabilizados, conformados a frio por prensagem estática. De acordo com as constatações de Hoppen *et al.* (2005) a co-disposição de lodo de ETA, ainda úmido, em matrizes de concreto, substituindo-se parcialmente os agregados miúdos e o cimento, é positiva para traços de mistura com até 5% de lodo, sendo que estes podem ser aplicados em situações que vão desde a fabricação de artefatos e blocos até a construção de pavimentos em concreto de cimento Portland. Já os estudos de Geyer (2001) foram afirmativos para a utilização de lodo de ETEs, após incineração, como adição do concreto, substituindo parcialmente o cimento Portland. Concordando com as avaliações de Santos (2003), que apresentam um diagnóstico positivo para a reciclagem de lodo de esgoto em agregados leves, cerâmica vermelha e cimento Portland. Para Fontes (2003), os resultados evidenciaram o potencial de valorização do resíduo na construção civil.

As pesquisas realizadas com foco na incorporação da cinza do lodo de esgoto ao concreto, efetuadas por Geyer (2001) e Fontes (2003), concluíram que o aproveitamento do lodo na composição do concreto é uma alternativa benéfica do ponto de vista ambiental e técnico, já que os poluentes considerados perigosos são encapsulados na matriz cimentícia e as propriedades físicas e mecânicas são melhoradas, além da redução no consumo de cimento Portland das misturas. Segundo Geyer (2001) as possibilidades de utilização das cinzas se mostram restritas ao concreto de baixa resistência. Para Fontes (2003), a redução na resistência à compressão é pequena para uma substituição de até 30 % do resíduo, em relação à mistura feita apenas com cimento Portland; além disso, a capacidade de absorção de água dos corpos de prova aditivados com cinza foi reduzida, resultando em uma estrutura mais durável. Tal fenômeno é explicado pela granulometria do subproduto ser mais fina do que a do cimento Portland.

Considerando o fato de que grande parte dos estudos efetuados no Brasil fazem menção a utilização da cinza oriunda da incineração do lodo de esgoto, vale mencionar que as pesquisas de Morales (1999) para incorporação do subproduto ao concreto, indicam que a temperatura de queima mais adequada gira em torno de 700 °C, com um tempo de residência de uma hora. Assim, tem-se maior índice de reatividade pozolânica e ao mesmo tempo, a completa eliminação de matéria orgânica, tendo já se estabilizado as perdas de massa verificadas no decorrer do processo. Ainda, com relação à temperatura e ao tempo de queima, outras pesquisas são positivas para a queima a 550 °C por um período de duas horas (GEYER, 2001; MORALES, 2001; FONTES, 2003). Vale mencionar que, de acordo com Morales (1999), o material

calcinado é compatível com o cimento Portland para ser utilizado na forma de adição até 35 %, desenvolvendo propriedades aglomerantes na presença do hidróxido de cálcio liberada na hidratação do cimento.

Vislumbrando-se a possibilidade da utilização do subproduto em questão, como insumo para a fabricação de tubos de concreto de seção circular, ressalta-se que nenhuma pesquisa específica foi encontrada. Como já mencionado, a incorporação da cinza do lodo de esgoto ao concreto, seja pela substituição parcial do cimento Portland ou do agregado miúdo, é comumente aplicada em pesquisas acadêmicas. Contudo, poucos estudos foram encontrados considerando o aproveitamento do lodo de esgoto, tratado por via alcalina, na construção civil (TARRUYA, OKUNO e KANAYA, 2002; KIN, CHO e YIM, 2005; RODRÍGUES *et al.*, 2011).

O desenvolvimento deste estudo relaciona-se a valorização do lodo de esgoto na composição do concreto para fabricação de tubos de drenagem. O aproveitamento de resíduos sólidos permite o fechamento do ciclo de vida dos materiais, fazendo com que eles retornem como matéria-prima secundária, diminuindo assim a exploração dos recursos naturais. A relevância de tal medida é muito ampla, passa pela conscientização da sociedade quanto à questão ambiental como sendo vital à sobrevivência do homem, pela diminuição da exploração dos recursos naturais (desmatamento, mineração, etc.), pelo equacionamento do consumo de energia, assim como pela redução da poluição e da quantidade de resíduos destinados aos aterros sanitários.

### 2.3 TUBO DE CONCRETO

Os tubos de concreto são empregados em larga escala nas diversas intervenções da engenharia no ambiente. É comum sua aplicação em galerias, bueiros, sistemas de drenagem, condução de efluentes domésticos, condução de águas pluviais e abastecimento de água. Sua fabricação exige equipamentos específicos e controle do processo produtivo, no sentido de garantir a qualidade do produto final, assim como a economia e homogeneidade em suas características. Neste sentido, a norma técnica NBR 8.890 (ABNT, 2007) estabelece que a moldagem de um tubo de concreto deve ser efetuada por processo industrial adequado às características do produto final, quanto à resistência mecânica, permeabilidade, estanqueidade, absorção, dimensão e acabamento. Em vista disso, alguns requisitos normativos específicos são descritos na sequência.

### → Acabamento

As superfícies internas e externas dos tubos devem ser regulares e homogêneas, compatíveis com o processo de fabricação, não devendo apresentar defeitos visíveis a olho nu ou detectável através de percussão, e que sejam prejudiciais a qualidade do tubo quanto à resistência, impermeabilidade e durabilidade. Após o fim de pega do cimento e mediante aprovação do comprador, podem ser executados reparos de defeitos de dimensões inferiores ao especificado a seguir, com materiais e procedimentos adequados e fiscalizados pelo comprador. Tubos com bolhas ou furos superficiais com diâmetros superior a 10 mm e profundidade superior a 5 mm, assim como fissuras com abertura maior que 0,15 mm, não devem ser aceitos. O acabamento da superfície interna do tubo deve ser avaliado de acordo com o gabarito da Figura 2.

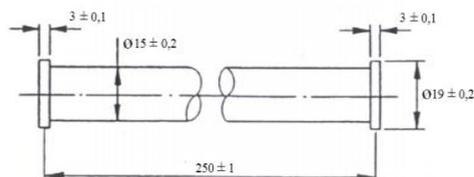


Figura 2. Gabarito – verificação do acabamento de tubos de concreto.

Devem ser aprovados os tubos cuja parede não é tocada pela parte central do gabarito, quando este é rolado em movimentos circulares com o eixo paralelo ao eixo do tubo.

### → Dimensões Nominais

O Anexo A da NBR 8.890 (ABNT, 2007) apresenta a relação das dimensões e resistências aplicáveis aos tubos de concreto para esgoto doméstico e água pluvial. Para este estudo optou-se por trabalhar com tubos de concreto com diâmetro nominal (DN) de 400, comprimento mínimo da bolsa de 65 mm, espessura interna da parede de 55 mm e comprimento útil mínimo do tubo de 1000 mm. Considerando que: o diâmetro interno médio não deve diferir mais de 1 % do diâmetro nominal; para a espessura de parede não são admitidas diferenças para menos de 5 % da espessura declarada ou 5 mm, adotando-se sempre o

menor valor; o comprimento útil não deve diferir da dimensão declarada em mais de 20 mm para menos nem mais de 50 mm para mais.

#### → **Compressão Diametral**

A resistência a compressão diametral deve ser avaliada conforme o descrito no Anexo B da NBR 8.890 (ABNT, 2007), sendo que para tubos com as características supracitadas, destinados a condução de efluentes domésticos e água pluvial, a carga mínima de ruptura deve ser de 36 kN/m e 16 kN/m, respectivamente.

#### → **Permeabilidade e Estanqueidade**

A determinação da permeabilidade e da estanqueidade dos tubos, deve ser realizada de acordo com os Anexos C e E da NBR 8.890 (ABNT, 2007). Os tubos para esgoto sanitário não devem apresentar vazamento, quando submetidos à pressão de 0,1 MPa durante o período de 30 minutos, e os tubos para água pluvial não devem apresentar vazamento, quando submetidos à pressão de 0,05 MPa durante o período de 15 minutos. Manchas de umidade, bem como gotas aderentes não devem ser consideradas como vazamentos.

#### → **Absorção**

A absorção deve ser determinada de acordo com o Anexo D da NBR 8.890 (ABNT, 2007). Os tubos devem ter absorção máxima de água, em relação à sua massa seca, limitada a 6 % para esgoto sanitário e 8 % para água pluvial.

#### → **Formação de Lotes para Ensaio**

Os tubos de mesmo diâmetro, classe e acessórios, de cada fornecimento, devem ser agrupados em lotes de 100 peças. A dimensão dos lotes pode ser aumentada de comum acordo entre comprador e produtor, limitado a um período de produção de 15 dias.

#### → **Número de Corpos de Prova para Ensaio**

Para tubos destinados à condução de esgoto sanitário e água pluvial, a amostra é constituída de quatro peças por lote, pois dois tubos

devem ser submetidos ao ensaio de compressão diametral e dois tubos devem ser submetidos ao ensaio de permeabilidade e estanqueidade. Posteriormente ao ensaio de compressão diametral, devem ser retiradas duas amostras indeformáveis por tubo submetido à ruptura (uma da região da ponta e a outra da região da bolsa) para realização do ensaio de absorção.

Tais critérios devem ser seguidos quando da fabricação e avaliação técnica de tubos de concreto. Dado o interesse na incorporação de materiais alternativos ao concreto para a fabricação de tubos de drenagem, apresenta-se a seguir algumas considerações relativamente ao concreto e atividade pozolânica do lodo de esgoto.

### **2.3.1 Concreto**

O concreto é um material composto que consiste essencialmente de um meio contínuo aglomerante, dentro do qual estão mergulhadas partículas ou fragmentos de agregados (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Os concretos de cimento Portland têm inúmeras aplicações e finalidades, podendo ser classificados em dois grandes grupos: concretos plásticos e concretos secos. O primeiro é utilizado em obras de concreto armado e o segundo é empregado na fabricação blocos de alvenaria estrutural, tubos e outros. Entre as várias diferenças existentes para os dois grupos de concretos, cabe salientar apenas que os secos apresentam consistência significativamente superior aos plásticos, devido à menor quantidade de água empregada, consequência da necessidade de desforma imediata (MARCHAND, 1996).

O concreto é um material bifásico, constituído por uma fase pasta (cimento Portland + água) e outra fase agregado (agregado miúdo e graúdo), cada qual com funções bem definidas. Como trata-se de um material estrutural, após seu endurecimento, deve apresentar resistência mecânica e durabilidade. Sua resistência progride com a idade, e isso pode ser explicado pelo mecanismo de hidratação do cimento que se processa ao longo do tempo, tornando o material progressivamente menos poroso (MEHTA e MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1997). Assim, alguns detalhes relativamente a cada um dos materiais básicos que compõem o concreto são apresentados nos itens a seguir.

## → Cimento

Existem vários tipos de cimento, que são frequentemente utilizados na indústria da construção civil. O cimento Portland é constituído principalmente por quatro componentes anidros: silicato tricálcico ( $C_3S$ ), silicato bicálcico ( $C_2S$ ), aluminato tricalcico ( $C_3A$ ) e ferroaluminato tetracálcico ( $C_4AF$ ) (NEVILLE, 1997). Com relação à hidratação do cimento é possível inferir basicamente que, ao reagir com a água por hidrólise, os constituintes do cimento dão origem a outros compostos, como os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), que são compostos mais estáveis cuja sua formação resulta na liberação grande quantidade de hidróxido de cálcio ( $Ca(OH)_2$ ) e conduz a um aumento da resistência da pasta (PETRUCCI, 1993; NEVILLE, 1997).

De acordo com os preceitos da NBR 8.890 (ABNT, 2007) para tubos destinados a águas pluviais qualquer tipo de cimento Portland pode ser utilizado. E, para os tubos destinados a esgotos sanitários deve-se utilizar cimento resistente a sulfato, o CP V ARI (Cimento Portland de Alta Resistência Inicial), em função da elevada resistência que proporciona nas primeiras idades, permitindo assim a desforma e a paletização mais rápida dos produtos, vide NBR 5.737 (ABNT, 1992). O cimento CP V ARI possui em sua composição maiores teores de silicato tricálcico ( $C_3S$ ) e em função de sua moagem ser mais fina do que a do cimento comum, desenvolve maior resistência inicial, como consta na NBR 5.737 (ABNT, 1992).

## → Agregado Miúdo

Os agregados miúdos comumente empregados na produção de tubos de concreto são as areias naturais, oriundas de rios ou de cavas (ALBUQUERQUE, 2000). Segundo Medeiros (1993), as características destes materiais podem interferir na aderência com a pasta de cimento, e afetar a resistência da peças. Outra consideração relaciona-se a resistência mecânica dos próprios agregados, uma vez que estes ocupam a maior parte do volume existente no concreto e também permitem maior ou menor grau de compactação, de acordo com sua distribuição granulométrica. Para Ferreira (1991) e Medeiros (1993) a distribuição granulométrica das areias deve ser contínua, pois a falta de continuidade desse material pode interferir na qualidade do produto final. Além disso, deve-se exigir que a areia apresente outros requisitos de qualidade, tais como teores de argila inferior a 1,5 %, teor de materiais carbonosos

inferior a 1,0 %, e teor de materiais pulverulentos inferior a 3,0 %. A quantidade de impurezas orgânicas deve ser inferior a 300 ppm (RODRIGUES, 1984). A qualidade dos agregados é de fundamental importância para a obtenção das propriedades requeridas quando da fabricação de tubos de concreto.

#### → **Agregado Graúdo**

Os agregados graúdos empregados para a fabricação de tubos de concreto são os provenientes do britamento de rochas compactas (depósitos geológico – jazidas), e atendem pela denominação comercial de brita nº “0” ou pedrisco. Estes são mais indicados por apresentarem, geralmente, uma melhor aderência com a pasta de cimento, o que favorece a obtenção de resistências mecânicas mais elevadas (ALBUQUERQUE, 2000). Outras propriedades, como o teor de material pulverulento (< 1,0 %), teor de partículas friáveis (< 2,0 %) e materiais carbonosos (< 1,0 %), também devem ser observadas nos agregados graúdos, conforme estabelece a norma NBR 7.211 (ABNT, 2009).

#### → **Água**

A quantidade de água na mistura tem função primordial, dado que pode influenciar na resistência final do concreto. O volume de água é estabelecido em função da quantidade de aglomerante presente, e sua absorção pelos grãos do agregado é determinada pela maior ou menor porosidade do material que compõem as partículas dos mesmos (ex.: argila expandida, quartzo, basalto e outros) e não pela porosidade do agregado propriamente dito (ALBUQUERQUE, 2000).

A qualidade da água também tem um papel importante, pois impurezas contidas nela podem influenciar negativamente a resistência do concreto ou causar manchas na sua superfície. A água de amassamento não deve conter matérias orgânicas indesejáveis nem substâncias inorgânicas em teores excessivos (NEVILLE, 1997). Comumente, a água potável fornecida pela rede normal de abastecimento é satisfatória para a produção do concreto. Segundo a NBR 8.890 (ABNT, 2007) a água para fabricação de tubos deve atender os requisitos da NM 137 (ABNT, 1997).

## → **Dosagem do concreto**

A dosagem do concreto é o processo pelo qual se faz a seleção de componentes adequados, determinando suas quantidades relativas, a fim de obter-se uma pasta que preencha basicamente os requisitos de trabalhabilidade, resistência mecânica e durabilidade. A dosagem de um concreto seco busca atingir os critérios de desempenho exigidos pelas normas vigentes, além de um bom acabamento superficial para as peças produzidas.

Uma vez definida a dosagem do concreto, deve-se efetuar o seu proporcionamento, que pode ser volumétrico ou gravimétrico, sendo recomendável que os agregados e o cimento sejam dosados em massa, em função do inchamento da areia úmida que pode ocasionar erros nas medições. Com relação à água, deve ser adicionada em volume. Após o proporcionamento, deve-se efetuar a adequada mistura dos materiais, de modo a produzir um concreto fresco no qual todas as partículas dos agregados sejam revestidas pela pasta de cimento, tornando-se assim uma mistura homogênea (NEVILLE, 1997).

Segundo a NBR 8.890 (ABNT, 2007), a relação água/cimento, expressa em litros de água por quilograma de cimento, deve ser de no máximo 0,50 para tubos destinados a águas pluviais e 0,45 para tubos destinados a esgotos sanitários, com consumo de cimento determinado de acordo com a NBR 12.655 (ABNT, 2006). Segundo Díaz (2000) dosagens com relação água/cimento menores do que 0,4 resultam em concretos com excesso de pasta de cimento, o que acarreta um decréscimo de sua resistência à compressão.

Com base na literatura específica, é plausível afirmar que são muitas as propriedades físicas dos materiais constituintes do concreto que podem efetivamente influenciar na resistência e qualidade do produto final produzido (PETRUCCI, 1993; MEHTA e MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1997). De acordo com a NBR 8.890 (ABNT, 2007), a escolha dos materiais para a produção do concreto destinado à fabricação de tubos deve considerar a agressividade do meio, interno e externo, onde os mesmos serão instalados. E ainda, a escolha dos agregados, tanto miúdo como graúdo, deve atender as exigências da NBR 7.211 (ABNT, 2009).

### 2.3.2 Atividade Pozolânica

O termo pozolana é empregado para materiais naturais ou artificiais, sendo o seu principal efeito, a sua capacidade de fixar o hidróxido de cálcio liberado na hidratação do cimento Portland (MORALES e DANTAS, 1995). Um material pozolânico serve como superfície para a sedimentação dos produtos provenientes da hidratação do cimento Portland e proporcionam um incremento de C-S-H, sendo que a pozolana consome o hidróxido de cálcio liberado e dá origem a uma estrutura cristalina rígida (MORALES, 1999).

De acordo com a NBR 12.653 (ABNT, 1992) as pozolanas podem ser classificadas de acordo com sua origem, como indica a Tabela 7. Neste estudo, o lodo de esgoto tratado é considerado um material pozolânico para ser utilizado na produção do concreto.

Tabela 7. Classificação de pozolanas segundo a sua origem.

Classe	Origem
N	Pozolanas naturais e artificiais, tais como materiais vulcânicos, terras diatomáceas e argilas calcinadas.
C	Cinza volante proveniente da queima de carvão betuminoso.
E	Qualquer pozolana cujos requisitos difiram das outras classes e a cinza volante resultante da queima de carvão sub-betuminoso.

FONTE: Adaptado de NBR 12.653 (ABNT, 1992).

Com relação à reação pozolânica salienta-se que o processo necessita da formação prévia do hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), o que resulta em processos lentos no que tange ao desenvolvimento de resistência. Todavia, os produtos desta reação são bastante eficientes no preenchimento dos espaços capilares grandes, o que contribui para a resistência e a durabilidade do sistema (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Segundo Kronlof (1994) o material pozolânico, em função de sua extrema finura, desempenha um papel físico no preenchimento de pequenos espaços, melhorando a resistência à compressão devido à interação com a pasta de cimento, interferindo na formação e orientação de cristais na interface pasta-agregado, e reduzindo o atrito interno nas interfaces, com a redução da porosidade.

Com base em bibliografias já consolidadas e em pesquisas recentemente desenvolvidas, é possível inferir que as propriedades pozolânicas de um material aumentam na proporção direta que aumenta a quantidade de partículas finas e a sua área específica. Para que uma partícula seja reativa, é necessário que a mesma encontre-se

preferencialmente na forma amorfa e não cristalina, pois na forma cristalina as partículas apresentam pouca reatividade (MEHTA e MONTEIRO, 1994; GAVA, 1999; PAN *et al.*, 2003; COUTAND, CLY e CLASTRES, 2006)

### → **Lodo de Esgoto como Material Pozolânico**

O lodo de esgoto apresenta considerável atividade pozolânica após ser submetido a adequado tratamento térmico e operação de moagem (MORALES e DANTAS, 1995). A atividade pozolânica de subprodutos, resultantes da incineração do lodo de esgoto e da mistura deste resíduo à cal, também foi comprovada por outros autores (MONZÓ *et al.*, 1996; PAN *et al.*, 2003; KIM, CHO e YIM, 2005; COUTAND, CLY e CLASTRES, 2006).

Neste sentido, a determinação do índice de atividade pozolânica (IAP) de um subproduto do tratamento de lodo de esgoto, se faz necessária quando se deseja utilizá-lo como material ativo, pois, assim tem-se a possibilidade de prever o comportamento hidráulico desse material quando de sua aplicação em argamassas ou concretos. Existem diversos métodos normalizados no Brasil e no exterior para a determinação do IAP, sendo que todos são baseados na determinação da resistência mecânica de argamassas ou em ensaios químicos (GAVA, 1999). Os estudos realizados pela mesma autora indicam que, além das propriedades físicas e mineralógicas da pozolana, fatores externos como as características do cimento Portland, a relação água/cimento, a temperatura e as condições de cura, podem contribuir em muito para alteração dos resultados quando da determinação do IAP.

## CAPÍTULO III – MATERIAIS E MÉTODOS

---

O desenvolvimento deste estudo prevê a incorporação do lodo de esgoto tratado ao concreto para a fabricação de tubos, a serem utilizados em redes coletoras de efluentes domésticos. Considerando que, a utilização deste resíduo como subproduto de um processo produtivo só é viável mediante sua estabilização e higienização, a abordagem relativa à parte experimental refere-se ao tratamento lodo de esgoto *in natura* e à fabricação experimental de tubos de concreto com incorporação do resíduo tratado. Os métodos utilizados nas etapas de tratamento de dados também são descritos neste capítulo.

### 3.1 LODO DE ESGOTO

O resíduo em estudo tem origem na Estação de Tratamento de Esgotos Insular, localizada no município de Florianópolis, Santa Catarina (Figura 3). A operação desta ETE iniciou em outubro de 1997, sendo que foi projetada para atender 150.000 habitantes (vazão máxima de 278 L/s), e atualmente atende cerca de 140.000 habitantes. O tratamento de efluentes é do tipo lodos ativados de aeração prolongada e é constituído por unidades anóxicas (seletores biológicos e câmaras de desnitrificação) antecedendo os tanques de aeração de mistura completa (Bento, *et al.*, 2005). Segundo informações da companhia responsável, a produção de lodo gira em torno de 35 m<sup>3</sup>/dia, sendo que este montante varia de acordo com o controle operacional do sistema. O seu destino final é o aterro sanitário da empresa Proactiva, localizado no município de Biguaçu, a 38 km da Capital. O valor pago pela CASAN para o transporte e destinação final do resíduo é de R\$ 125,16 (cento e vinte cinco reais e dezesseis centavos) por metro cúbico. Todavia, cabe mencionar que o processo implantado na ETE Insular já não apresenta a eficiência requerida para o tratamento do lodo de esgoto e o aproveitamento deste resíduo está condicionado à sua estabilização e higienização, assim, processos complementares devem ser implantados de tal forma a suprir esta deficiência no sistema.

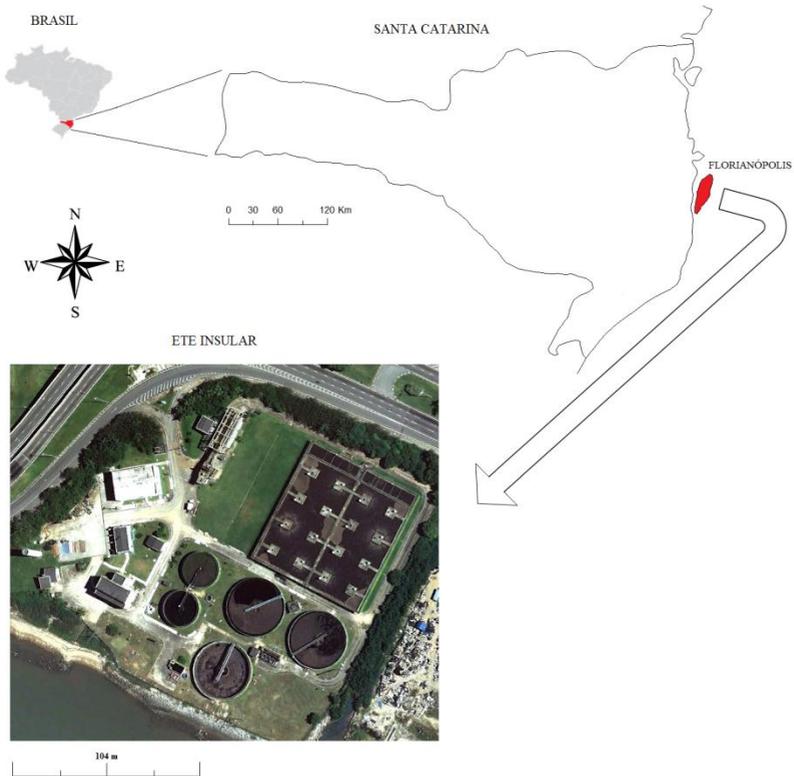


Figura 3. Localização da ETE Insular.

Os processos de tratamento do esgoto doméstico aplicados na ETE Insular são apresentados na Figura 4.



foram realizadas seguindo os preceitos da NBR 10.007 (ABNT, 2004a) e da Resolução CONAMA nº 375 (BRASIL, 2006). Assim, para cada coleta obteve-se uma amostra composta, adquirida a partir de 8 amostras simples, retiradas em pontos distintos da saída do sistema de desidratação de lodo de esgoto; as amostras simples foram misturadas e homogeneizadas e, em seguida, efetuou-se o quarteramento<sup>2</sup> para obtenção de uma porção representativa do resíduo.

### 3.1.1.1 Caracterização Simples

O desenvolvimento destas análises é justificado pela necessidade da realização de muitas coletas de lodo de esgoto ao longo do ano, para efetivação de todas as etapas que envolveram esta pesquisa. Assim, o objetivo foi avaliar a variação de parâmetros específicos, em períodos curtos de tempo. A Tabela 8 apresenta as análises e a periodicidade em que foram realizadas.

Tabela 8. Parâmetros avaliados na caracterização simples.

Parâmetro	Metodologia/Método	Periodicidade	Duração
pH	Potenciométrico	Diária	1 semana
		Semanal	1 mês
		Quinzenal	2 meses
Sólidos Totais, Voláteis e Fixos	Gravimétrico	Diária	1 semana
		Semanal	1 mês
		Quinzenal	2 meses

O resíduo coletado foi armazenado em saco previamente autoclavado e transportado para o Laboratório Integrado de Meio Ambiente (LIMA) da UFSC, onde as análises foram realizadas. Em cada amostragem, uma alíquota de aproximadamente 1 kg de material foi coletada. Esta caracterização foi executada durante um período de 178 dias. Os resultados obtidos foram comparados com os valores de referência da literatura, bem como, com as considerações estabelecidas pela Resolução CONAMA nº 375 (BRASIL, 2006).

<sup>2</sup> Quarteramento: Processo de divisão em quatro partes iguais de uma amostra pré-homogeneizada, sendo tomadas duas partes opostas entre si para constituir uma nova amostra e descartadas as partes restantes. As partes não descartadas são misturadas totalmente e o processo de quarteramento é repetido até que se obtenha o volume desejado (ABNT, 2004a).

### 3.1.1.2 Caracterização Geral

Esta etapa foi realizada sazonalmente, de tal forma a obter-se dados físicos, químicos e biológicos do resíduo ao passo que alteravam-se as estações climáticas do ano. Foram efetuadas quatro coletas de lodo objetivando a sua caracterização. Esta configuração foi adotada em função do estabelecido pela Resolução CONAMA nº 375 (BRASIL, 2006), relativamente à caracterização de lodo de esgoto.

O material coletado foi armazenado em saco previamente autoclavado e transportado para o laboratório onde as análises foram realizadas. Em cada amostragem, uma alíquota de aproximadamente 2 kg de material foi coletada. Os parâmetros físico-químicos avaliados constam na Tabela 9.

Tabela 9. Parâmetros da caracterização físico-química.

Parâmetro	Unidade	Metodologia/Método	
pH em água 1:5	-	Potenciométrico	
pH em CaCl <sub>2</sub>	-		
Teor de Sólidos Totais	% (m/m)	Gravimétrico	
Teor de Sólidos Fixos	% ST (m/m)		
Teor de Sólidos Voláteis	% ST (m/m)		
Carbono Orgânico Total	% (m/m)	Oxidação – K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	
Matéria Orgânica	% (m/m)		
Cálcio (Ca)	%	Espectrofotometria de Absorção Atômica – Chama	
Magnésio (Mg)	%		
Zinco (Zn)	mg/kg		
Ferro (Fe)	mg/kg		
Cobre (Cu)	mg/kg		
Bário (Ba)	mg/kg		
Níquel (Ni)	mg/kg		
Cádmio (Cd)	mg/kg		
Chumbo (Pb)	mg/kg		
Cromo (Cr)	mg/kg		
Selênio (Se)	mg/kg		
Molibdênio (Mo)	mg/kg		Forno de Grafite
Arsênio (As)	mg/kg		
Mercúrio (Hg)	mg/kg		
Umidade a 105 ± 5 °C	%	Vapor Frio	
Densidade	g/cm <sup>3</sup>	Gravimétrico	
Nitrogênio Total	mg/L		
Nitrogênio Amoniacal	mg/L	Kjeldahl titulométrico	
Teor de cinzas a 850 °C	%		
		Gravimétrico	

Na Tabela 10 são descritos os parâmetros microbiológicos avaliados.

Tabela 10. Parâmetros da caracterização microbiológica.

Parâmetro	Unidade	Metodologia/Método
Coliformes Totais e Fecais	NMP/g	Tubos Múltiplos/placas
<i>Escherichia coli</i>	NMP/g	MAPA, SDA, 2003 (IN SDA N° 62/2003)
Ovos de Helminhos	NMP/g	EPA (2003)

Como forma de complementação da caracterização, análises de lixiviação e solubilização foram efetuadas, e os parâmetros apresentados na Tabela 11 foram avaliados. Destaca-se que essas análises foram realizadas apenas para uma campanha de caracterização.

Tabela 11. Parâmetros complementares da caracterização.

Parâmetro	Unidade	Metodologia/Método
Lixiviação	Arsênio (As)	µg/L
	Bário (Ba)	mg/L
	Cádmio (Cd)	mg/L
	Chumbo (Pb)	mg/L
	Cromo (Cr)	mg/L
	Mercúrio (Hg)	µg/L
	Selênio (Se)	µg/L
	Fluoreto (F <sup>-1</sup> )	mg/L
	Prata (Ag)	mg/L
Solubilização	Alumínio (Al)	mg/L
	Arsênio (As)	µg/L
	Bário (Ba)	mg/L
	Cádmio (Cd)	mg/L

A análise dos parâmetros apresentados nas Tabelas 9, 10 e 11 foi terceirizada e efetuada em laboratório externo. Os resultados obtidos foram comparados com os valores de referência da literatura, bem como, com as considerações estabelecidas pela Resolução CONAMA n° 375 (BRASIL, 2006) e NBR 10.004 (ABNT, 2004d).

### 3.1.2 Estabilização e Higienização

A estabilização e a higienização do lodo de esgoto foram realizadas por dois métodos distintos, caleação e térmico. De cada processo o objetivo foi, além do tratamento do resíduo propriamente dito, obter diferentes subprodutos para serem testados na composição do concreto. O fluxograma da Figura 5 apresenta uma simplificação esquemática dos procedimentos aplicados.

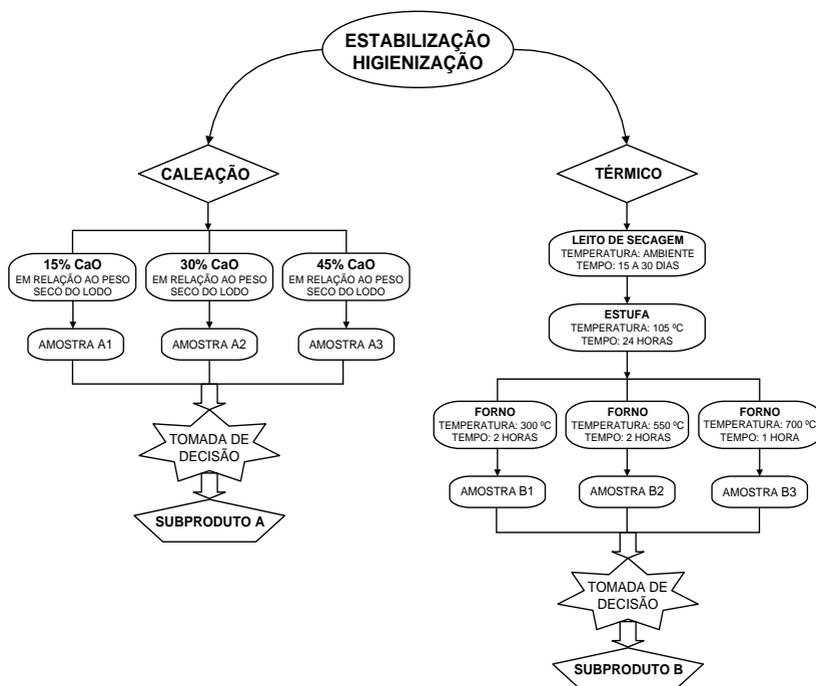


Figura 5. Processo de tratamento do lodo de esgoto *in natura*.

Vale mencionar que a tomada de decisão consistiu na escolha de duas amostras, entre as seis geradas (A1, A2, A3, B1, B2 e B3), para serem utilizadas na continuidade da pesquisa, mais especificamente na produção de artefatos de concreto. Esta escolha foi fundamentada no grau de estabilização e higienização, no índice de atividade pozolânica (detalhe no *item 3.2.1*) e na viabilidade técnica, econômica e ambiental para geração de cada amostra. O detalhamento de cada um dos procedimentos aplicados no tratamento do lodo de esgoto consta nos itens a seguir.

### 3.1.2.1 Coleta

Dada a necessidade de grande quantidade de lodo de esgoto para os processos de estabilização e higienização, o resíduo foi coletado junto a ETE em seis datas distintas. As coletas foram realizadas diretamente na saída do sistema de desidratação de lodo. Um caminhão caçamba foi utilizado para o transporte do material até o Laboratório de Pesquisas em Resíduos Sólidos – Área Experimental da UFSC. O caminhão foi devidamente preparado com a colocação de uma lona plástica, formando uma espécie de forro no local onde o lodo foi depositado para o transporte, como mostra a Figura 6.



Figura 6. Coleta de lodo de esgoto *in natura*. A) Vista geral – saída do sistema de desidratação de lodo e caminhão caçamba; B) Vista superior – caçamba do caminhão; C) Vista lateral – caçamba do caminhão e saída do sistema de desidratação de lodo.

A cada coleta foi recolhido aproximadamente  $2 \text{ m}^3$  de resíduo, totalizando  $12 \text{ m}^3$  ao final das coletas (6 coletas realizadas). Esta etapa foi finalizada quando a demanda pelo resíduo foi cessada.

### 3.1.2.2 Caleação

Dado que a caleação é um processo químico que envolve a adição de cal virgem (CaO) ao lodo de esgoto, para esta pesquisa as percentagens de mistura foram de 0, 15, 30 e 45 % de CaO em relação ao peso seco do lodo, seguido do armazenamento do material resultante em estufa agrícola por um período de 90 dias. A quantidade inicial de lodo foi fixada e a quantidade cal virgem a ser adicionada foi obtida através da Equação 4.

$$M_{CaO} = [(M_{lodo} \times (1 - h)) \times p_{CaO}] \div P_{CaO} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

$M_{CaO}$  = massa de cal virgem a ser adicionada (kg);

$M_{lodo}$  = massa inicial de lodo de esgoto (kg);

$h$  = umidade do lodo de esgoto (% / 100);

$p_{CaO}$  = percentual de cal virgem requerido para a mistura (% / 100);

$P_{CaO}$  = grau de pureza da cal virgem (% / 100).

A cal virgem utilizada apresentava pureza de 55 % e o laudo fornecido pelo seu fabricante consta no Anexo I. O detalhamento do procedimento aplicado consta na Figura 7.

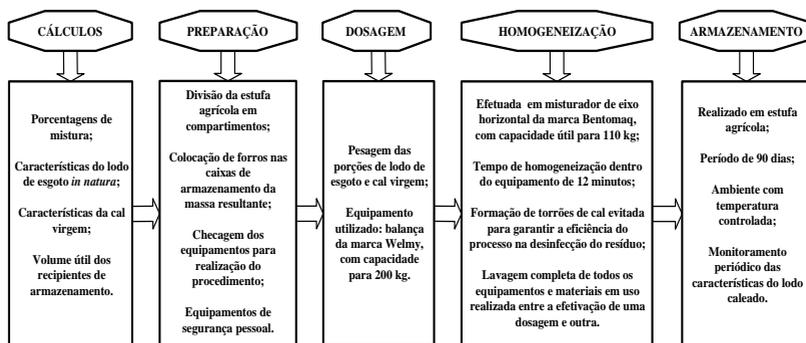


Figura 7. Processo de caleação.

Esta metodologia foi desenvolvida com base em literatura específica da área (ANDREOLI, FERNANDES e VON SPERLING, 2001; ANDREOLI *et al.*, 2001; ANDREOLI, 2001; ANDREOLI, 2006), sendo que técnica similar foi implantada por Lima (2010) e Comparini (2001).

O procedimento de caleação foi realizado no Laboratório de Pesquisas em Resíduos Sólidos – Área Experimental, dentro das instalações da UFSC. Na Figura 8 apresentam-se imagens da caleação do lodo de esgoto.



Figura 8. Processo de caleação. A) Recipiente de armazenamento; B) Balança; e C) Misturador de eixo horizontal; D) Recipiente com lodo de esgoto *in natura*; E) Recipiente com cal virgem; F) Misturador antes da homogeneização; G) Misturador depois da homogeneização; H) Retirada e transferência do material; e I) Acondicionamento do material na caixa de armazenamento.

Por determinação da Resolução CONAMA nº 375 (BRASIL, 2006) durante a caleação o pH foi elevado, pelo menos até 12 por um período mínimo de 2 horas, e mantido acima de 11,5 por mais 22 horas. Assim, para efetivação do controle das variações de tal parâmetro, foi efetuado o seu monitorado periódico durante o processo, sendo que a temperatura ambiente e a temperatura do resíduo *in natura* também foram medidas. Para tanto, foi utilizado um phmetro digital e um termômetro de bulbo com graduação de 0 a 60 °C, salientando que, para a avaliação do pH, o procedimento foi de acordo com o método da SANEPAR (2000) pois este trata especificamente da análise para lodo de esgoto.

O monitoramento de parâmetros para o controle do processo de estabilização e higienização, também foi realizado durante o período de secagem. Na Tabela 12 estão especificados as metodologias de análise, a forma de preservação, o período máximo de estocagem das amostras, e periodicidade em que foram realizadas.

A coleta do material foi realizada de acordo com os preceitos da NBR 10.007 (ABNT, 2004a), sendo que em cada amostragem obteve-se uma amostra composta a partir de 8 amostras simples, retiradas em posições e profundidades diferenciadas das leiras; as amostras simples foram misturadas e homogeneizadas e, em seguida, efetuou-se o quartearamento<sup>2</sup> para obtenção de uma porção representativa do resíduo. As análises referentes ao monitoramento foram realizadas no laboratório LIMA da UFSC, sendo que a temperatura do material foi medida diretamente nas caixas de armazenamento, em dois pontos distintos. Para evitar a secagem superficial da massa resultante da caleação, efetuou-se o revolvimento do material três vezes por semana.

Tabela 12. Parâmetros analisados no monitoramento da caleação.

Parâmetro	Metodologia/Método	Preservação da Amostra <sup>1</sup>	Período de Estocagem Máxima (dias) <sup>1</sup>	Periodicidade
Sólidos Totais, Voláteis e Fixos	SANEPAR, 2000	Resfriar a 4 °C	7	Quinzenal
Coliformes Fecais	Kit colilert	Resfriar a 4 °C	1	Quinzenal
Temperatura	Termômetro bulbo graduação 0 a 60 °C	-	Imediato	Semanal
Umidade	SANEPAR (2000)	-	Imediato	Semanal
pH	SANEPAR (2000)	-	Imediato	Semanal

<sup>1</sup> Os métodos de preservação e tempo de estocagem foram determinados de acordo com a NBR 10.007 (ABNT, 2004a).

Com a finalização do período de 90 dias, as amostras foram moídas em triturador de resíduos, peneiradas em peneira com abertura de 2 mm e acondicionadas em sacos para o seu armazenamento. Na Figura 9 constam algumas imagens de tal procedimento.



Figura 9. Moagem do lodo caleado. A) Trituração dos torrões de lodo; B) Subproduto antes e depois da moagem; e C) subproduto ensacado.

Após o armazenamento do material e a finalização desta etapa, análises detalhadas foram realizadas em cada uma das amostras (A1, A2 e A3, vide Figura 5). Os parâmetros avaliados constam nas Tabelas 9 e 10, acima apresentadas. Os resultados obtidos, tanto durante o monitoramento quanto na caracterização final, foram comparados com os valores de referência da literatura e, com as considerações estabelecidas pela Resolução CONAMA n° 375 (BRASIL, 2006).

Todo o processo de caleação foi repetido, nas mesmas condições de execução, armazenamento e monitoramento, a fim de se obter maior representatividade dos resultados inicialmente obtidos. O primeiro experimento foi montado nos dias 3 e 30 de setembro de 2010 (inverno – primavera) e o segundo experimento no dia 31 de março de 2011 (outono – inverno).

### 3.1.2.3 Tratamento Térmico

O processo térmico tem por base a submissão do lodo de esgoto a temperaturas elevadas, para tanto esta etapa envolve diferentes estágios de exposição ao calor.

#### I. Secagem ao Ar – temperatura ambiente

O resíduo *in natura* foi armazenado em caixas de secagem e mantido em estufa agrícola, por um período de tempo que variou de 15 a 30 dias. O objetivo foi atingir umidade de aproximadamente 50 %. Assim, o lodo só foi retirado do leito de secagem quando atingiu este patamar. O monitoramento da umidade foi realizado semanalmente.

Adotou-se a etapa de secagem ao ar para reduzir o volume do resíduo, haja vista a umidade elevada do mesmo e a necessidade de posterior secagem em estufa elétrica.

#### II. Secagem em Estufa – temperatura de 105 °C

Ao final da secagem ao ar o resíduo foi fracionado e transferido para estufa a 105 °C, por um período de 24 horas. Após esta etapa, todo material foi moído, peneirado (abertura da peneira de 2 mm), homogeneizado e armazenado em sacos apropriados.

Este procedimento (estágios I e II) foi efetuado repetidas vezes, até a obtenção de uma quantidade representativa do resíduo. O montante resultante desta etapa foi dividido em três frações, e cada uma foi submetida a um processo de queima diferenciado (estágios III, IV e V).

### III-a. Secagem em Forno de Alto Aquecimento – temperatura de 300 °C

O material resultante da secagem em estufa (estágio II) foi transferido para esta etapa e submetido à queima a 300 °C em forno de alto aquecimento, por um período de duas horas. A cinza resultante foi armazenada em sacos apropriados.

### III-b. Secagem em Forno de Alto Aquecimento – temperatura de 550 °C

O material resultante da secagem em estufa (estágio II) foi transferido para esta etapa e submetido à queima a 550 °C em forno de alto aquecimento, por um período de duas horas. A cinza resultante foi armazenada em sacos apropriados.

### III-c. Secagem em Forno de Alto Aquecimento – temperatura de 700 °C

O material resultante da secagem em estufa (estágio II) foi transferido para esta etapa e submetido à queima a 700 °C em forno de alto aquecimento, por um período de uma hora. A cinza resultante foi armazenada em sacos apropriados.

Na Figura 10 são apresentadas imagens do processo térmico aplicado no lodo da ETE Insular.

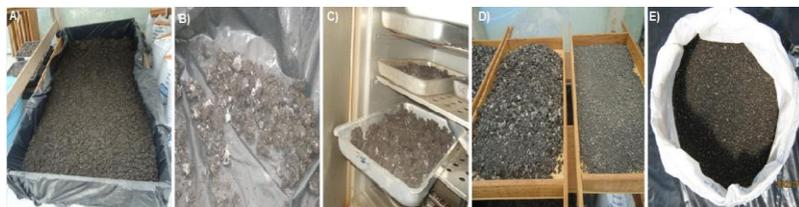


Figura 10. Processo térmico. A) Início da secagem ao ar; B) Término da secagem ao ar. C) Secagem em estufa a 105 °C. D) Lodo seco a 105 °C, antes e depois da moagem. E) Subproduto moído e ensacado.

Cada uma das amostras resultantes das etapas III-a, III-b e III-c (B1, B2 e B3, vide Figura 5), foram submetidas à análise dos parâmetros apresentados nas Tabelas 9 e 10. Os resultados obtidos foram avaliados de acordo com os valores de referência da literatura, bem como, com as considerações estabelecidas pela Resolução CONAMA n° 375 (BRASIL, 2006).

Neste contexto, as amostras resultantes desta etapa de estabilização e higienização do lodo de esgoto foram utilizadas na fase seguinte, que aborda fundamentalmente a determinação do índice de atividade pozolânica.

## 3.2 TUBOS DE CONCRETO

A fabricação experimental de tubos de concreto envolveu três etapas. A primeira foi a determinação do índice de atividade pozolânica dos materiais, a segunda foi o teste de dosagem, e a última foi a produção dos tubos de concreto.

### 3.2.1 Índice de Atividade Pozolânica

Para efetivação deste teste os preceitos da NBR 5.752 (ABNT, 1992) foram seguidos, basicamente as atividades desenvolvidas foram:

- Preparo de uma argamassa no traço 1:3 (cimento:areia normal) e relação água/cimento (a/c) de 0,48. O cimento utilizado foi CP V ARI PURO e os corpos de prova (CPs) produzidos com esta argamassa foram utilizados como de referência, quando da realização do ensaio de compressão;
- Preparo de seis argamassas no traço 1:3 (cimento:areia normal) com o diferencial de que, para cada massa 35 % do volume absoluto de cimento foi substituído por uma pozolana diferente. As amostras A1, A2, A3, B1, B2 e B3 (Figura 5) foram testadas, todas oriundas do processo de estabilização e higienização do lodo. O cimento utilizado foi CP V ARI PURO;
- A consistência das argamassas foi mantida fixa em 225 mm (admitiu-se variações para mais ou para menos de 5 mm), e o controle foi efetuado através da quantidade de água adicionada em cada massa;
- A mistura dos materiais e a moldagem dos corpos de prova foram realizadas conforme a NBR 7.215 (ABNT, 1991), sendo que, para cada uma das argamassas foram moldados quatro corpos de prova cilíndricos de 5 x 10 mm;
- Durante as primeiras 24 horas de cura os corpos de prova foram mantidos nos moldes em uma câmara úmida a temperatura de 23 °C (com variação aceitável de mais ou menos 2 °C);

- O desmolde dos CPs foi realizado depois de 24 horas, contudo, para alguns casos a argamassa produzida não atingiu a resistência requerida, e o desmolde foi efetuado posteriormente;
- Após este período, todos os CPs foram colocados em recipientes hermeticamente fechados e estanques à temperatura de 38 °C (admitiu-se variação de 2 °C para mais ou para menos), durante 27 dias;
- Aos 28 dias de idade os CPs foram esfriados a temperatura de aproximadamente 23 °C, capeados com mistura de enxofre e ensaiados à compressão de acordo com a NBR 5.739 (ABNT, 2007);
- O IAP foi calculado pela razão, em percentual, entre a resistência média dos CPs moldados com as pozolanas (amostras: A1, A2, A3, B1, B2 e B3) e a resistência média dos CPs moldados apenas com cimento.

Na Figura 11 são apresentadas algumas imagens do procedimento para a determinação do IAP.



Figura 11. Determinação do IAP. A) Colocação dos materiais na argamassadeira; B, C e D) Realização do *Flow Test*; E) Moldagem dos CPs.

Uma modificação deste teste também foi desenvolvida, haja vista os estudos de GAVA (1999) que sugerem melhores resultados com aplicação do teste variando a quantidade de areia normal e não a quantidade de água. Assim, outra avaliação foi efetuada seguindo a metodologia acima apresentada, porém o controle da consistência das argamassas foi realizado através da quantidade de areia adicionada em cada massa. O detalhamento das quantidades de cada material,

constituente das argamassas produzidas nos dois testes, consta nos Apêndices I e II.

Verificada a pozolanicidade de cada amostra, dado o IAP mínimo para uso como adição ao cimento Portland referenciado na NBR 12.653 (ABNT, 1992), procedeu-se à tomada de decisão relativamente aos subprodutos mais adequados para o desenvolvimento das demais atividades experimentais. Para tanto, também foram considerados os resultados da etapa de estabilização e higienização de lodo de esgoto. Como mostra o *Capítulo IV* (Resultados e Discussões), foram selecionados dois materiais, cada qual resultante de um processo de tratamento diferenciado. Estes foram denominados experimentalmente como *Subproduto A* e *Subproduto B*, submetidos aos testes de dosagem do concreto e posteriormente à fabricação de tubos de drenagem. Para finalização da avaliação das características dos materiais a serem incorporados no concreto, uma alíquota de cada um dos subprodutos escolhidos foi enviada para análise de lixiviação, solubilização, difração por raio-x e microscopia eletrônica de varredura (MEV/EDS), todas realizadas em laboratório externo.

### **3.2.2 Dosagem do Concreto**

Para o desenvolvimento desta etapa foram considerados os dados relativos à produção de uma fábrica de tubos de concreto localizada na região metropolitana de Florianópolis, no município de Palhoça, Santa Catarina, como mostra a Figura 12.

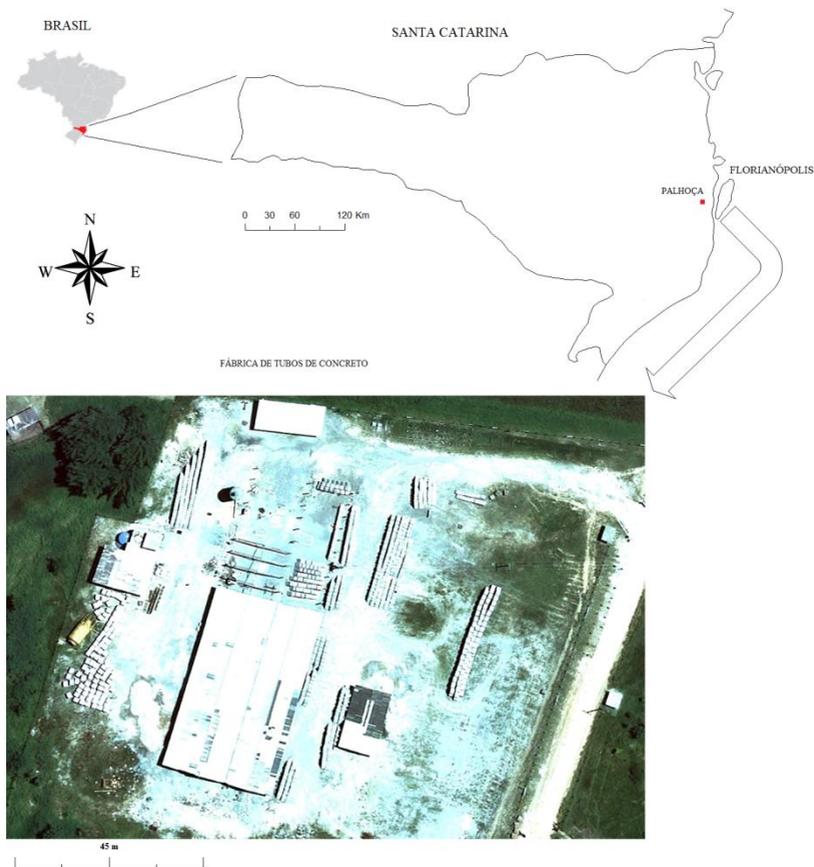


Figura 12. Localização da fábrica de tubos de concreto.

A produção diária da empresa gira em torno de 600 tubos de concreto, sendo que são fabricados tubos com tamanhos diferenciados, variando entre DN 200, 300, 400, 500, 600, 800, 1000 e 1200. Para tanto, são utilizados três misturadores, um para os tubos maiores (DN 600, 800, 1000 e 1200) e os outros dois para os tubos menores (DN 200, 300, 400 e 500). Cada linha de produção é composta por quatro trabalhadores, sendo que para todos os casos a dosagem de água é baseada na experiência do operador do sistema. O tempo de cura é de dois dias e após este período os tubos são transportados para o depósito da empresa e posterior comercialização. Trata-se de uma fábrica de pequeno porte, com produção artesanal e tradicional como mostra a Figura 13.



Figura 13. Processo de fabricação de tubos de concreto. A) Estoque de areia grossa; B) Estoque de brita nº 0; C) Colocação dos materiais na esteira; D) Adensamento da massas; E) Cura dos tubos produzidos.

Nesta pesquisa a referência foi o tubo de concreto com DN 400. Um levantamento de suas características básicas foi efetuado para subsidiar as atividades experimentais que envolveram a dosagem do concreto. Os resultados obtidos constam nas tabelas abaixo apresentadas, na Tabela 13 são descritos os materiais e as quantidades utilizadas para a produção de três tubos de concreto.

Tabela 13. Características do tubo de concreto.

Concreto	Traço 1:7,3	Quantidade	Produção Equivalente
Cimento	1,0	50,00 kg	3 Tubos de Concreto DN 400
Brita n° 0	3,638	121,26 kg	
Areia Grossa	3,659	121,96 kg	
Água <sup>3</sup>	≈ 0,28	Aproximadamente 14 L – Varia de acordo com a umidade dos materiais e com a experiência do operador	

Destaca-se que uma alteração foi proposta para os materiais originalmente utilizados pela empresa. Dada necessidade de aperfeiçoamento no aspecto visual do tubo, sugeriu-se a substituição de 30 % do volume absoluto de areia grossa por areia fina. Na Tabela 14 constam outras características de um tubo de concreto com DN 400 produzido pela empresa.

Tabela 14. Características do tubo de concreto.

Tubo de Concreto	
Peso Seco	136 kg
Peso Úmido	149 kg
Comprimento	99,0 cm
Diâmetro Externo	48,5 cm
Diâmetro Interno	39 cm
Espessura	4,75 cm
Massa Específica do Concreto	2.270 kg/m <sup>3</sup>

Assim, com base nos dados obtidos em campo e nas informações encontradas em literatura específica (FIGUEIREDO, 2011), a configuração do teste para a dosagem do concreto foi elaborada. O estudo envolveu diversas variações na composição concreto, de tal forma a se avaliar as alterações na resistência dos corpos de prova (5,1 x 10 cm) feitos com massas diferentes. Os fluxogramas das Figuras 13 e 14 mostram todas as combinações testadas em laboratório.

---

<sup>3</sup> Refere-se ao volume de água adicionado, sem considerar a umidade dos agregados que compõem o concreto.

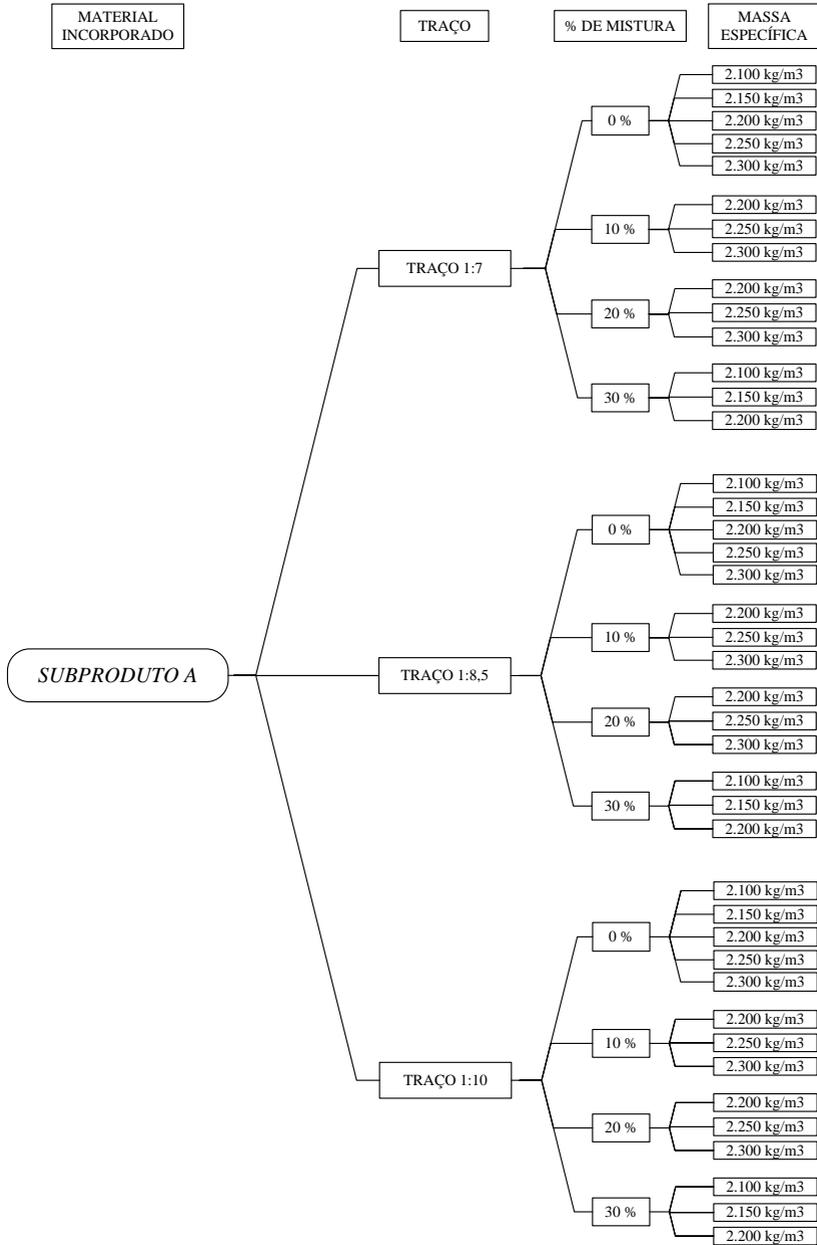


Figura 14. Variações do teste de dosagem com o *Subproduto A*.

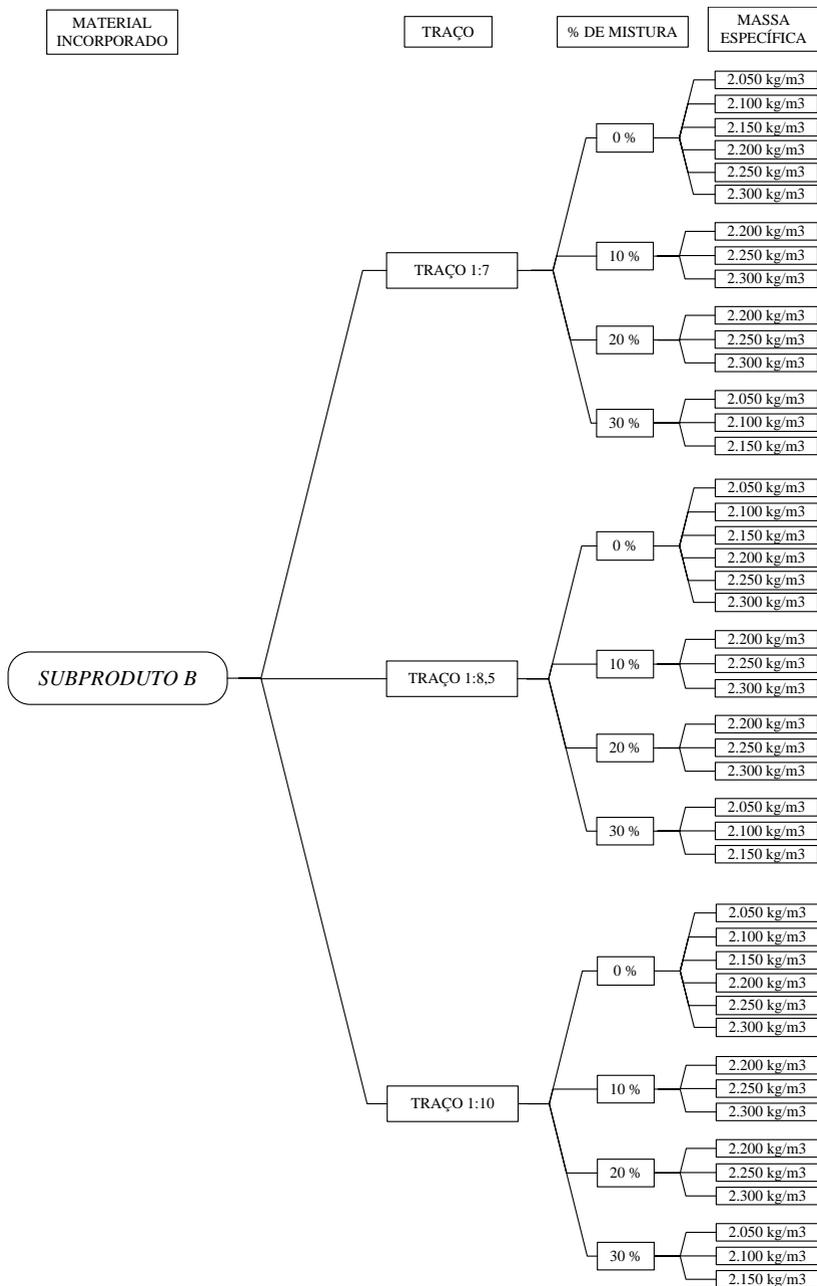


Figura 15. Variações do teste de dosagem com o *Subproduto B*.

Considerando que a massa específica do concreto produzido na fábrica está na ordem de  $2.250 \text{ kg/m}^3$ , a proposta inicial foi reproduzir esta massa específica com uma variação para menos ( $2.200 \text{ kg/m}^3$ ) e outra para mais ( $2.300 \text{ kg/m}^3$ ). Contudo, para as pastas com 30 % de subproduto não foi possível atingir o mesmo patamar relativamente às massas específicas, e conseqüentemente foram utilizadas referências menores. Como os concretos com 0 % de adição de subproduto serviram de referência no ensaio de compressão axial, todas as variações de massas específicas foram testadas.

Destaca-se que a proposta foi a substituição da areia fina por frações que variaram entre 0, 10, 20 e 30 % de subproduto, sendo que o detalhamento das quantidades de cada material utilizado na dosagem do concreto, é apresentado nos Apêndices III e IV. Foram feitas 30 misturas diferentes, sendo que para cada uma foram produzidos nove CPs e a metodologia aplicada para a moldagem e cura dos mesmos é detalhada a seguir:

- Secagem, em estufa a  $105 \text{ }^\circ\text{C}$ , de todos os agregados por um período de 24 horas;
- Resfriamento ao ar dos agregados, desta forma todos os materiais utilizados encontravam-se isentos de umidade;
- Pesagem das porções de cada material que compõe o concreto;
- Transferência, nesta ordem de colocação, da brita nº 0, subproduto, areia fina, areia grossa e cimento, para a argamassadeira;
- Colocação da água em incrementos pequenos, de tal forma a observar-se o aspecto da massa resultante;
- O volume de água adicionado em cada mistura variou de acordo com o aspecto da pasta, sendo que o objetivo foi a produção de um concreto seco (com aproximadamente 8 % de umidade), específico para a produção de tubos de concreto;
- A velocidade de funcionamento da argamassadeira oscilou entre 1 e 2, para garantir melhor homogeneização da pasta. O tempo de mistura foi de aproximadamente 2 minutos;
- Após a completa homogeneização do concreto, o material resultante foi fracionado para a produção dos corpos de prova. Cada CP produzido foi compactado em três camadas de igual tamanho, a metodologia para sua produção é detalhada a seguir:

- Pesagem da quantidade de material necessária para cada uma das três camadas que compõem o CP;
  - Transferência, para molde, do material equivalente a primeira camada. Compactação com 30 golpes de um Soquete para Argamassa (Figura 16). Escarificação do concreto compactado de tal forma a facilitar a ligação com a camada seguinte;
  - Transferência, para o molde, do material equivalente a segunda camada. Compactação com 30 golpes de um Soquete para Argamassa. Escarificação do concreto compactado, para facilitar a ligação com a camada seguinte;
  - Transferência, para o molde, do material equivalente a terceira camada. Compactação com Soquete Marshall Manual (Figura 16), o número de golpes foi o equivalente para obter-se um corpo de prova com altura de 10 cm, de acordo com a especificação do molde utilizado;
  - A compactação do material variou de acordo com a massa específica requerida e com as características da pasta resultante;
  - Após a compactação das três camadas, cada CP produzido foi desmoldado em uma base adequada e devidamente identificado.
- 
- Assim, foram testadas até seis referências de massa específica diferenciadas (Figuras 14 e 15) e para cada uma delas foram produzidos três corpos de prova, o que resultou na produção total de nove CPs por mistura;
  - Nas primeiras 24 horas de cura, os CPs foram mantidos em sala climatizada, com temperatura de 19 °C (admitiu-se variações de 2 °C para mais ou para menos);
  - Posteriormente, todos os CPs foram transferidos para uma espécie de câmara úmida (caixa de isopor com uma lâmina d'água de aproximadamente 10 cm). Os CPs foram colocados em uma base, sobre água, e a temperatura foi mantida em 23 °C (admitiu-se variações de 2 °C para mais ou para menos), para os demais 27 dias de cura;
  - Após este período, os CPs foram capeados com mistura de cimento e submetidos ao ensaio de compressão axial, de acordo com os preceitos da NBR 5.739 (ABNT, 2007).

Para melhor visualização da metodologia implementada, na Figura 16 são apresentadas imagens do teste de dosagem. Tanto este procedimento como os ensaios de compressão foram realizados no Laboratório de Materiais da Construção Civil (LMC) da UFSC.



Figura 16. Imagens da moldagem dos CPs. A) Porções dos materiais que compõem o concreto; B) Argamassadeira utilizada para a homogeneização da mistura; C) Massa produzida; D) Equipamentos utilizados para a moldagem; E) Compactação da primeira camada do CP; F) Compactação da terceira camada do CP; G, H e I) Desmolde dos CPs produzidos.

Uma réplica deste experimento foi efetuada, de tal forma a possibilitar uma avaliação mais consistente dos resultados gerados. Cabe salientar que, para melhor representatividade dos resultados, a produção das massas com adições de 0, 10, 20 e 30 % de subproduto, para cada traço testado, foi realizada no mesmo dia e com as mesmas condições de operação.

De posse dos resultados do ensaio de compressão axial, foi tomada a decisão relativamente à melhor massa específica, traço de composição dos materiais e percentagem de mistura do subproduto em substituição à areia fina. E, assim foram selecionadas duas composições distintas para o concreto, uma com o *Subproduto A* e a outra com o *Subproduto B*, para serem encaminhados aos testes em escala real. Dada a seleção das duas melhores configurações do concreto, uma amostra de cada CP e uma terceira amostra, sem adição de subproduto (CP referência), foram encaminhadas para análise de lixiviação e solubilização (Tabela 11), para avaliação do grau de estabilização de higienização dos subprodutos. Adicionalmente, algumas avaliações foram efetuadas tanto no extrato do lixiviado como no extrato do solubilizado, e os parâmetros analisados constam na Tabela 15.

Tabela 15. Parâmetros complementares da caracterização do lodo *in natura*.

	<b>Parâmetro</b>	<b>Unidade</b>	<b>Metodologia/Método</b>
<b>Extrato do Lixiviado</b>	Coliformes Totais	NMP/100 mL	Tubos múltiplos
	Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL	Tubos múltiplos
	<i>Escherichia coli</i>	-	Substrato Enzimático
	Ovos de Helmintos	ovos/g	WHO (2004) e EPA (2003)
	Larvas de Helmintos	larvas/g	WHO (2004) e EPA (2003)
	<i>Streptococcus fecalis</i>	NMP/100 mL	Tubos Múltiplos
	Salmonella	-	Plaqueamento Seletivo
	Cistos de Protozoários	cistos/g	WHO (2004) e EPA (2003)
<b>Extrato do Solubilizado</b>	Coliformes Totais	NMP/100 mL	Tubos Múltiplos
	Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL	Tubos Múltiplos
	<i>Escherichia coli</i>	-	Substrato Enzimático
	Ovos de Helmintos	ovos/g	WHO (2004) e EPA (2003)
	Larvas de Helmintos	larvas/g	WHO (2004) e EPA (2003)
	<i>Streptococcus fecalis</i>	NMP/100 mL	Tubos Múltiplos
	Salmonella	-	Plaqueamento Seletivo
	Cistos de Protozoários	cistos/g	WHO (2004) e EPA (2003)

Os resultados dessas análises foram comparados com os valores de referência obtidos em literatura específica, bem como, com os valores de referência apresentados na NBR 10.004 (ABNT, 2004d) e pela Resolução CONAMA n° 375 (BRASIL, 2006).

### 2.3.2 Fabricação Experimental de Tubos de Concreto

A fabricação experimental de tubos de concreto foi realizada diretamente na empresa parceira desta pesquisa. As etapas anteriores subsidiaram a realização desta parte, sendo que foram selecionadas configurações distintas para a composição do concreto, baseado nos resultados obtidos no teste de dosagem. A descrição de cada conformação escolhida, para compor o concreto a ser testado na fabricação dos tubos consta na Tabela 16.

Tabela 16. Configuração selecionada para compor o concreto.

Configuração Concreto	Descrição	Traço	
		Massa Específica	
		% de Adição de Subproduto	
Concreto Fábrica	Quantidade dos materiais equivalente à convencionalmente utilizada pela fábrica parceira da pesquisa, para a produção de tubos de concreto DN 400.	1:7,3	
		$\approx 2.250 \text{ kg/m}^3$	
		0 % de adição de Subproduto	
Concreto Referência	Quantidade dos materiais equivalente à configuração que indicou melhor resultado nos testes para a dosagem de concreto.	1:8,5	
		$2.250 \text{ kg/m}^3$	
		0 % de adição de Subproduto	
Concreto A	Quantidade dos materiais equivalente à configuração que indicou melhor resultado nos testes para a dosagem de concreto ( <i>Subproduto A</i> ).	1:8,5	
		$2.250 \text{ kg/m}^3$	
		10 % de adição do Subproduto A	
Concreto B	Quantidade dos materiais equivalente à configuração que indicou melhor resultado nos testes para a dosagem de concreto ( <i>Subproduto B</i> ).	1:8,5	
		$2.250 \text{ kg/m}^3$	
		10 % de adição do Subproduto B	

O detalhamento relativo ao traço de composição de cada mistura e a quantidade de cada material utilizado, consta nas Tabelas 17 e 18, respectivamente.

Tabela 17. Composição do concreto – detalhamento do traço.

Composição	Traço			
	Concreto Fábrica	Concreto Referência	Concreto A	Concreto B
Cimento	1,000	1,000	1,000	1,000
Brita n° 0	3,638	4,370	4,370	4,370
Areia Grossa	3,659	2,891	2,891	2,891
Areia Fina	-	1,239	0,830	0,830
Subproduto	-	-	0,410	0,410
Água <sub>calculada</sub>	0,400	0,760	0,682	0,695
Água <sub>adicionada</sub>	0,280	0,320	0,420	0,420

Com base no traço de composição de cada mistura, foi calculada a quantidade de cada material que compõem o concreto.

Tabela 18. Composição do concreto – detalhamento das quantidades.

Composição	Quantidade			
	Concreto Fábrica	Concreto Referência	Concreto A	Concreto B
<b>Cimento</b>	50,00 kg	50,00 kg	50,00 kg	50,00 kg
<b>Brita nº 0</b>	181,89	218,50 kg	218,50 kg	218,50 kg
<b>Areia Grossa</b>	182,94	144,55 kg	144,55 kg	144,55 kg
<b>Areia Fina</b>	-	61,95 kg	41,30 kg	41,30 kg
<b>Subproduto</b>	-	-	20,65 kg	20,65 kg
<b>Água<sub>calculada</sub></b>	20 L	38,00 L	34,11 L	34,77 L
<b>Água<sub>adicionada</sub></b>	14 L	16,00 L	21,00 L	21,00 L

Foram produzidos três tubos de concreto para cada uma das conformações testadas e o procedimento implementado para a fabricação é detalhado a seguir:

- Pesagem de todas as porções dos materiais que compõe o concreto;
- Colocação da brita nº 0, subproduto, areia fina, areia grossa e cimento, nesta ordem, na esteira para transferência ao misturador;
- Adição de água em pequenos incrementos. A quantidade final foi determinada pelo operador do sistema, dada sua experiência na dosagem de concreto seco;
- Homogeneização e transferência do material para o molde;
- Aplicação de vibração para o adensamento da pasta dentro do molde;
- Desmolde do tubo produzido;
- O período de cura foi de 28 dias e foi realizado parcialmente nas instalações da empresa e no LMC da UFSC;
- Aos 28 dias de cura os tubos de concreto foram submetidos ao ensaio de compressão diametral, massa específica e absorção de água no LMC da UFSC. Os preceitos da NBR 8.890 (ABNT, 2007) foram atendidos para a realização dos ensaios.

Na Figura 17 consta uma representação esquemática do processo de fabricação de tubos de concreto.

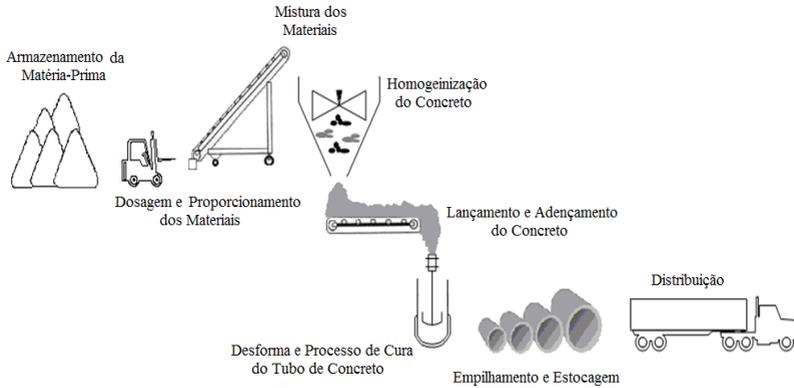


Figura 17. Processo de fabricação de tubos de concreto.

Na Figura 18, são apresentadas imagens da fabricação experimental de tubos de concreto.



Figura 18. Fabricação experimental de tubos de concreto. A, B e C) Pesagem dos materiais; D e E) Transferência dos materiais para a esteira e betoneira. F) Dosagem da água; G) Transferência da betoneira para o molde; H) Adensamento do concreto; I, J e K) Transporte e desmolde; L) Lubrificação do molde; M, N e O) Tubo de concreto.

Na Figura 19 constam imagens da etapa de transporte dos tubos de concreto, da fábrica para o LMC da UFSC, e do seu armazenamento nas instalações do laboratório durante a finalização do período de cura.



Figura 19. Transporte e armazenamento dos tubos de concreto. A) Armazenamento na fábrica; B, C e D) Carregamento; E) Descarregamento; F) Armazenamento no LMC/UFSC.

Os ensaios foram realizados e os resultados obtidos são detalhados no próximo capítulo deste estudo.

### 3.3 PANORAMA GERAL

Como esta pesquisa envolve um plano experimental com muitas etapas, apresenta-se nas figuras a seguir um panorama das atividades desenvolvidas. Na Figura 20 consta a evolução da parte experimental relativamente à caracterização e o tratamento do lodo de esgoto *in natura*.

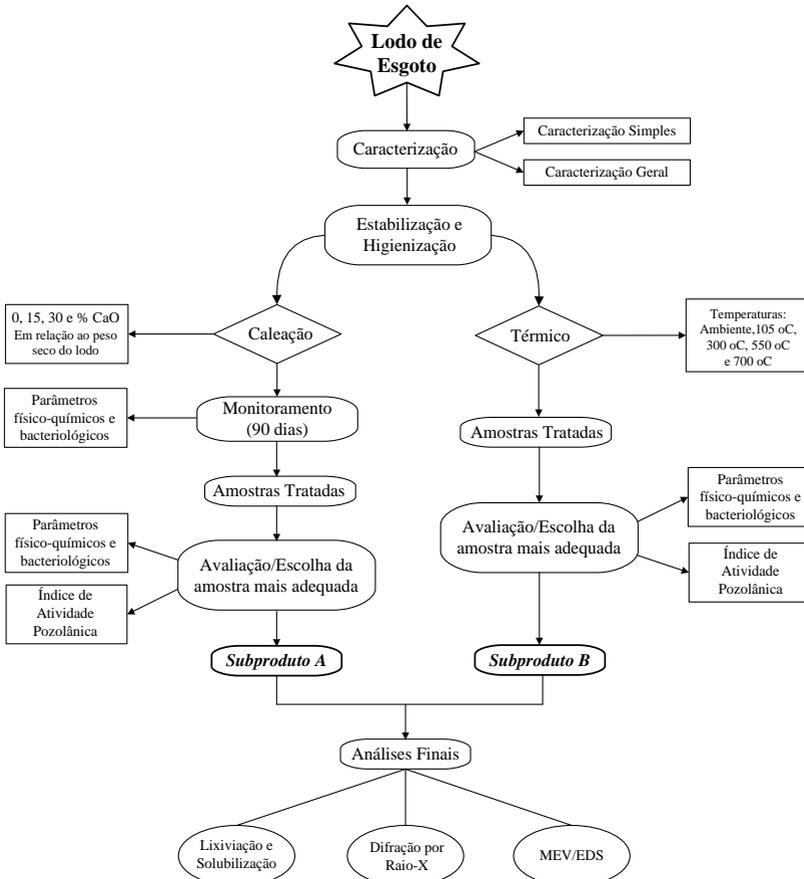


Figura 20. Panorama Geral – lodo de esgoto in natura.

Na Figura 21 consta a evolução da parte experimental relativamente à incorporação dos subprodutos ao concreto para a fabricação de tubos de drenagem.

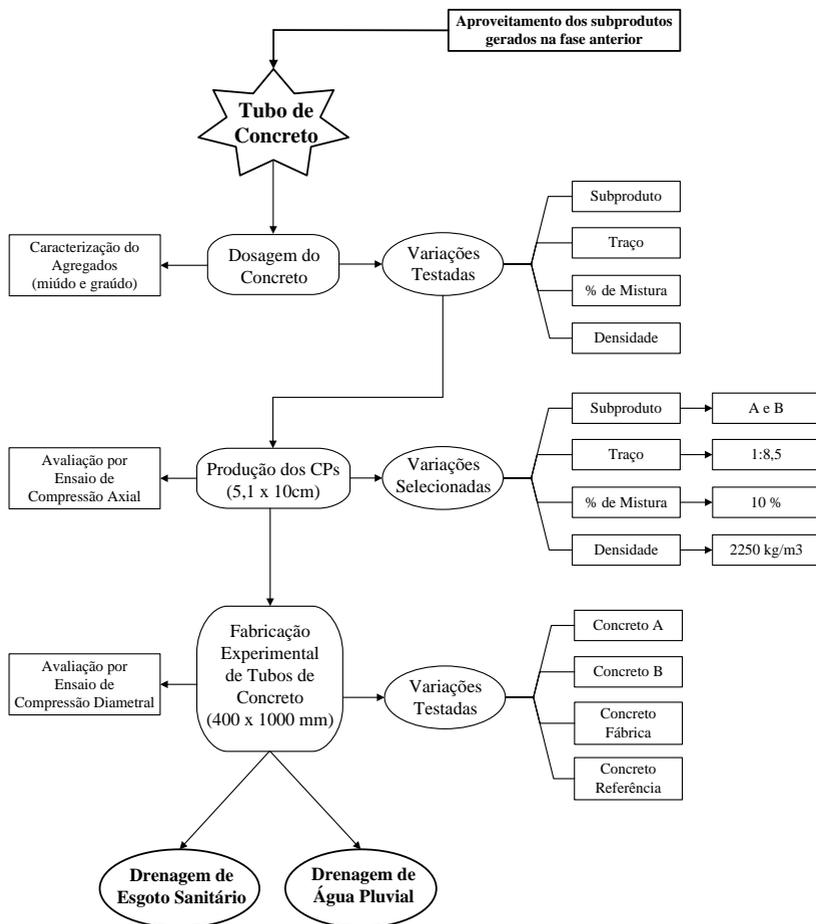


Figura 21. Panorama Geral – tubos de concreto.

Assim, a visualização da evolução desta pesquisa é facilitada pela avaliação dos fluxogramas apresentados.

### 3.4 TRATAMENTO DE DADOS

Com a finalização da parte experimental, um tratamento dos dados obtidos foi realizado. Este consistiu-se, basicamente, na análise estatística dos resultados do monitoramento do experimento de caleção e dos resultados do teste de dosagem do concreto. A metodologia

adotada será abordada separadamente nos itens a seguir. A ferramenta computacional utilizada foi o *software Statistica 8.0*.

### **3.4.1 Caleação**

A avaliação das características do lodo de esgoto durante o período experimental, considerando os diferentes parâmetros analisados, foi realizada através de estatística descritiva e inferencial. Com a estatística descritiva, foram realizadas avaliações básicas como média, mediana, desvio padrão, intervalo de confiança e variância, assim como as correlações existentes entre as variáveis sob avaliação. Com a estatística inferencial foi possível obter uma extrapolação dos resultados, dado que foram realizadas comparações múltiplas entre os grupos de dados através da análise de variância (ANOVA), para aceitar ou não a hipótese de igualdade entre eles. E, adicionalmente, o teste de Tukey foi aplicado para a comparação das médias pareadas. O nível de significância adotado foi de 5 %, indicando que são considerados diferentes os grupos cuja significância foi menor que este valor.

Para a estatística descritiva a matriz das análises consta na Tabela 19, considerando o monitoramento do primeiro e do segundo experimento. A execução de 3 análises semanais foi planejada, para cada um dos parâmetros monitorados, contudo, alguns eventos planejados não foram realizados. Assim, o número de eventos realizados consta na tabela abaixo.

Tabela 19. Número de eventos realizados no período experimental.

Parâmetro	Experimento	% de Mistura <sup>1</sup>	Tempo (dias)														
			1	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91	
			Número de eventos realizados em cada período														
Umidade	1 <sup>0</sup>	15 %	0	2	3	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3
		30 %	0	0	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0
		45 %	0	3	3	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	2 <sup>0</sup>	0 %	0	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0
		15 %	0	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0
		30 %	0	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0
		45 %	0	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	0	0	
SV/ST	1 <sup>0</sup>	15 %	0	2	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	0	0	
		30 %	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0	0	
		45 %	0	0	3	0	0	0	3	0	3	3	3	3	3	3	
	2 <sup>0</sup>	0 %	0	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	0	0	
		15 %	0	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	0	0	
		30 %	0	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	0	
		45 %	0	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	0		
pH	1 <sup>0</sup>	15 %	0	1	1	2	2	1	3	3	3	3	3	3	3	3	
		30 %	0	2	2	1	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	
		45 %	0	1	1	2	2	1	3	3	3	3	3	3	3	3	
	2 <sup>0</sup>	0 %	1	1	1	1	1	2	2	2	0	2	2	2	0	0	
		15 %	1	1	1	1	1	2	2	2	0	2	2	2	0	0	
		30 %	1	1	1	1	1	2	2	2	0	2	2	2	0	0	
		45 %	1	1	1	1	1	2	2	2	0	2	2	2	0		
C. Totais	1 <sup>0</sup>	15 %	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	
		30 %	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	
		45 %	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	
	2 <sup>0</sup>	0 %	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	
		15 %	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	
		30 %	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	
		45 %	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0		
<i>E. Coli</i>	1 <sup>0</sup>	15 %	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	
		30 %	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	
		45 %	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	
	2 <sup>0</sup>	0 %	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	
		15 %	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	
		30 %	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	
		45 %	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0		

<sup>1</sup> O monitoramento do lodo de esgoto sem adição de cal (0%) foi realizado apenas no segundo monitoramento.

Quando o número de eventos realizados foi menor do que os planejados, utilizou-se o artifício da imputação de dados. Para tanto, alguns critérios foram adotados:

- Para os eventos em que o dado faltante estava em uma posição intermediária ao longo do tempo, a imputação foi efetivada através da média do tempo anterior e posterior. Nesses casos, supôs-se que o decaimento ao longo do tempo foi linear;
- Não foi efetuada a imputação de dados para os casos em que o não existia medida posterior ou anterior ao tempo faltante;
- Não foi realizada a imputação de dados para os casos em que registrou-se um valor ao invés dos três inicialmente planejados;
- Para os casos com dois dados, o terceiro foi obtido pela média dos dois registros. Nesses casos, supôs-se que o decaimento ao longo do tempo foi linear;
- Para os parâmetros coliformes totais e *Escherichia coli* não foi realizada a imputação de dados.

Para a estatística inferencial, o planejamento das análises é descrito na Tabela 20. Sendo que cada variável dependente foi avaliada separadamente em função das duas variáveis independentes.

Tabela 20. Descrição das variáveis independentes e dependentes.

	<b>Fator</b>	<b>Nível</b>
<b>Variáveis Independentes</b>	% de Mistura	15 %
		30 %
		45 %
	Tempo	0 – 90 dias
<b>Variáveis Dependentes</b>	Umidade	
	SV/ST	
	pH	
	Coliformes totais	
	<i>Escherichia coli</i>	

O teste de Tukey não foi aplicado para os parâmetros de coliformes totais e *Escherichia coli*, pois estas análises não foram realizadas em triplicata em função do seu custo, o que atrelado a outros fatores, aumentou a incidência de dados faltantes. Outra consideração importante faz-se no sentido de que, pela incidência elevada de eventos faltantes no primeiro experimento optou-se por não trabalhar com o teste de Tukey para este conjunto e assim tal avaliação foi realizada apenas para o segundo grupo de dados.

### 3.4.2 Dosagem do Concreto

A avaliação da variação da resistência dos corpos de prova produzidos no teste para a dosagem do concreto foi realizada através de estatística descritiva e inferencial. Com a estatística descritiva foram realizadas avaliações básicas como média, mediana, desvio padrão, intervalo de confiança e variância, assim como as correlações existentes entre as variáveis sob avaliação. Enquanto que, com a estatística inferencial foi possível obter uma extrapolação dos resultados, dado que foram realizadas comparações múltiplas entre os grupos de dados através da análise de variância (ANOVA), e por meio do resultado foi possível aceitar ou não a hipótese de igualdade entre os grupos. O nível de significância adotado foi de 5 %, indicando que são considerados diferentes os grupos cuja significância for menor que este valor.

Considerando que uma réplica do teste de dosagem do concreto foi executada, a primeira avaliação realizada foi a verificação da existência de diferenças estatisticamente significativas entre os dois conjuntos de dados com a mesma configuração experimental. Assim, efetuou-se uma análise de variância para aceitar ou não a hipótese de igualdade entre eles, seguido do teste de Tukey para a comparação das médias par à par. Como os resultados obtidos indicaram não haver diferenças estatisticamente significativas entre os grupos testados (vide *Capítulo IV – item 4.2.2*), o tratamento de dados foi realizado considerando apenas um conjunto homogêneo de dados, para o concreto com a mesma configuração experimental (subproduto, traço, massa específica e percentagem de mistura).

Na estatística descritiva, as variações apresentadas na Tabela 21 foram consideradas para a análise.

Tabela 21. Configuração estatística descritiva.

Subproduto	Traço	% de Mistura	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )					
			2.050	2.100	2.150	2.200	2.250	2.300
			Número de eventos realizados					
A	1:7	0	0	2	2	2	2	2
		10	0	0	0	2	2	2
		20	0	0	0	2	2	2
		30	0	2	2	2	0	0
	1:8,5	0	0	6	2	2	2	2
		10	0	0	0	2	2	2
		20	0	0	0	2	2	2
		30	0	2	2	2	0	0
	1:10	0	0	2	2	2	2	2
		10	0	0	0	2	2	2
		20	0	0	0	2	2	2
		30	0	2	2	2	0	0
B	1:7	0	2	2	2	2	2	2
		10	0	0	0	2	2	2
		20	0	0	0	2	2	2
		30	2	2	2	0	0	0
	1:8,5	0	2	2	2	2	2	2
		10	0	0	0	2	2	2
		20	0	0	0	2	2	2
		30	2	2	2	0	0	0
	1:10	0	2	2	2	2	2	2
		10	0	0	0	2	2	2
		20	0	0	0	2	2	2
		30	2	2	2	0	0	0

Para eliminar erros de laboratório, vinculados às fases de produção, cura e rompimento dos CPs, optou-se por trabalhar apenas com a média das triplicatas produzidas em cada teste de dosagem do concreto. Assim, o número de eventos relaciona-se à resistência média obtida no ensaio de compressão axial. Alguns eventos planejados não foram realizados em função de problemas técnicos, os dados faltantes não foram imputados para não forçar falsas tendências aos resultados já obtidos. Para a análise descritiva os dados faltantes não influenciam nos resultados, em função disso todas as variações foram avaliadas. Para a estatística inferencial, foram consideradas quatro variáveis independentes e uma variável dependente, como mostra a Tabela 22.

Tabela 22. Descrição variáveis independentes e dependentes.

VARIÁVEIS INDEPENDENTES		VARIÁVEL DEPENDENTE
Fator	Nível	
Subproduto	A	Resistência (MPa)
	B	
Traço	1:7	
	1:8,5	
	1:10	
% de Mistura	0	
	10	
	20	
Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	2.200	
	2.500	
	2.300	

Para evitar erros em função da existência de dados faltantes, os eventos com mistura de 30 % de subproduto e massa específica de 2.050, 2.100 e 2.150 kg/m<sup>3</sup>, não foram considerados na avaliação estatística inferencial. Com relação á geração de dados, dois eventos foram planejados e realizados, para cada uma das variações em estudo. Vale mencionar que, a massa específica foi considerada uma variável dependente, pois foi um dois parâmetros controlados no teste para a dosagem do concreto.

## CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos para todas as etapas experimentais e de tratamento de dados constam nos itens a seguir.

### 4.1 LODO DE ESGOTO

Com relação ao lodo de esgoto são apresentados os resultados relativamente à caracterização e ao seu tratamento (estabilização e higienização).

#### 4.1.1 Caracterização

A caracterização do lodo de esgoto foi efetuada como descrito anteriormente e os resultados obtidos em cada etapa constam a baixo.

##### 4.1.1.1 Caracterização Simples

Para melhor visualização da variação de cada parâmetro ao longo do tempo, respeitando a periodicidade em que as análises foram efetuadas, apresenta-se na Figura 22 as tendências observadas no monitoramento dos sólidos voláteis totais (SV/ST) e da umidade.

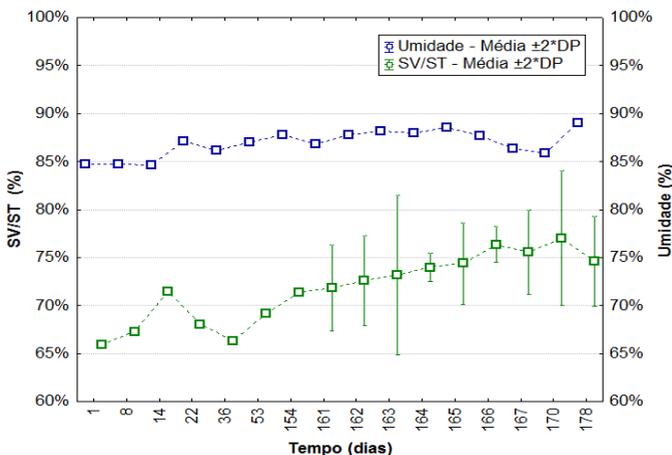


Figura 22. Variação temporal da umidade e SV/ST – lodo de esgoto *in natura*.

Para a relação SV/ST o valor médio obtido no monitoramento foi de 73,1%, com desvio padrão de 3,43% e intervalo de confiança variando de 71,93% a 74,26%. Em comparação com os valores de literatura para lodo de esgoto *in natura*, é possível inferir que o resíduo produzido na ETE Insular não encontra-se em estado estabilizado, já que os valores de referência estão em uma faixa inferior ao valor médio obtido nesta pesquisa. De acordo com a Resolução CONAMA n° 375 (BRASIL, 2006), USEPA (1995), Jordão e Pessoa (2005) e, Sperling e Gonçalves (2001) os valores para SV/ST devem ser menores do que 70 %, 50 %, 45 % e 65 %, respectivamente.

Com relação ao parâmetro umidade, o valor médio registrado foi de 87,3 %, com desvio padrão de 1,6 % e intervalo de confiança variando de 86,8 % a 87,9 %. Tais valores estão de acordo com o observado por outros autores, em pesquisas semelhantes envolvendo lodo de esgoto *in natura* (COMPARINI, 2001; ANDREOLI, 2006; LIMA, 2010).

Na Figura 23 tem-se a variação do pH ao longo do tempo em que as avaliações foram realizadas.

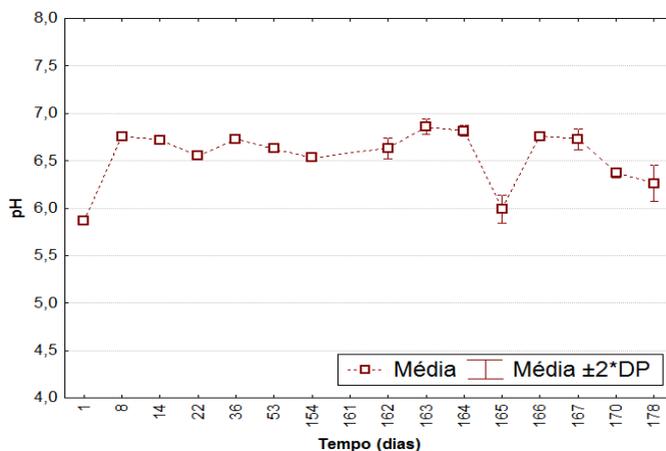


Figura 23. Variação temporal do pH – lodo de esgoto *in natura*.

Para este parâmetro, é possível inferir que o valor médio registrado foi de 6,54, com desvio padrão de 0,289 e intervalo de confiança variando entre 6,44 e 6,65. Tais valores estão de acordo com os dados obtidos por Leite (2011) em suas pesquisas com o lodo de esgoto da ETE Insular, assim como, com os valores comumente

encontrados na literatura para lodos de esgoto (MACHADO, 2001, COMPARINI, 2001; LIMA, 2010; PRIM, 2011)

Neste sentido, é possível inferir que o lodo de esgoto produzido pela ETE Insular, apresenta características semelhantes ao comumente encontrado em literatura (MACHADO, 2001, COMPARINI, 2001; ANDREOLI, 2006; LIMA, 2010; LEITE, 2011; PRIM, 2011). Todavia, o resultado da relação SV/ST é um indicativo de que o resíduo não encontra-se em estado estabilizado (BRASIL, 2006; USEPA, 1995; JORDÃO e PESSÔA, 2005; SPERLING e GONÇALVES, 2001). Ainda assim, os dados obtidos a partir da caracterização simples, atrelados a estatística descritiva acima apresentada, sugerem que as características deste resíduo não variam significativamente ao longo do tempo, fator que justifica a realização de repetidas coletas de lodo, tal como foi feito para o desenvolvimento da parte experimental deste estudo.

#### *4.1.1.2 Caracterização Geral*

Para a caracterização geral, os dados adquiridos nas análises efetuadas em quatro coletas de lodo, constam na Tabela 23 de forma simplificada, através da média e desvio padrão. Para facilitar a avaliação do conteúdo, apresenta-se na mesma tabela os valores de referência para lodo de *Classe B*, de acordo com a Resolução CONAMA n° 357 (BRASIL, 2006). Os resultados detalhados constam no Apêndice V.

Tabela 23. Resultados médios de cada parâmetro analisado.

Parâmetros	Média	Desvio Padrão	CONAMA N° 375
pH em água 1:5 <sup>1</sup>	6,65	0,49	-
pH em CaCl <sub>2</sub> <sup>1</sup>	6,67	0,52	-
Teor de Sólidos Totais (%) (m/m)	12,70	0,76	-
Teor de Sólidos Fixos (% ST) (m/m) <sup>2</sup>	23,52	4,29	-
Teor de Sólidos Voláteis (% ST) (m/m) <sup>2</sup>	76,48	4,29	< 70
Umidade a 65 ± 5 °C (%)	86,34	1,09	-
Umidade a 105 ± 5 °C (%)	87,30	0,76	-
Densidade (g/cm <sup>3</sup> ) <sup>1</sup>	0,93	0,16	-
Coliformes Totais (NMP/g ST)	1,10E+09	3,48E+09	-
Coliformes Termotolerantes (NMP/g ST)	1,11E+08	3,48E+08	-
<i>Escherichia coli</i> (NMP/g ST)	1,11E+08	3,48E+08	1,0E+06
Ovos Helmintos (viáveis ovo/g ST) ( <i>A. lumbricoides</i> )	5,47E-02	1,25E-01	< 10
<i>Salmonella sp.</i> – Mini vidas	Ausente	0	-
Carbono Orgânico (%) (m/m)	37,03	3,31	-
Matéria Orgânica (%) (m/m)	63,71	5,67	-
Cinzas a 550 °C (%) (m/m)	30,68	-	-
Nitrogênio Total (%) (m/m)	6,00	1,02	-
Nitrogênio Amoniacal (%) (m/m)	1,33	0,33	-
Fósforo (P) Total (%) (m/m)	2,28	0,47	-
Fósforo (PO <sub>4</sub> ) (%) (m/m)	2,48	1,63	-
Alumínio (Al) (%)	1,00	0,44	-
Cálcio (Ca) (%)	0,99	0,16	-
Magnésio (Mg) (%)	0,56	0,09	-
Arsênio (As) (mg/kg)	3,73	2,77	41
Bário (Ba) (mg/kg)	147,75	31,08	1300
Mercúrio (Hg) (mg/kg)	0,95	0,57	17
Molibdênio (Mo) (mg/kg)	13,80	15,27	50
Níquel (Ni) (mg/kg)	14,25	1,26	420
Selênio (Se) (mg/kg)	2,70	3,12	100
Ferro (Fe) (mg/kg)	12850,00	1909,19	-
Cobre (Cu) (mg/kg)	204,00	28,21	1500
Zinco (Zn) (mg/kg)	521,80	32,42	2800
Cádmio (Cd)(mg/kg)	0,70	0,20	39
Chumbo (Pb) (mg/kg)	22,64	3,38	300
Cromo (Cr) (mg/kg)	37,52	28,95	1000

<sup>1</sup> Ensaios realizados na amostra *in natura*.<sup>2</sup> Resultados em peso seco a 105 °C ± 5 °C.

Os resultados gerados durante a investigação das características do lodo produzido na ETE Insular, nas quatro estações climáticas do ano, indicaram que todos os parâmetros, com exceção dos sólidos voláteis e *Escherichia coli*, estão abaixo do padrão estabelecido para lodo de Classe B (BRASIL, 2006). Tanto os parâmetros físico-químicos como os bacteriológicos estão de acordo com o comumente encontrado na literatura para lodo de esgoto não estabilizado (GONÇALVES, 1999; TSUTIYA, 2001; MACHADO, 2001; COMPARINI, 2001; TCHOBANOGLIOUS, BURTON e STENSEL, 2003; PIANA, 2009; LIMA, 2010; LEITE, 2011). No que tange aos parâmetros de uso agrônômico, os resultados assemelham-se com os valores de outras pesquisas para lodo de ETE no Brasil (COMPARINI, 2001; LIMA, 2010). Com relação às substâncias inorgânicas, é possível inferir que os resultados encontram-se abaixo da faixa de padrões de referência legal e dos valores da bibliografia (COMPARINI, 2001; BRASIL, 2006; PIANA, 2009; LIMA, 2010), possivelmente pelo fato de não existir contribuição industrial no efluente tratado pela ETE Insular.

Na Tabela 24 são descritos os resultados das análises de lixiviação e solubilização, assim como uma comparação com os valores de referência da NBR 10.004 (ABNT, 2004d).

Tabela 24. Lixiviação e solubilização – lodo de esgoto *in natura*.

Análise	Parâmetros	Resultado	NBR 10.004 (ABNT, 2004d)
<b>Lixiviação</b>	Teor de Arsênio (mg/L)	< 0,0015	1,0
	Teor de Bário (mg/L)	< 0,5	70,0
	Teor de Cádmio (mg/L)	< 0,001	0,5
	Teor de Chumbo (mg/L)	0,074	1,0
	Teor de Cromo Total (mg/L)	0,047	5,0
	Teor de Mercúrio (mg/L)	< 0,00005	0,1
	Teor de Selênio (mg/L)	< 2	1,0
	Fluoreto (mg/L) <sup>1</sup>	1,48	150,0
	Teor de Prata (mg/L) <sup>2</sup>	<0,002	5,0
<b>Solubilização</b>	Teor de Alumínio (mg /L)	< 0,200	0,2
	Teor de Arsênio (mg/L)	< 0,0015	0,01
	Teor de Bário (mg/L)	< 0,5	0,7
	Teor de Cádmio (mg/L)	< 0,001	0,005

<sup>1</sup>Parâmetros e limites máximos no lixiviado extraídos da USEPA – Environmental Protection Agency 40 CFR Part 261 – 24 – “Toxicity Characteristics”.

<sup>2</sup>Parâmetro e limite máximo no lixiviado mantido, extraído da versão anterior da NBR 10.004, publicada em 1987 pela ABNT.

Tanto para o extrato do lixiviado como do solubilizado, é possível inferir que todos os valores estão abaixo dos padrões estabelecidos pela NBR 10.004 (ABNT, 2004d). Os resultados das análises de lixiviação e solubilização encontrados por Piana (2009), para o lodo da ETE Insular, assemelham-se aos registrados a cima, indicando não haver alterações significativas relativamente as características do resíduo produzido nessa estação de tratamento. Tendência semelhante também foi publicada por Greyer (2001) e Fontes (2003).

#### **4.1.2 Estabilização e Higienização**

Os resultados aqui apresentados relativamente à estabilização e higienização do lodo de esgoto referem-se aos processos de caleação e térmico.

##### *4.1.2.1 Caleação*

O primeiro experimento de caleação foi montado no ano de 2010, porém em datas distintas, no dia 03 de setembro para as amostras com 15 e 45 % de cal virgem, e no dia 30 de setembro para a amostra com 30 % de CaO. Ambos permaneceram em operação durante 90 dias. Uma réplica foi montada no dia 31 de março de 2011 e esteve em funcionamento até o dia 31 de junho de 2011. Assim, os resultados apresentados a seguir referem-se a cada parâmetro monitorado nos dois experimentos de caleação. Vale mencionar que durante o monitoramento dos experimentos, alguns problemas técnicos impossibilitaram a realização das análises em determinados períodos.

##### **→ Temperatura**

Com relação à temperatura, na Figura 24 apresenta-se a média das médias horárias registradas dentro e fora da estufa agrícola, onde o lodo caleado foi armazenado.

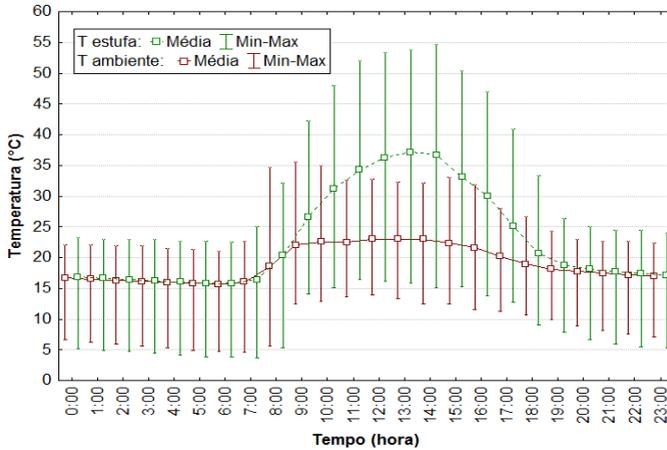


Figura 24. Variação da temperatura ao longo do dia.

Destaca-se que no intervalo das 21:00 às 8:00 horas a temperatura do interior da estufa e do ambiente externo apresentaram valores semelhantes. Nas horas restantes a temperatura da estufa manteve-se elevada em relação ao ambiente externo, além de apresentar maiores amplitudes térmicas. Os valores referentes aos picos de máximas e mínimas registrados são apresentados na Tabela 25, consta também uma comparação com os valores registrados em duas pesquisas realizadas no sentido de promover a estabilização e higienização do lodo de esgoto em estufa agrícola.

Tabela 25. Temperaturas registradas no período experimental.

AUTORES	Temperatura Ambiente (°C)		Temperatura Estufa (°C)	
	Máxima <sup>1</sup>	Mínima <sup>2</sup>	Máxima <sup>1</sup>	Mínima <sup>2</sup>
<b>COMPARINI (2001)</b>	35,4	16	51,0	18,2
<b>LIMA (2010)<sup>3</sup></b>	37,5	16,5	51,6	18,3
<b>ESTE EXPERIMENTO</b>	35,6	4,6	54,7	3,7

<sup>1</sup>Média das máximas diárias.

<sup>2</sup>Média das mínimas diárias.

<sup>3</sup>Considerando a etapa de tratamento de lodo não digerido deste estudo.

Observou-se que a temperatura mínima registrada foi menor do que o apresentado pelos outros autores, provavelmente em função da localização geográfica de Florianópolis (região sul do país), onde as estações climáticas do ano são bem caracterizadas. Outra consideração

importante faz-se no sentido de que, o período experimental compreendeu o inverno (para os dois experimentos), estação onde as temperaturas são tradicionalmente mais baixas. Os experimentos desenvolvidos por Lima (2010) e Comparini (2001) foram desenvolvidos na região sudoeste do país. Com relação às temperaturas máximas, os registros indicaram que estiveram em faixa semelhante a das principais referências pesquisadas, corroborando para a consolidação dos métodos que utilizam estufa agrícola como alternativa para o tratamento do lodo.

→ **SV/ST**

Na Figura 25 apresenta-se os gráficos com as variações da relação entre sólidos voláteis e sólidos totais ao longo de cada período experimental, para todas as misturas de lodo e cal analisadas.

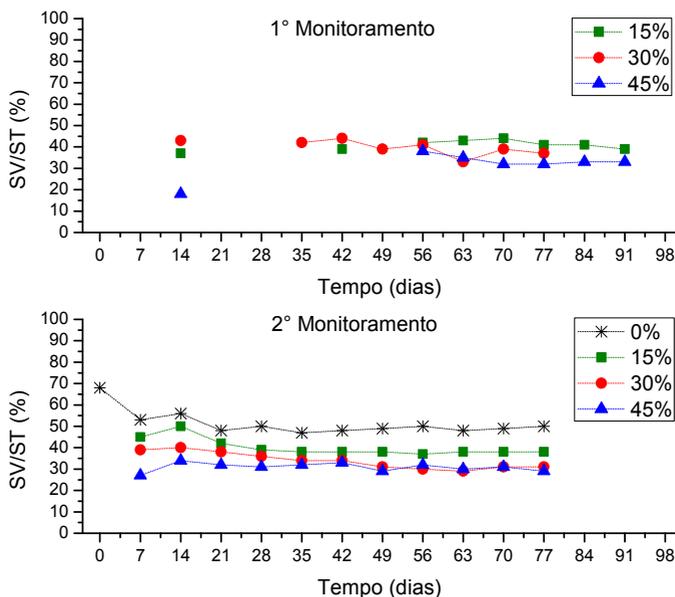


Figura 25. Variação temporal da relação SV/ST.

Para os dois experimentos, não foram registradas variações significativas após a sexta semana de monitoramento, sendo que os resultados tendenciam para o equilíbrio ao longo do período experimental. Na comparação entre as misturas de lodo e 0, 15, 30 e 45

% de CaO, observou-se que a presença da cal virgem diminuiu a relação SV/ST em função da elevação dos teores de sólidos totais presentes no resíduo e consequente efeito de diluição. Todavia, a estufa agrícola se mostrou eficiente no sentido de promover a estabilização do material, já que o lodo sem adição de CaO também apresentou redução satisfatória para o teor de SV/ST. Deste modo, os resultados sugerem uma tendência à estabilização do resíduo pela utilização da técnica caleação e armazenamento em estufa agrícola, sendo que os resultados ao final do processo atenderam o padrão estabelecido pela Resolução CONAMA n° 375 (BRASIL, 2006).

### → Umidade

O comportamento do parâmetro umidade ao longo do tempo é apresentado na Figura 26, para todas as misturas de lodo e cal analisadas, nos dois monitoramentos.

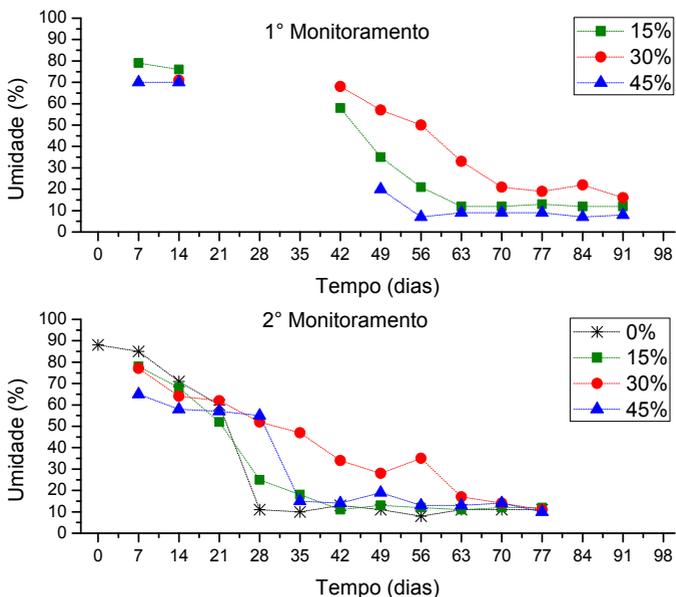


Figura 26. Variação da umidade de acordo com cada período experimental.

Para os dois experimentos, no início do monitoramento o valor médio de umidade registrado foi na faixa de 65 % – 88 %, sendo que foi tanto maior quanto menor o percentual de cal adicionado a mistura. Para

todas as avaliações, observou-se uma tendência decrescente, convergindo para o equilíbrio no final do período experimental. Os resultados registrados por Comparini (2001), Lima (2010) e Prim (2011) apresentam uma faixa de variação na mesma ordem de grandeza.

## → pH

As oscilações do pH em cada período experimental são apresentadas na Figura 27, para todas as misturas de lodo e cal virgem.

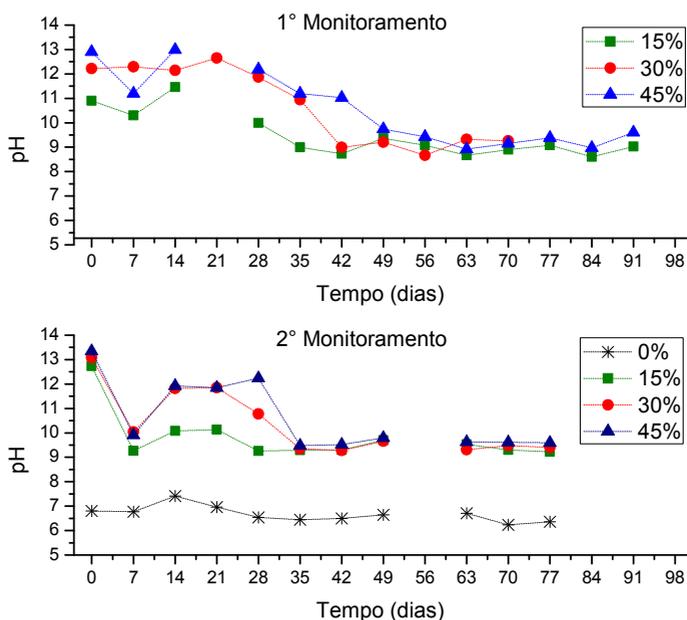


Figura 27. Variação do pH de acordo com cada período experimental.

Para o segundo experimento, onde realizou-se o monitoramento do lodo sem cal, foi possível visualizar que no início do ciclo o pH esteve na faixa de 6,5 a 7 e ao longo do período experimental manteve-se nesse patamar. Para o lodo caledado, as curvas indicaram comportamento semelhante para os dois experimentos, os valores iniciais variaram entre 12 e 14, desta forma atenderam as exigências estabelecidas pela Resolução CONAMA n° 375 (BRASIL, 2006) que estabelece que o pH esteja acima de 12 por 2 h e acima de 11,5 por 24 h.

Posteriormente os valores decaíram gradualmente em função da perda de umidade e tendenciaram ao equilíbrio nas semanas finais. Os resultados da última análise do lodo caledado, para os dois experimentos, foram na faixa de 9 a 10, fator que corrobora para estabilização do resíduo pela técnica aplicada. Os resultados de Comparini (2001), Lima (2010) e Prim (2011) foram semelhantes aos registrados neste experimento.

→ *Escherichia coli*

Para o primeiro experimento, consta na Figura 28 as concentrações de *Escherichia coli* em comparação com a variação da umidade, de acordo com o percentual de CaO adicionado ao lodo, no decorrer do período experimental.

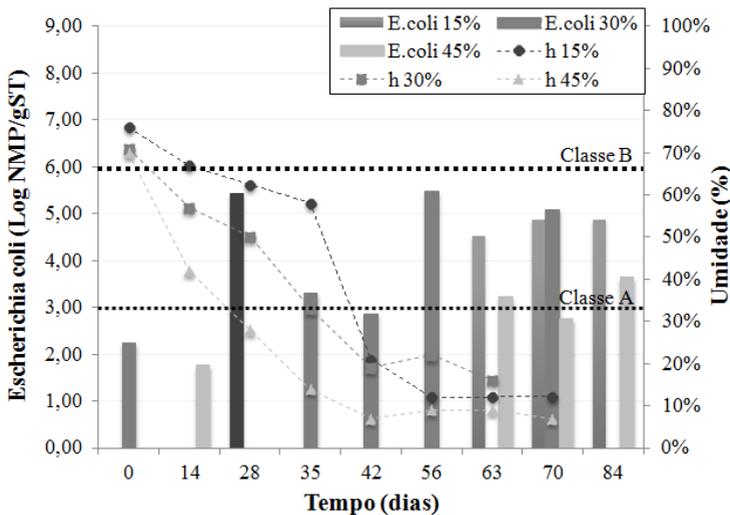


Figura 28. Variação temporal de *Escherichia coli* – 1º experimento.

Para os resultados do primeiro monitoramento as concentrações apresentaram um comportamento bastante distinto ao longo do tempo, imagina-se que uma contaminação possa ter ocorrido durante o revolvimento das misturas, principalmente pelo fato do experimento ter sido montado em datas distintas. Ainda assim, ao final do processo, todas as amostras estavam de acordo com o padrão *Classe B* estabelecido pela Resolução CONAMA n° 375 (BRASIL, 2006).

Para o segundo experimento (Figura 29), as concentrações de *Escherichia coli* em comparação com a variação da umidade, de acordo com o percentual de CaO adicionado ao lodo, no decorrer do período experimental.

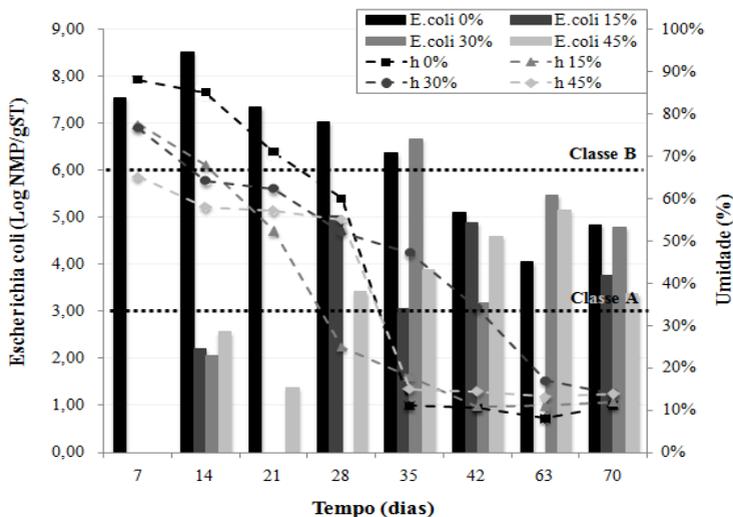


Figura 29. Variação temporal de *Escherichia coli* – 2º experimento.

Para o lodo sem cal observou-se um decaimento das concentrações ao longo do período experimental. Para o lodo caledado, as concentrações de *E. coli* apresentaram-se zeradas no início do processo, provavelmente em função da elevação do pH registrada no mesmo período, posteriormente foi visualizado um recrescimento dos microrganismos e novamente um decaimento ao final do período experimental. Em comparação com a umidade, para todas as misturas, a contagem dos micro-organismos diminuiu com o decaimento da umidade, favorecendo a estabilização e higienização do material. No final do processo todas as amostras estavam de acordo com o padrão Classe B estabelecido pela Resolução CONAMA n° 375 (BRASIL, 2006).

### → Resultados Compilados

Para facilitar a avaliação dos resultados apresentados e comentados a cima, apresenta-se na Tabela 26 a faixa de variação de

cada parâmetro, no início e no fim dos dois monitoramentos, em comparação com estudos realizados com conformação semelhante. No Apêndice VI consta o detalhamento dos dados obtidos para os experimentos de caleação.

Tabela 26. Compilação dos resultados dos experimentos de caleação.

EXPERIMENTOS	pH		Umidade (%)		SV/ST (%)		<i>E.coli</i> (NMP/gST)		Ovos Helmintos (ovos viáveis /gST)	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Inicial	Inicial	Final	Inicial	Final
<b>COMPARINI (2001)</b> <sup>1</sup>	6,0 a 7,7	6,0 a 7,7	82 a 84	9,7 a 11,5	73	53	5,37	<3	27,06	0,00
<b>LIMA (2010) lodo sem cal</b> <sup>2</sup>	6,2 a 7,3	5,1 a 6,4	85,2 a 89,1	5,9 a 27,9	64,6 a 79,7	36,0 a 45,7	4 a 5	<0,5 a 2	0,21 a 0,29	0,11 a 0,16
<b>LIMA (2010) lodo com cal</b> <sup>2, 3</sup>	12 a 12,4	7,7 a 8,1	82,3 a 87,9	5,7 a 21,9	52,1 a 66,5	33,0 a 35,4	<0,5	<0,5 a 1	0,17 a 0,31	0,09 a 0,16
<b>PRIM (2011)</b> <sup>4</sup>	13,3	9,5	62	6	39	38	7,9 x 10 <sup>2</sup>	1,8x 10 <sup>1</sup>	-	-
<b>1º Experimento 15 % de cal</b>	-	9,0 a 9,1	78 a 80	12	35 a 39	32 a 42	0,00	4,88	-	0,33
<b>1º Experimento 30 % de cal</b>	12,2 a 12,3	-	69 a 75	16	42 a 44	34 a 39	2,24	5,08	-	0,30
<b>1º Experimento 45 % de cal</b>	-	9,4 a 9,5	69 a 71	7 a 8	14 a 24	30 a 34	0,00	3,64	-	0,08
<b>2º Experimento 0 % de cal</b>	6,8	6,3 a 6,4	88	11 a 12	68	44 a 56	7,53	4,84	-	-
<b>2º Experimento 15 % de cal</b>	12,7	9,2	78	12	45	37 a 38	0,00	3,75	-	-
<b>2º Experimento 30 % de cal</b>	13,1	9,4	77	10 a 11	39	29 a 32	0,00	4,78	-	-
<b>2º Experimento 45 % de cal</b>	13,4	9,6	65	10 a 11	27	27 a 30	0,00	3,37	-	-

Obs.: A segunda casa decimal de alguns resultados foi arredondada.

<sup>1</sup> Resultados referentes ao lodo sem adição de cal, apenas submetido ao processo de secagem em estufa agrícola.

<sup>2</sup> Os resultados de Lima (2010) englobam a média dos valores dos 3 ciclos realizados e consideram a etapa de lodo não digerido.

<sup>3</sup> O teor de CaO adicionado no experimento de Lima (2010) foi de 13,5 %.

<sup>4</sup> O teor de cal adicionado no experimento de Prim (2011) foi de 15 %.

De modo geral, todos os parâmetros apresentaram-se de acordo ou levemente superiores à variação dos valores da literatura. Os discrepantes podem estar associados ao fato de que, no início do período experimental o monitoramento não foi realizado. Com relação aos parâmetros bacteriológicos, cabe a consideração de que o lodo utilizado nesta pesquisa encontrava-se com maior concentração de *E. coli* e ovos de helmintos, em relação às referências, tanto no início como no final do processo (para os casos onde havia registro de dados). Concentrações próximas de zero no início do processo são justificadas pelo efeito da cal na mistura com lodo.

Os resultados relativos à caracterização final das misturas de lodo e cal virgem constam na Tabela 27.

Tabela 27. Resultados da caracterização final do lodo caleadado.

Processo de Tratamento	Caleação				
	-	Lodo 0 %	Lodo 15 %	Lodo 30 %	Lodo 45 %
Parâmetros					
pH em água 1:5 <sup>1</sup>	6,00	9,40	9,80	10,00	
pH em CaCl <sub>2</sub> <sup>1</sup>	5,90	9,30	9,50	9,80	
Teor de Sólidos Totais (%) (m/m)	91,50	90,10	90,44	93,15	
Umidade a 65 ± 5°C (%)	5,82	5,36	5,50	4,23	
Umidade a 105 ± 5°C (%)	8,50	9,90	9,56	6,85	
Densidade (g/cm <sup>3</sup> ) <sup>1</sup>	0,81	0,72	0,67	0,89	
Coliformes Totais (NMP/g ST)	0,00	0,00	0,00	0,00	
Coliformes Fecais (NMP/g ST)	0,00	0,00	0,00	0,00	
<i>Escherichia coli</i> (NMP/g ST)	0,00	0,00	0,00	0,00	
Ovos Helmintos (viáveis ovo/g ST) ( <i>A. lumbricoides</i> )	0,365	0,333	0,295	0,075	
Carbono Orgânico (%) (m/m)	36,87	26,31	26,10	18,90	
Matéria Orgânica (%) (m/m)	63,42	45,25	44,89	32,51	
Cinzas a 550 °C (%) (m/m)	25,57	45,39	51,66	60,94	
Nitrogênio Total (%) (m/m)	5,90	3,10	2,60	2,50	
Nitrogênio Amoniacal (%) (m/m)	1,00	0,60	0,30	0,20	
Fósforo (P) Total (%) (m/m)	1,40	0,90	0,70	0,50	
Fósforo (PO <sub>4</sub> ) (%) (m/m)	4,30	2,80	2,10	1,50	
Alumínio (Al) (%)	1,20	0,70	0,50	0,40	
Cálcio (Ca) (%)	1,10	7,94	10,12	13,67	
Magnésio (Mg) (%)	0,63	5,01	5,91	8,11	
Ferro (Fe) (mg/kg)	12013,00	7828,00	4778,00	4168,00	
Cobre (Cu) (mg/kg)	217,00	115,00	81,00	65,00	
Zinco (Zn) (mg/kg)	540,00	454,00	272,00	215,00	
Cádmio (Cd)(mg/kg)	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	
Chumbo (Pb) (mg/kg)	29,10	11,40	22,70	7,40	
Cromo (Cr) (mg/kg)	26,20	21,60	15,40	11,20	

<sup>1</sup> Ensaios realizados na amostra *in natura*.

<sup>2</sup> Resultados em peso seco a 105 °C ± 5 °C.

As amostras cujos resultados são apresentados na tabela acima foram enviadas para análise no final do mês de fevereiro de 2011, considerando que referem-se ao material gerado no primeiro experimento e que o período experimental encerrou no início de dezembro de 2010. O tempo entre o final do monitoramento e o envio das amostras para caracterização geral contribuiu para uma maior higienização do lodo caledado. A presença de coliformes não foi detectada neste estágio, provavelmente em função do baixo teor de umidade das amostras analisadas, cujos valores foram inferiores à 10%. Contudo, a presença de ovos viáveis helmintos (*A. lumbricoides*) foi detectada, provavelmente por serem comprovadamente os organismos mais resistentes aos processos de higienização, fator que o torna um indicador da sanidade do lodo (GONÇALVES *et al.*, 2001; ANDREOLI, 2006). Com relação à classificação do lodo em relação à Resolução CONAMA nº 375 (BRASIL, 2006), as misturas de lodo com 0, 15 e 30 % de cal virgem enquadram-se na *Classe B*, enquanto que e a mistura com 45 % atingiu padrão *Classe A* (ovos viáveis < 0,25ovos/g ST).

As concentrações dos parâmetros agronômicos (P, PO<sub>4</sub>, N<sub>total</sub>, NH<sub>4</sub> e Carbono Orgânico) decaíram com o decaimento da matéria orgânica, provavelmente em decorrência do efeito de diluição da cal e da volatilização da amônia por *stripping* (ANDREOLI *et al.*, 2001; FERNANDES e SOUZA, 2001).

Ainda, é possível inferir que de acordo com o aumento do percentual de cal incorporado ao lodo, percebeu-se um aumento gradual nas concentrações de Ca e Mg, ao passo que, a concentração dos outros metais analisados (Cu, Al, Zn, Cr, Fe, Pb, Cd) decaíram, possivelmente em função do efeito de diluição decorrente da adição de sólidos (cal virgem) no lodo e elevação do pH.

De modo geral, os resultados aqui descritos, legitimam a eficiência da técnica de caleação associada à secagem em estufa agrícola para o tratamento do lodo de esgoto.

### → **Avaliação Estatística dos Resultados**

Para a estatística descritiva os resultados constam no Apêndice VII, sendo que, estão condizentes com os valores encontrados para pesquisas semelhantes, que envolvem a adição de cal e secagem do resíduo em estufa agrícola (FERNANDES *et al.*, 1996; COMPARINI,

2001; LIMA, 2010). Para os dados do segundo monitoramento, observou-se menor variabilidade em comparação com os resultados do primeiro experimento, isso porque maior rigor técnico foi implementado para a replicação, durante as atividades em que envolveram o desenvolvimento de análises em laboratório e revolvimento das leiras.

Com relação à estatística inferencial, o primeiro passo foi a aplicação da ANOVA, seguido do teste de Tukey, para verificação da existência de diferenças estatisticamente significativas entre as médias das medidas dos parâmetros, em cada período monitorado, para os dois experimentos de caleação. Na Tabela 28, são apresentados os resultados obtidos, ressaltando que referem-se apenas às amostras caleadas.

Tabela 28. Resultado ANOVA – interceptação dos dois experimentos.

Interceptação	Variável Dependente	ANOVA		Teste de Tukey	
		F <sup>1</sup>	p <sup>2</sup>	Média 1ºExperimento	Média 2ºExperimento
1º Experimento X	pH	0,260	0,611714	10,10200	10,26652
	C. Totais	0,4724	0,496549	4,076000	4,604882
	E. Coli	1,46129	0,235065	3,338667	2,509078
2º Experimento	SV/ST	3,237	0,077563	0,349697	0,376087
	Umidade	0,0211	0,885103	0,320000	0,329091

<sup>1</sup> F de Fisher – Teste de hipóteses.

<sup>2</sup> p-valor: Refere-se ao nível descritivo, é uma estatística utilizada para sintetizar o resultado de um teste de hipóteses.

Visto que o resultado da ANOVA foi positivo (valor p maior que 5 %), conclui-se que os dados dos dois experimentos não diferem entre si. O teste de Tukey, para a comparação das médias gerais pareadas, confirmou o resultado da análise de variância. Tal constatação legitima a evolução do tratamento do lodo, dado que mesmo em épocas distintas os resultados foram semelhantes.

Uma avaliação detalhada foi efetivada pela aplicação do teste de Tukey, contudo, para este caso avaliou-se as médias pareadas de cada parâmetro, em função do tempo e do percentual de mistura, separadamente. Os resultados constam na Tabela 29, e referem-se exclusivamente aos dados do segundo experimento.

Tabela 29. Resultados do teste de Tukey.

Interceptação		pH	SV/ST	Umidade
		p <sup>1</sup>	p <sup>1</sup>	p <sup>1</sup>
Parâmetro X % Mistura	0% - 15%	0,0001	0,0001	0,8905
	0% - 30%	0,0001	0,0001	0,5774
	0% - 45%	0,0001	0,0001	0,9681
	15% - 30%	0,6870	0,0001	0,2064
	15% - 45%	0,1801	0,0001	0,9941
	30% - 45%	0,7850	0,2656	0,3206
Parâmetro X Tempo	0-7	0,5393	0,1169	0,9878
	7-14	0,9902	0,9999	0,9670
	14-21	1,0000	0,9991	0,9674
	21-28	1,0000	1,0000	0,5873
	28-35	0,9906	1,0000	0,0002
	35-42	1,0000	1,0000	0,8967
	42-49	1,0000	1,0000	1,0000
	49-56	1,0000	1,0000	0,9910
	56-63	1,0000	0,9999	1,0000
	63-70	1,0000	1,0000	1,0000
70-77	1,0000	1,0000	1,0000	

<sup>1</sup> p-valor: Refere-se ao nível descritivo, é uma estatística utilizada para sintetizar o resultado de um teste de hipóteses.

Os resultados serão comentados de acordo com a interceptação aplicada:

#### a) Parâmetro X % de Mistura

Com relação ao pH, os resultados da amostra com 0 % de CaO (branco) indicaram diferenças significativas na comparação com as amostras caleadas (15, 30 e 45 % de CaO), o que é deveras positivo já a adição de cal provoca a elevação do pH. Na comparação dos resultados considerando apenas o material com mistura de cal, não foram registradas diferenças significativa.

Para a relação SV/ST, registrou-se diferenças significativas entre todos os percentuais de mistura, com exceção do par 30 % – 45 %. Este resultado confirma a tendência já observada na Figura 25, anteriormente apresentada, que indica que a partir do 35° dia os resultados das duas amostras igualaram-se, apesar de se esperar valores menores para as amostras de 45 % em função do efeito de diluição da cal.

A avaliação do parâmetro umidade não apresentou diferença significativa na comparação entre todos os percentuais de mistura

par a par, o que é favorável pois indica que o decaimento da umidade dentro da estufa agrícola ocorreu de forma uniforme.

## b) Parâmetro X Tempo

De forma geral os resultados não apresentaram diferenças estatisticamente significativas ao longo do tempo, para todos os parâmetros. A única exceção observada foi para a umidade entre os dias 28 e 35. Para melhor visualização do decaimento deste parâmetro ao longo do tempo, apresenta-se na Figura 30 o gráfico das médias não ponderadas associadas a cada intervalo de confiança ( $\pm 95\%$ ).

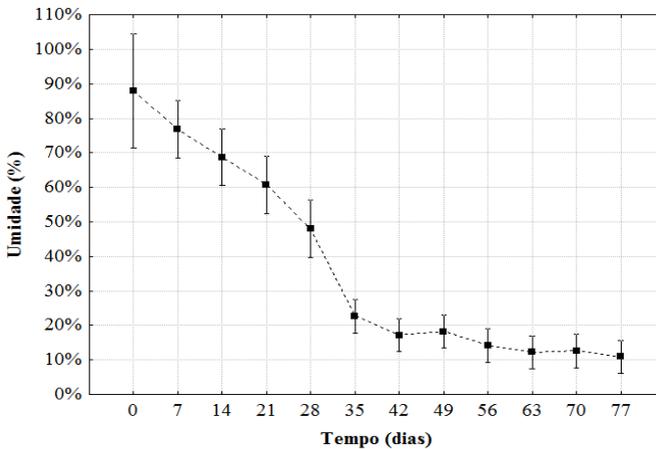


Figura 30. Média não ponderada da umidade – teste de Tukey.

Graficamente, percebe-se uma tendência diferenciada entre os dias 28 e 35, na comparação com o período experimental de forma geral. Outra constatação foi que até o 35º dia de monitoramento o decréscimo da umidade apresentou amplitudes maiores e após esta data as variações foram menos acentuadas.

### 4.1.2.2 Tratamento Térmico

Para o tratamento térmico, apresenta-se, na Tabela 30, o levantamento das características das amostras de acordo com a

temperatura de queima aplicada para a estabilização e higienização do lodo de esgoto.

Tabela 30. Resultado da caracterização final – amostras do processo térmico.

Processo de Tratamento	Térmico		
	300 °C	550 °C	700 °C
<b>Parâmetros</b>			
pH em água 1:5 <sup>1</sup>	6,70	8,60	8,80
pH em CaCl <sub>2</sub> <sup>1</sup>	6,20	8,20	8,50
Teor de Sólidos Totais (%) (m/m)	96,53	97,71	97,93
Teor de Sólidos Fixos (% ST) (m/m) <sup>2</sup>	32,08	52,69	56,96
Teor de Sólidos Voláteis (% ST) (m/m) <sup>2</sup>	67,92	47,31	43,04
Umidade a 65 ± 5 °C (%)	2,88	0,67	1,06
Umidade a 105 ± 5 °C (%)	3,47	2,29	2,07
Densidade (g/cm <sup>3</sup> ) <sup>1</sup>	0,72	0,69	0,65
Coliformes Totais (NMP/g ST)	0,00	0,00	0,00
Coliformes Fecais (NMP/g ST)	0,00	0,00	0,00
<i>Escherichia coli</i> (NMP/g ST)	0,00	0,00	0,00
Ovos Helminthos (viáveis ovo/g ST) ( <i>A. lumbricoides</i> )	0,00	0,00	0,00
Carbono Orgânico (%) (m/m)	37,30	30,50	30,70
Cinzas a 550 °C (%) (m/m)	32,08	52,69	56,96
Nitrogênio Total (%) (m/m)	6,70	5,00	3,90
Nitrogênio Amoniacal (%) (m/m)	0,05	ND <sup>3</sup>	ND <sup>3</sup>
Fósforo (P) Total (%) (m/m)	2,00	3,50	3,20
Fósforo (PO <sub>4</sub> ) (%) (m/m)	6,10	10,70	9,80
Alumínio (Al) (%)	1,50	2,80	3,40
Cálcio (Ca) (%)	1,21	2,02	2,23
Magnésio (Mg) (%)	0,73	1,20	1,26
Ferro (Fe) (mg/kg)	12.468,00	20.798,00	22.983,00
Cobre (Cu) (mg/kg)	266,00	452,00	486,40
Zinco (Zn) (mg/kg)	742,00	1.283,00	1.419,00
Cádmio (Cd)(mg/kg)	< 0,01	1,70	1,20
Chumbo (Pb) (mg/kg)	46,60	73,00	75,50
Cromo (Cr) (mg/kg)	48,00	50,20	52,20

<sup>1</sup> Ensaios realizados na amostra *in natura*.

<sup>2</sup> Resultados em peso seco a 105 °C ± 5 °C.

<sup>3</sup> ND: não detectado.

Para os parâmetros bacteriológicos, nenhuma incidência foi evidenciada, consequência da exposição do resíduo a altas temperaturas de queima. Com relação aos parâmetros de interesse agrônômico, alguns valores registrados reduziram em comparação com os valores obtidos para o lodo *in natura*, fator que evidencia a mineralização do resíduo. Tendências similares foram observadas em outras pesquisas acadêmicas similares (GREYER, 2001; FONTES, 2003; SANTOS, 2003). Para os parâmetros físico-químicos os valores obtidos conferem com o esperado, dado que a aplicação de temperaturas elevadas contribuiu para

a estabilização das amostras (todos os valores de sólidos voláteis estão abaixo de 70 % – valor de referência para a Resolução CONAMA nº 375 (BRASIL, 2006)).

No que refere-se ao teor dos metais, notou-se um aparente acréscimo de concentração de acordo com o aumento da temperatura (°C) aplicada para o tratamento do resíduo. Provavelmente pelo fato de que sob altas temperaturas de combustão ocorre a manutenção da massa dos metais e a diminuição da massa de lodo propriamente dito, fator que evidencia um aumento da concentração na maioria dos metais pesados. Contudo, alguns metais como o chumbo e mercúrio podem apresentar redução de concentração pelo efeito da vaporização e, em seguida, acabam por se condensar na superfície das partículas de cinza (SANTOS, 2003). Na efetivação do processo de queima, os sólidos voláteis são convertidos em gás carbônico e água na presença de oxigênio e, os sólidos fixos são transformados em cinza (GREYER, 2001), que, por sua vez possui uma carga orgânica praticamente nula, porém uma concentração de poluentes superior ao lodo *in natura* (GREYER, 2001). Além disso, para Lin, Luo e Sheen (2005) há um aumento diretamente proporcional à temperatura de ignição do lodo, na estabilização dos metais pesados, o que vai de acordo com os resultados obtidos nesta pesquisa.

Em comparação com a Resolução CONAMA nº 375 (BRASIL, 2006), todas as amostras encontram-se estabilizadas e higienizadas. Os resultados sugerem que, quanto maior a temperatura maior o grau de estabilização e higienização do material. Todavia, durante o processo de decomposição, apesar dos organismos patogênicos e compostos orgânicos tóxicos serem eliminados, os metais pesados continuam presentes nas cinzas e este fator deve ser considerado quando do aproveitamento do resíduo (TSUTIYA *et al.*, 2001; GREYER, 2001; FONTES, 2003; SANTOS, 2003). Ainda assim, os resultados evidenciam a eficiência dos processos térmicos para o objetivo requerido, que relaciona-se fundamentalmente ao tratamento do lodo de esgoto para uso na construção civil.

Na comparação entre os resultados obtidos ao final dos processos de caleção e térmico, afirma-se que as duas técnicas mostraram-se eficientes no sentido de promover o tratamento do resíduo produzido na ETE Insular. Os níveis de estabilização e higienização apresentaram-se mais elevados para as amostras com maior concentração de cal virgem e para as amostras submetidas à maior temperatura de queima, o que era esperado dado o registros de outras pesquisas acadêmicas

(COMPARINI, 2001, GREYER, 2001; FONTES, 2003; SANTOS, 2003; LIMA, 2010). Neste contexto, os objetivos relacionados ao tratamento do lodo de esgoto foram atingidos para as duas técnicas implementadas nesta pesquisa.

## 4.2 TUBOS DE CONCRETO

Para esta etapa experimental, os resultados apresentados a seguir referem-se à determinação do índice de atividade pozolânica, dosagem do concreto e fabricação experimental dos tubos de concreto.

### 4.2.1 Índice de Atividade Pozolânica

Foram executados dois testes para a determinação do IAP, cada qual por uma metodologia distinta. A resistência média obtida no ensaio de compressão axial dos corpos de prova é apresentada na Figura 31 seguindo a NBR 5.752 (ABNT, 1992) e na Figura 32 os dados referentes à produção seguindo Gava (1999).

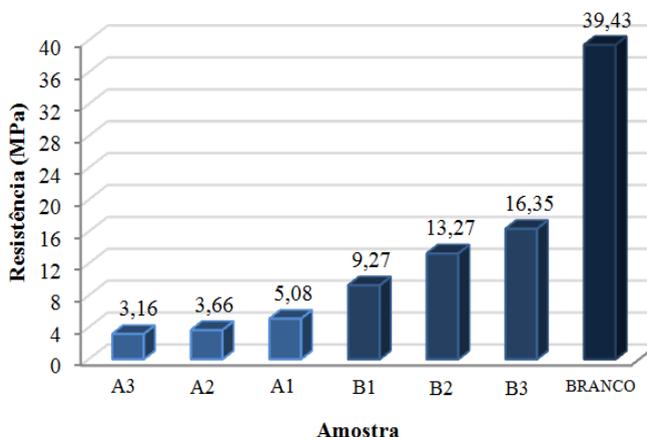


Figura 31. Resistência dos CPs – metodologia NBR 5.752 (ABNT, 1992).

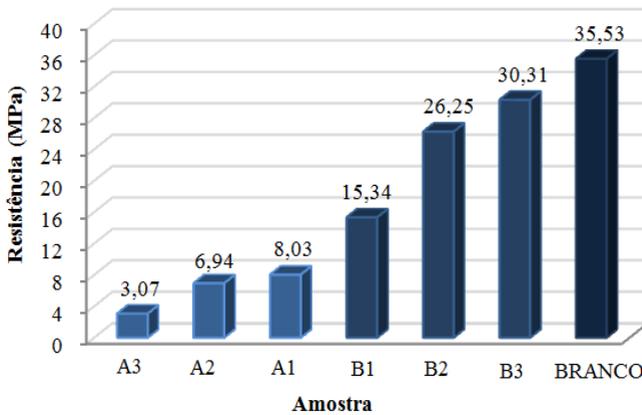


Figura 32. Resistência dos CPs – metodologia Gava (1999).

A resistência dos CPs com incorporação de pozolana foi consideravelmente menor do que a resistência obtida para o CP branco (sem pozolana), o que é deveras negativo dado que a redução foi superior a 50 %. As resistências obtidas seguindo a metodologia de Gava (1999) foram razoavelmente maiores, principalmente para as amostra resultantes do processo térmico (B1, B2 e B3). Ainda assim, observou-se que em todos os ensaios, a ordem de classificação das pozolanas foi sempre a mesma.

O IAP foi determinado conforme descrito no *item 3.2.1* e exemplificado nos Apêndices I e II, e o resultado consta nas Figuras 33 e 34, de acordo com a metodologia empregada.

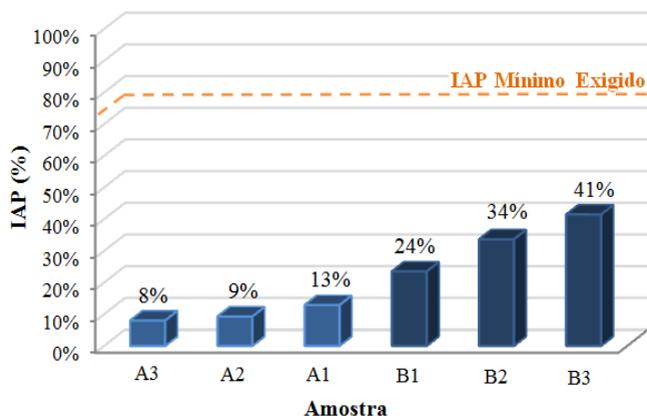


Figura 33. IAP – metodologia NBR 5.752 (ABNT, 1992).

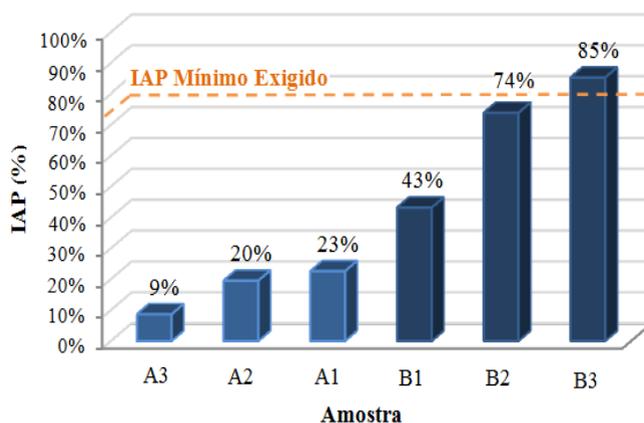


Figura 34. IAP – metodologia Gava (1999).

A aplicação de todas as amostras às argamassas testadas como estabelecido pela NBR 5.752 (ABNT, 1992), indicou valores inferiores ao estabelecido como IAP mínimo pela NBR 12.653 (ABNT, 1992). Todavia, para o procedimento realizado de acordo com Gava (1999), os resultados mostraram-se mais adequados no sentido de viabilizar o aproveitamento do resíduo em estudo, visto que a amostra B3 (lodo de esgoto submetido ao processo térmico à temperatura de 700 °C) teve um IAP superior ao valor mínimo exigido pela norma acima mencionada.

Outra relação passível de ser analisada refere-se à quantidade de água requerida para a produção das argamassas (vide Apêndices I e II). Para todas as misturas o volume utilizado foi abaixo da percentagem máxima permitida pela NBR 12.653 (ABNT, 1992). Os valores de referência da norma são descritos na Tabela 31.

Tabela 31. Exigências físicas para um material pozolânica.

Propriedades	Classes de Material Pozolânico		
	N	C	E
<b>IAP</b>			
Teste feito com cimento aos 28 dias, em relação ao controle (% mínima)	75	75	75
Água requerida (% máxima)	115	110	110

FONTE: Adaptado de NBR 12.653 (ABNT, 1992).

Segundo Gava (1999) o fato de algumas metodologias apresentarem relação água/aglomerante variável, pode influenciar diretamente na resistência dos CPs. Pozolanas com elevada área específica apresentam desempenho inferior, por consumirem mais água e conseqüentemente apresentarem maiores relações água/aglomerante (GAVA, 1999; COUTAND, CYR e CLASTRES, 2006). O resultado deste ensaio também pode sofrer influência de outros agentes, tais como algumas características da pozolana utilizada, o teor de substituição, o tipo de cimento utilizado e a cura dos CPs. Algumas características geotécnicas relativamente às pozolanas testadas constam no Anexo II, salienta-se apenas que trata-se de um material com elevada finura, cujo peso específico varia de 1.829 a 1.085 kg/m<sup>3</sup>. Deste modo, alguns fatores que não foram controlados nesta pesquisa podem ter influenciado os resultados obtidos.

Ainda assim, alterações significativas foram constatadas relativamente às duas metodologias utilizadas para determinação do IAP. Como percebeu-se que ao fixar o volume de água obteve-se melhores resultados, é presumível que a exigência por água pode levar a uma diminuição no desempenho mecânico das argamassas (COUTAND, CYR e CLASTRES, 2006). Existem várias metodologias consolidadas no que tange a determinação do índice de atividade

pozolânica, contudo, os resultados adquiridos corroboram para a contestação das mesmas, já que os valores foram consideravelmente distintos quando da aplicação de uma variação do proposto pela NBR 5.752 (ABNT, 1992). Os estudos de Gava (1999), concluíram que nem sempre os IAPs são bons indicativos do real desempenho das pozolanas nas argamassas, sendo que na maioria dos casos indicam um desempenho inferior.

Ainda assim, a viabilização do uso dos materiais pozolânicos em substituição ao cimento Portland está condicionada ao enquadramento com os padrões estabelecidos pela NBR 12.653 (ABNT, 1992), acima apresentados. No entanto, no que tange às etapas seguintes desta pesquisa, é sabido que há diferenças no desenvolvimento da resistência de argamassas e de concretos, pois em concretos a interface pasta-agregado influencia decisivamente na resistência do material (GAVA, 1999).

Em função dos valores alcançados nos ensaios, para as fases seguintes optou-se pela substituição da areia fina pelos subprodutos. Considerando que o IAP de 75% foi atingido apenas pela amostra B3, seguindo a metodologia de Gava (1999), o critério para a escolha dos subprodutos mais adequados para serem utilizados na fabricação experimental de tubos de concreto, foi baseado no grau de tratamento das amostras, sendo que um alto grau foi exigido dado o uso futuro dos pré-moldados em redes de drenagem. Alguns aspectos ambientais atrelados ao processo de estabilização e higienização das mesmas, também foram considerados. Como as amostras resultantes da caleação não apresentaram diferenças significativas relativamente ao índice de atividade pozolânica, a amostra selecionada foi a A3 (lodo de esgoto misturado com 45 % de CaO), a mesma foi denominada experimentalmente como *Subproduto A*. Para o material resultante do processo térmico optou-se pela amostra B1 (lodo de esgoto submetido ao processo térmico à temperatura de 300 °C), pois apresentava um grau de tratamento adequado e principalmente em função dos danos causados ao meio ambiente quando da calcinação do lodo de esgoto a temperaturas mais elevadas (550 °C e 700 °C), a mesma foi denominada experimentalmente como *Subproduto B*.

→ **Detalhamento das características do *Subproduto A e B***

Para melhor identificação da composição de cada subproduto, especialmente quanto à forma em que se apresentam (amorfa ou cristalina) foi realizada a análise de difração por raio-x. Esta análise auxilia na avaliação da atividade pozolânica dos materiais. Nas Figuras 35 e 36 constam os difratogramas para o *Subproduto A e B*, respectivamente.

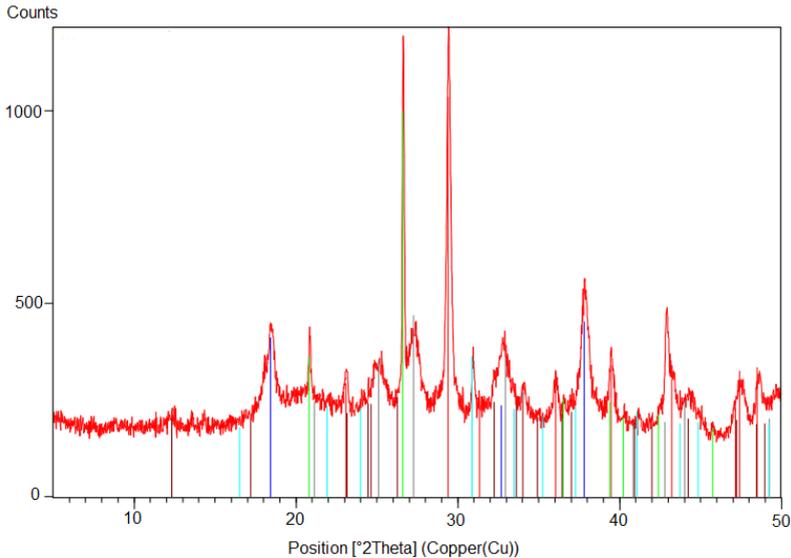


Figura 35. Difração por raio-x do *Subproduto A*.

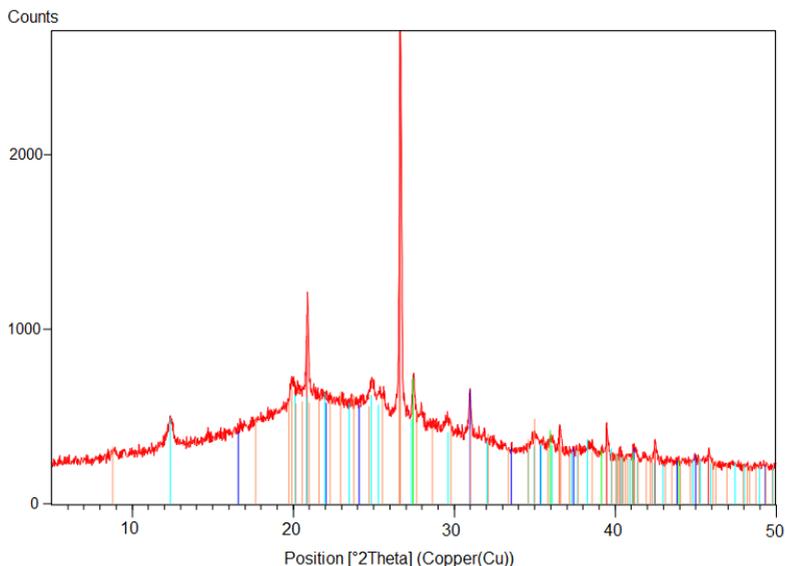


Figura 36. Difração por raio-x do *Subproduto B*.

Na cor vermelha tem-se o difratograma obtido, onde são assinaladas as linhas correspondentes às fases identificadas. Para o *Subproduto A* os principais compostos identificados foram: calcita, brucita, quartzo, vaterita, dolomita e brownmillerita. Para o *Subproduto B* os principais compostos identificados foram: quartzo, dolomita, rutilo, caulinita, muscovita. De modo geral os resultados indicam que as duas amostras apresentam fase cristalina, o que indica baixa atividade pozolânica, corroborando com o obtido na determinação do IAP para os dois materiais. Segundo Greyer (2001) as partículas cristalinas, como quartzo, mulita, hematita, anidrita, entre outras, não possuem alta atividade pozolânica.

Os resultados referentes às análises de microscopia eletrônica de varredura são apresentados nas imagens da Figura 37. Por meio de análise de MEV/EDS foi possível analisar as principais alterações na estrutura morfológica e os elementos químicos dos grãos de lodo antes e após os processos de tratamento (caleação e térmico).

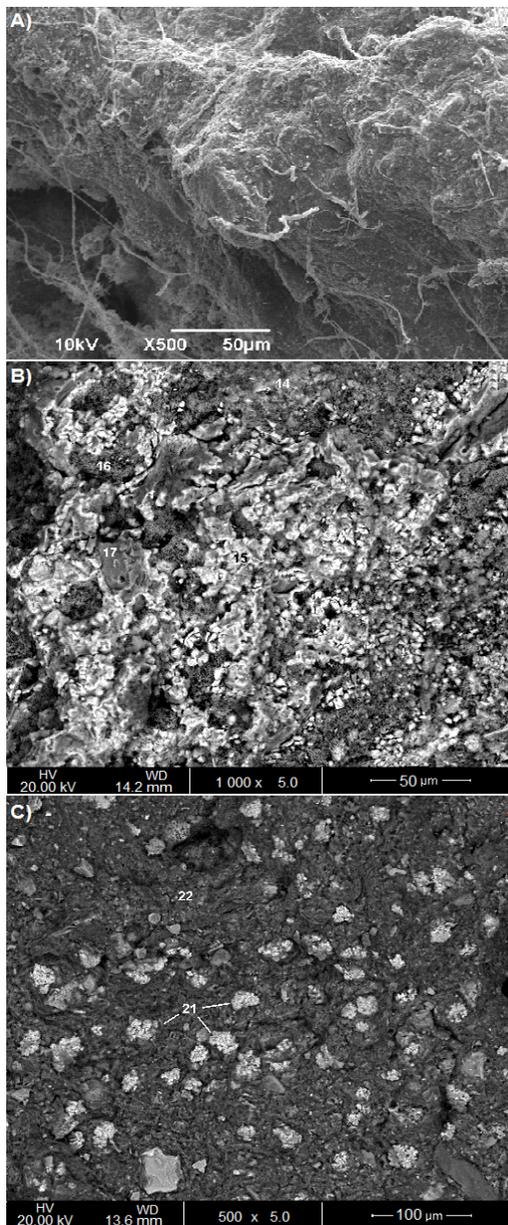


Figura 37. Resultados do MEV. A) amostra do lodo in natura; B) amostra do *Subproduto A*; e C) amostra do *Subproduto B*.

Nas imagens é possível visualizar diferenças marcantes na composição estrutural dos três materiais. Com relação ao lodo *in natura* (Figura 37-A) nota-se uma composição homogênea e filamentososa, trata-se de uma agregação de pequenas partículas tal como foi constatado por Kim, Cho e Yim (2005). Para os dois subprodutos foi identificada a incidência de grãos irregulares e o detalhamento de arranjos característicos é apresentado na Figura 38.

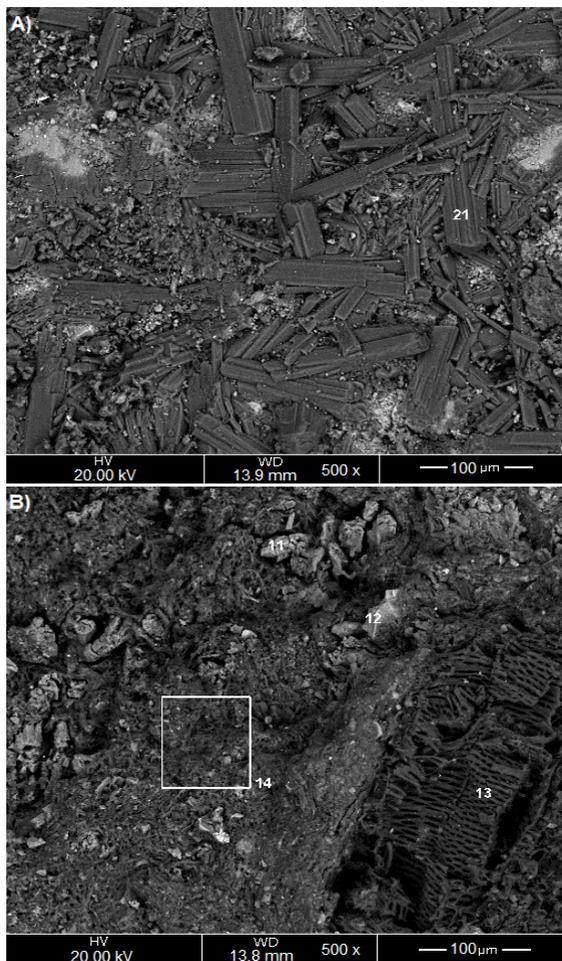


Figura 38. Resultados do MEV. A) amostra do *Subproduto A*; e B) amostra do *Subproduto B*.

Para o *Subproduto A* observou-se a presença de pequenas partículas onde os vazios são preenchidos pelos finos existentes. Resultados semelhantes foram obtidos por Kim, Cho e Yim (2005) em suas pesquisas com lodo de esgoto submetido à caleação. Também foram visualizados cristais em formato de agulhas, formação típica de compostos hidratados (C-S-H), neste caso influência da presença da cal virgem. O composto resultante da reação entre a cal virgem e a água é o  $\text{Ca(OH)}_2$  (hidróxido de cálcio). Segundo Taylor (1990) sua morfologia é variável e se apresenta desde largos prismas hexagonais até finos e alongados cristais, sua presença contribui muito para a resistência dos materiais.

Para o *Subproduto B* constatou-se que é formado por grãos irregulares, alguns em formato de favo de mel onde os orifícios das partículas de maior dimensão são preenchidos por materiais finos, concordando com as pesquisas de Greyer (2001) e Coutand, Cyr e Clastres (2006), para lodo de esgoto submetido à tratamento térmico. De forma geral, as partículas têm um formato mais angular do que arredondado, o que as torna mais suscetíveis à quebra (PINTO, 2003).

O formato dos grãos tem muita importância no comportamento mecânico dos materiais, pois determina como eles se encaixam e se entrosam. Além disto, é indicativo de como eles deslizam entre si quando solicitados por forças externas (PINTO, 2003). Fator que justifica a análise das amostras de lodo *in natura*, *Subproduto A* e *B* por microscopia eletrônica de varredura.

A Figura 39 traz o resultado da análise de MEV/EDS, para melhor entendimento da composição dos grãos compõem cada material.

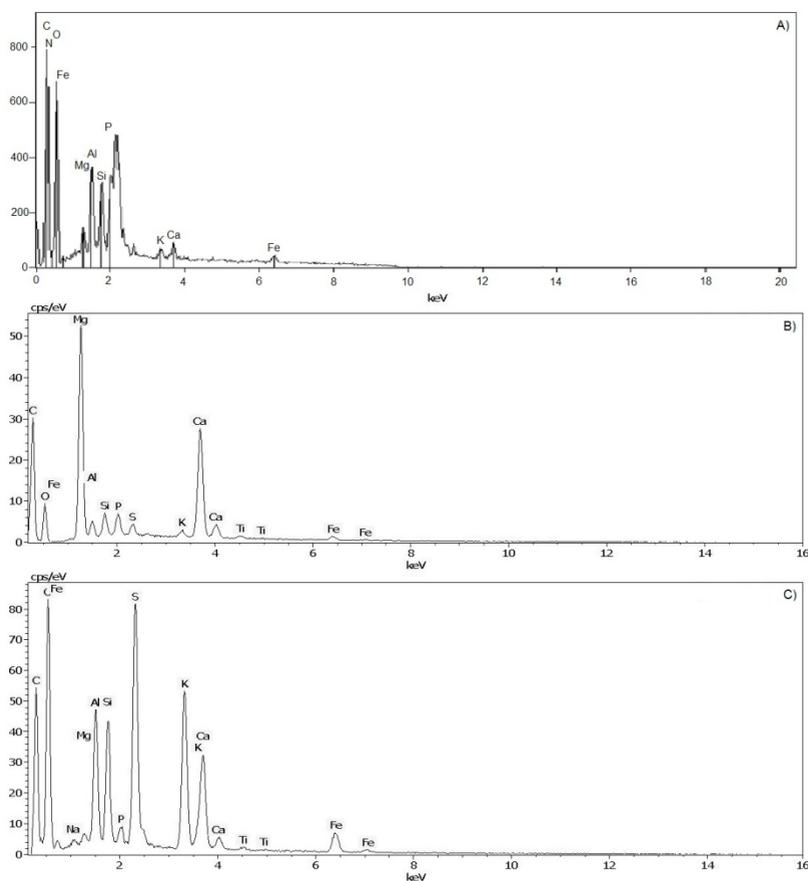


Figura 39. Resultados do MEV/EDS. A) amostra do lodo in natura; B) amostra do *Subproduto A*; e C) amostra do *Subproduto B*.

Através da Figura 39-A constatou-se que os grãos têm várias composições, dentre os quais destaca-se os elementos orgânicos em maior quantidade (C, O, N e P) e alguns minerais como Si, Fe, Al, Ca, K, Mg e Na. Na Figura 39-B foi possível identificar picos marcantes de cálcio e magnésio consequência do processo de caleação do lodo. Outros elementos orgânicos e minerais também foram identificados, porém com amplitudes menores. Através da Figura 39-C foi constatado que o aglomerado de partículas muito finas depositadas sobre os grãos de maior dimensão constitui-se de diversos compostos químicos e não somente de um único material. Entre os compostos foram identificados

o sódio, magnésio, alumínio, enxofre, potássio, cálcio, titânio e ferro, tal como foi publicado por Greyer (2001).

Os resultados relativamente às análises de lixiviação e solubilização, para os dois subprodutos analisados, são apresentados na Tabela 32 acompanhados da comparação com os valores para o lodo de esgoto *in natura*.

Tabela 32. Lixiviação e solubilização – *Subprodutos A e B*.

Amostra	Parâmetros	Lodo <i>in natura</i>	Subproduto A	Subproduto B
Lixiviada	Coliformes Termotolerantes (NMP/100 mL)	1300000	< 1,8	< 1,8
	Coliformes Totais (NMP/100 mL)	1300000	< 1,8	< 1,8
	<i>Escherichia coli</i> (NMP/100 mL)	Presente	< 2,0	< 2,0
	Salmonella	Ausente	Ausente	Ausente
	<i>Streptococcus fecalis</i> (NMP/100 mL)	Presente	0,00	0,00
	Ovos Helmintos (viáveis ovo/g ST) ( <i>A. lumbricoides</i> )	0,04	0,004	Ausente
	Protozoários (cistos/g ST) ( <i>Entamoeba coli</i> )	0,02	0,005	Ausente
	Teor de Arsênio (µg/L)	< 1,5	< 1,5	< 1,5
	Teor de Bário (mg/L)	< 0,5	< 0,5	< 0,5
	Teor de Cádmio (mg/L)	< 0,001	< 0,0008	< 0,0008
	Teor de Chumbo (mg/L)	0,074	< 0,04	< 0,04
	Teor de Cromo Total (mg/L)	0,047	0,0509	0,0423
	Teor de Mercúrio (µg/L)	< 0,05	< 0,2	< 0,2
	Teor de Selênio (µg/L)	< 2	< 2	< 2
	Fluoreto (mg/L)	1,48	1,71	3,6
Teor de Prata (mg/L)	< 0,002	< 0,0015	< 0,0015	
Solubilizada	Coliformes Termotolerantes (NMP/100 mL)	27000	< 1,8	< 1,8
	Coliformes Totais (NMP/100 mL)	27000	< 1,8	< 1,8
	<i>Escherichia coli</i> (NMP/100 mL)	Ausente	< 2,0	< 2,0
	Salmonella	Ausente	Ausente	Ausente
	<i>Streptococcus fecalis</i> (NMP/100 mL)	< 1,8	0,00	0,00
	Ovos Helmintos (viáveis ovo/g ST) ( <i>A. lumbricoides</i> )	0,03	0,005	Ausente
	Protozoários (cistos/g ST) ( <i>Entamoeba coli</i> )	0,02	Ausente	Ausente
	Teor de Alumínio (mg/L)	< 0,200	< 0,100	< 0,100
	Teor de Arsênio (µg/L)	< 1,5	< 1,5	< 1,5
	Teor de Bário (mg/L)	< 0,5	< 0,5	< 0,5
	Teor de Cádmio (mg/L)	< 0,001	< 0,0008	< 0,0008

Pela avaliação dos resultados obtidos para os subprodutos, em comparação com o lodo *in natura*, percebe-se a evolução no sentido do tratamento do resíduo, pois a maioria dos parâmetros apresentou considerável redução. Ainda, é possível afirmar que para os limites regulamentados pela NBR 10.004 (ABNT, 2004d), todos os valores obtidos estão abaixo do estabelecido.

## 4.2.2 Dosagem do Concreto

Os resultados obtidos no teste de dosagem do concreto serão apresentados a seguir, associados à avaliação estatística dos dados obtidos no experimento. Na Figura 40 consta uma imagem dos CPs produzidos de acordo com o percentual de mistura de cada subproduto.

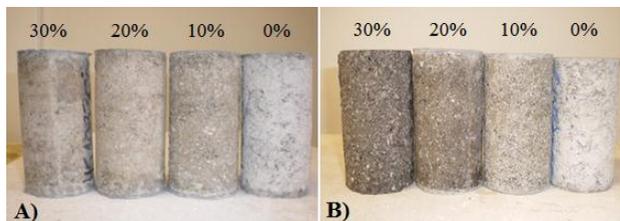


Figura 40. Corpos de prova. A) Com incorporação do *Subproduto A*; B) Com incorporação do *Subproduto B*.

As imagens mostram claramente a mudança na coloração dos CPs associada ao percentual do resíduo adicionado ao concreto. Para o *Subproduto A*, a alteração é mais sutil, mas para o *Subproduto B* o tom escuro é bem marcante, principalmente para os CPs com 20 e 30 %. Comercialmente esta é uma característica negativa, pois diminui a aceitação do produto no mercado.

### → Avaliação estatística dos resultados

Como uma réplica do teste de dosagem do concreto foi feita, na Tabela 33 consta o resultado da ANOVA associado às médias obtidas no teste de Tukey, para avaliar a hipótese de igualdade entre os dois conjuntos de dados.

Tabela 33. Resultado da ANOVA – comparação das réplicas.

Subproduto	Traço	ANOVA		TUKEY	
		F <sup>1</sup>	p <sup>2</sup>	Média 1° Grupo	Média 2° Grupo
A	1:7	0,3170	0,574972	11,206	12,028
	1:8,5	1,0702	0,303949	8,551	9,687
	1:10	0,7225	0,397792	7,822	8,670
B	1:7	0,4342	0,511652	11,783	10,810
	1:8,5	0,0938	0,760135	10,689	11,152
	1:10	0,0015	0,969638	9,717	9,769

<sup>1</sup> F de Fisher – Teste de hipóteses.

<sup>2</sup> p-valor: Refere-se ao nível descritivo, é uma estatística utilizada para sintetizar o resultado de um teste de hipóteses.

Os resultados indicaram não existir diferenças estatisticamente significativas entre os conjuntos de dados comparados. Assim, a análise estatística foi realizada considerando apenas um grupo homogêneo de dados, para o concreto com a mesma configuração experimental (subproduto, traço, massa específica e percentagem de mistura).

A resistência à compressão axial dos corpos de prova produzidos é apresentada nas figuras abaixo, através das médias e desvio padrão de cada ponto. Os resultados detalhados referentes à estatística descritiva para todas as variações testadas estão no Apêndice VII. Nas Figuras 41, 42 e 43 constam os resultados para os CPs com incorporação do *Subproduto A* de acordo com o traço de cada concreto.

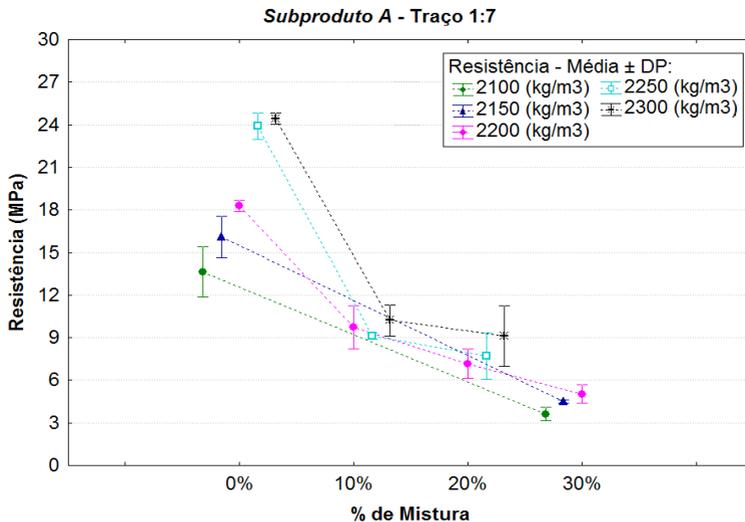


Figura 41. Média e desvio padrão para traço 1:7.

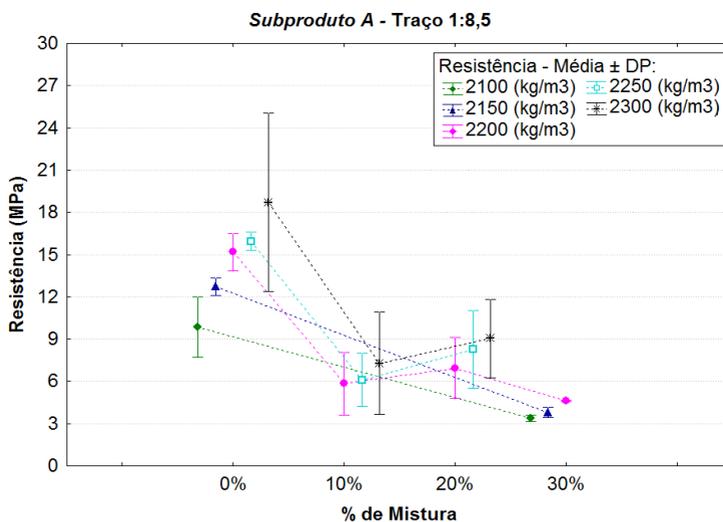


Figura 42. Média e desvio padrão para traço 1:8,5.

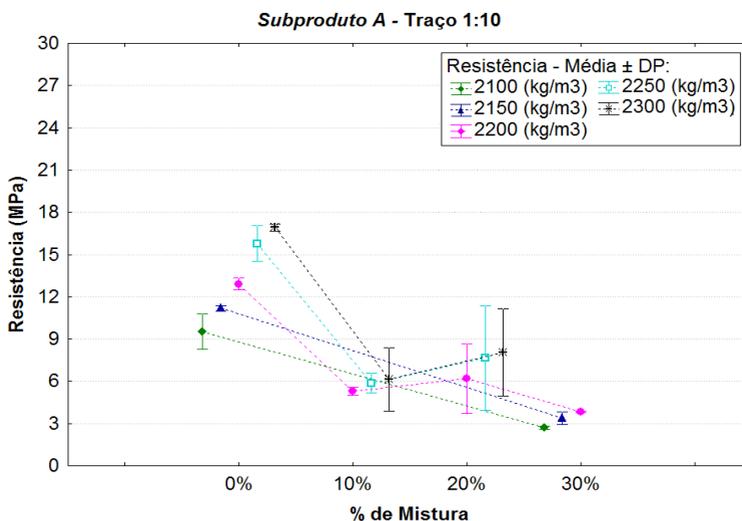


Figura 43. Média e desvio padrão para traço 1:10.

Observou-se um decaimento da resistência com o aumento da percentagem de mistura do subproduto. Para os traços 1:8,5 e 1:10 a resistência dos CPs com 20 % de subproduto foi maior do que com 10 %. Para todos os traços os CPs com 30 % de subproduto indicaram as

resistências mais baixas, variando entre 2,61 e 5,48 MPa. Quanto maior a massa específica dos CP maior a resistência inicial.

Nas Figuras 44, 45 e 46 constam os resultados para os CPs com incorporação do *Subproduto B* de acordo com o traço de cada concreto.

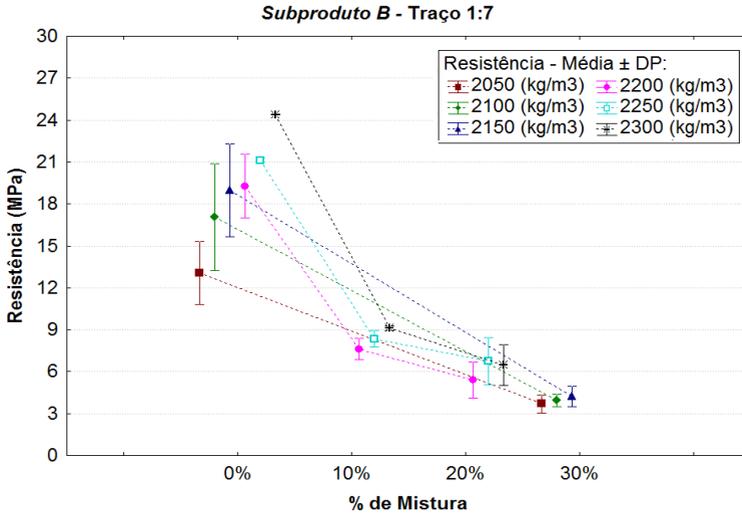


Figura 44. Média e desvio padrão para traço 1:7.

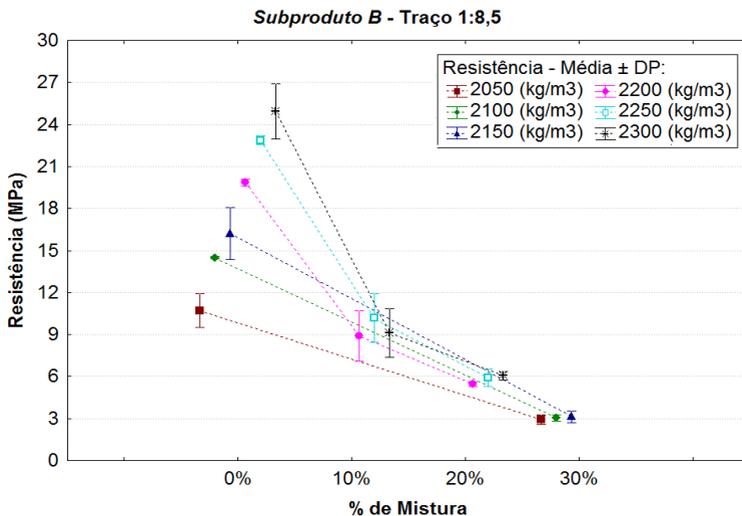


Figura 45. Média e desvio padrão para traço 1:8,5.

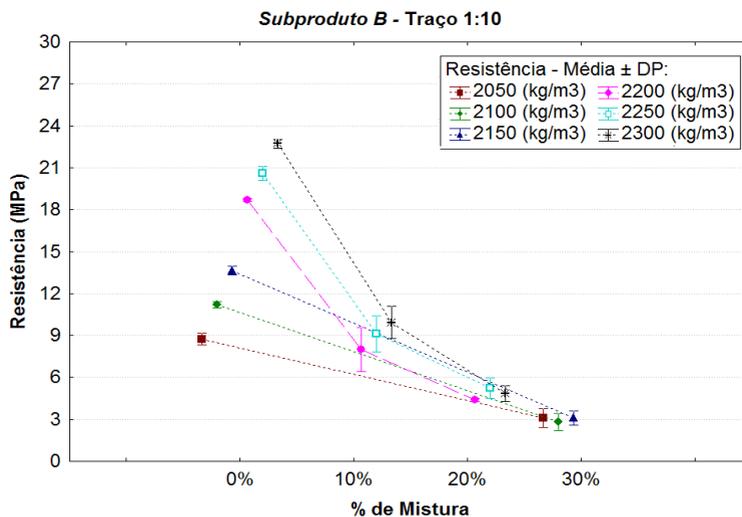


Figura 46. Média e desvio padrão para traço 1:10.

Observou-se um decaimento da resistência com o aumento da porcentagem de mistura do subproduto, tal como foi obtido por Sasaoka, Yokoy e Yamanaka (2006) em seus estudos com lodo incinerado. De modo geral, os CPs com 10 % de subproduto indicaram resistência superior aos com 20 e 30 %. Quanto maior a massa específica dos CPs, maior sua resistência inicial. Não obstante, para os traços 1:8,5 e 1:10 os CPs com 0 % de subproduto e compactados a  $2.050 \text{ kg/m}^3$ , apresentaram resistência inferior aos com 10 % de subprodutos e massa específica superior, mostrando que a diminuição da massa específica provoca efeito negativo para a resistência dos CPs, tanto quanto a adição do subproduto.

Para os dois subprodutos, constatou-se que quanto maior a porcentagem de adição do resíduo, maior a demanda de água requerida pela mistura (vide Apêndices III e IV), tal como foi constatado em outras pesquisas acadêmicas (PAN, TSENG, e LEE, 2003; CHIOU, 2006; COUTAND, CYR e CLASTRES, 2006). Os estudos de Coutand, Cyr e Clastres (2006) indicam que a exigência de água pode levar a uma diminuição no desempenho mecânico das massas e estão relacionadas com a alta porosidade do concreto, dado que os dois subprodutos são compostos principalmente por pequenas partículas (vide Anexo II). Outras considerações cabíveis referem-se ao fato de que o desempenho

de um subproduto está relacionada a características como sua finura, porosidade/área de superfície externa dos poros e grau de amorfismo de suas partículas (MONZÓ, 1996; GAVA, 1999; PAN, TSENG, e LEE, 2003; YEN, TSENG, e LIN, 2011), todavia, estudos mais detalhados seriam necessários para aprofundar esta discussão.

Os resultados referentes à estatística inferencial são apresentados na Tabela 34 para todas as interações testadas.

Tabela 34. Resultado da ANOVA.

Interceptação	ANOVA	
	F <sup>1</sup>	p <sup>2</sup>
Subproduto	9,028	0,004025
Traço	14,250	0,000011
% de Mistura	600,192	0,000000
Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	16,198	0,000003
Subproduto x Traço	11,181	0,000086
Subproduto x % de Mistura	25,084	0,000000
Traço x % de Mistura	2,495	0,053472
Subproduto x Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	0,060	0,941361
Traço x Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	0,116	0,976249
% de Mistura x Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	3,899	0,007467
Subproduto x Traço x % de Mistura	4,173	0,005125
Subproduto x Traço x Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	0,193	0,940962
Subproduto x % de Mistura x Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	0,444	0,776519
Traço x % de Mistura x Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	0,197	0,990112
Subproduto x Traço x % de Mistura x Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	0,410	0,909696

<sup>1</sup> F de Fisher – Teste de hipóteses.

<sup>2</sup> p-valor: Refere-se ao nível descritivo, é uma estatística utilizada para sintetizar o resultado de um teste de hipóteses.

Os resultados indicaram haver diferenças estatisticamente significativas quando da interceptação do subproduto e traço ou percentual de mistura, assim como na avaliação de cada fator isolado. Conclui-se que, a associação destes fatores ou sua ação isolada não influenciou significativamente a resistência dos corpos de prova produzidos.

Para a interceptação: percentual de mistura e massa específica, também obteve-se diferenças significativas, isso porque tais fatores têm influência inversamente proporcional na resistência dos CPs. Para todas as outras avaliações os resultados demonstraram não haver discrepância, inclusive na interceptação de todas as variáveis independentes em relação à resistência. Esse resultado valida a hipótese de todos os fatores tem influência sob resistência dos corpos de prova.

Nas Figuras 47 e 48 é possível a visualização da variação das médias não ponderadas das resistências dos CPs com incorporação dos

*Subprodutos A e B*, de acordo com a variação do traço, massa específica e percentual de mistura. Consta, também, o intervalo de confiança com variação de 95 % para mais e para menos.

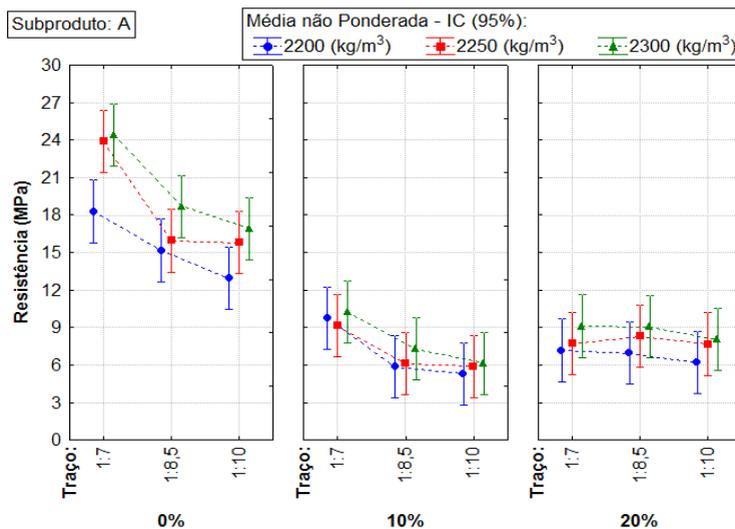


Figura 47. Média não ponderada – resultado ANOVA.

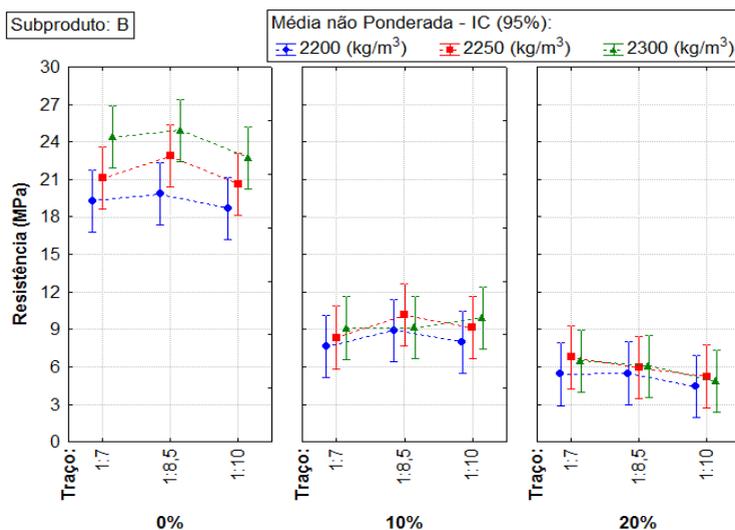


Figura 48. Média não ponderada – resultado ANOVA.

Para o *Subproduto B*, com 0 % de incorporação, não observou-se um decaimento linear da resistência com a variação no traço de composição dos materiais. O decaimento linear, tal como ocorreu para o *Subproduto A*, era esperado para os dois casos, dada a redução na quantidade de cimento e aumento na quantidade dos agregados na composição de cada concreto (vide *Apêndice III e IV*). Este comportamento pode ser resultado de uma moldagem dos CPs realizada de modo não uniforme.

Ainda assim, por estes gráficos fica claro que para o *Subproduto B* o traço 1:8,5 apresentou as maiores resistências, assim como a mistura de 10 % do resíduo. Deste modo, tais resultados serviam de base para a tomada de decisão em relação à configuração do concreto que foi testado diretamente no tudo. Para o *Subproduto A*, as tendências marcantes pareceram não ser as mais adequadas para a continuidade dos estudos. Na Tabela 35 consta a configuração testada diretamente no tubo de concreto.

Tabela 35. Configuração selecionada para o concreto

Subproduto	A e B
Traço	1:8,5
% de mistura	10 %
Massa Específica	2.250 kg/m <sup>3</sup>

Com relação à massa específica, cabe destacar que foi selecionada apenas para efeito de cálculo, pois na produção em escala real, não foi possível controlar este parâmetro.

Segundo Fontes (2003), a resistência à compressão do concreto pode ser afetada por diversos fatores, tais como as propriedades dos materiais, traço do concreto, grau de adensamento, condições de cura e principalmente da relação água/aglomerante. Ainda assim, a queda na resistência foi maior do que 50 % o que é uma característica negativa para os estudos para fabricação de tubos de concreto. Com relação ao *Subproduto A*, poucas pesquisas foram encontradas no sentido de viabilizar a sua utilização no concreto, porém para o *Subproduto B* todos os estudos que indicaram tendências positivas, relacionam-se com a submissão do lodo de esgoto a temperaturas de queima superiores, variando de 600 a 1200 °C (MORALES, 1999; FONTES, 2003; CHEN, CHIOU e WANG, 2006; COUTAND, CYR e CLASTRES; 2006; SALES e SOUZA, 2009).

Na Tabela 36 são apresentados os resultados referentes à lixiviação e solubilização dos blocos de concreto cuja configuração foi

selecionada para a continuidade dos estudos em comparação com um bloco convencional.

Tabela 36. Lixiviação e solubilização – blocos de concreto.

Amostra	Parâmetros	0%	10% do Subproduto A	10% do Subproduto B
Lixiviada	Coliformes Termotolerantes (NMP/100 mL)	< 1,8	< 1,8	< 1,8
	Coliformes Totais (NMP/100 mL)	< 1,8	< 1,8	< 1,8
	<i>Escherichia coli</i> (NMP/100 mL)	Ausente	Ausente	Ausente
	Salmonella	Ausente	Ausente	Ausente
	<i>Streptococcus fecalis</i> (NMP/100 mL)	0	0	0
	Ovos Helmintos (viáveis ovo/g ST) ( <i>A. lumbricoides</i> )	0	0	0
	Protozoários (cistos/g ST) ( <i>Entamoeba coli</i> )	0	0	0
	Teor de Arsênio (µg/L)	< 1,5	< 1,5	< 1,5
	Teor de Bário (mg/L)	< 0,5	< 0,5	< 0,5
	Teor de Cádmiu (mg/L)	< 0,0008	< 0,0008	< 0,0008
	Teor de Chumbo (mg/L)	0,358	< 0,434	0,367
	Teor de Cromo Total (mg/L)	< 0,005	< 0,005	< 0,005
	Teor de Mercúrio (µg/L)	< 0,2	< 0,2	< 0,2
	Teor de Selênio (µg/L)	< 2	< 2	< 2
Fluoreto (mg/L)	0,157	0,779	1,72	
Teor de Prata (mg/L)	< 0,0015	< 0,0015	< 0,0015	
Solubilizada	Coliformes Termotolerantes (NMP/100 mL)	< 1,8	< 1,8	< 1,8
	Coliformes Totais (NMP/100 mL)	< 1,8	< 1,8	< 1,8
	<i>Escherichia coli</i> (NMP/100 mL)	Ausente	Ausente	Ausente
	Salmonella	Ausente	Ausente	Ausente
	<i>Streptococcus fecalis</i> (NMP/100mL)	< 1,8	< 1,8	< 1,8
	Ovos Helmintos (viáveis ovo/g ST) ( <i>A. lumbricoides</i> )	0	0	0
	Protozoários (cistos/g ST) ( <i>Entamoeba coli</i> )	0	0	0
	Teor de Alumínio (mg Al/L)	0,726	0,67	1,16
	Teor de Arsênio (µg/L)	< 1,5	< 1,5	< 1,5
	Teor de Bário (mg/L)	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Teor de Cádmiu (mg Cd/L)	< 0,0008	< 0,0008	0,0008	

Os resultados indicaram que a presença dos outros materiais não influenciou significativamente o estado de estabilização dos subprodutos, corroborando com as pesquisas de Coutand, Cyr e Clastres (2006) que afirmam que a lixiviação de poluentes para concretos com e sem a adição de pozolanas é da mesma ordem de grandeza. Tais resultados estão de acordo com as constatações de Sales e Souza (2009) que afirmam não haver poluentes nocivos quando da lixiviação de concretos e argamassas produzidos com lodo de ETA e de Kim, Cho e

Yim (2005) que afirmam que a lixiviação de metais pesados é insignificante para lodo de ETE com mistura de CaO. É sabido que o cimento Portland tem ação positiva no tratamento do lodo de esgoto dado que consegue enclausurar resíduos que possuam em sua composição metais pesados e substâncias perigosas (GREYER, 2001).

#### 4.2.3 Fabricação Experimental de Tubos de Concreto

Foram produzidos três tubos de concreto para cada configuração distinta, tal como foi exemplificado no *item 3.2.3* referente à metodologia, e todos foram submetidos ao ensaio de compressão diametral seguindo os preceitos da NBR 8.890 (ABNT, 2007). As imagens da execução do ensaio constam na Figura 49.



Figura 49. Ensaio de compressão diametral dos tubos de concreto. A) Início do ensaio; B) Execução do ensaio (formação de trincas); C) Término do ensaio.

Os resultados obtidos são apresentados na Figura 50, para todos os tubos produzidos.

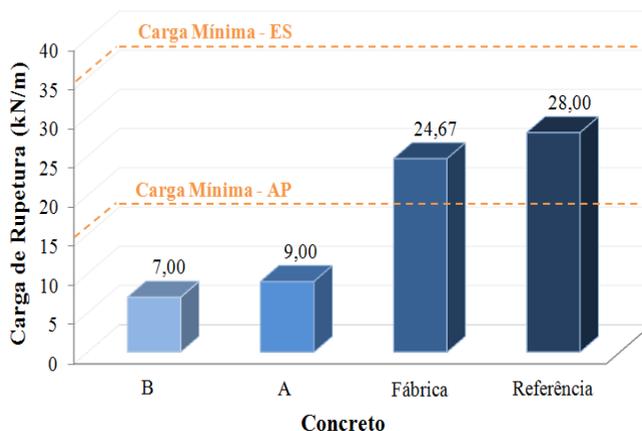


Figura 50. Carga de ruptura para os tubos fabricados.

A carga mínima de ruptura exigida pela NBR 8.890 (ABNT, 2007) é de 16 kN/m para tubos destinados á águas pluviais (AP) e de 36 kN/m para tubos destinados á esgotos sanitários (ES). Como pode ser visto acima, nenhum dos concretos produzidos atingiu a resistência mínima exigida pela norma brasileira para drenagem de esgoto sanitário, enquanto que apenas os tubos confeccionados sem adição de subproduto alcançaram o valor de referência para águas pluviais. Esse resultado reforça as constatações obtidas na fase de conformação desta pesquisa, onde entrevistas realizadas em fábricas do município evidenciaram o descaso por parte das empresas no sentido de seguir os preceitos legais. Essa é uma questão preocupante, pois segundo Figueiredo (2011), como os tubos trabalham enterrados, invariavelmente têm que apresentar uma resistência mecânica compatível com as cargas às quais estarão submetidos, deste modo, os tubos que não conseguirem atingir ou manter a carga de resistência mínima, devem ser rejeitados.

A redução da resistência foi consideravelmente menor para os tubos com incorporação de subproduto, dadas as baixas cargas aplicadas para o seu rompimento. Muitos são os fatores que podem ter influenciado neste resultado, além das questões já abordadas, é possível citar o traço de composição dos materiais, o tamanho diametral, os processos aplicados na fabricação, desforma e cura dos pré-moldados, entre outros (RAMOS, PINTO e FRANCO, 2007; FIGUEIREDO, 2011). A demanda por água foi maior para os tubos com adição de

subproduto (vide *Tabela 18 – item 3.2.3*), o que vai de acordo com o comportamento já identificado nas etapas anteriores.

A norma brasileira que trata dos tubos de concreto (NBR 8.890) traz outras exigências para a comercialização dos tubos de concreto, estas relacionam-se ao acabamento visual, dimensões de tolerância, permeabilidade, estanqueidade e absorção dos tubos de concreto, contudo, como o patamar desejado para a resistência no ensaio de compressão diametral não foi alcançado, as demais verificações não foram realizadas.

## CAPÍTULO V – CONCLUSÕES

---

As características do lodo da ETE Insular encontram-se de acordo com os valores comumente encontrados em literatura. Contudo, o lodo desidratado não encontra-se em estado estabilizado como era esperado por se tratar de um tratamento do tipo lodos ativados com aeração prolongada.

Com relação aos processos de estabilização e higienização testados, é possível afirmar que todos foram eficientes para o objetivo proposto. Ao final dos processos de caleação e térmico, todas as amostras (A1, A2, A3, B1, B2 e B3) poderiam ser enquadradas de acordo com a *Classe B* estabelecida pela Resolução nº 375 (BRASIL, 2006). Ainda, é plausível inferir que o potencial da estufa agrícola se mostrou adequado para a secagem do resíduo, já que bons resultados relativamente à estabilização foram obtidos apenas com a secagem ao ar.

O índice de atividade pozolânica demonstrou ser um parâmetro questionável quando da determinação da ação aglomerante das amostras (A1, A2, A3, B1, B2 e B3), dado que ao aplicar uma variação do teste proposto pela NBR 5.752 (ABNT, 1992) obteve-se resultados consideravelmente melhores relativamente à resistência das argamassas.

A incorporação ao concreto de 10, 20 e/ou 30 % dos *Subprodutos A e B* não se mostrou adequada no que tange a resistência dos corpos de prova, já que na maioria dos casos a redução da resistência foi maior do que 50 % em relação ao concreto sem adição dos resíduos. Com relação aos subprodutos, ambos demonstraram desempenho semelhante. Constatou-se que, quanto maior a massa específica dos CPs maior a resistência no ensaio de compressão axial. Com relação ao traço de mistura dos materiais, verificou-se que para a maioria dos casos o traço intermediário (1:8,5), nem o mais rico nem o mais pobre, indicou os melhores resultados relativamente a resistência dos CPs.

Para os tubos de concreto, foi constatado que, nem mesmo os produzidos sem incorporação de resíduos são enquadráveis nos preceitos da NBR 8.890 (ABNT, 2007), para drenagem de esgoto sanitário. O que é de veras preocupante dado o uso difundido dessa classe de pré-moldados em redes de drenagens e outros fins.

Os resultados obtidos nesta pesquisa não viabilizam a incorporação dos dois subprodutos testados ao concreto para a fabricação de tubos de drenagem. Todavia, já existem outras alternativas consolidadas para o aproveitamento do lodo de esgoto estabilizado e

higienizado. Deste modo, salienta-se que a avaliação ambiental e econômica do processo produtivo de tubos de concreto, considerando a incorporação de lodo de esgoto, estabilizado e higienizado, não foi efetuada nesta pesquisa, dada a comprovada inviabilidade técnica.

## *CAPÍTULO VI – RECOMENDAÇÕES*

---

Considerando a amplitude desta pesquisa acadêmica, que abordou desde a caracterização, estabilização e higienização do lodo de esgoto até sua aplicação em áreas de abrangência da construção civil, e a partir das conclusões obtidas para as pesquisas realizadas até o momento, recomenda-se a realização de:

- Estudos relacionados às características físicas e mecânicas das amostras testadas (A1, A2, A3, B1 B2 e B3);
- Estudos relativos às inter-relações que podem ter influenciado tanto a resistência das argamassas como a resistência do concreto, quando da incorporação das amostras de lodo tratado;
- Estudos para a produção de concreto com incorporação de menor percentual de resíduo em substituição ao agregado;
- Estudos com as amostras A1, A2, A3, B1 B2 e B3 diretamente no concreto para outras aplicações, tais como blocos de concreto sem função estrutural, cuja resistência requerida é de aproximadamente 2,5 MPa de acordo com a NBR 6.136 (ABNT, 2007);
- Estudo da viabilidade ambiental e econômica relativamente ao aproveitamento do lodo de esgoto na produção de artefatos de concreto.

**BIBLIOGRAFIA**

---

AARAB, T.; SMEYERS, M.; REMY, M.; GODDEN, B.; DELHAYE, J. P. The storage of sewage sludge: Influence of liming on the evolution of copper chemical fractions. **Waste Management**, n. 26, p. 1024-1032, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 12.653**: Materiais pozolânicos – Especificação. Rio de Janeiro, 1992. 3p.

\_\_\_\_\_. **NBR 12.655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR 10.007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004a.

\_\_\_\_\_. **NBR 10.006**: Solubilização de resíduos – procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2004b.

\_\_\_\_\_. **NBR 10.005**: Lixiviação de resíduos – procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2004c.

\_\_\_\_\_. **NBR 10.004**: resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro, 2004d.

\_\_\_\_\_. **NBR 8.890**: Tubo de concreto de seção circular para águas pluviais e esgotos sanitários - Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 7.211**: Agregados para o concreto – especificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 7.215**. Ensaios de cimento Portland. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 5.752**: Materiais Pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de Atividade pozolânica. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 5.737**: Cimentos Portland resistentes a sulfatos. Rio de Janeiro: ABNT, 1992. Dirigindo

\_\_\_\_\_. **NBR 5.739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

\_\_\_\_\_. **NM 137**: Argamassa e Concreto – Água para amassamento e cura de argamassa e concreto de cimento portland. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

AKERLUND, A. Evaluation of a disintegration technique for increased biogas production from excess activated sludge, 2008. Disponível em: [http://www.stockholmvatten.se/Stockholmvatten/commondata/rapporter/avlopp/Processer/R03\\_2008\\_Anna\\_Akerlund\\_exame\\_nsarbete.pdf](http://www.stockholmvatten.se/Stockholmvatten/commondata/rapporter/avlopp/Processer/R03_2008_Anna_Akerlund_exame_nsarbete.pdf). Acesso em: 10 fev. 2011.

ALBUQUERQUE, A. S. Agregados. In: BAUER, L. A. **Materiais de construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2000. 447 p. ISBN 85-216-1249-4.

ALMEIDA, G. C.; FANHANI, J. C.; D'OLIVEIRA, P. S.; FILHO, B. P. D. Eficiência dos processos químico e térmico na higienização de lodo de esgoto. CESUMAR, Matingá, v 08, n.1, p.95-99, jul. 2006.

ALLEMAN, J.E.; BERMAN, N. A.; PROUTY, M.F.; Solidification, Encapsulation and Stabilization of Industrial Wastes., Maryland, 1984.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **C 618**: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural pozzolan for use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete. Philadelphia, 1995. 3p.

ANDREOLI, C. V., *et al.* Reciclagem de Biossólidos : Transformando Problemas em Soluções. Curitiba, SANEPAR, FINEP, 1999.

ANDREOLI, C. V. Aproveitamento do Lodo Gerado em Estações de Tratamento de Água e Esgotos Sanitários, Inclusive com a Utilização de Técnicas Consorciadas com Resíduos Sólidos Urbanos. 1 ed. PROSAB: Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. Curitiba, 2001.

ANDREOLI, C. V.; FERREIRA, A. C.; CHERUBINI, C. TELES, C. R.; CARNEIRO, C.; FERNANDES, F. Higienização do Lodo de Esgoto. In: ANDREOLI, C. V. *Aproveitamento do Lodo Gerado em Estações de Tratamento de Água e Esgotos Sanitários, Inclusive com a Utilização de Técnicas Consorciadas com Resíduos Sólidos Urbanos*. 1 ed. PROSAB: Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. Curitiba, 2001.

ANDREOLI, C.V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. Lodo de Esgotos: Tratamento e Disposição Final. DESA/UFMG e SANEPAR. 1. ed. Belo Horizonte, 2001.

ANDREOLI, C. V. Biossólidos: Alternativas de Uso de Resíduos do Saneamento. PROSAB, Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. 1. ed. Curitiba, 2006.

ANDREOLI, C. V.; GARBOSA, L. H. P.; LUPATINI, G.; PEGORINI, E. S. BRAZIL – Wastewater Sludge Management: A Brazilian Approach. In: LEBLANC, R. J.; MATTHEWS, P.; RICHARD, R.P. *Global Atlas of Excreta, Wastewater Sludge, and Biosolids Management: moving forward the sustainable and welcome uses of a global resource*. Un-Habitat, 2008.

ÂNGULO, S.C.; ZORDAN, S.E.; JOHN, V.M. Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil. São Paulo, Departamento Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, p. 1-13, 2001.

BENTO, A. P.; SEZERINO, P. H; PHILIPPI, L.S.; REGINATTO, V.; LAPOLLI, F. R. Caracterização da Microfauna em Estação de Tratamento de Esgotos do Tipo Lodos Ativados: um Instrumento de Avaliação e Controle do Processo. Revista Engenharia Sanitária Ambiental. V. 10. n. 4. p. 329-338. Rio de Janeiro: out/dez 2005.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução do CONAMA nº 375, de 29 de agosto de 2006. Dispõe sobre a Regulamentação do Uso Agrícola do Lodo de Esgoto. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/CONAMA>>. Acesso em: 09 de jan. 2011.

\_\_\_\_\_. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 62, de 26 de agosto de 2003. Oficializa os Métodos Analíticos Oficiais para Análises Microbiológicas para Controle de Produtos de Origem Animal e Água. Disponível em: <http://extranet.agricultura.gov.br/sislegisconsulta/consultarLegislacao.do?operacao=visualizar&id=2851>. Acesso em: 12 de fev. 2011.

\_\_\_\_\_. Câmara dos Deputados. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nºs 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências. Brasília, 2007

\_\_\_\_\_. Câmara dos Deputados. **Lei nº 12,305**, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, 2010.

BIOLO, S. M. Reuso do resíduo de fundição areia verde na produção de blocos cerâmicos. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

BITENCOURT, E. R. de. Utilização de material-prima alternativa na fabricação de tijolos de argila vermelha e branca. Dissertação (Mestrado em ciência e engenharia de Materiais). Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2004.

CAPIZZI-BANAS, S.; DELOGE, M.; REMY, M.; SCHWARTZBROD, J. Liming as an advanced treatment for sludge sanitization: helminths eggs elimination – *Ascaris* eggs as model. *Water Research*, n. 38, p. 3251-3258, 2004.

CHEESEMAN, C. K.; VIRDI, G. S. Properties and microstructure of light weight aggregate produced from sintered sewage sludge ash. **Resources, Conservation and Recycling**: p.18-30, 2005

CHEN, C.; CHIOU, I.; WANG, K. Sintering effect on cement bonded sewage sludge ash. **Cement & Concrete Composites**, n. 28, p. 26-32, 2006.

CHIANG, K. Y.; YOI, S.-D.; LIN, H. N.; WANG, K.-S. Stabilization of heavy metals in sewage sludge composting process. In: LEE, D.-J. Sludge management entering the 3<sup>rd</sup> millennium. **Water Science & Technology**, London, v. 44, n. 10 2001, 2001. 367 p. ISBN 1-84339-404-9.

CHIOU, I.; WANG, K.; CHEN, C.; LIN, Y. Lightweight aggregate made from sewage sludge and incinerated ash. **Waste Management**, n. 26, p. 1453–1461, 2006.

COMPARINI, J. B. Estudo do decaimento de patógenos em biossólidos estocados em valas e em biossólidos submetido à secagem em estufa agrícola. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.

COUTAND, M.; CYR, M.; CLASTRES, P. Use of sewage sludge ash as mineral admixture in mortars. **Construction Materials**, n. 159 , p. 153 – 156, nov 2006.

CZECHOWSKI, F.; MARCINKOWSKI, T. Sewage sludge stabilization with calcium hydroxide: Effect on physicochemical properties and molecular composition. **Water Research**, n. 40, p. 1895-1905, 2006.

DE'GENNARO, R.; GRAZIANO, S. F.; CAPPELLETTI, P.; DONDI, A. C. M.; LANGELLA, A.; DE'GENNARO, M. Structural concretes with waste-based lightweight aggregate – from landfill to engineered materials. *Environ. Sci. Technol*, n. 43, p. 7123–7129, 2009.

DÍAZ, V. O. Método de dosagem de concreto de elevado desempenho. 1. ed. São Paulo: Pini, 1998. 122 p. ISBN.85-7266-090-9.

EPSTEIN, Eliot. Land application of sewage sludge and biosolids. Florida: Lewis, 2003. 201 p. ISBN 1-56670-624-6.

FERNANDES, F.; ANDRAUS, S.; ANDREOLI, C. V.; BONNET, B. J. C. CANTO, L. A.; MEDEIROS, M. L. B. Eficiência dos processos de

desinfecção do lodo da ETE – Bélem com vista a seu uso agrícola. SANARE, v.5, n.5 , p. 46-58, 1996.

FERNANDES, F.; ANDREOLI, C. V.; LARA, A. I. Reciclagem de Biossólidos: transformando problemas em soluções. Curitiba: SANEPAR, 1999, 288 p.

FERNANDES, F; SOUZA, S. G. Estabilização de Lodo de Esgoto. In: ANDREOLI, C. V. Aproveitamento do Lodo Gerado em Estações de Tratamento de Água e Esgotos Sanitários, Inclusive com a Utilização de Técnicas Consorciadas com Resíduos Sólidos Urbanos. 1 ed. Curitiba, 2001.

FERREIRA Jr. S. Peças de concreto para pavimentação. In:25º Reunião Anual de Pavimentação. São Paulo, 1991.

FIGUEIREDO, A. D. Concreto reforçado com fibras. Tese (Livredocência). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo/SP, 2011.

FONTES, C. M. A. Potencialidades da Cinza de Lodo de Estações de Tratamento de Esgotos como Material Suplementar para a Produção de Concretos com Cimento Portland. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Rio de Janeiro/RJ, 2003.

GASTALDINI, A. L. G.; ISAIA, G. C. Concreto com cinza de casca de arroz – Contribuição para o desenvolvimento sustentável. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23., 2005, Campo Grande. Anais... Campo Grande: ABES, 2005. 1 CD ROM.

GAVA, G. P. Estudo Comparativo de Diferentes Metodologias para Avaliação da Atividade Pozolânica. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis/SC, 1999.

GEYER, A. L. B. Contribuição ao Estudo da Disposição Final e Aproveitamento da Cinza de Lodo de Estações de Tratamento de Esgotos Sanitários como Adição ao Concreto. Tese de Doutorado.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre/RS, 2001.

GONÇALVES, J. P. – Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos. Dissertação de Mestrado apresentada à Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2000.

GONÇALVES, R. F.; LUDUVICE, M.; LIMA, P. M. R.; RAMALDES, D. L. da C.; FERREIRA, A. C.; TELES, C. R.; ANDREOLI, C. V. Desidratação de Lodo de Esgoto. In: ANDREOLI, C. V. Aproveitamento do Lodo Gerado em Estações de Tratamento de Água e Esgotos Sanitários, Inclusive com a Utilização de Técnicas Consorciadas com Resíduos Sólidos Urbanos. 1. ed. PROSAB: Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. Curitiba, 2001.

HOFFMANN, G.; SCHINGNITZ, D.; BILITEWSKI, B., Comparing different methods of analysing sewage sludge, dewatered sewage sludge and sewage sludge ash. *Desalination*, n. 250, p. 399–403, 2010.

HOPPEN, C. et al. Estudo de dosagem para incorporação do lodo de ETA em matriz de concreto, como forma de disposição final. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23., 2005, Campo Grande. **Anais...**Campo Grande: ABES, 2005. 1 CD ROM.

INGUZA, M. P. D.; ANDREOLI, C. V.; NASCIMENTO, R. M. do; TINOCO, J. D. HOPPEN, C. PEGORINI, E. S. Uso de Resíduos do Saneamento na Fabricação da Cerâmica Vermelha. In: ANDREOLI, C. V. *Biossólidos: Alternativas de Uso de Resíduos do Saneamento*. PROSAB, Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. 1 ed. Curitiba, 2006.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico. Brasil, 2008. Disponível em:  
[http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia\\_visualiza.php?id\\_noticia=1691&id\\_pagina=1](http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_visualiza.php?id_noticia=1691&id_pagina=1). Acesso em: 05 de fev., 2011.

JORDÃO, E.P.; PESSÔA, C.A., Tratamento de esgotos domésticos. 3 ed. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES). Rio de Janeiro, 1995

KIM, E.; CHO, J.; YIM, S. Digested sewage sludge solidification by converter slag for landfill cover. **Chemosphere**, n. 59, p. 387-395, 2005.

KRONLOF, A. Effect of very fine aggregate on concrete strength. *Materials and Structures*, v. 27, n. 165, p. 15-25, 1994.

LEBLANC, R. J.; MATTHEWS, P.; RICHARD, R.P. *Global Atlas of Excreta, Wastewater Sludge, and Biosolids Management: moving forward the sustainable and welcome uses of a global resource*. Un-Habitat, 2008.

LEITE, W. R. M. Digestão anaeróbia mesofílica de lodo adensado de estação de tratamento de esgoto. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Estado de Santa Catarina. Santa Catarina, 2011.

LIEW, A. G.; IDRIS, A.; SAMAD, A. A.; WONG, C. H. K.; JAAFAR, M. S.; BAKI, A. M. Reusability of sewage sludge in clay bricks. **J Mater Cycles Waste Manag**: n. 6, 6, p. 41-47,. 2004.

LIMA, M. R. P. Uso de Estufa Agrícola para Secagem e Higienização de Lodo de Esgoto. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.

LIN, K.; LIN, C. Hydration properties of ecociment pastes from waste sludge ash clinkers. **Journal of the Air & Waste Management Association**:1534-1542, 2004.

LIN, D.; LUO, H.; SHEEN, Y. Glazed tiles manufactures from incinerated sewage sludge ash and clay. **Journal of the Air & Waste Management Association**: p.163-172, 2005.

LUCAS, D.; BENATTI, C. T. Utilização de Resíduos Industriais para a Produção de Artefatos Cimentícios e Argilosos Empregados na Construção Civil. **Revista em Agronegócios e Meio Ambiente**, v. 1, n.3, p. 405-418, set./dez. 2008 - ISSN 1981-9951.

LUDUVICE, M. Processos de estabilização de lodos. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. *Lodo de esgoto: tratamento e disposição final*. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG; Companhia de Saneamento do Paraná, 2001. v. 6, cap. 4, p. 123-157.

LUZ, C. A. Comportamento do Cimento Sulfo-Aluminoso (CSA) e da Cinza Pesada (CZP) no Tratamento de Resíduos: Fosfogesso e Lodo Galvânico. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis/SC, 2005.

MACHADO, M. F. de S. A Situação Brasileira dos Biossólidos. Dissertação de Mestrado. Universidade de Campinas – FEC. Campinas, 2001.

MARCHAND, J.; HORNAIN, H.; DIAMOND, S.; PIGEON, M.; GUIRAUD, H. The microstructure of dry concrete products. **Cement and Concrete Research**: 1996.

MALHOTRA, V. M. e MEHTA, P. K. – Pozolanic and Cementitious Materiald – **Advanced in Concrete Technology**: v. 1 , Amsterdam , 1996.

MEDEIROS, J. S. Alvenaria estrutural não armada de blocos de concreto: produção de componentes e parâmetros de projeto. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1993.

MEDEIROS, S.A. Incorporação do resíduo de tanque séptico como matéria-prima de uma mistura asfáltica. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2006.

MENEZES, R. R; GLEMIREs, A. N.; FERREIRA, H. C. O Estado da Arte Sobre o Uso de Resíduos como Matérias-Primas Cerâmicas Alternativas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*: p. 303-313. Campina Grande/PB: 2002.

MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J.M. Concreto – Estruturas, Propriedades e materiais. 2ª ed. São Paulo, Pini, 1994.

MIKI, M. K.; SOBRINHO, P., A.; VAN HAANDEL, A. C. Tratamento da Fase Sólida em Estações de Tratamento de Esgotos – condicionamento, desaguamento mecanizado e secagem térmica do lodo. In: ANDREOLI, C. V. Biossólidos: Alternativas de Uso de Resíduos do Saneamento. PROSAB, Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. 1 ed. Curitiba, 2006.

MONTERO, M. A. et. al., The use of sewage sludge and marble residues in the manufacture of ceramic tile bodies. **Applied Clay Science**: n. 46, p. 404–408, 2009.

MONZÓ, J.; PAYÁ, J.; BORRACHERO, M. V.; CÓRCOLES, A. Use of sewage sludge ash(ssa) – cement admixtures in mortars. **Cement and Concrete Research**: v. 26, n. 9, p. 1389-1398, 1996.

MORALES, G.; DANTAS, F. de A. S. Verificação e Avaliação da Reatividade Pozolânica da Cinza de Lodo de Esgoto da Cidade de Londrina. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, BT/PCC/146. p. 1-17. São Paulo, 1995.

MORALES, G. Aproveitamento de lodo de esgoto sanitário como matéria prima para a produção de material pozolânico. Semina (Londrina), Londrina, 1999.

MORTUREUX, B. *et al.* Comparaison de La Réactivité de Differentes Pouzzolanes. In: International Congresso the Chemistry of Cement. 7th. v. 3. Paris, 1980.

NEVILLE, A.M. (1997). Propriedades do concreto. São Paulo, Ed. Pini, 2ª ed., 1997.

OKUNO, N.; YAMADA, A. Evaluation of full scale thermal solidification processes implemented in Tokyo lightweight aggregate, slag and brick. **Water Science & Technology**: v. 41, n. 8, p. 69-76, 2000.

O'KELLY, B. C. Geotechnical aspects of sewage sludge monofills, **Municipal Engineer**, n. 157, p. 193–197, set 2004

PAN, S.; TSENG, D.; LEE, C. Influence of the fineness of sewage sludge ash on the mortar properties. **Cement and Concrete Research**: n. 33, p. 1749–1754, 2003.

PARK, K.; LIM, B.; LEE, S. Drying characteristics of sewage sludge using vacuum evaporation and frying. **J Mater Cycles Waste Mang**: n. 12, p. 235-239, 2010.

PEGORINI E. S.; ANDREOLI, C. V. Introdução. In: ANDREOLI, C. V. *Biossólidos: Alternativas de Uso de Resíduos do Saneamento*. PROSAB, Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. 1 ed. Curitiba, 2006.

PEREIRA, E. G. Aproveitamento do Resíduo da Estação de Tratamento de Água de Cubatão para Fabricação de Elementos Construtivos Estruturais. Dissertação de Mestrado. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2008.

PETRUCCI, E. G. R. *Concreto de cimento Portland*. 12. ed. Rio de Janeiro: Globo, 1999. 307 p.

PIANA, M. G. Higienização de Lodo de Estações de Tratamento de Esgoto por Compostagem Termofílica. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Centro de Ciências Agrárias. Curso de Agronomia. Florianópolis/ SC, 2009.

PINTO, C. S. *Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas*. São Paulo: Oficina de Texto, 2003, 247p

PINTO, M. T. Higienização de Lodos. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. *Lodo de esgoto: tratamento e disposição final*. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG; Companhia de Saneamento do Paraná, 2001. v. 6, cap. 6, p. 261-297.

PRIM, E. C. C. Utilização de lodo de estações de tratamento de água e esgoto sanitário como material de cobertura de aterro sanitário. Tese

(Doutorado) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

POGGIANI, F. SILVA, P. H. M. da; GUEDES, M. C. Uso do Lodo de Esgoto em Plantações Florestais. *N*: ANDREOLI, C. V. Biossólidos: Alternativas de Uso de Resíduos do Saneamento. PROSAB, Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. 1 ed. Curitiba, 2006.

RODRIGUES, P.P.F. Recomendações para a fabricação de peças pré-moldadas de concreto para pavimentação. In: Reunião Anual, São Paulo, IBRACON, 1984.

SANTOS, A. D. dos. Estudo das Possibilidades de Reciclagem dos Resíduos de Tratamento de Esgotos da Região Metropolitana de São Paulo. Dissertação de Mestrado. Escola politécnica da Universidade de São Paulo (USP). São Paulo/SP, 2003.

SANEPAR – Companhia de Saneamento do Paraná. ANDREOLI, C. V. (Coord.); BONNET, B. R. P. (Coord.). Manual de métodos para análises microbiológicas e parasitológicas em reciclagem agrícola de lodo de esgoto. 2º ed. rev. e ampl. Curitiba, 2000. 80 p.

SALES, A; SOUZA, F.R. Concretes and mortars recycled with water treatment sludge and construction and demolition rubble. **Construction and Building Materials**: n. 23, p. 2362-2370, 2009.

SAMARAS, P; PAPADIMITRIOU, C. A.; HARITOU, I; ZOUBOULIS, A.I. Investigation of sewage sludge stabilization potential by addition of fly ash and lime. **Journal of Hazardous Materials**, n. 154, p.1052-1059, 2008.

SASAKA, S.; YOKOY, k.;YAMANAKA T. Basic study of concrete made using ash derived from the incinerating sewage sludge, **International Journal of Modern Physics**: v. 20, n. 25, 26 & 27, p. 3716-3721, 2006.

SILVA, S. M. C. P.; FERNANDES, F.; THOMAZ-SOCCOL, V.; MORITA, D. M. Principais Contaminantes do Lodo. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. Lodo de Esgoto: Tratamento e Disposição Dinal. Belo Horizonte: Departamento de

Engenharia Sanitária e Ambiental-UFGM; Companhia de Saneamento do Paraná, 2001. v. 6, cap. 3, p. 69-121.

SCHLINDWEIN, A. D. Pesquisa de Vírus Entéricos Humanos em Amostras de Lodo da Estação de Tratamento de Esgoto (sistema insular) de Florianópolis, SC: padronização e avaliação de técnicas moleculares e de cultura celular na detecção e viabilidade viral. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2009.

TARUYA, T.; OKUNO, N.; KANAYA, K. Reuse of sewage sludge as raw material of Portland cement in Japan. In: JIMENEZ, B.; SPINOSA, L.; ODEGAARD, H.; LEE, D.-J. *Sludge management: regulation, treatment, utilisation and disposal*. **Water Science & Technology**, London, v. 46, n. 10 2002, 2002. 320 p. ISBN 1-84339-426-X.

TAY, J. H.; SHOW, K.Y. Properties of cement made from sludge. **Journal of Environmental Engineering**: v. 117, n. 2, p. 236-46, Mar./Apr. 1991.

Taylor, H.F.W. Cement Chemistry. Academic Press, London: 1990.

TCHOBANOGLIOUS, G.; BURTON, F. L.; STENSEL, H. D. **Wastewater engineering: treatment, disposal, and reuse**. 4<sup>o</sup> ed. Metcalf & Eddy, Inc. New York: McGraw Hill, 2003.1819 p.

TSUTIYA, M.T.; COMPARINI, J.B.; SOBRINHO, P.A.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P.C.T.; MELFI, A.J.; MELO, W.J.; MARQUES, M.O. *Biossólidos na Agricultura*. 1 ed. São Paulo, SABESP, 2001.

TSUTIYA, M. T. Características de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgotos. In: TSUTIYA, M. T.; COMPARINI, J. B.; SOBRINHO, P. A.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P. C. T.; MELFI, A. J.; MELO, W. J.; MARQUES, M. O. *Biossólidos na agricultura*. São Paulo: SABESP, 2001a, p. 89-131.

\_\_\_\_\_. Alternativas de disposição final de biossólidos. In: TSUTIYA, M. T.; COMPARINI, J. B.; SOBRINHO, P. A.; HESPANHOL, I.;

CARVALHO, P. C. T.; MELFI, A. J.; MELO, W. J.; MARQUES, M. O. *Biossólidos na agricultura*. São Paulo: SABESP, 2001b, p. 133-180.

US EPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Land application of sewage sludge and domestic septage – Process design manual**. EPA/625/R-95/001: Cincinnati, 1995. 290p.

\_\_\_\_\_. Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge. EPA/625/R-92/013: Cincinnati, 2003. 177p.

\_\_\_\_\_. Environmental Regulations and Technology – Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge (Including Domestic Septage). Under 40 CFR Part 503. Appendix I – Test Method for Detecting, Enumerating, and Determining the Viability of *Ascaris* Ova in Sludge, p. 166, EPA/625/R-92/013.

VAN HAANDEL, A.; SOBRINHO, P. A. Produção, Composição e Constituição de Lodo de Esgoto. In: ANDREOLI, C. V. *Biossólidos: Alternativas de Uso de Resíduos do Saneamento*. PROSAB, Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. 1 ed. Curitiba, 2006.

VON SPERLING, M. Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos. 2 ed. Belo Horizonte, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Universidade Federal de Minas Gerais (DESA/UFMG), 1996.

VON SPERLING, M; ANDREOLI, C. V. Introdução. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. Lodo de esgoto: tratamento e disposição final. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental-UFMG; Companhia de Saneamento do Paraná, 2001. v. 6, cap. 1, p.13-14.

VON SPERLING, M.; GONÇALVES, R. F. Lodo de Esgoto: características e produção. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. Lodo de esgoto: tratamento e disposição final. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental-UFMG; Companhia de Saneamento do Paraná, 2001. v. 6, cap. 2, p.17-67.

WHO. World Health Organization, Regional Office for the Eastern Mediterranean Regional Centre for Environmental Health Activities Amma – Jordan – Integrated Guide to Sanitary Parasitology, 2004.

YEN, C.; TSENG, D.; LIN, T. Characterization of eco-cement paste produced from waste sludges. **Chemosphere**: n. 84, p. 220-226, 2011.

ZALYGINA, O. S.; BARANTSEVA, S. E. The use of excess activated sludge from municipal sewage treatment works in production of construction ceramics. **Environmental Protection**: v. 55, p. 5 – 6, 1998

**APÊNDICES****APÊNDICE I – Índice de atividade pozolânica: NBR 5.752 (ABNT, 1992)**

Segue o detalhamento dos cálculos e considerações efetuadas na determinação do Índice de Atividade Pozolânica segundo a NBR 5.752 (ABNT 1992). Na Tabela 1 constam as dimensões do molde utilizado para a produção dos CPs, assim como a massa necessária para a moldagem de 5 CPs.

Tabela 1. Especificações do molde utilizado.

<b>MOLDE P/ OS CORPOS DE PROVA</b>		
CARACTERÍSTICAS DO MOLDE P/ 1 CP	DIÂMETRO	0,0500 m
	ALTURA	0,1000 m
	ÁREA	0,0020 m <sup>2</sup>
	VOLUME	0,0002 m <sup>3</sup>
CARACTERÍSTICAS DO MOLDE P/ 5 CPs	VOLUME	0,0010 m <sup>3</sup>
	MASSA	2,33 Kg

Destaca-se que o objetivo foi moldar 4 CPs, todavia, o cálculo foi superestimado em função das perdas durante o processo. Na Tabela 2 é apresentado o detalhamento do traço de composição dos materiais utilizados, e as frações de substituição entre o cimento e material pozolânico.

Tabela 2. Especificação do traço e relação de substituição.

<b>COMPONENTE</b>		
TRAÇO	CIMENTO	1,00
	AREIA NORMAL	3,00
	ÁGUA	0,48
	SOMA	4,48
PERCENTAGEM DE SUBSTITUIÇÃO	CIMENTO	65 %
	MATERIAL POZOLÂNICO	35 %
RELAÇÃO DE SUBSTITUIÇÃO		182,00
DOSAGEM – CIMENTO		520,00 g

O valor equivalente a massa de cimento (520 kg) foi apresentado, pois, todo o traço de composição das argamassas foi calculado em função do mesmo. Para efetivação dos cálculos, os preceitos da NBR 5.752 (ABNT, 1992) foram atendidos. As equações utilizadas são apresentadas a seguir.

$$MP = 182 \times \frac{\rho_{MP}}{\rho_C}$$

Equação 1. Quantidade de material pozolânico a ser adicionada na mistura.

$$IAP = \left( \frac{f_{CB}}{f_{CA}} \right) \times 100\%$$

Equação 2. Índice de atividade pozolânica.

$$V_{\text{ÁGUA}} = Y^{(B)}$$

$$V_{\text{ÁGUA}} = X^{(B)}$$

Equações 3 e 4. Volume de água a ser adicionado às argamassas com e sem a adição de material pozolânico.

$$AR = \left( \frac{B}{A} \right) \times 100\%$$

Equação 4. Água requerida para a obtenção de uma argamassa com consistência média entre 220 e 230 mm.

Onde:

MP: Quantidade de material pozolânico utilizado em cada argamassa;

$\rho_{MP}$ : Massa específica do material pozolânico;

$\rho_C$ : Massa específica do cimento;

IAP: Índice de atividade pozolânica;

$f_{CB}$ : Resistência média, aos 28 dias, dos corpos de prova moldados com cimento e material pozolânico (*Argamassa B*);

$f_{CA}$ : Resistência média, aos 28 dias, dos corpos de prova moldados só com cimento (*Argamassa A*);

$V_{\text{ÁGUA}}$ : Volume de água utilizado em cada argamassa;

$X^{(B)}$  e  $Y^{(B)}$ : Representam as quantidades de água necessárias para produzir argamassas de acordo com a NBR 7.215 (ABNT, 1996).

AR: Representa a água requerida para a obtenção de uma argamassa com consistência média entre 220 e 230 mm.

Na Tabela 3 é apresentada a massa específica de todos os materiais utilizados para a determinação do IAP.

Tabela 3. Massa específica.

COMPONENTE	MASSA ESPECÍFICA (kg/m <sup>3</sup> )
CIMENTO	3.120,00
LODO 45 %	1.829,00
LODO 30 %	1.739,70
LODO 15 %	1.632,40
LODO 300 °C	1.390,00
LODO 550 °C	1.674,50
LODO 700 °C	1.607,70

A determinação da massa específica de todos os materiais pozolânicos foi efetuada no LMC da UFSC, cujo laudo consta no Anexo II. Para o cimento, o valor foi fornecido pelo fabricante. Nas tabelas apresentadas a seguir, consta a quantidade adicionada de cada material para a composição das argamassas, o resultado do *Flow Test*, a resistência média obtida no ensaio de compressão, o desvio padrão relativamente à resistência e o IAP de cada CP produzido.

Tabela 4. Dados relativos à argamassa sem adição de pozolana.

BRANCO					
MATERIAL	QUANTIDADE	FLOW TEST MÉDIO (mm)	RESISTÊNCIA (Mpa)	RESISTÊNCIA MÉDIA (Mpa)	DESVIO PADRÃO
CIMENTO	520,00 g	219,67	39,45	39,43	0,8933
AREIA	1560,00 g		40,56		
ÁGUA	250,12 mL		38,38		
			39,31		

A consistência da *Argamassa A* foi levemente inferior ao intervalo estabelecido pelo NBR 5.752 (ABNT, 1992), aceitou-se proceder dessa forma pois a quantidade de água utilizada foi o volume estabelecido pela NBR 7.215 (ABNT, 1996), que fixa a relação água/cimento em 0,48 para as massas elaboradas somente com cimento Portland.

Tabela 5. Dados relativos à argamassa com adição de lodo com 45 % de cal virgem (estabilização e higienização por caleação).

<b>LODO 45 %</b>						
MATERIAL	QUANTIDADE	FLOW TEST MÉDIO (mm)	ÁGUA REQUERIDA (%)	RESISTÊNCIA MÉDIA (Mpa)	DESVIO PADRÃO	IAP (%)
CIMENTO	338,00	224,67	101	3,16	0,3853	8
AREIA	1560,00					
LODO 45%	106,69					
ÁGUA	252,40					

Tabela 6. Dados relativos à argamassa com adição de lodo com 30 % de cal virgem (estabilização e higienização por caleação).

<b>LODO 30 %</b>						
MATERIAL	QUANTIDADE	FLOW TEST MÉDIO (mm)	ÁGUA REQUERIDA (%)	RESISTÊNCIA MÉDIA (Mpa)	DESVIO PADRÃO	IAP (%)
CIMENTO	338,00	220,67	106	3,66	0,2793	9
AREIA	1560,00					
LODO 30%	101,48					
ÁGUA	265,00					

Tabela 7. Dados relativos à argamassa com adição de lodo com 15 % de cal virgem (estabilização e higienização por caleação).

<b>LODO 15 %</b>						
MATERIAL	QUANTIDADE	FLOW TEST MÉDIO (mm)	ÁGUA REQUERIDA (%)	RESISTÊNCIA MÉDIA (Mpa)	DESVIO PADRÃO	IAP (%)
CIMENTO	338,00	228,00	116	5,08	0,6271	13
AREIA	1560,00					
LODO 15%	95,22					
ÁGUA	290,00					

Tabela 8. Dados relativos à argamassa com adição de lodo com 300 °C de cal virgem (estabilização e higienização por processo térmico).

<b>LODO 300 °C</b>						
MATERIAL	QUANTIDADE	FLOW TEST MÉDIO (mm)	ÁGUA REQUERIDA (%)	RESISTÊNCIA MÉDIA (Mpa)	DESVIO PADRÃO	IAP (%)
CIMENTO	338,00	220,00	112	9,27	1,0565	24
AREIA	1560,00					
LODO 300 °C	81,08					
ÁGUA	280,40					

Tabela 9. Dados relativos à argamassa com adição de lodo com 550 °C de cal virgem (estabilização e higienização por processo térmico).

<b>LODO 550 °C</b>						
MATERIAL	QUANTIDADE	FLOW TEST MÉDIO (mm)	ÁGUA REQUERIDA (%)	RESISTÊNCIA MÉDIA (Mpa)	DESVIO PADRÃO	IAP (%)
CIMENTO	338,00	230,00	124	13,27	2,1558	<b>34</b>
AREIA	1560,00					
LODO 550 °C	97,68					
ÁGUA	310,00					

Tabela 10. Dados relativos à argamassa com adição de lodo com 700 °C de cal virgem (estabilização e higienização por processo térmico).

<b>LODO 700 °C</b>						
MATERIAL	QUANTIDADE	FLOW TEST MÉDIO (mm)	ÁGUA REQUERIDA (%)	RESISTÊNCIA MÉDIA (Mpa)	DESVIO PADRÃO	IAP (%)
CIMENTO	338,00	230,00	127	16,35	1,4309	<b>41</b>
AREIA	1560,00					
LODO 700 °C	93,78					
ÁGUA	318,10					

O método aplicado para a moldagem dos corpos de prova e execução do ensaio de compressão axial seguiu as recomendações da NBR 7.215 (ABNT, 1996). A preparação das argamassas, a cura e o capeamento dos CPs foram de acordo com a NBR 5.752 (ABNT, 1992).

APÊNDICE II – Índice de atividade pozolânica: GAVA (1999)

Segue o detalhamento dos cálculos e considerações efetuadas na determinação do Índice de Atividade Pozolânica segundo GAVA (1999). Na Tabela 1 constam as dimensões do molde utilizado para a produção dos CPs, e a massa necessária para a moldagem de 5 CPs.

Tabela 1. Especificações do molde utilizado.

<b>MOLDE P/ OS CORPOS DE PROVA</b>		
CARACTERÍSTICAS DO MOLDE P/ 1 CP	DIÂMETRO	0,0500 m
	ALTURA	0,1000 m
	ÁREA	0,0020 m <sup>2</sup>
	VOLUME	0,0002 m <sup>3</sup>
CARACTERÍSTICAS DO MOLDE P/ 5 CPs	VOLUME	0,0010 m <sup>3</sup>
	MASSA	2,33 Kg

Destaca-se que o objetivo foi moldar 4 CPs, todavia, o cálculo foi superestimado em função das perdas durante o processo. Na Tabela 2 é apresentado o detalhamento do traço de composição dos materiais utilizados, e as frações de substituição entre o cimento e material pozolânico.

Tabela 2. Especificação do traço e relação de substituição.

	<b>COMPONENTE</b>	
TRAÇO	CIMENTO	1,00
	AREIA NORMAL	3,00
	ÁGUA	0,48
	SOMA	4,48
PERCENTAGEM DE SUBSTITUIÇÃO	CIMENTO	65 %
	MATERIAL POZOLÂNICO	35 %
RELAÇÃO DE SUBSTITUIÇÃO		182,00
DOSAGEM – CIMENTO		520,00 g

O valor equivalente a massa de cimento (520 kg) foi apresentado, pois todo o traço de composição das argamassas foi calculado em função do mesmo. As fórmulas utilizadas para efetivação dos cálculos são apresentadas a seguir. Destaca-se que as terminologias *Argamassa A* e *Argamassa B* foram utilizadas quando, não utilizou-se material pozolânico e quando utilizou-se material pozolânico, respectivamente.

$$MP = 182 \times \frac{\rho_{MP}}{\rho_C}$$

Equação 1. Quantidade de material pozolânico a ser adicionada na mistura.

$$IAP = \left( \frac{f_{CB}}{f_{CA}} \right) \times 100\%$$

Equação 2. Índice de atividade pozolânica.

Onde:

MP: Quantidade de material pozolânico utilizado em cada argamassa;

$\rho_{MP}$ : Massa específica do material pozolânico;

$\rho_C$ : Massa específica do cimento;

IAP: Índice de atividade pozolânica;

$f_{CB}$ : Resistência média, aos 28 dias, dos corpos de prova moldados com cimento e material pozolânico (*Argamassa B*);

$f_{CA}$ : Resistência média, aos 28 dias, dos corpos de prova moldados só com cimento (*Argamassa A*);

As Equações 1 e 2 foram propostas considerando os princípios da NBR 5.752 (ABNT, 1992). Na Tabela 3 é apresentada a massa específica de todos os materiais utilizados para a determinação do IAP.

Tabela 3. Massa específica.

COMPONENTE	MASSA ESPECÍFICA APARENTE (Kg/m <sup>3</sup> )
CIMENTO	3.120,00
LODO 45 %	1.829,00
LODO 30 %	1.739,70
LODO 15 %	1.632,40
LODO 300 °C	1.390,00
LODO 550 °C	1.674,50
LODO 700 °C	1.607,70

A determinação da massa específica de todos os materiais pozolânicos foi efetuada no LMC da UFSC, cujo laudo consta no Anexo II. Para o cimento, o valor foi fornecido pelo fabricante. Nas tabelas apresentadas a seguir, consta a quantidade adicionada de cada material para a composição das argamassas, o resultado do *Flow Test*, a resistência média obtida no ensaio de compressão, o desvio padrão relativamente à resistência e o IAP de cada CP produzido.

Tabela 4. Dados relativos à argamassa sem adição de pozolana.

<b>ARGAMASSA A – BRANCO</b>				
MATERIAL	QUANTIDADE	FLOW TEST MÉDIO (mm)	RESISTÊNCIA MÉDIA (Mpa)	DESVIO PADRÃO
CIMENTO	520,00 g	219,67	35,53	4,8407
AREIA	1560,00 g			
ÁGUA	250,12 mL			

A consistência da *Argamassa A* foi inferior ao intervalo estabelecido pelo NBR 5.752 (ABNT, 1992), aceitou-se proceder dessa forma pois a quantidade de água utilizada foi o volume estabelecido pela NBR 7.215 (ABNT, 1996), que fixa a relação água/cimento em 0,48 para as massas elaboradas somente com cimento Portland.

Tabela 5. Dados relativos à argamassa com adição de lodo com 45 % de cal virgem (estabilização e higienização por caleação).

<b>ARGAMASSA B – LODO 45 %</b>						
MATERIAL	QUANTIDADE	FLOW TEST MÉDIO (mm)	ÁGUA REQUERIDA (%)	RESISTÊNCIA MÉDIA (Mpa)	DESVIO PADRÃO	IAP (%)
CIMENTO	338,00 g	229,67	100	3,07	0,1212	9
AREIA	1580,00 g					
LODO 45%	106,69 g					
ÁGUA	250,12 mL					

Tabela 6. Dados relativos à argamassa com adição de lodo com 30 % de cal virgem (estabilização e higienização por caleação).

<b>ARGAMASSA B – LODO 30 %</b>						
MATERIAL	QUANTIDADE	FLOW TEST MÉDIO (mm)	ÁGUA REQUERIDA (%)	RESISTÊNCIA MÉDIA (Mpa)	DESVIO PADRÃO	IAP (%)
CIMENTO	338,00 g	220,33	100	6,94	0,3079	20
AREIA	1500,00 g					
LODO 30%	101,48 g					
ÁGUA	250,12 mL					

Tabela 7. Dados relativos à argamassa com adição de lodo com 15 % de cal virgem (estabilização e higienização por caleação).

<b>ARGAMASSA B – LODO 15 %</b>						
MATERIAL	QUANTIDADE	FLOW TEST MÉDIO (mm)	ÁGUA REQUERIDA (%)	RESISTÊNCIA MÉDIA (Mpa)	DESVIO PADRÃO	IAP (%)
CIMENTO	338,00 g	220,00	100	8,03	-	23
AREIA	800,00 g					
LODO 15%	95,22 g					
ÁGUA	250,12 mL					

Tabela 8. Dados relativos à argamassa com adição de lodo com 300 °C de cal virgem (estabilização e higienização por processo térmico).

<b>ARGAMASSA B – LODO 300 °C</b>						
MATERIAL	QUANTIDADE	FLOW TEST MÉDIO (mm)	ÁGUA REQUERIDA (%)	RESISTÊNCIA MÉDIA (Mpa)	DESVIO PADRÃO	IAP (%)
CIMENTO	338,00	226,00	100	15,34	0,7373	43
AREIA	1350,00					
LODO 300 °C	81,08					
ÁGUA	250,12					

Tabela 9. Dados relativos à argamassa com adição de lodo com 550 °C de cal virgem (estabilização e higienização por processo térmico).

<b>ARGAMASSA B – LODO 550 °C</b>						
MATERIAL	QUANTIDADE	FLOW TEST MÉDIO (mm)	ÁGUA REQUERIDA (%)	RESISTÊNCIA MÉDIA (Mpa)	DESVIO PADRÃO	IAP (%)
CIMENTO	338,00 g	227,67	100	26,25	1,8014	74
AREIA	1175,00 g					
LODO 550 °C	97,68 g					
ÁGUA	250,12 mL					

Tabela 10. Dados relativos à argamassa com adição de lodo com 700 °C de cal virgem (estabilização e higienização por processo térmico).

<b>ARGAMASSA B – LODO 700 °C</b>						
MATERIAL	QUANTIDADE	FLOW TEST MÉDIO (mm)	ÁGUA REQUERIDA (%)	RESISTÊNCIA MÉDIA (Mpa)	DESVIO PADRÃO	IAP (%)
CIMENTO	338,00 g	228,33	100	30,31	3,5756	85
AREIA	1175,00 g					
LODO 700 °C	93,78 g					
ÁGUA	250,12 mL					

O método aplicado para a moldagem dos corpos de prova e execução do ensaio de compressão axial seguiu as recomendações da NBR 7.215 (ABNT, 1996). A preparação das argamassas, a cura e o capeamento dos CPs foram de acordo com a NBR 5.752 (ABNT, 1992).

### APÊNDICE III – Teste de dosagem: *Subproduto A*

Segue o detalhamento dos cálculos e considerações adotadas para o teste de dosagem do concreto. Na Tabela 1 apresentam-se as variações de massa específica testadas.

Tabela 1. Variações de massa específica testadas.

<b>MASSA ESPECÍFICA (kg/m<sup>3</sup>)</b>					
<b>CONCRETO</b>	2.100	2.150	2.200	2.250	2.300

A massa específica do concreto utilizado como base para este estudo é de aproximadamente 2.270 kg/m<sup>3</sup> (vide Anexo III), assim, foram feitas extrapolações para mais e para menos, quando da aplicação do teste com os corpos de prova. Na Tabela 2 constam as características do molde utilizado para a produção dos CPs.

Tabela 2. Características do corpo de prova.

<b>CORPO DE PROVA</b>	
DIÂMETRO	0,051 m
ALTURA	0,1 m
ÁREA	0,0020 m <sup>2</sup>
VOLUME 1 CP	0,0002 m <sup>3</sup>
<b>VOLUME 10 CPs</b>	<b>0,0020 m<sup>3</sup></b>

Foi utilizado um molde desmontável, possibilitando desta forma o desmolde de cada CP imediatamente após a sua produção. Na Tabela 3 apresentam-se os valores para a massa de composição de 10 corpos de prova. Os cálculos foram efetuados de acordo com a massa específica requerida para o concreto.

Tabela 3. Características do CP – massa para moldagem de um CP.

<b>CORPO DE PROVA</b>	
<b>MASSA ESPECÍFICA DO CONCRETO</b>	<b>MASSA P/10 CPs</b>
2.100 kg/m <sup>3</sup>	4,29 kg
2.150 kg/m <sup>3</sup>	4,39 kg
2.200 kg/m <sup>3</sup>	4,49 kg
2.250 kg/m <sup>3</sup>	4,60 kg
2.300 kg/m <sup>3</sup>	4,70 kg

Salienta-se que, apesar de serem produzidos 9 CPs por massa, o cálculo foi superestimado em função das perdas no processo. Na Tabela

4 estão descritas as massas equivalentes a cada uma das três camadas que compõem um CP, sempre de acordo com a massa específica requerida para o concreto.

Tabela 4. Características do CP – massa para moldagem de uma camada.

<b>CORPO DE PROVA – MOLDAGEM</b>		
VOLUME P/ 1 CAMADA	MASSA ESPECÍFICA DO CONCRETO	MASSA P/ 1 CAMADA
6,8094E-05 m <sup>3</sup>	2.100 kg/m <sup>3</sup>	143,00 g
	2.150 kg/m <sup>3</sup>	146,40 g
	2.200 kg/m <sup>3</sup>	149,81 g
	2.250 kg/m <sup>3</sup>	153,21 g
	2.300 kg/m <sup>3</sup>	156,62 g

O cálculo da massa de cada camada foi efetuado considerando o volume para o seu preenchimento e a massa específica requerida. Os testes englobaram a avaliação de três traços diferenciados para a composição do concreto: 1:7, 1:8,5 e 1:10 (cimento:agregados), cujo detalhamento é exposto a seguir. Na Tabela 5 consta a descrição dos valores calculados para o traço 1:7.

Tabela 5. Detalhamento do traço 1:7.

<b>TRAÇO 1:7</b>		
CIMENTO	1,000 g	
BRITA N° 0	3,680 g	
AREIA GROSSA	2,324 g	
AREIA FINA (100 %)	0,996 g	
SUBPRODUTO A (0 %)	0,000 g	
ÁGUA	0,640 mL	
SOMA	8,640	
	AREIA FINA	SUBPRODUTO A
SUBSTITUIÇÃO DE 10 %	0,664 g	0,332 g
SUBSTITUIÇÃO DE 20 %	0,332 g	0,664 g
SUBSTITUIÇÃO DE 30 %	0,000 g	0,996 g

Outros dados utilizados para os cálculos do traço 1:7 constam na Tabela 6.

Tabela 6. Dados adicionais para o cálculo de dosagem.

<b>OUTROS DADOS</b>		
Teor ideal de argamassa seca	$\alpha$ (%)	54 %
Relação agregados secos/cimento, em massa	m (kg/kg)	7,00
Relação agregados graúdos secos/cimento, em massa	p (kg/kg)	3,68
Relação agregado miúdo seco/cimento, em massa	a (kg/kg)	3,32
Teor de umidade	H (%)	8 %

O detalhamento da quantidade de cada material utilizado para as misturas de 0 %, 10 %, 20 % e 30 %, consta nas Tabelas 7, 8, 9 e 10.

Tabela 7. Detalhamento traço 1:7 com 0 % de adição de subproduto.

<b>TRAÇO 1:7 – 0 % DE ADIÇÃO DE SUBPRODUTO A</b>		
	Moldagem dos CPs $c/\rho$ de 2.200, 2.250 e 2.300 kg/m <sup>3</sup>	Moldagem dos CPs $c/\rho$ de 2.100, 2.150 e 2.200 kg/m <sup>3</sup>
<b>MATERIAL</b>	<b>QUANTIDADE</b>	<b>QUANTIDADE</b>
CIMENTO	531,98 g	508,34 g
BRITA Nº 0	1.957,70 g	1.870,69 g
AREIA GROSSA	1.236,33 g	1.181,38 g
AREIA FINA	529,86 g	506,31 g
ÁGUA <sub>calculada</sub>	340,47 mL	325,34 mL
ÁGUA <sub>adicionada</sub>	285,56 mL	275,94 mL
H (%)	6,71 %	6,79 %

Tabela 8. Detalhamento traço 1:7 com 10 % de adição de subproduto.

<b>TRAÇO 1:7 – 10 % DE ADIÇÃO DE SUBPRODUTO A</b>	
	Moldagem dos CPs $c/\rho$ de 2.200, 2.250 e 2.300 kg/m <sup>3</sup>
<b>MATERIAL</b>	<b>QUANTIDADE</b>
CIMENTO	531,98 g
BRITA Nº 0	1.957,70 g
AREIA GROSSA	1.236,33 g
AREIA FINA	353,24 g
SUBPRODUTO A	176,62 g
ÁGUA <sub>calculada</sub>	340,47 mL
ÁGUA <sub>adicionada</sub>	319,27 mL
H (%)	7,50 %

Tabela 9. Detalhamento traço 1:7 com 20 % de adição de subproduto.

<b>TRAÇO 1:7 – 20% DE ADIÇÃO DE SUBPRODUTO A</b>	
	Moldagem dos CPs $c/\rho$ de 2.200, 2.250 e 2.300 kg/m <sup>3</sup>
MATERIAL	QUANTIDADE
CIMENTO	531,98 g
BRITA Nº 0	1.957,70 g
AREIA GROSSA	1.236,33 g
AREIA FINA	176,62 g
SUBPRODUTO A	353,24 g
ÁGUA <sub>calculada</sub>	340,47 mL
ÁGUA <sub>adicionada</sub>	309,72 mL
H (%)	7,28 %

Tabela 10. Detalhamento traço 1:7 com 30 % de adição de subproduto.

<b>TRAÇO 1:7 – 30% DE ADIÇÃO DE SUBPRODUTO A</b>	
	Moldagem dos CPs $c/\rho$ de 2.100, 2.150 e 2.200 kg/m <sup>3</sup>
MATERIAL	QUANTIDADE
CIMENTO	508,34 g
BRITA Nº 0	1.870,69 g
AREIA GROSSA	1.181,38 g
SUBPRODUTO A	506,31 g
ÁGUA <sub>calculada</sub>	325,34 mL
ÁGUA <sub>adicionada</sub>	325,34 mL
H (%)	8,00 %

Na Tabela 11 consta a descrição dos valores calculados para o traço 1:8,5 (cimento:agregados).

Tabela 11. Detalhamento traço 1:8,5.

<b>TRAÇO 1:8,5</b>		
CIMENTO	1,000 g	
BRITA Nº 0	4,370 g	
AREIA GROSSA	2,891 g	
AREIA FINA (100 %)	1,239 g	
SUBPRODUTO A (0 %)	0,000 g	
ÁGUA	0,760 mL	
SOMA	10,260	
	AREIA FINA	SUBPRODUTO A
SUBSTITUIÇÃO DE 10 %	0,826 g	0,413 g
SUBSTITUIÇÃO DE 20 %	0,413 g	0,826 g
SUBSTITUIÇÃO DE 30 %	0,000 g	1,239 g

Outros dados utilizados para os cálculos do traço 1:8,5 constam na Tabela 12.

Tabela 12. Dados adicionais para o cálculo de dosagem.

<b>OUTROS DADOS</b>		
Teor ideal de argamassa seca	$\alpha$ (%)	54 %
Relação agregados secos/cimento, em massa	m (kg/kg)	8,50
Relação agregados graúdos secos/cimento, em massa	p (kg/kg)	4,37
Relação agregado miúdo seco/cimento, em massa	a (kg/kg)	4,13
Teor de umidade	H (%)	8 %

O detalhamento da quantidade de cada material utilizado para as misturas de 0 %, 10 %, 20 % e 30 %, consta nas Tabelas 13, 14, 15 e 16.

Tabela 13. Detalhamento traço 1:8,5 com 0 % de adição de subproduto.

<b>TRAÇO 1:8,5 – 0% DE ADIÇÃO DE SUBPRODUTO A</b>		
	Moldagem dos CPs c/ $\rho$ de 2.200, 2.250 e 2.300 kg/m <sup>3</sup>	Moldagem dos CPs c/ $\rho$ de 2.100, 2.150 e 2.200 kg/m <sup>3</sup>
MATERIAL	QUANTIDADE	QUANTIDADE
CIMENTO	447,99 g	447,99 g
BRITA N° 0	1.957,70 g	1.957,70 g
AREIA GROSSA	1.295,13 g	1.295,13 g
AREIA FINA	555,06 g	555,06 g
ÁGUA <sub>calculada</sub>	340,47 mL	340,47 mL
ÁGUA <sub>adicionada</sub>	293,67 mL	340,47 mL
H (%)	6,90 %	8,00 %

Tabela 14. Detalhamento traço 1:8,5 com 10 % de adição de subproduto.

<b>TRAÇO 1:8,5 – 10% DE ADIÇÃO DE SUBPRODUTO A</b>	
	Moldagem dos CPs c/ $\rho$ de 2.200, 2.250 e 2.300 kg/m <sup>3</sup>
MATERIAL	QUANTIDADE
CIMENTO	447,99 g
BRITA N° 0	1.957,70 g
AREIA GROSSA	1.295,13 g
AREIA FINA	370,04 g
SUBPRODUTO A	185,02 g
ÁGUA <sub>calculada</sub>	340,47 mL
ÁGUA <sub>adicionada</sub>	305,71 mL
H (%)	7,18 %

Tabela 15. Detalhamento traço 1:8,5 com 20 % de adição de subproduto.

<b>TRAÇO 1:8,5 – 20% DE ADIÇÃO DE SUBPRODUTO A</b>	
Moldagem dos CPs c/ $\rho$ de 2.200, 2.250 e 2.300 kg/m <sup>3</sup>	
MATERIAL	QUANTIDADE
CIMENTO	447,99 g
BRITA Nº 0	1.957,70 g
AREIA GROSSA	1.295,13 g
AREIA FINA	185,02 g
SUBPRODUTO A	370,04 g
ÁGUA <sub>calculada</sub>	340,47 mL
ÁGUA <sub>adicionada</sub>	328,68 mL
H (%)	7,72 %

Tabela 16. Detalhamento traço 1:8,5 com 30 % de adição de subproduto.

<b>TRAÇO 1:8,5 – 30% DE ADIÇÃO DE SUBPRODUTO A</b>	
Moldagem dos CPs c/ $\rho$ de 2.100, 2.150 e 2.200 kg/m <sup>3</sup>	
MATERIAL	QUANTIDADE
CIMENTO	428,08 g
BRITA Nº 0	1.870,69 g
AREIA GROSSA	1.237,57 g
AREIA FINA	0,00 g
SUBPRODUTO A	530,39 g
ÁGUA <sub>calculada</sub>	325,34 mL
ÁGUA <sub>adicionada</sub>	325,34 mL
H (%)	8,00 %

Na Tabela 17 consta a descrição dos valores calculados para o traço 1:10 (cimento:agregados).

Tabela 17. Detalhamento traço 1:10.

<b>TRAÇO 1:10</b>		
CIMENTO	1,000 g	
BRITA Nº 0	5,060 g	
AREIA GROSSA	3,458 g	
AREIA FINA (100 %)	1,482 g	
SUBPRODUTO A (0 %)	0,000 g	
ÁGUA	0,880 mL	
SOMA	11,880	
	AREIA FINA	SUBPRODUTO A
SUBSTITUIÇÃO DE 10 %	0,988 g	0,494 g
SUBSTITUIÇÃO DE 20 %	0,494 g	0,988 g
SUBSTITUIÇÃO DE 30 %	0,000 g	1,482 g

Outros dados utilizados para os cálculos do traço em questão constam na Tabela 18.

Tabela 18. Dados adicionais para o cálculo de dosagem.

OUTROS DADOS		
Teor ideal de argamassa seca	$\alpha$ (%)	54 %
Relação agregados secos/cimento, em massa	m (kg/kg)	10,00
Relação agregados grãos secos/cimento, em massa	p (kg/kg)	5,06
Relação agregado miúdo seco/cimento, em massa	a (kg/kg)	4,94
Teor de umidade	H (%)	8 %

O detalhamento da quantidade de cada material utilizado para as misturas de 0 %, 10 %, 20 % e 30 %, consta nas Tabelas 19, 20, 21 e 22.

Tabela 19. Detalhamento traço 1:10 com 0 % de adição de subproduto.

TRAÇO 1:10 – 0 % DE ADIÇÃO DE SUBPRODUTO A		
	Moldagem dos CPs $c/\rho$ de 2.200, 2.250 e 2.300 kg/m <sup>3</sup>	Moldagem dos CPs $c/\rho$ de 2.100, 2.150 e 2.200 kg/m <sup>3</sup>
MATERIAL	QUANTIDADE	QUANTIDADE
CIMENTO	386,90 g	369,70 g
BRITA N° 0	1.957,70 g	1.870,69 g
AREIA GROSSA	1.337,89 g	1.278,43 g
AREIA FINA	573,38 g	547,90 g
ÁGUA <sub>calculada</sub>	340,47 mL	325,34 mL
ÁGUA <sub>adicionada</sub>	306,80 mL	281,54 mL
H (%)	7,21 %	6,92 %

Tabela 20. Detalhamento traço 1:10 com 10 % de adição de subproduto.

10% DE ADIÇÃO DE SUBPRODUTO A	
	Moldagem dos CPs $c/\rho$ de 2.200, 2.250 e 2.300 kg/m <sup>3</sup>
MATERIAL	QUANTIDADE
CIMENTO	386,90 g
BRITA N° 0	1.957,70 g
AREIA GROSSA	1.337,89 g
AREIA FINA	382,26 g
SUBPRODUTO A	191,13 g
ÁGUA <sub>calculada</sub>	340,47 mL
ÁGUA <sub>adicionada</sub>	302,97 mL
H (%)	7,12 %

Tabela 21. Detalhamento traço 1:10 com 20 % de adição de subproduto.

<b>20% DE ADIÇÃO DE SUBPRODUTO A</b>	
Moldagem dos CPs $c/\rho$ de 2.200, 2.250 e 2.300 $\text{kg}/\text{m}^3$	
<b>MATERIAL</b>	<b>QUANTIDADE</b>
CIMENTO	386,90 g
BRITA Nº 0	1.957,70 g
AREIA GROSSA	1.337,89 g
AREIA FINA	191,13 g
SUBPRODUTO A	382,26 g
ÁGUA <sub>calculada</sub>	340,47 mL
ÁGUA <sub>adicionada</sub>	317,06 mL
H (%)	7,45 %

Tabela 22. Detalhamento traço 1:10 com 30 % de adição de subproduto.

<b>30% DE ADIÇÃO DE SUBPRODUTO A</b>	
Moldagem dos CPs $c/\rho$ de 2.100, 2.150 e 2.200 $\text{kg}/\text{m}^3$	
<b>MATERIAL</b>	<b>QUANTIDADE</b>
CIMENTO	369,70 g
BRITA Nº 0	1.870,69 g
AREIA GROSSA	1.278,43 g
AREIA FINA	0,00 g
SUBPRODUTO A	547,90 g
ÁGUA <sub>calculada</sub>	325,34 mL
ÁGUA <sub>adicionada</sub>	325,34 mL
H (%)	8,00 %

Para o caso das massas sem adição de subproduto, para todos os traços, a mesma foi produzida duas vezes em função do teste com cinco massas específicas diferenciadas para o concreto e maior produção de corpos de prova.

Para todas as massas a água foi adicionada de acordo com a aparência do concreto. Estimou-se uma umidade de 8 %, contudo, para alguns casos a quantidade adicionada foi inferior à inicialmente calculada.

## APÊNDICE IV – Teste de dosagem: *Subproduto B*

Segue o detalhamento dos cálculos e considerações adotadas para o teste de dosagem do concreto. Na Tabela 1 apresentam-se as variações de massa específica testadas.

Tabela 1. Variações de massa específica testadas.

<b>MASSA ESPECÍFICA (kg/m<sup>3</sup>)</b>						
<b>CONCRETO</b>	2.050	2.100	2.150	2.200	2.250	2.300

A massa específica do concreto utilizado como base para este estudo é de aproximadamente 2.270 kg/m<sup>3</sup> (vide *Anexo III*), assim, foram feitas extrapolações para mais e para menos, quando da aplicação do teste com os corpos de prova. Na Tabela 2 constam as características do molde utilizado para a produção dos CPs.

Tabela 2. Características do corpo de prova.

<b>CORPO DE PROVA</b>	
DIÂMETRO	0,051 m
ALTURA	0,1 m
ÁREA	0,0020 m <sup>2</sup>
VOLUME 1 CP	0,0002m <sup>3</sup>
<b>VOLUME 10 CPs</b>	<b>0,0020 m<sup>3</sup></b>

Foi utilizado um molde desmontável, possibilitando desta forma o desmolde de cada CP imediatamente após a sua produção. Na Tabela 3 apresentam-se os valores para a massa de composição de 10 corpos de prova. Os cálculos foram efetuados de acordo com a massa específica requerida para o concreto.

Tabela 3. Características do CP – massa para moldagem de um CP.

<b>CORPO DE PROVA</b>	
<b>MASSA ESPECÍFICA DO CONCRETO</b>	<b>MASSA P/10 CPs</b>
2.050 kg/m <sup>3</sup>	4,19 kg
2.100 kg/m <sup>3</sup>	4,29 kg
2.150 kg/m <sup>3</sup>	4,39 kg
2.200 kg/m <sup>3</sup>	4,49 kg
2.250 kg/m <sup>3</sup>	4,60 kg
2.300 kg/m <sup>3</sup>	4,70 kg

Salienta-se que, apesar de serem produzidos 9 CPs por massa, o cálculo foi superestimado em função das perdas no processo. Na Tabela 4 estão descritas as massas equivalentes a cada uma das três camadas que compõem um CP, sempre de acordo com a massa específica requerida para o concreto.

Tabela 4. Características do CP – massa para moldagem de uma camada.

<b>CORPO DE PROVA – MOLDAGEM</b>		
VOLUME P/ 1 CAMADA	MASSA ESPECÍFICA DO CONCRETO	MASSA P/ 1 CAMADA
6,8094E-05 m <sup>3</sup>	2.050 kg/m <sup>3</sup>	139,60 g
	2.100 kg/m <sup>3</sup>	143,00 g
	2.150 kg/m <sup>3</sup>	146,40 g
	2.200 kg/m <sup>3</sup>	149,81 g
	2.250 kg/m <sup>3</sup>	153,21 g
	2.300 kg/m <sup>3</sup>	156,62 g

O cálculo da massa de cada camada foi efetuado considerando o volume para o seu preenchimento e a massa específica requerida. Os testes englobaram a avaliação de três traços diferenciados para a composição do concreto: 1:7, 1:8,5 e 1:10 (cimento:agregados), cujo detalhamento é exposto a seguir. Na Tabela 5 consta a descrição dos valores calculados para o traço 1:7.

Tabela 5. Detalhamento do traço 1:7.

<b>TRAÇO 1:7</b>		
CIMENTO	1,000 g	
BRITA N° 0	3,680 g	
AREIA GROSSA	2,324 g	
AREIA FINA (100 %)	0,996 g	
SUBPRODUTO B (0 %)	0,000 g	
ÁGUA	0,640 mL	
SOMA	8,640	
	AREIA FINA	SUBPRODUTO B
SUBSTITUIÇÃO DE 10 %	0,664 g	0,332 g
SUBSTITUIÇÃO DE 20 %	0,332 g	0,664 g
SUBSTITUIÇÃO DE 30 %	0,000 g	0,996 g

Outros dados utilizados para os cálculos do traço 1:7 constam na Tabela 6.

Tabela 6. Dados adicionais para o cálculo de dosagem.

<b>OUTROS DADOS</b>		
Teor ideal de argamassa seca	$\alpha$ (%)	54 %
Relação agregados secos/cimento, em massa	m (kg/kg)	7,00
Relação agregados graúdos secos/cimento, em massa	p (kg/kg)	3,68
Relação agregado miúdo seco/cimento, em massa	a (kg/kg)	3,32
Teor de umidade	H (%)	8 %

O detalhamento da quantidade de cada material utilizado para as misturas de 0 %, 10 %, 20 % e 30 %, consta nas Tabelas 7, 8, 9 e 10.

Tabela 7. Detalhamento traço 1:7 com 0 % de adição de subproduto.

<b>TRAÇO 1:7 – 0 % DE ADIÇÃO DE SUBPRODUTO B</b>		
	Moldagem dos CPs c/ $\rho$ de 2.200, 2.250 e 2.300 kg/m <sup>3</sup>	Moldagem dos CPs c/ $\rho$ de 2.050, 2.100 e 2.150 kg/m <sup>3</sup>
<b>MATERIAL</b>	<b>QUANTIDADE</b>	<b>QUANTIDADE</b>
CIMENTO	531,98 g	508,34 g
BRITA Nº 0	1.957,70 g	1.870,69 g
AREIA GROSSA	1.236,33 g	1.181,38 g
AREIA FINA	529,86 g	506,31 g
ÁGUA <sub>calculada</sub>	340,47 mL	325,34 g
ÁGUA <sub>adicionada</sub>	311,62 mL	301,04 mL
H (%)	7,32 %	7,40 %

Tabela 8. Detalhamento traço 1:7 com 10 % de adição de subproduto.

<b>TRAÇO 1:7 – 10 % DE ADIÇÃO DE SUBPRODUTO B</b>	
	Moldagem dos CPs c/ $\rho$ de 2.200, 2.250 e 2.300 kg/m <sup>3</sup>
<b>MATERIAL</b>	<b>QUANTIDADE</b>
CIMENTO	531,98 g
BRITA Nº 0	1.957,70 g
AREIA GROSSA	1.236,33 g
AREIA FINA	353,24 g
SUBPRODUTO B	176,62 g
ÁGUA <sub>calculada</sub>	340,47 mL
ÁGUA <sub>adicionada</sub>	339,54 mL
H (%)	7,98 %

Tabela 9. Detalhamento traço 1:7 com 20 % de adição de subproduto.

<b>TRAÇO 1:7 – 20% DE ADIÇÃO DE SUBPRODUTO B</b>	
	Moldagem dos CPs $c/\rho$ de 2.200, 2.250 e 2.300 kg/m <sup>3</sup>
MATERIAL	QUANTIDADE
CIMENTO	531,98 g
BRITA N° 0	1.957,70 g
AREIA GROSSA	1.236,33 g
AREIA FINA	176,62 g
SUBPRODUTO B	353,24 g
ÁGUA <sub>calculada</sub>	340,47 mL
ÁGUA <sub>adicionada</sub>	325,06 mL
H (%)	7,64 %

Tabela 10. Detalhamento traço 1:7 com 30 % de adição de subproduto.

<b>TRAÇO 1:7 – 30% DE ADIÇÃO DE SUBPRODUTO B</b>	
	Moldagem dos CPs $c/\rho$ de 2.050, 2.100 e 2.150 kg/m <sup>3</sup>
MATERIAL	QUANTIDADE
CIMENTO	508,34 g
BRITA N° 0	1.870,69 g
AREIA GROSSA	1.181,38 g
SUBPRODUTO B	506,31 g
ÁGUA <sub>calculada</sub>	325,34 mL
ÁGUA <sub>adicionada</sub>	312,54 mL
H (%)	7,69 %

Na Tabela 11 consta a descrição dos valores calculados para o traço 1:8,5 (cimento:agregados).

Tabela 11. Detalhamento traço 1:8,5.

<b>TRAÇO 1:8,5</b>		
CIMENTO	1,000 g	
BRITA N° 0	4,370 g	
AREIA GROSSA	2,891 g	
AREIA FINA (100 %)	1,239 g	
SUBPRODUTO B (0 %)	0,000 g	
ÁGUA	0,760 mL	
SOMA	10,260	
	AREIA FINA	SUBPRODUTO B
SUBSTITUIÇÃO DE 10 %	0,826 g	0,413 g
SUBSTITUIÇÃO DE 20 %	0,413 g	0,826 g
SUBSTITUIÇÃO DE 30 %	0,000 g	1,239 g

Outros dados utilizados para os cálculos do traço 1:8,5 constam na Tabela 12.

Tabela 12. Dados adicionais para o cálculo de dosagem.

<b>OUTROS DADOS</b>		
Teor ideal de argamassa seca	$\alpha$ (%)	54 %
Relação agregados secos/cimento, em massa	m (kg/kg)	8,50
Relação agregados graúdos secos/cimento, em massa	p (kg/kg)	4,37
Relação agregado miúdo seco/cimento, em massa	a (kg/kg)	4,13
Teor de umidade	H (%)	8 %

O detalhamento da quantidade de cada material utilizado para as misturas de 0 %, 10 %, 20 % e 30 %, consta nas Tabelas 13, 14, 15 e 16.

Tabela 13. Detalhamento traço 1:8,5 com 0 % de adição de subproduto.

<b>TRAÇO 1:8,5 – 0% DE ADIÇÃO DE SUBPRODUTO B</b>		
	Moldagem dos CPs c/ $\rho$ de 2.200, 2.250 e 2.300 kg/m <sup>3</sup>	Moldagem dos CPs c/ $\rho$ de 2.050, 2.100 e 2.150 kg/m <sup>3</sup>
MATERIAL	QUANTIDADE	QUANTIDADE
CIMENTO	447,99 g	428,08 g
BRITA N° 0	1.957,70 g	1.870,69 g
AREIA GROSSA	1.295,13 g	1.237,57 g
AREIA FINA	555,06 g	530,39 g
ÁGUA <sub>calculada</sub>	340,47 mL	325,34 mL
ÁGUA <sub>adicionada</sub>	312,67 mL	288,04 mL
H (%)	7,35 %	7,08 %

Tabela 14. Detalhamento traço 1:8,5 com 10 % de adição de subproduto.

<b>TRAÇO 1:8,5 – 10% DE ADIÇÃO DE SUBPRODUTO B</b>	
	Moldagem dos CPs c/ $\rho$ de 2.200, 2.250 e 2.300 kg/m <sup>3</sup>
MATERIAL	QUANTIDADE
CIMENTO	447,99 g
BRITA N° 0	1.957,70 g
AREIA GROSSA	1.295,13 g
AREIA FINA	370,04 g
SUBPRODUTO B	185,02 g
ÁGUA <sub>calculada</sub>	340,47 mL
ÁGUA <sub>adicionada</sub>	311,47 mL
H (%)	7,32 %

Tabela 15. Detalhamento traço 1:8,5 com 20 % de adição de subproduto.

<b>TRAÇO 1:8,5 – 20% DE ADIÇÃO DE SUBPRODUTO B</b>	
Moldagem dos CPs c/ $\rho$ de 2.200, 2.250 e 2.300 kg/m <sup>3</sup>	
MATERIAL	QUANTIDADE
CIMENTO	447,99 g
BRITA Nº 0	1.957,70 g
AREIA GROSSA	1.295,13 g
AREIA FINA	185,02 g
SUBPRODUTO B	370,04 g
ÁGUA <sub>calculada</sub>	340,47 mL
ÁGUA <sub>adicionada</sub>	297,27 mL
H (%)	6,98 %

Tabela 16. Detalhamento traço 1:8,5 com 30 % de adição de subproduto.

<b>TRAÇO 1:8,5 – 30% DE ADIÇÃO DE SUBPRODUTO B</b>	
Moldagem dos CPs c/ $\rho$ de 2.050, 2.100 e 2.150 kg/m <sup>3</sup>	
MATERIAL	QUANTIDADE
CIMENTO	428,08 g
BRITA Nº 0	1.870,69 g
AREIA GROSSA	1.237,57 g
SUBPRODUTO B	530,39 g
ÁGUA <sub>calculada</sub>	325,34 mL
ÁGUA <sub>adicionada</sub>	292,64 mL
H (%)	7,20 %

Na Tabela 17 consta a descrição dos valores calculados para o traço 1:10 (cimento:agregados).

Tabela 17. Detalhamento traço 1:10.

<b>TRAÇO 1:10</b>		
CIMENTO	1,000 g	
BRITA Nº 0	5,060 g	
AREIA GROSSA	3,458 g	
AREIA FINA (100 %)	1,482 g	
SUBPRODUTO B (0 %)	0,000 g	
ÁGUA	0,880 mL	
SOMA	11,880	
	AREIA FINA	SUBPRODUTO B
SUBSTITUIÇÃO DE 10 %	0,988 g	0,494 g
SUBSTITUIÇÃO DE 20 %	0,494 g	0,988 g
SUBSTITUIÇÃO DE 30 %	0,000 g	1,482 g

Outros dados utilizados para os cálculos do traço em questão constam na Tabela 18.

Tabela 18. Dados adicionais para o cálculo de dosagem.

OUTROS DADOS		
Teor ideal de argamassa seca	$\alpha$ (%)	54 %
Relação agregados secos/cimento, em massa	m (kg/kg)	10,00
Relação agregados graúdos secos/cimento, em massa	p (kg/kg)	5,06
Relação agregado miúdo seco/cimento, em massa	a (kg/kg)	4,94
Teor de umidade	H (%)	8 %

O detalhamento da quantidade de cada material utilizado para as misturas de 0 %, 10 %, 20 % e 30 %, consta nas Tabelas 19, 20, 21 e 22.

Tabela 19. Detalhamento traço 1:10 com 0 % de adição de subproduto.

TRAÇO 1:10 – 0 % DE ADIÇÃO DE SUBPRODUTO B		
	Moldagem dos CPs c/ $\rho$ de 2.200, 2.250 e 2.300 kg/m <sup>3</sup>	Moldagem dos CPs c/ $\rho$ de 2.050, 2.100 e 2.150 kg/m <sup>3</sup>
MATERIAL	QUANTIDADE	QUANTIDADE
CIMENTO	386,90 g	369,70 g
BRITA N° 0	1.957,70 g	1.870,69 g
AREIA GROSSA	1.337,89 g	1.278,43 g
AREIA FINA	573,38 g	547,90 g
ÁGUA <sub>calculada</sub>	340,47 mL	325,34 mL
ÁGUA <sub>adicionada</sub>	307,47 mL	290,44 mL
H (%)	7,22 %	7,14 %

Tabela 20. Detalhamento traço 1:10 com 10 % de adição de subproduto.

10% DE ADIÇÃO DE SUBPRODUTO B	
	Moldagem dos CPs c/ $\rho$ de 2.200, 2.250 e 2.300 kg/m <sup>3</sup>
MATERIAL	QUANTIDADE
CIMENTO	386,90 g
BRITA N° 0	1.957,70 g
AREIA GROSSA	1.337,89 g
AREIA FINA	382,26 g
SUBPRODUTO B	191,13 g
ÁGUA <sub>calculada</sub>	340,47 mL
ÁGUA <sub>adicionada</sub>	333,17 mL
H (%)	7,83 %

Tabela 21. Detalhamento traço 1:10 com 20 % de adição de subproduto.

<b>20% DE ADIÇÃO DE SUBPRODUTO B</b>	
Moldagem dos CPs c/ $\rho$ de 2.200, 2.250 e 2.300 kg/m <sup>3</sup>	
<b>MATERIAL</b>	<b>QUANTIDADE</b>
CIMENTO	386,90 g
BRITA N° 0	1.957,70 g
AREIA GROSSA	1.337,89 g
AREIA FINA	191,13 g
SUBPRODUTO B	382,26 g
ÁGUA <sub>calculada</sub>	340,47 mL
ÁGUA <sub>adicionada</sub>	309,07 mL
H (%)	7,26 %

Tabela 22. Detalhamento traço 1:10 com 30 % de adição de subproduto.

<b>30% DE ADIÇÃO DE SUBPRODUTO B</b>	
Moldagem dos CPs c/ $\rho$ de 2.050, 2.100 e 2.150 kg/m <sup>3</sup>	
<b>MATERIAL</b>	<b>QUANTIDADE</b>
CIMENTO	369,70 g
BRITA N° 0	1.870,69 g
AREIA GROSSA	1.278,43 g
SUBPRODUTO B	547,90 g
ÁGUA <sub>calculada</sub>	325,34 mL
ÁGUA <sub>adicionada</sub>	306,14 mL
H (%)	7,53 %

Para o caso das massas sem adição de subproduto, para todos os traços, a mesma foi produzida duas vezes em função do teste com seis massas específicas diferenciadas para o concreto e maior produção de corpos de prova.

Para todas as massas a água foi adicionada de acordo com a aparência do concreto. Estimou-se uma umidade de 8 %, contudo, para alguns casos a quantidade adicionada foi inferior à inicialmente calculada.

## APÊNDICE V – Resultados: Caracterização geral

Segue o detalhamento dos resultados obtidos nas análises realizadas para a caracterização do lodo *in natura* da ETE Insular.

Tabela 1. Caracterização detalhada do lodo de esgoto *in natura*.

Resultados Caracterização detalhada					
Parâmetros	<i>in natura</i> (jul/10)	<i>in natura</i> (fev/11)	<i>in natura</i> (abr/11)	<i>in natura</i> (jul/11)	<i>in natura</i> (nov/11)
pH em água 1:5 <sup>1</sup>	7,00	6,30	-	-	-
pH em CaCl <sub>2</sub> <sup>1</sup>	6,60	5,90	6,56	7,08	7,21
Teor de Sólidos Totais (%) (m/m)	12,68	12,59	13,94	12,43	11,87
Teor de Sólidos Fixos (%ST) (m/m) <sup>2</sup>	23,72	30,68	22,74	20,40	20,08
Teor de Sólidos Voláteis (%ST) (m/m) <sup>2</sup>	76,28	69,32	77,26	79,60	79,92
Carbono Orgânico (%) (m/m)	41,97	36,67	34,60	33,60	38,30
Matéria Orgânica (%) (m/m)	72,19	63,07	59,50	57,90	65,90
Cinzas a 550°C (%) (m/m)	-	30,68	-	-	-
Nitrogênio Total (%) (m/m)	-	6,01	4,60	7,00	6,40
Nitrogênio Amoniacal (%) (m/m)	-	1,30	0,90	1,71	1,40
Fósforo (P) Total (%) (m/m)	-	1,60	2,70	2,40	2,40
Fósforo (PO <sub>4</sub> ) (%) (m/m)	-	4,90	1,50	2,00	1,50
Alumínio (Al) (%)	0,89	1,70	1,10	0,59	0,70
Cálcio (Ca) (%)	0,90	1,00	0,95	0,85	1,25
Magnésio (Mg) (%)	0,65	0,66	0,48	0,53	0,48
Arsênio (As) (mg/kg)	< 0,1	-	6,30	4,10	0,80
Bário (Ba) (mg/kg)	117,00	-	191,00	140,00	143,00
Mercúrio (Hg) (mg/kg)	0,30	-	1,20	1,60	0,70
Molibdênio (Mo) (mg/kg)	3,00	-	< 5	24,60	< 5
Níquel (Ni) (mg/kg)	14,00	-	14,00	13,00	16,00
Selênio (Se) (mg/kg)	< 0,1	-	6,30	1,00	0,80
Ferro (Fe) (mg/kg)	11500,0	14200,0	-	-	-
Cobre (Cu) (mg/kg)	174,00	230,00	208,00	-	-
Zinco (Zn) (mg/kg)	550,00	560,00	515,00	484,00	500,00
Cádmio (Cd)(mg/kg)	< 1,0	0,90	0,70	0,50	< 0,01
Chumbo (Pb) (mg/kg)	25,00	22,00	26,50	17,70	22,00
Cromo (Cr) (mg/kg)	19,00	28,00	88,00	18,60	34,00
Umidade a 65 ± 5°C (%)	86,40	85,73	84,94	86,84	87,80
Umidade a 105 ± 5°C (%)	87,32	87,41	86,06	87,57	88,13
Densidade (g/cm <sup>3</sup> ) (1)	1,04	0,82	-	-	-

<sup>1</sup> Ensaios realizados na amostra *in natura*.

<sup>2</sup> Resultados em peso seco a 105°C ± 5°C.

Tabela 2. Caracterização detalhada do lodo de esgoto *in natura* – bacteriológico.

<b>Resultados Caracterização detalhada – Micro-organismos</b>										
<b>Parâmetros</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
Coliformes Totais (NMP/ gST)	7,9E+05	>1,1E+05	3,3E+06	4,6E+06	1,1E+10	5,4E+05	1,6E+06	1,6E+06	3,5E+05	4,9E+06
Coliformes Termotolerantes (NMP/ gST)	5,0E+04	1,10E+05	3,3E+06	9,3E+05	1,1E+09	2,2E+05	9,2E+05	2,2E+05	3,5E+05	3,3E+06
<i>Escherichia coli</i> (NMP/ gST)	5,0E+04	1,10E+05	3,3E+06	2,2E+05	1,1E+09	2,2E+05	9,2E+05	2,2E+05	3,5E+05	3,3E+06
Ovos Helminhos (ovo viáveis/g ST)	0,337	0,002	0,011	0,008	0,01	0,01	0,005	-	-	-
<i>Salmonella sp.</i> Mini vidas	Ausente	Ausente	-	-	-	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente

## APÊNDICE VI – Resultados: Caleação

A caleação do lodo de esgoto foi realizada duas vezes, os resultados referentes ao primeiro e ao segundo experimento são apresentados nas tabelas a seguir. Os parâmetros monitorados foram coliformes totais, *Escherichia coli*, pH, sólidos totais voláteis e fixos, umidade e temperatura. Nas Tabelas 1 e 2 constam os dados referentes aos coliformes totais e *Escherichia coli*.

Tabela 1. Coliformes totais e *Escherichia coli* para o primeiro experimento.

Data	1° MONITORAMENTO							
	0%		15%		30%		45%	
	C. TOTAIS <sup>1</sup>	E. COLI <sup>1</sup>						
20/09/2010	-	-	0,00	0,00			0,00	0,00
04/10/2010	-	-	5,73	5,44	2,84	2,24	1,76	1,76
08/11/2010	-	-	4,52	4,52	5,31	3,30	4,21	3,23
15/11/2010	-	-	4,88	4,88	6,32	2,87	4,88	2,76
29/11/2010	-	-	4,88	4,88	5,48	5,48	4,87	3,64
13/12/2010	-	-	-	-	5,46	5,08	-	-

<sup>1</sup>Os resultados da contagem de coliformes totais e *Escherichia coli* são apresentados em logaritmo na base 10.

Tabela 2. Coliformes totais e *Escherichia coli* para o segundo experimento.

Data	2° MONITORAMENTO							
	0%		15%		30%		45%	
	C. TOTAIS <sup>1</sup>	E. COLI <sup>1</sup>						
07/04/2011	7,96	7,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14/04/2011	8,89	8,50	6,88	2,20	3,74	2,06	5,43	2,55
21/04/2011	9,00	7,34	6,70	0,00	6,28	0,00	5,18	1,37
28/04/2011	8,29	7,01	6,51	5,02	6,70	0,00	6,73	3,41
05/05/2011	8,05	6,35	4,95	3,04	6,66	6,66	6,45	3,87
02/06/2011	7,27	4,04	4,63	0,00	0,00	5,46	5,44	5,14
09/06/2011	7,10	4,84	4,77	3,75	4,78	4,78	4,86	3,37

<sup>1</sup>Os resultados da contagem de coliformes totais e *Escherichia coli* são apresentados em logaritmo na base 10.

Nas Tabelas 3 e 4 são apresentados os resultados referente ao monitoramento do pH.

Tabela 3. pH para o primeiro experimento.

<b>1° MONITORAMENTO</b>				
<b>Data</b>	<b>% de Cal</b> (em relação ao peso seco)			
	<b>0%</b>	<b>15%</b>	<b>30%</b>	<b>45%</b>
13/09/2010	-	10,30	-	11,20
20/09/2010	-	11,46	-	12,99
04/10/2010	-	10,00	12,22	12,19
11/10/2010	-	8,99	12,29	11,20
18/10/2010	-	8,73	12,15	11,03
25/10/2010	-	9,36	12,65	9,74
01/11/2010	-	9,08	11,87	9,43
08/11/2010	-	8,67	10,94	8,92
15/11/2010	-	8,90	8,99	9,15
22/11/2010	-	9,08	9,20	9,38
29/11/2010	-	8,60	8,67	8,97
06/12/2010	-	9,03	9,32	9,61
13/12/2010	-	-	9,26	-

Tabela 4. pH para o segundo experimento.

<b>2° MONITORAMENTO</b>				
<b>Data</b>	<b>% de Cal</b> (em relação ao peso seco)			
	<b>0%</b>	<b>15%</b>	<b>30%</b>	<b>45%</b>
31/03/2011	6,80	12,74	13,08	13,35
07/04/2011	6,77	9,27	10,04	9,91
14/04/2011	7,41	10,08	11,82	11,92
21/04/2011	6,96	10,13	11,85	11,85
28/04/2011	6,54	9,26	10,77	12,24
05/05/2011	6,44	9,29	9,35	9,48
12/05/2011	6,50	9,30	9,28	9,52
19/05/2011	6,64	9,70	9,66	9,80
26/05/2011	-	-	-	-
02/06/2011	6,71	9,53	9,31	9,63
09/06/2011	6,23	9,31	9,48	9,62
16/06/2011	6,36	9,23	9,42	9,60

Nas Tabelas 5 e 6 são apresentados os resultados referentes à sólidos totais, voláteis e fixos, para o primeiro e segundo experimento.

Tabela 5. Série de sólidos para o primeiro experimento.

1° MONITORAMENTO												
Data	0%			15%			30%			45%		
	ST	STV	STF	ST	STV	STF	ST	STV	STF	ST	STV	STF
20/09/2010	-	-	-	24%	37%	63%	-	-	-	30%	18%	82%
18/10/2010	-	-	-	42%	39%	61%	29%	43%	57%	-	-	-
01/11/2010	-	-	-	79%	42%	58%	43%	42%	58%	93%	38%	62%
09/11/2010	-	-	-	88%	43%	57%	50%	44%	56%	91%	35%	65%
15/11/2010	-	-	-	88%	44%	56%	67%	39%	61%	91%	32%	68%
22/11/2010	-	-	-	87%	41%	59%	79%	41%	59%	91%	32%	68%
29/11/2010	-	-	-	88%	41%	59%	81%	33%	67%	93%	33%	67%
06/12/2010	-	-	-	88%	39%	61%	78%	39%	61%	92%	33%	67%
13/12/2010	-	-	-	-	-	-	84%	37%	63%	-	-	-

Tabela 6. Série de sólidos para o segundo experimento.

2° MONITORAMENTO												
Data	0%			15%			30%			45%		
	ST	STV	STF									
31/03/2011	12%	68%	32%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
07/04/2011	15%	53%	47%	22%	45%	55%	23%	39%	61%	35%	27%	73%
14/04/2011	29%	56%	44%	32%	50%	50%	36%	40%	60%	42%	34%	66%
21/04/2011	40%	48%	52%	48%	42%	58%	38%	38%	62%	43%	32%	68%
28/04/2011	89%	50%	50%	75%	39%	61%	48%	36%	64%	45%	31%	69%
05/05/2011	90%	47%	53%	82%	38%	62%	53%	34%	66%	85%	32%	68%
12/05/2011	87%	48%	52%	89%	38%	62%	66%	34%	66%	86%	33%	67%
19/05/2011	89%	49%	51%	87%	38%	62%	72%	31%	69%	81%	29%	71%
26/05/2011	92%	50%	50%	88%	37%	63%	65%	30%	70%	87%	32%	68%
02/06/2011	89%	49%	51%	89%	38%	62%	83%	29%	71%	87%	30%	70%
09/06/2011	89%	48%	52%	88%	38%	62%	86%	31%	69%	86%	31%	69%
16/06/2011	89%	50%	50%	88%	38%	62%	89%	31%	69%	90%	29%	71%

Nas Tabelas 7 e 8 são apresentados os resultados referentes à umidade, para o primeiro e segundo experimento.

Tabela 7. Umidade para o primeiro experimento.

1° MONITORAMENTO				
Data	% de Cal (em relação ao peso seco)			
	0%	15%	30%	45%
13/09/2010	-	79%	-	70%
20/09/2010	-	76%	-	70%
18/10/2010	-	58%	71%	-
25/10/2010	-	35%	68%	20%
01/11/2010	-	21%	57%	7%
09/11/2010	-	12%	50%	9%
15/11/2010	-	12%	33%	9%
22/11/2010	-	13%	21%	9%
29/11/2010	-	12%	19%	7%
06/12/2010	-	12%	22%	8%
13/12/2010	-	-	16%	-

Tabela 8. Umidade para o segundo experimento.

<b>2° MONITORAMENTO</b>				
<b>Data</b>	<b>% de Cal (em relação ao peso seco)</b>			
	<b>0%</b>	<b>15%</b>	<b>30%</b>	<b>45%</b>
31/03/2011	88%	-	-	-
07/04/2011	85%	78%	77%	65%
14/04/2011	71%	68%	64%	58%
21/04/2011	60%	52%	62%	57%
28/04/2011	11%	25%	52%	55%
05/05/2011	10%	18%	47%	15%
12/05/2011	13%	11%	34%	14%
19/05/2011	11%	13%	28%	19%
26/05/2011	8%	12%	35%	13%
02/06/2011	11%	11%	17%	13%
09/06/2011	11%	12%	14%	14%
16/06/2011	11%	12%	11%	10%

APÊNDICE VII – Resultados: Estatística descritiva (caleação e dosagem do concreto)

Nas Tabela 1 e 2 constam os valores de média, mediana, desvio padrão, intervalo de confiança ( $\pm 95\%$ ) e variância para os resultados relativos aos dois experimentos de caleação.

Tabela 1. Estatística descritiva para o primeiro monitoramento.

% Mistura	Parâmetros	Estatística Descritiva					
		Média	Mediana	DP	IC (-95%)	IC (+95%)	Variância
15%	pH	9,18	9,03	0,59	8,97	9,39	0,35
	C. Totais <sup>1</sup>	4,00	4,88	2,28	1,17	6,83	5,20
	E. Coli <sup>1</sup>	3,94	4,88	2,23	1,18	6,71	4,97
	SV/ST (%)	41	42	4	39	42	0
	Umidade (%)	34	13	27	24	44	7
30%	pH	10,59	10,94	1,55	10,02	11,16	2,40
	C. Totais <sup>1</sup>	5,08	5,46	1,31	3,45	6,71	1,73
	E. Coli <sup>1</sup>	3,79	3,30	1,42	2,04	5,55	2,00
	SV/ST (%)	40	41	4	38	42	0
	Umidade (%)	39	29	22	30	48	5
45%	pH	9,98	9,45	1,16	9,57	10,39	1,35
	C. Totais <sup>1</sup>	3,14	4,21	2,18	0,44	5,85	4,73
	E. Coli <sup>1</sup>	2,28	2,76	1,45	0,47	4,08	2,11
	SV/ST (%)	31	33	8	28	35	1
	Umidade (%)	23	9	24	14	32	6

<sup>1</sup>Unidade: Log NMP/gST

Tabela 2. Estatística descritiva para o segundo monitoramento.

% Mistura	Parâmetros	Estatística Descritiva					
		Média	Mediana	DP	IC (-95%)	IC (+95%)	Variância
0%	pH	6,57	6,54	0,26	6,46	6,69	0,07
	C. Totais <sup>1</sup>	7,97	8,00	0,75	7,34	8,59	0,56
	E. Coli <sup>1</sup>	6,34	6,68	1,54	5,05	7,63	2,38
	Umidade (%)	50	49	5	48	52	0
	SV/ST (%)	21	11	25	11	31	6
15%	pH	9,59	9,32	0,72	9,29	9,89	0,52
	C. Totais <sup>1</sup>	5,05	5,44	2,23	3,18	6,91	4,96
	E. Coli <sup>1</sup>	2,36	2,62	2,16	0,56	4,16	4,65
	Umidade (%)	39	38	3	37	40	0
	SV/ST (%)	20	12	18	12	27	3
30%	pH	9,85	9,46	1,00	9,43	10,28	1,00
	C. Totais <sup>1</sup>	4,42	5,53	2,95	1,95	6,88	8,70
	E. Coli <sup>1</sup>	2,77	2,62	2,68	0,53	5,01	7,16
	Umidade (%)	33	32	3	31	34	0
	SV/ST (%)	31	28	19	23	39	4
45%	pH	10,08	9,62	1,07	9,63	10,53	1,14
	C. Totais <sup>1</sup>	5,77	5,44	0,72	5,11	6,43	0,51
	E. Coli <sup>1</sup>	3,04	3,39	1,69	1,62	4,45	2,86
	Umidade (%)	31	31	2	30	32	0
	SV/ST (%)	21	14	17	14	28	3

<sup>1</sup>Unidade: Log NMP/gST

## → Estatística descritiva – dosagem do concreto:

Tabela 3. Estatística descritiva para o *Subproduto A*.

Traço	% Mistura	Massa Específica	ESTATÍSTICA DESCRITIVA					
			Média	Mediana	Variância	Desvio Padrão	IC (-95%)	IC (-95%)
1:7	0	2100	13,6450	13,6450	3,1500	1,7748	-2,301	29,5913
		2150	16,0983	16,0983	2,0876	1,4449	3,117	29,0798
		2200	18,2917	18,2917	0,1440	0,3795	14,882	21,7012
		2250	23,8917	23,8917	0,8321	0,9122	15,696	32,0872
		2300	24,4350	24,4350	0,1549	0,3936	20,898	27,9716
	10	2200	9,7483	9,7483	2,2827	1,5109	-3,826	23,3228
		2250	9,1333	9,1333	0,0534	0,2310	7,058	11,2087
		2300	10,2217	10,2217	1,1909	1,0913	0,417	20,0266
	20	2200	7,1700	7,1700	1,0952	1,0465	-2,233	16,5726
		2250	7,7100	7,7100	2,6912	1,6405	-7,029	22,4492
		2300	9,1150	9,1150	4,5904	2,1425	-10,135	28,3649
	30	2100	3,6283	3,6283	0,2335	0,4832	-0,713	7,9696
		2150	4,5200	4,5200	0,0128	0,1131	3,504	5,5365
		2200	5,0300	5,0300	0,4050	0,6364	-0,688	10,7478
	1:8,5	0	2100	9,8567	9,8567	4,6614	2,1590	-9,541
2150			12,7450	12,7450	0,3785	0,6152	7,218	18,2722
2200			15,1750	15,1750	1,7485	1,3223	3,295	27,0553
2250			15,9400	15,9400	0,4232	0,6505	10,095	21,7849
2300			18,6883	18,6883	40,1109	6,3333	-38,214	75,5910
10		2200	5,8350	5,8350	4,8984	2,2132	-14,050	25,7202
		2250	6,1000	6,1000	3,5378	1,8809	-10,799	22,9993
		2300	7,2850	7,2850	13,2613	3,6416	-25,433	40,0035
20		2200	6,9400	6,9400	4,6818	2,1637	-12,500	26,3805
		2250	8,2950	8,2950	7,6441	2,7648	-16,546	33,1356
		2300	9,0567	9,0567	7,7356	2,7813	-15,932	34,0455
30		2100	3,3550	3,3550	0,0501	0,2239	1,343	5,3668
		2150	3,7883	3,7883	0,1369	0,3701	0,464	7,1131
		2200	4,6050	4,6050	0,0025	0,0495	4,160	5,0497
1:10		0	2100	9,5333	9,5333	1,5961	1,2634	-1,818
	2150		11,1833	11,1833	0,0338	0,1838	9,532	12,8351
	2200		12,9150	12,9150	0,1740	0,4172	9,167	16,6633
	2250		15,7800	15,7800	1,5488	1,2445	4,599	26,9615
	2300		16,9217	16,9217	0,0545	0,2333	14,825	19,0182
	10	2200	5,2950	5,2950	0,0760	0,2758	2,817	7,7727
		2250	5,8750	5,8750	0,4901	0,7000	-0,415	12,1646
		2300	6,1300	6,1300	4,9928	2,2345	-13,946	26,2058
	20	2200	6,1950	6,1950	6,1601	2,4819	-16,104	28,4944
		2250	7,6650	7,6650	13,8864	3,7265	-25,816	41,1458
		2300	8,0333	8,0333	9,6214	3,1018	-19,836	35,9023
	30	2100	2,6950	2,6950	0,0145	0,1202	1,615	3,7750
		2150	3,3933	3,3933	0,1964	0,4431	-0,588	7,3746
		2200	3,8333	3,8333	0,0032	0,0566	3,325	4,3416

Tabela 4. Estatística descritiva para o *Subproduto B*.

Traço	% Mistura	Massa Específica	ESTATÍSTICA DESCRITIVA						
			Média	Mediana	Variância	Desvio Padrão	IC (-95%)	IC (-95%)	
1:7	0	2050	13,0567	13,0567	5,0139	2,2392	-7,0615	33,1748	
		2100	17,0450	17,0450	14,7424	3,8396	-17,4523	51,5423	
		2150	18,9733	18,9733	11,1078	3,3328	-10,9710	48,9176	
		2200	19,2767	19,2767	5,2057	2,2816	-1,2227	39,7760	
		2250	21,1150	21,1150	0,0181	0,1344	19,9079	22,3221	
	10	2300	24,3767	24,3767	0,0008	0,0283	24,1225	24,6308	
		2200	7,6250	7,6250	0,5940	0,7707	0,7001	14,5499	
		2250	8,3400	8,3400	0,3528	0,5940	3,0034	13,6766	
	20	2300	9,1150	9,1150	0,0264	0,1626	7,6538	10,5762	
		2200	5,4100	5,4100	1,6928	1,3011	-6,2797	17,0997	
		2250	6,7600	6,7600	2,9282	1,7112	-8,6145	22,1345	
	30	2300	6,4750	6,4750	2,1841	1,4779	-6,8030	19,7530	
		2050	3,6917	3,6917	0,4080	0,6388	-2,0473	9,4306	
		2100	3,9467	3,9467	0,1964	0,4431	-0,0346	7,9279	
			2150	4,2433	4,2433	0,5339	0,7307	-2,3215	10,8082
	1:8,5	0	2050	10,7083	10,7083	1,4849	1,2186	-0,2402	21,6568
			2100	14,4850	14,4850	0,0040	0,0636	13,9132	15,0568
			2150	16,2283	16,2283	3,4235	1,8503	-0,3956	32,8523
2200			19,8450	19,8450	0,0684	0,2616	17,4944	22,1956	
2250			22,8683	22,8683	0,0868	0,2946	20,2212	25,5155	
10		2300	24,9367	24,9367	3,7904	1,9469	7,4445	42,4289	
		2200	8,9050	8,9050	3,2004	1,7890	-7,1683	24,9783	
		2250	10,1617	10,1617	3,0340	1,7418	-5,4881	25,8115	
20		2300	9,1283	9,1283	3,0669	1,7513	-6,6062	24,8629	
		2200	5,4750	5,4750	0,0265	0,1626	4,0138	6,9362	
		2250	5,9200	5,9200	0,3872	0,6223	0,3293	11,5107	
30		2300	6,0550	6,0550	0,0925	0,3041	3,3232	8,7868	
		2050	2,9250	2,9250	0,1013	0,3182	0,0661	5,7839	
		2100	3,0300	3,0300	0,0578	0,2404	0,8699	5,1901	
			2150	3,1383	3,1383	0,1663	0,4078	-0,5253	6,8020
1:10		0	2050	8,7300	8,7300	0,1800	0,4243	4,9181	12,5419
			2100	11,2133	11,2133	0,0512	0,2263	9,1803	13,2463
			2150	13,6450	13,6450	0,1104	0,3323	10,6590	16,6310
	2200		18,6917	18,6917	0,0133	0,1155	17,6540	19,7293	
	2250		20,6217	20,6217	0,2568	0,5068	16,0686	25,1747	
	10	2300	22,7250	22,7250	0,0924	0,3041	19,9932	25,4568	
		2200	8,0050	8,0050	2,4864	1,5768	-6,1624	22,1724	
		2250	9,1350	9,1350	1,6745	1,2940	-2,4912	20,7612	
	20	2300	9,9217	9,9217	1,3176	1,1479	-0,3915	20,2349	
		2200	4,3983	4,3983	0,0133	0,1155	3,3607	5,4360	
		2250	5,2250	5,2250	0,5304	0,7283	-1,3187	11,7687	
	30	2300	4,8300	4,8300	0,3042	0,5515	-0,1254	9,7854	
		2050	3,0967	3,0967	0,4934	0,7024	-3,2141	9,4074	
		2100	2,8083	2,8083	0,3843	0,6199	-2,7612	8,3779	
			2150	3,0933	3,0933	0,2788	0,5280	-1,6503	7,8370

## ANEXO I – Laudo: Cal virgem



Cal Cem Indústria de Minérios Ltda.

<b>LAUDO DE ANÁLISE</b>		<b>1.149</b>
<i>Cliente:</i>	Cal Cem Indústria de Minérios Ltda	
<i>Endereço:</i>	Rua Antônio Gasparim, 9586 - CEP 83415-070 - Colombo - Pr	
<i>Coleta:</i>	40417	
<i>Período de Ensaio:</i>	27/08/2010 A 27/08/2010	

Os resultados são restritos ao material ensaiado no laboratório da Cal Cem Indústria de Minérios Ltda.  
Este documento só poderá ser reproduzido por inteiro.

<i>Material:</i>	Cal Virgem				
<i>Identificação:</i>	CV-C				
<i>Referência Normativa:</i>	Referente aos parâmetros da Norma NBR 6453.				
<b>Análise Química:</b>					
Ensaio	Unidade	Resultado	Limites		
			CV-E	CV-C	CV-P
Perda ao Fogo (PF)	%	9,8	-	-	-
Silica e Resíduo Insolúvel (SiO <sub>2</sub> + RI)	%	3,0	-	-	-
Óxido de Cálcio (CaO)	%	51,6	-	-	-
Óxido de Magnésio (MgO)	%	35,0	-	-	-
Óxidos Totais (CaO total+MgO total) ñ v	%	96,0	≥ 90,0	≥ 88,0	≥ 88,0
Anidrido Carbônico (CO <sub>2</sub> )	Fábrica		≤ 6,0	≤ 12,0	≤ 12,0
	Depósito	%	6,5	≤ 8,0	≤ 15,0
Carbonato Residual	%	8,3	-	-	-
Água Combinada	Fábrica		≤ 3,0	≤ 3,5	≤ 3,0
	Depósito	%	3,3	≤ 3,6	≤ 4,0
Óxido de Ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	%	nd	-	-	-
Óxido de Alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	%	nd	-	-	-
<b>Análise Física:</b>					
Ensaio	Unidade	Resultado	Limites		
			CV-E	CV-C	CV-P
Granulometria # 18 (1,00 mm )	%	1,7	≤ 2,0	≤ 5,0	≥ 85,0
Granulometria # 50 (0,30 mm)	%	18,2	≤ 15,0	≤ 30,0	-
Umidade	%	0,6	-	-	-
CV-E Cal Virgem Especial    CV-C Cal Virgem Comum    CV-P Cal Virgem em Pedra					
Legenda: nd - não determinado    ald - abaixo do limite de detecção					
<i>Observações:</i>					

Data: 27/08/2010-Agosto

Bruna Tuane

Responsável Técnico

Rua Antônio Gasparim, 9586 - CEP 83415 - 070 - Colombo / Pr - Fone: (41) 3656 - 3636  
www.calcem.com.br    calcem@brturbo.com.br

## ANEXO II – Laudo: Caracterização dos agregados (miúdo e graúdo)

---



---

**RELATÓRIO DE ENSAIO**


---



---

**Realizador do Ensaio**

Nome: *Laboratório de Materiais da Construção Civil - LMCC*  
 Endereço  
 : *Dep. de Eng. Civil - UFSC - Campus Universitário - Trindade - Florianópolis - SC*  
 Fone: *37 21-9723*

---

**Solicitante do Ensaio**

Nome: *Franciele Fedrizzi*  
 Endereço: *Engenharia Ambiental – Grupo de Pesquisa em Avaliação do Ciclo de Vida – UFSC*  
 Fone: *(048) 3721-6319 / (048) 9900-7939*  
 Contato: *Franciele Fedrizzi*

---

**Dados referentes aos itens ensaiados**

Descrição dos itens ensaiados:	<i>Caracterização física de agregado miúdo e graúdo</i>
Material declarado:	<i>Lodo, agregado miúdo e graúdo</i>
Data de recebimento:	<i>18/04/2.011.</i>
Data da amostragem:	<i>18/04/2.011.</i>
Data da realização do ensaio:	<i>xxxxxxx</i>
Local da amostragem:	<i>xxxxxxx</i>
Identificação interna:	<i>PS 087/011</i>
Procedimento de amostragem:	<i>Coletada pelo interessado</i>
Informações adicionais:	<i>Certificado de calibração das balanças: BAL 005, CERTI nº 1520/010 de 04/04/10.</i>

---

**Dados referentes ao ensaio realizado**

Procedimento de ensaio:	<i>– Conforme NBR NM 248/3 e NM 49/011.</i>
Normas de referência:	<i>NBR 7211/05 – Agregados para concreto - Especificação        NBR NM 248/03 – Determinação da composição granulométrica        NM 49/01 – Determinação de impurezas orgânicas</i>

---

## Resultados obtidos

**Amostra: Brita nº 0**

<b>Peneiras # mm</b>	<b>% média retida</b>	<b>% média retida acumulada</b>
9,5	10	10
6,3	48	58
4,8	33	91
2,4	9	100
1,2	0	100
0,6	0	100
0,3	0	100
0,15	0	100
Fundo	9	100
Total	100	-

<i>Módulo de finura</i>	<b>6,01</b>
<i>Dimensão máxima característica</i>	<b>12,5 mm</b>
<i>Massa específica</i>	<b>2.620 kg/m<sup>3</sup></b>
<i>Argila em torrões</i>	-
<i>Material pulverulento</i>	-
<i>Matéria orgânica</i>	-
<i>Massa unitária solta</i>	<b>1.345 kg/m<sup>3</sup></b>
<i>Massa unit. Compact.</i>	<b>1.489 kg/m<sup>3</sup></b>
<i>Umidade superficial</i>	-
<i>Mat. carbonosos</i>	-
<i>Absorção de água</i>	-

### Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo

PENEIRAS (ABNT)	Porcentagem, em peso, retida acumulada			
	Zona ótima		Zona utilizável	
	Limite inferior	Limite superior	Limite inferior	Limite superior
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	5	0	10
2,36 mm	10	20	0	25
1,18 mm	20	30	5	50
600 µm	35	55	15	70
300 µm	65	85	50	95
150 µm	90	95	85	100

Notas:

1. O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90
2. O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20

**Amostra: Areia Grossa**

<b>Peneiras # mm</b>	<b>% média retida</b>	<b>% média retida acumulada</b>
9,5	0	0
6,3	0	0
4,8	1	1
2,4	11	12
1,2	32	44
0,6	25	69
0,3	16	85
0,15	9	94
Fundo	6	100
Total	100	-

<i>Módulo de finura</i>	<b>3,05</b>
<i>Dimensão máxima característica</i>	<b>4,8 mm</b>
<i>Massa específica</i>	<b>2.590 kg/m<sup>3</sup></b>
<i>Argila em torrões</i>	-
<i>Material pulverulento</i>	-
<i>Matéria orgânica</i>	-
<i>Massa unitária seca</i>	<b>1.402 kg/m<sup>3</sup></b>
<i>Massa unit. Úmida (7,6%)</i>	<b>1.181 kg/m<sup>3</sup></b>
<i>Umidade superficial</i>	-
<i>Mat. carbonosos</i>	-
<i>Absorção de água</i>	-

## Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo

PENEIRAS (ABNT)	Porcentagem, em peso, retida acumulada			
	Zona ótima		Zona utilizável	
	Limite inferior	Limite superior	Limite inferior	Limite superior
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	5	0	10
2,36 mm	10	20	0	25
1,18 mm	20	30	5	50
600 µm	35	55	15	70
300 µm	65	85	50	95
150 µm	90	95	85	100

## Notas:

1. O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90
2. O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20

**Amostra: Areia Fina**

<b>Peneiras # mm</b>	<b>% média retida</b>	<b>% média retida acumulada</b>		
9,5	0	0	<i>Módulo de finura</i>	<b>2,70</b>
6,3	0	0	<i>Dimensão máxima característica</i>	<b>4,8 mm</b>
4,8	2	2	<i>Massa específica</i>	<b>2.620 kg/m<sup>3</sup></b>
2,4	7	9	<i>Argila em torrões</i>	-
1,2	23	32	<i>Material pulverulento</i>	-
0,6	24	56	<i>Matéria orgânica</i>	-
0,3	22	78	<i>Massa unitária seca</i>	<b>1.472 kg/m<sup>3</sup></b>
0,15	15	93	<i>Massa unit. Úmida (6,7%)</i>	<b>1.431 kg/m<sup>3</sup></b>
<i>Fundo</i>	7	<b>100</b>	<i>Umidade superficial</i>	-
<i>Total</i>	100	-	<i>Mat. carbonosos</i>	-
			<i>Absorção de água</i>	-

## Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo

PENEIRAS (ABNT)	Porcentagem, em peso, retida acumulada			
	Zona ótima		Zona utilizável	
	Limite inferior	Limite superior	Limite inferior	Limite superior
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	5	0	10
2,36 mm	10	20	0	25
1,18 mm	20	30	5	50
600 µm	35	55	15	70
300 µm	65	85	50	95
150 µm	90	95	85	100
Notas:				
1. O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90				
2. O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20				

**Amostra: Subproduto A – Lodo 45%**

<b>Peneiras # mm</b>	<b>% média retida</b>	<b>% média retida acumulada</b>		
9,5	-	-	<i>Módulo de finura</i>	<b>1,59</b>
6,3	-	-	<i>Dimensão máxima característica</i>	<b>2,4 mm</b>
4,8	-	-	<i>Massa específica</i>	<b>1.829 kg/m<sup>3</sup></b>
2,4	-	-	<i>Argila em torrões</i>	-
1,2	6	<b>6</b>	<i>Material pulverulento</i>	-
0,6	22	<b>28</b>	<i>Matéria orgânica</i>	-
0,3	23	<b>52</b>	<i>Massa unitária seca</i>	<b>800 kg/m<sup>3</sup></b>
0,15	22	<b>73</b>	<i>Massa unit. Úmida (5,4%)</i>	<b>786 kg/m<sup>3</sup></b>
<i>Fundo</i>	27	<b>100</b>	<i>Umidade superficial</i>	-
<i>Total</i>	100	-	<i>Mat. carbonosos</i>	-
			<i>Absorção de água</i>	-

**Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo**

<b>PENEIRAS (ABNT)</b>	<b>Porcentagem, em peso, retida acumulada</b>			
	<b>Zona ótima</b>		<b>Zona utilizável</b>	
	<b>Limite inferior</b>	<b>Limite superior</b>	<b>Limite inferior</b>	<b>Limite superior</b>
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	5	0	10
2,36 mm	10	20	0	25
1,18 mm	20	30	5	50
600 µm	35	55	15	70
300 µm	65	85	50	95
150 µm	90	95	85	100

**Notas:**

1. O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90
2. O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20

**Amostra: Subproduto B – Lodo 300 °C**

<b>Peneiras # mm</b>	<b>% média retida</b>	<b>% média retida acumulada</b>		
9,5	0	0	<i>Módulo de finura</i>	<b>4,31</b>
6,3	0	0	<i>Dimensão máxima característica</i>	<b>4,8 mm</b>
4,8	3	3	<i>Massa específica</i>	<b>1.085 kg/m<sup>3</sup></b>
2,4	27	30	<i>Argila em torrões</i>	-
1,2	68	98	<i>Material pulverulento</i>	-
0,6	2	100	<i>Matéria orgânica</i>	-
0,3	0	100	<i>Massa unitária úmida</i>	<b>548 kg/m<sup>3</sup></b>
0,15	0	100	<i>Massa unitária seca</i>	<b>563 kg/m<sup>3</sup></b>
Fundo	0	100	<i>Umidade superficial</i>	-
Total	100	-	<i>Mat. carbonosos</i>	-
			<i>Absorção de água</i>	-

## Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo

PENEIRAS (ABNT)	Porcentagem, em peso, retida acumulada			
	Zona ótima		Zona utilizável	
	Limite inferior	Limite superior	Limite inferior	Limite superior
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	5	0	10
2,36 mm	10	20	0	25
1,18 mm	20	30	5	50
600 µm	35	55	15	70
300 µm	65	85	50	95
150 µm	90	95	85	100

## Notas:

1. O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90
2. O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20

**Massa específica**

Material	Resultados (kg/m <sup>3</sup> )
Amostra caleação – 45 %	1.829,00
Amostra caleação – 30 %	1.739,70
Amostra caleação – 15 %	1.632,40
Amostra secagem – 300 °C	1.085,00
Amostra secagem – 550 °C	1.674,50
Amostra secagem – 700 °C	1.607,70

**Cláusulas de responsabilidade**

- \* O Laboratório de Materiais da Construção Civil, não se torna responsável em nenhum caso de interpretação ou uso indevido que se possa fazer deste documento, cuja reprodução parcial ou total, sem autorização expressa deste laboratório, está totalmente proibida.
- \* Os resultados obtidos somente se referem à amostra do material submetido ao(s) ensaio(s).
- \* Não é de responsabilidade à representatividade da amostragem realizada pelo solicitante.
- \* O Laboratório de Materiais da Construção Civil não se torna responsável pela divulgação ou o uso que o solicitante, outra pessoa ou entidade venham a fazer dos resultados apresentados no presente relatório.
- \* O Laboratório garante a confiabilidade dos resultados contidos no presente relatório de ensaio.
- \* Os resultados que são obtidos por meio de cálculos matemáticos são apresentados com valores arredondados conforme a norma utilizada.
- \* A reprodução deste relatório só está autorizada na forma de uma reprodução integral.

Florianópolis, 13 de junho de 2.011.

Professor Dr. Humberto Ramos Roman  
Supervisor do laboratório

ANEXO III – Laudo: Caracterização do concreto (tubo de drenagem DN 400)

---

**RELATÓRIO DE ENSAIO**

---

**Realizador do Ensaio**

Nome: **Laboratório de Materiais da Construção Civil - LMCC**

Endereço: *Dep. de Eng. Civil - UFSC - Campus Universitário - Trindade - Florianópolis - SC*

Fone: 3721 9723

---

**Solicitante do Ensaio**

Nome: **Franciele Fedrizzi**

Endereço: *Engenharia Ambiental – Grupo de Pesquisa em Avaliação do Ciclo de Vida (GPACV) – www.ciclodevida.ufsc.br - UFSC*

Fone: *(48) 3721-7754 / (48) 9900-7939*

Contato: *Franciele Fedrizzi*

---

**Dados referentes aos itens ensaiados**

Descrição dos itens ensaiados:	<i>Verificação da resistência à compressão diametral em tubos de concreto simples de seção circular para águas pluviais e esgotos sanitários.</i>
Material declarado:	<i>Tubos de concreto simples e reforçados com fibras de seção circular.</i>
Data de recebimento:	<i>21/10/2.011</i>
Data da amostragem:	<i>21/10/2.011</i>
Data da realização do ensaio:	<i>26/10/2.011</i>
Local da amostragem:	<i>Canteiro de obras da CASAN</i>
Identificação interna:	<i>PS 304/011</i>
Procedimento de amostragem:	<i>Coletada pelo interessado</i>
Informações adicionais:	<i>Certificado de calibração da prensa: CERTI nº 0941/11 – 28.02.011</i> <i>Ensaio acompanhado pelo engenheiro da Prefeitura de Blumenau Alexandre Procópio Gomes</i>

---

**Dados referentes ao ensaio realizado**

Normas de referência: *NBR 8890/2007 – Tubo de concreto, de seção circular, para águas pluviais e esgotos sanitários – Requisitos e métodos de ensaios.*

---

### **Resultados obtidos**

C.P. Nº	Diâmetro nominal (mm)	Comprimento útil (m)	Carga de ruptura (kN/m)	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Absorção (%)
01	400	0,98	<b>11</b>	<b>2,39</b>	<b>6,2</b>
02	“	0,98	<b>11</b>	<b>2,41</b>	<b>5,7</b>
03	“	0,97	<b>5</b>	<b>2,44</b>	<b>5,9</b>
04	“	0,98	<b>5</b>	<b>2,41</b>	<b>6,4</b>
05	“	0,98	<b>11</b>	<b>2,45</b>	<b>6,9</b>
06	“	0,97	<b>5</b>	<b>2,41</b>	<b>6,3</b>
07	“	1,00	<b>22</b>	<b>2,50</b>	<b>5,7</b>
08	“	0,98	<b>21</b>	<b>2,48</b>	<b>6,0</b>
09	“	0,99	<b>18</b>	<b>2,46</b>	<b>5,7</b>
10	“	0,99	<b>29</b>	<b>2,52</b>	<b>4,8</b>
11	“	1,00	<b>29</b>	<b>2,53</b>	<b>5,3</b>
12	“	0,99	<b>26</b>	<b>2,53</b>	<b>5,5</b>
13	“	1,00	<b>23</b>	<b>2,56</b>	<b>6,0</b>
14	“	1,00	<b>25</b>	<b>2,50</b>	<b>5,5</b>
15	“	0,98	<b>26</b>	<b>2,57</b>	<b>5,3</b>

### **Cláusulas de responsabilidade**

- \* O Laboratório de Materiais da Construção Civil, não se torna responsável em nenhum caso de interpretação ou uso indevido que se possa fazer deste documento, cuja reprodução parcial ou total, sem autorização expressa deste laboratório, está totalmente proibida.
- \* Os resultados obtidos somente se referem à amostra do material submetido ao(s) ensaio(s).
- \* Não é de responsabilidade à representatividade da amostragem realizada pelo solicitante.
- \* O Laboratório de Materiais da Construção Civil não se torna responsável pela divulgação ou o uso que o solicitante, outra pessoa ou entidade venham a fazer dos resultados apresentados no presente relatório.
- \* O Laboratório garante a confiabilidade dos resultados contidos no presente relatório de ensaio.
- \* Os resultados que são obtidos por meio de cálculos matemáticos são apresentados com valores arredondados conforme a norma utilizada.
- \* A reprodução deste relatório só está autorizada na forma de uma reprodução integral.

Florianópolis, 27 de outubro de 2.011.

Professor Dr. Humberto Ramos Roman  
Supervisor do laboratório

## ANEXO IV – Laudo: Cimento Votorantim CP V ARI RS

VOTORANTIM CIMENTOS BRASIL S/A				CP V ARI (NBR 5733/Jun92)				Votorantim Cimentos							
Controle de Qualidade - Rio Branco				julho/11											
BOLETIM DE ANÁLISES DE CIMENTO				Certificada pela NBR ISO 9001:2000											
ENSAIOS QUÍMICOS								ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS							
Limites de Norma	TEORES (%)				Resistência Compressão (MPa)				Finura (%)		Bolha	Água de	Tempo Pegaj. (min)	Exp. Quente	
	≤ 4,50	≤ 6,5	Não Aplicável	Não Aplicável	≥ 11,0	≥ 24,0	≥ 34,0	Não Aplicável	≤ 6,0	Não Aplicável	≥ 3000	Não Aplicável	≥ 60	≤ 600	≤ 5,0
17/20/11	PF	MgO	SO3	Ri	1 Dias	3 Dias	7 Dias	28 Dias	#200	#325	cm2/g	Cons. (%)	INÍCIO	FIM	(mm)
01/07/11	3,27	6,25	3,01	0,88	23,20	34,40	40,50	48,20	0,00	0,70	4720	29,50	220	285	0,00
02/07/11															
03/07/11															
04/07/11	3,06	6,12	2,44	0,89	21,40	33,00	37,50		0,10	1,30	4530	29,60	200	260	0,50
05/07/11	3,07	6,08	2,71	0,72	21,30	32,70	37,10		0,10	1,40	4630	29,60	200	260	0,50
06/07/11	4,38	6,05	2,60	0,65	21,90	34,20	38,50		0,20	1,80	4600	29,20	190	250	0,50
07/07/11	3,08	6,23	2,69	0,71	22,10	33,70	39,30		0,10	1,30	4730	29,50	210	270	0,50
08/07/11	3,32	5,95	3,24	0,93	24,10	35,70	40,20		0,00	0,50	4980	29,50	190	250	1,00
09/07/11															
10/07/11															
11/07/11	3,30	6,10	2,67	0,81	23,80	34,40	39,40		0,10	1,00	4660	29,60	210	270	0,50
12/07/11	3,18	6,12	2,82	0,87	23,50	33,30	38,90		0,10	1,00	4730	30,00	200	260	0,50
13/07/11	2,70	6,25	2,71	0,98	23,70	34,10	39,60		0,10	0,80	4620	29,60	210	270	0,50
14/07/11	3,16	6,24	2,80	0,56	23,30	35,60	38,30		0,00	0,50	4780	30,20	200	260	0,50
15/07/11	2,76	6,24	2,32	0,95	23,30	33,10	37,20		0,10	0,90	4850	29,80	215	280	0,50
16/07/11															
17/07/11															
18/07/11	3,10	6,45	2,97	0,95	24,70	35,90	40,90		0,10	1,20	4890	30,10	180	240	0,50
19/07/11	3,45	6,37	3,38	0,72	24,50	34,90	38,70		0,10	1,20	5010	29,80	190	250	0,50
20/07/11	3,34	6,57	3,55	0,83	24,80	34,70	40,70		0,00	0,80	4840	29,40	180	240	0,50
21/07/11															
22/07/11															
23/07/11	3,24	6,46	3,07	0,88	24,70	37,50	40,80		0,10	1,20	4950	30,40	195	255	0,50
24/07/11															
25/07/11	3,24	6,53	3,20	0,92	26,30	37,10			0,10	2,00	5010	30,40	200	260	0,50
26/07/11	3,28	6,39	3,00	0,93	24,90	35,80			0,10	1,40	4770	30,40	220	280	0,50
27/07/11	0,16	6,47	2,65	0,95	22,90	33,20			0,10	1,20	4650	30,20	190	250	1,00
28/07/11	3,26	6,33	2,96	0,88	24,20	36,60			0,10	1,00	4790	30,00	215	275	1,00
29/07/11															
30/07/11															
31/07/11															
Média	3,07	6,27	2,88	0,84	23,61	34,73	39,17	48,20	0,08	1,12	4776	29,84	201	261	0,55
D. Padrão	0,78	0,18	0,32	0,12	1,30	1,44	1,30	#DIV/0!	0,05	0,38	145	0,37	12	13	0,23
Mínimo	0,16	5,95	2,32	0,56	21,30	32,70	37,10	48,20	0,00	0,50	4530	29,20	180	240	0,00
Máximo	4,38	6,57	3,55	0,98	26,30	37,50	40,90	48,20	0,20	2,00	5010	30,40	220	285	1,00

Resistência à compressão Comparativo NBR

■ valores exigidos NBR ■ valores médios mês

Observações:

Abílio Estevão Galli Junior  
Gerente Controle de Qualidade

Paulo Roberto Niebel  
Comercial

Atualizado em: 01/08/11