

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

**Inertização de lodo de esgoto em tijolos cerâmicos
maciços: Aspectos tecnológicos e ambientais**

Ariovaldo Nuvolari

Campinas

2002

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

**Inertização de lodo de esgoto em tijolos cerâmicos
maciços: Aspectos tecnológicos e ambientais**

Ariovaldo Nuvolari

Orientador: Prof. Dr. Bruno Coraucci Filho

Tese de Doutorado apresentada à Comissão de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção de título de Doutor em Engenharia Civil, na área de concentração de Saneamento.

Campinas, SP

2002

Atesto que esta é a versão definitiva da dissertação/tese.	
Prof. Dr.	<i>Bruno Coraucci Filho</i>
Matrícula:	03737-1

UNIDADE	80
Nº CHAMADA	UNICAMP
	N979i
V	EX
TOMBO BC	54434
PROC.	124/03
C	☐
D	☒
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	19/06/03
1º CPD	

CM00185625-1

18 10 293680

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

N979i

Nuvolari, Ariovaldo

Inertização de lodo de esgoto em tijolos cerâmicos
maciços: aspectos tecnológicos e ambientais / Ariovaldo
Nuvolari. --Campinas, SP: [s.n.], 2002.

Orientador: Bruno Coraucci Filho

Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas,
Faculdade de Engenharia Civil.

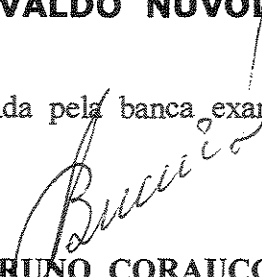
1. Solubilização. 2. Lixiviação. 3. Radioatividade. 4.
Material cerâmico. 5. Águas residuais. 6. Lodo. I.
Coraucci Filho, Bruno. II. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia Civil. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

**Inertização de lodo de esgoto em tijolos cerâmicos
maciços: Aspectos tecnológicos e ambientais**

ARIOVALDO NUVOLARI

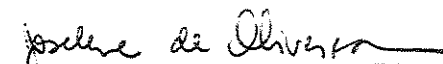
Tese de Doutorado aprovada pela banca examinadora, constituída por:


Prof. Dr. **BRUNO CORAUCCI FILHO**

Presidente e Orientador: Deptº de Saneamento e Ambiente da FEC-UNICAMP


Profª Dra **EGLÊ NOVAES TEIXEIRA**

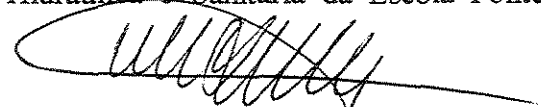
Deptº de Saneamento e Ambiente da FEC-UNICAMP


Profª Dra **JOSELENE DE OLIVEIRA**

Deptº de Radioproteção Ambiental do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares


Prof. Dr. **PEDRO ALÊM SOBRINHO**

Deptº de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da USP


Prof. Dr. **ROBERTO FEIJÓ DE FIGUEIREDO**

Deptº de Saneamento e Ambiente da FEC-UNICAMP

Campinas, 22 de agosto de 2002.

Agradecimentos

A decisão de se elaborar um trabalho desta natureza é geralmente individual. A sua realização, no entanto, é árdua e dificilmente se concretiza sem a ajuda inestimável de outras pessoas e instituições. Nesta pesquisa, os agradecimentos vão especialmente ao orientador deste trabalho Dr. Bruno Coraucci Filho; aos professores do Departamento de Saneamento e Ambiente da Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP; Dra Eglé Novaes Teixeira; Dra Rozely Ferreira dos Santos, Dr. Roberto Feijó de Figueiredo, Dr. Ruben Bresaola Junior; Dr. Carlos Gomes da Nave Mendes, Dr. Edson Aparecido Abdul Nour e Dr. José Roberto Guimarães. Aos professores da FATEC-SP (Faculdade de Tecnologia de São Paulo); Dr. Dirceu D'Alkmin Telles e Mestre Acacio Eiji Ito, respectivamente diretor e vice-diretor daquela instituição; Mestre José Tarcísio Ribeiro, responsável pelo Laboratório de Química e Saneamento; Dra Sonia Hatsue Tatumi, responsável pelo Laboratório de Vidros e Datação; Luiz Antonio da Silva, responsável pelo Laboratório de Solos; Mara Fátima do Prado Rocha, responsável pelo Laboratório de Materiais de Construção Civil; Celso Couto Junior, professor do Departamento de Edifícios da FATEC-SP. Aos instrutores, auxiliares e estagiários da FATEC-SP: Idalino Pereira Abreu; Rubens Bastos; Antonio Manoel de Aguiar; Adriana Capanema Godoi; Luci Sayuri Matsuda, Emília Akemi Kowata e Márcio de Mello Machado. À Dra Joselene de Oliveira e Dra Barbara Mazzilli, do Departamento de Radioproteção Ambiental do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. À Dra Elisabeth de Oliveira, do Instituto de Química da USP. Aos engenheiros Hector Patrício Alvial Muñoz e Marcio Alves da Silva, da ETE Jesus Neto, Estação de tratamento de esgoto, da SABESP.

Resumo

Nuvolari, Ariovaldo. Inertização de lodo de esgoto em tijolos cerâmicos maciços: aspectos tecnológicos e ambientais. Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 2002. xxi, 238p. Tese (Doutorado em Saneamento).

O lodo de esgoto sanitário é gerado nas estações de tratamento de esgoto (ETEs), em quantidades significativas. O seu destino final é um dos mais sérios problemas ambientais, em nível mundial, podendo-se optar por duas linhas gerais de decisão, quais sejam, o descarte controlado ou a utilização. Em termos de descarte, a tendência é a disposição em aterros sanitários. A utilização mais nobre é na melhoria de solos agrícolas, desde que respeitadas as condicionantes ambientais, tipos de solos, culturas, etc. Quando isto não é possível, outras alternativas têm sido estudadas, dentre elas, a inertização em tijolos cerâmicos, objeto desta pesquisa. Nesta, foram utilizados, como matéria prima, um solo argiloso, dois diferentes tipos de lodo (LD1 e LD2) e suas cinzas. O LD1, oriundo de um sistema convencional de lodos ativados, foi condicionado com cal e cloreto férrico e desaguado em filtro-prensa de placas. O LD2, oriundo de um reator anaeróbio de fluxo ascendente foi desaguado em leito de secagem, sem condicionamento químico. Os lodos foram coletados na ETE Jesus Neto, Bairro do Ipiranga em São Paulo e em seguida; destorroados, secos em estufa a 105 °C, passados em peneira nº 10 – ASTM (2,0 mm de abertura) e armazenados. Os lodos foram misturados ao solo argiloso (previamente seco ao ar e passado na peneira de 2,0 mm), nas proporções de 10, 20 e 30 % (em peso seco). Parte dos lodos armazenados foram colocados em forno-mufla a 900 °C e transformados em cinzas. Estas foram misturadas ao solo nas proporções de 10, 20, 30 e 40 %. Uma massa cerâmica feita apenas com o solo foi utilizada como testemunho. Os tijolos foram moldados manualmente, secos ao ar por no mínimo 10 dias, em estufa a 105 °C por 24 horas e queimados a 950 °C. Foram avaliados os parâmetros e condicionantes tecnológicos e ambientais para o emprego dos mesmos na construção civil, tendo-se concluído que tanto o LD1 quanto o LD2, quando utilizados após secagem a 105 °C, só podem ser utilizados com até 10 % de lodo na massa cerâmica. As cinzas do LD1 podem ser utilizadas com até 40 % na mistura com o solo argiloso. No entanto, o uso das cinzas do LD2 foi considerado desaconselhável por causa do nível de radioatividade presente neste resíduo.

Palavras chave: lodo de esgoto; tijolo cerâmico; resistência à compressão; solubilização, lixiviação; radioatividade.

Abstract

Significant quantities of sewage sludge is produced in the wastewater treatment plants (WTPs). At global level, its final destination is one of the most serious environmental issues, allowing two options to be chosen: the controlled discard or its utilization. In terms of the discard there is a general trend of landfilling utilization. The most noble utilization of the sewage sludge is in the improvement of agricultural soils, since that verified the environmental conditions, soil tipology, crops, eg. When this is not possible, however, other options can be chosen, such as ceramics bricks utilization, which is the subject of the present research. Here, the studies carried out with one clay-soil and two different kinds of sewage sludge (called LD1 and LD2) and their dusts are presented. The LD1 is from a conventional system of activated sludge, dehydrated in plate's press filter, after amended with CaO and FeCl_3 . The LD2 is from a upflow anaerobic shaped bed reactor (UASB), dehydrated in drier bed and without the inclusion of any chemical substance. After the collection of the two sewage sludges (LD1 and LD2), from the Jesus Neto WTP, Bairro Ipiranga in São Paulo city, the samples were grinded, dried at 105°C , sieved with number 10-ASTM sieve (2,0 mm) and stored. They were mixed with clay-soil (previously dried in open-air, grinded and sieved with number 10-ASTM), using 10, 20 and 30 % proportions (dried weight). Part of the sewage sludge was burned at 900°C and became ash, which was also mixed with soil at 10, 20, 30 and 40 % proportions. Another sample, made only with soil, was used as control. The bricks were shaped by hand, dried in open-air for a minimum of 10 days, dried in stove at 105°C for 24 hours and burned at 950°C . The technological and environmental parameters for their use in civil construction were evaluated. LD1 and LD2 can be used in up to 10 % proportions. LD1 ashes can be used in up to 40 % proportions. On the other hand, for the LD2 ashes, is not advisable the use of this material in ceramic bricks, because the results concerning its radioactive content.

Sumário

	Lista de Figuras	
	Lista de Tabelas	
	Lista de siglas, símbolos e abreviaturas	
1.	INTRODUÇÃO	1
2.	OBJETIVOS	5
2.1	Objetivo geral	5
2.2	Objetivos específicos	5
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
3.1	Origem e definições	7
3.2	Histórico sobre tratamento de esgoto e do destino final do lodo	9
3.3	Aspectos ambientais do uso do lodo em tijolos cerâmicos	24
3.3.1	Presença de elementos potencialmente tóxicos no lodo	24
3.3.2	Presença de elementos radioativos no lodo	30
3.3.2.1	Radioatividade em resíduos	30
3.3.2.2	Principais aspectos sobre a radioatividade	31
3.3.2.3	Fontes naturais de radiação	36
3.3.2.4	Fontes de radiação na medicina	39
3.3.2.5	Radioatividade no lodo de esgoto sanitário	40
3.3.2.6	Radioatividade nos materiais de construção civil	48
3.4	Materiais cerâmicos e suas principais propriedades	53
3.4.1	Breve Histórico	53
3.4.2	A matéria prima dos produtos cerâmicos	54
3.4.3	Principais propriedades das argilas	57
3.4.4	Principais propriedades dos corpos cerâmicos	59
3.4.5	Tijolos feitos com lodo de esgoto	60

4.	METODOLOGIA	64
4.1	Resumo dos procedimentos utilizados nesta pesquisa	64
4.2	Materiais, dispositivos e equipamentos	69
4.3	Ensaio e procedimentos no solo argiloso	73
4.3.1	Escolha do material argiloso a ser utilizado	73
4.3.2	Análise granulométrica do solo	74
4.3.3	Limite de plasticidade do solo	74
4.3.4	Limite de liquidez do solo	75
4.3.5	Teor de umidade higroscópica do solo	75
4.3.6	Perda de massa do solo à temperatura de 600°C	76
4.3.7	Valor do pH do solo	76
4.3.8	Caracterização dos argilo-minerais presentes no solo	77
4.3.9	Concentração de elementos potencialmente tóxicos no solo	77
4.3.10	Concentração de elementos radioativos no solo	78
4.4	Ensaio e procedimentos nos lodos de esgoto sanitário	79
4.4.1	Teor de umidade higroscópica nos lodos e cinzas	80
4.4.2	Perda de massa dos lodos à temperatura de 600 °C	80
4.4.3	Valor do pH dos lodos e de suas cinzas	80
4.4.4	Caracterização dos minerais presentes nos lodos e em suas cinzas	81
4.4.5	Concentração de elementos potencialmente tóxicos nos lodos	81
4.4.6	Concentração de elementos radioativos nos lodos	81
4.5	Ensaio e procedimentos nas massas cerâmicas	82
4.5.1	Nomenclatura adotada	82
4.5.2	Procedimentos preliminares	83
4.5.3	Procedimentos complementares	84
4.5.3.1	Determinação do volume original “V _{orig} ” de cada forma de tijolo	87
4.5.3.2	Massa específica aparente pós- preparação de cada massa cerâmica “ γ_{pp} ”	88
4.5.3.3	Teor de umidade das MCs na moldagem dos CPs	88
4.5.3.4	Perdas de massa das MCs à temperatura de 600 °C	88
4.5.3.5	Perdas de massa durante a secagem ao ar	89
4.5.3.6	Secagem à temperatura de 105 °C e pesagem	89
4.5.3.7	Queima à temperatura de 950 °C e pesagem	90
4.5.3.8	Absorção d’água pós-imersão “A”	90
4.5.3.9	Retração volumétrica pós-queima “RV”	91
4.5.3.10	Massa específica aparente úmida pós-moldagem “ γ_{pm} ”	91
4.5.3.11	Massa específica aparente pós-queima “ γ_{pq} ”	92

4.5.3.12	Massa específica aparente pós-imersão em água " γ_{pi} "	92
4.5.3.13	Resistência à compressão pós-secagem e pós-queima	92
4.5.3.14	Resistência à flexão pós-secagem e pós-queima	93
4.5.3.15	Concentração de EPTs - teste de solubilização	94
4.5.3.16	Concentração de EPTs - teste de lixiviação	95
4.5.3.17	Concentração de radionuclídeos nas misturas solo-cinzas de lodo	95
4.6	Tabulação e tratamento estatístico dos resultados	96
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	98
5.1	Forma de apresentação dos resultados	98
5.2	Escolha do solo argiloso utilizado	98
5.3	Resultados dos ensaios de caracterização do solo escolhido	99
5.4	Ensaio de caracterização dos lodos e suas cinzas	101
5.4.1	Coleta dos lodos e ensaios preliminares	101
5.4.2	Resultados dos ensaios de caracterização dos lodos e cinzas	104
5.5	Resultados dos ensaios realizados nas massas cerâmicas	111
5.5.1	Diagrama tempo x temperatura de queima dos tijolos	111
5.5.2	Moldagem dos corpos de prova	111
5.5.3	Teor de umidade dos corpos de prova pós-moldagem " h_{PM} "	112
5.5.4	Acompanhamento da secagem ao ar de cada corpo de prova	113
5.5.5	Resumo dos dados e observações sobre as massas cerâmicas	119
5.5.6	Resultados dos ensaios cerâmicos realizados em cada CP	122
5.5.6.1	Massa específica aparente pós-queima " γ_{pq} "	129
5.5.6.2	Absorção d'água pós-imersão "A"	132
5.5.6.3	Retração volumétrica pós-queima "RV"	134
5.5.6.4	Resistência à compressão pós-queima " $\sigma_{C,950}$ "	136
5.5.6.5	Correlação entre a massa específica e a resistência à compressão	141
5.5.6.6	Resistência à compressão dos CPs (crus e pós-queima)	141
5.5.6.7	Resistência à flexão dos CPs (crus e pós-queima)	145
5.5.6.8	Massas específicas: pós-moldagem, pós-queima e pós-imersão	148
5.5.6.9	Ensaio de solubilização e de lixiviação	152
5.5.6.10	Medida da radioatividade nas misturas solo + cinzas de lodo	158
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	162
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	165
	ANEXOS	175

Lista de Figuras

3.1	Esquema para elucidar as principais unidades de radiação e de dose	35
4.1	Corte esquemático do dispositivo para medida da carga de ruptura à flexão....	71
4.2	Dispositivo e procedimento para medida do volume final dos corpos de prova .	72
5.1	Limites, comparados aos valores de EPTs medidos: no solo, no LD1 e LD2 e suas cinzas	107
5.2	Gráficos e equações que representam a média geral das perdas de massa na secagem dos corpos de prova ao ar	117
5.3	Comparação da massa específica aparente pós-queima para tijolos feitos com lodo de esgoto	124
5.4	Comparação da absorção d'água pós-imersão para tijolos feitos com lodo de esgoto	124
5.5	Comparação da retração volumétrica pós-queima para tijolos feitos com lodo de esgoto	125
5.6	Comparação da resistência à compressão pós-queima para tijolos feitos com lodo de esgoto	125
5.7	Comparação da massa específica aparente pós-queima para tijolos feitos com cinzas de lodo	126
5.8	Comparação da absorção d'água pós-imersão para tijolos feitos com cinzas de lodo	126
5.9	Comparação da retração volumétrica pós-queima para tijolos feitos com cinzas de lodo	127
5.10	Comparação da resistência à compressão pós-queima para tijolos feitos com cinzas de lodo	127
5.11	Correlação entre a massa específica e a resistência à compressão pós-queima	128

5.12	Comparação das resistências médias à compressão dos tijolos rompidos crus e pós-queima	143
5.13	Comparação das resistências médias à flexão e à compressão dos tijolos rompidos crus e pós-queima	147
5.14	Comparação das massas específicas aparentes: pós-moldagem, pós-queima e pós-imersão	150
5.15	Comparação: limites da NBR-10004 e resultados dos ensaios de lixiviação	154
5.16	Comparação: limites da NBR-10004 e resultados dos ensaios de solubilização.	155
A1	Curva granulométrica do solo argiloso 1 (escolhido para continuidade da pesquisa)	176
A2	Curva granulométrica do solo argiloso 2 (não escolhido para continuidade da pesquisa)	176
A3	Curva granulométrica do solo argiloso 3 (não escolhido para continuidade da pesquisa)	177
A4	Diagrama tempo x temperatura de queima utilizado na pesquisa	177
A5	Perdas de massa x temperatura	178
A6	MC-0-A – Gráfico de perda de massa na secagem ao ar	179
A7	MC-0-B – Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar	180
A8	MC-0-C – Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar	181
A9	MC-10-LD1-A – Gráfico de perda de massa na secagem ao ar	182
A10	MC-10-LD1-B – Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar	183
A11	MC-10-LD1-C – Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar	184
A12	MC-20-LD1-A – Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar	185
A13	MC-20-LD1-B – Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar	186
A14	MC-20-LD1-C – Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar	187
A15	MC-30-LD1-A – Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar	188
A16	MC-30-LD1-B – Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar	189
A17	MC-30-LD1-C – Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar	190
A18	MC-10-CZ-LD1-A – Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar	191
A19	MC-10-CZ-LD1-B – Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar	192
A20	MC-20-CZ-LD1-A – Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar	193
A21	MC-20-CZ-LD1-B – Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar	194
A22	MC-30-CZ-LD1-A – Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar	195
A23	MC-30-CZ-LD1-B – Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar	196
A24	MC-40-CZ-LD1-A – Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar	197
A25	MC-40-CZ-LD1-B – Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar	198

A26	MC-10-LD2-A – Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar	199
A27	MC-10-LD2-B – Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar	200
A28	MC-10-LD2-C – Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar	201
A29	MC-20-LD2-A – Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar	202
A30	MC-20-LD2-B – Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar	203
A31	MC-20-LD2-C – Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar	204
A32	MC-30-LD2-A – Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar	205
A33	MC-30-LD2-B – Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar	206
A34	MC-30-LD2-C – Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar	207
A35	MC-10-CZ-LD2-A – Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar	208
A36	MC-10-CZ-LD2-B – Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar	209
A37	MC-20-CZ-LD2-A – Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar	210
A38	MC-20-CZ-LD2-B – Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar	211
A39	MC-30-CZ-LD2-A – Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar	212
A40	MC-30-CZ-LD2-B – Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar	213
A41	MC-40-CZ-LD2-A – Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar	214
A42	MC-40-CZ-LD2-B – Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar	215
A43	Vista geral da masseira	231
A44	Detalhe do interior da masseira	231
A45	Vista geral da prensa hidráulica utilizada no ensaio de resistência à compressão	232
A46	Detalhe dos dispositivos utilizados no ensaio de resistência à compressão	232
A47	Detalhe do painel de controle da prensa hidráulica	233
A48	Corpos de prova preparados para ruptura à compressão	233
A49	Vista geral do dispositivo utilizado no ensaio de resistência à flexão	234
A50	Detalhe do dispositivo utilizado no ensaio de resistência à flexão	234
A51	Aspecto dos corpos de prova utilizados no ensaio de resistência à flexão	235
A52	Vista geral do dispositivo utilizado para medir volume final dos CPs	235
A53	Corpos de prova secando ao ar, ainda nas formas de madeira	236
A54	Aspecto dos corpos de prova secando ao ar pós-desmoldagem e pós-queima	236
A55	Dispositivo de confinamento dos corpos de prova - Vista 1	237
A56	Dispositivo de confinamento dos corpos de prova - Vista 2	237
A57	Aspecto visual dos corpos de prova preservados como testemunho	238

Lista de Tabelas:

3.1	Limites de elementos potencialmente tóxicos (EPTs) no lodo, para fins de uso em solo agrícola, em diversos países (em mg do elemento por kg de lodo)	14
3.2	Estimativa de vazões (m ³ /s) e produção de lodo (tss/dia), nas ETEs da RMSP	18
3.3	Estimativa da produção diária de lodo (ano 2005), nas ETEs do Estado de São Paulo	20
3.4	EPTs encontrados nos lodos de esgotos nos EUA (em mg de EPT por kg de lodo)	21
3.5	EPTs e outros metais presentes no lodo da ETE Riacho Grande - SBC – SP..	22
3.6	Valores (em mg de EPT por kg de lodo – base seca) nos lodos de esgoto das ETEs brasileiras	23
3.7	Testes de lixiviação usados na Alemanha (A e B), no Japão (1 a 5) e no Brasil (6)	25
3.8	Valores limites para Elementos Potencialmente Tóxicos (EPTs) nos solos e no lixiviado na Alemanha e no Brasil	28
3.9	Valores limites de EPTs para o teste de solubilização	29
3.10	Alcance das partículas ALFA e BETA no ar, no tecido humano e no alumínio	33
3.11	Espessura da camada redutora válida para Raios-X e γ	34
3.12	Atividade de algumas substâncias naturais e outras fabricadas pelo homem	39
3.13	Radioisótopos encontrados no lodo de esgoto pelo WSDOH (1997).....	42
3.14	Resultados dos estudos do WSDOH (1997) para doses de exposição.....	43
3.15	Radioatividade encontrada no lodo e suas cinzas (9 ETEs) e típica concentração em solos, no fosfato usado como fertilizante e nos materiais de construção (valores em Bq/kg - base seca)	47
3.16	Comparação de resultados obtidos por diferentes pesquisadores, para os	

principais parâmetros cerâmicos, nos tijolos feitos com lodo de esgoto sanitário (torta)	62
3.17 Comparação de resultados obtidos por diferentes pesquisadores, para os principais parâmetros cerâmicos, nos tijolos feitos com as cinzas de lodo de esgoto sanitário	63
3.18 Resistência mínima à compressão em relação à categoria do tijolo maciço	63
4.1 Resumo geral dos ensaios e procedimentos utilizados nesta pesquisa	68
4.2 Variação da massa específica da água com a temperatura	72
4.3 Valores críticos para o teste “T” com 5 % de discordância	97
5.1 Resumo dos resultados dos ensaios de granulometria nos solos 1, 2 e 3	99
5.2 Resultados dos ensaios de caracterização no solo argiloso	100
5.3 Resultados dos ensaios preliminares nos lodos de esgoto	102
5.4 Perdas de massa pós-queima das diversas massas cerâmicas	103
5.5 Resultados dos ensaios de caracterização dos lodos e suas cinzas	105
5.6 Limites, comparados aos valores de EPTs medidos: no solo, no LD1, no LD2 e cinzas do LD1 e LD2	107
5.7 Concentrações de radionuclídeos (media $\pm$ desvio padrão) nos lodos e no solo	110
5.8 Teor de umidade pós-moldagem “h _{PM} ” nas diversas massas cerâmicas (%)	112
5.9 Equações de perdas médias de massa durante a secagem ao ar	115
5.10 Perdas médias de massa de cada massa cerâmica (MC) na secagem ao ar	117
5.11 Resumo de dados e observações gerais sobre as massas cerâmicas	120
5.12 Média “ μ ” e desvio padrão “ σ ” dos resultados obtidos para cada massa cerâmica	123
5.13 Comparação da massa específica aparente pós-queima para tijolos feitos com lodo de esgoto (em kg/dm ³)	124
5.14 Comparação da absorção d’água pós-imersão para tijolos feitos com lodo de esgoto (em %)	124
5.15 Comparação da retração volumétrica pós-queima para tijolos feitos com lodo de esgoto (em %)	125
5.16 Comparação da resistência à compressão pós-queima para tijolos feitos com lodo de esgoto (em MPa)	125
5.17 Comparação da massa específica aparente pós-queima para tijolos feitos com cinzas de lodo (em kg/dm ³)	126
5.18 Comparação da absorção d’água pós-imersão para tijolos feitos com cinzas de lodo (em %)	126
5.19 Comparação da retração volumétrica pós-queima para tijolos feitos com cinzas de lodo (em %)	127
5.20 Comparação da resistência à compressão pós-queima para tijolos feitos com cinzas de lodo (em MPa)	127

5.21	Comparação das resistências médias à compressão dos tijolos rompidos crus e pós-queima	143
5.22	Comparação das resistências médias à flexão e à compressão dos tijolos rompidos crus e pós-queima	147
5.23	Comparação das massas específicas aparentes pós-moldagem, pós-queima e pós-imersão	150
5.24	Procedimentos detalhados e controle dos ensaios de solubilização e de lixiviação	153
5.25	Comparação: limites da NBR-10004 e resultados dos ensaios de solubilização e de lixiviação	154
5.26	Radioatividade nas misturas das cinzas do LD1 e LD2 com o solo	159
A1	MC-0 - Perda de massa x temperatura	178
A2	Perdas de massa durante a secagem medidas nos CPs da MC-0-A	179
A3	Perdas de massa durante a secagem medidas nos CPs da MC-0-B	180
A4	Perdas de massa durante a secagem medidas nos CPs da MC-0-C	181
A5	Perdas de massa durante a secagem medidas nos CPs da MC-10-LD1-A	182
A6	Perdas de massa durante a secagem medidas nos CPs da MC-10-LD1-B	183
A7	Perdas de massa durante a secagem medidas nos CPs da MC-10-LD1-C	184
A8	Perdas de massa durante a secagem medidas nos CPs da MC-20-LD1-A	185
A9	Perdas de massa durante a secagem medidas nos CPs da MC-20-LD1-B	186
A10	Perdas de massa durante a secagem medidas nos CPs da MC-20-LD1-C	187
A11	Perdas de massa durante a secagem medidas nos CPs da MC-30-LD1-A	188
A12	Perdas de massa durante a secagem medidas nos CPs da MC-30-LD1-B	189
A13	Perdas de massa durante a secagem medidas nos CPs da MC-30-LD1-C	190
A14	Perdas de massa durante a secagem medidas nos CPs da MC-10-CZ-LD1-A .	191
A15	Perdas de massa durante a secagem medidas nos CPs da MC-10-CZ-LD1-B..	192
A16	Perdas de massa durante a secagem medidas nos CPs da MC-20-CZ-LD1-A..	193
A17	Perdas de massa durante a secagem medidas nos CPs da MC-20-CZ-LD1-B ..	194
A18	Perdas de massa durante a secagem medidas nos CPs da MC-30-CZ-LD1-A .	195
A19	Perdas de massa durante a secagem medidas nos CPs da MC-30-CZ-LD1-B ..	196
A20	Perdas de massa durante a secagem medidas nos CPs da MC-40-CZ-LD1-A .	197
A21	Perdas de massa durante a secagem medidas nos CPs da MC-40-CZ-LD1-B ..	198
A22	Perdas de massa durante a secagem medidas nos CPs da MC-10-LD2-A	199
A23	Perdas de massa durante a secagem medidas nos CPs da MC-10-LD2-B	200
A24	Perdas de massa durante a secagem medidas nos CPs da MC-10-LD2-C	201
A25	Perdas de massa durante a secagem medidas nos CPs da MC-20-LD2-A	202
A26	Perdas de massa durante a secagem medidas nos CPs da MC-20-LD2-B	203

A27	Perdas de massa durante a secagem medidas nos CPs da MC-20-LD2-C	204
A28	Perdas de massa durante a secagem medidas nos CPs da MC-30-LD2-A	205
A29	Perdas de massa durante a secagem medidas nos CPs da MC-30-LD2-B	206
A30	Perdas de massa durante a secagem medidas nos CPs da MC-30-LD2-C	207
A31	Perdas de massa durante a secagem medidas nos CPs da MC-10-CZ-LD2-A..	208
A32	Perdas de massa durante a secagem medidas nos CPs da MC-10-CZ-LD2-B ..	209
A33	Perdas de massa durante a secagem medidas nos CPs da MC-20-CZ-LD2-A .	210
A34	Perdas de massa durante a secagem medidas nos CPs da MC-20-CZ-LD2-B ..	211
A35	Perdas de massa durante a secagem medidas nos CPs da MC-30-CZ-LD2-A .	212
A36	Perdas de massa durante a secagem medidas nos CPs da MC-30-CZ-LD2-B ..	213
A37	Perdas de massa durante a secagem medidas nos CPs da MC-40-CZ-LD2-A..	214
A38	Perdas de massa durante a secagem medidas nos CPs da MC-40-CZ-LD2-B ..	215
A39	Resultados das análises feitas na massa cerâmica com 0 % de lodo (testemunho)	216
A40	Resultados das análises feitas na massa cerâmica com 10 % de lodo 1	217
A41	Resultados das análises feitas na massa cerâmica com 20 % de lodo 1	218
A42	Resultados das análises feitas na massa cerâmica com 30 % de lodo 1	219
A43	Resultados das análises feitas na massa cerâmica com 10 % de cinzas do lodo 1	220
A44	Resultados das análises feitas na massa cerâmica com 20 % de cinzas do lodo 1	221
A45	Resultados das análises feitas na massa cerâmica com 30 % de cinzas do lodo 1	222
A46	Resultados das análises feitas na massa cerâmica com 40 % de cinzas do lodo 1	223
A47	Resultados das análises feitas na massa cerâmica com 10 % de lodo 2	224
A48	Resultados das análises feitas na massa cerâmica com 20 % de lodo 2	225
A49	Resultados das análises feitas na massa cerâmica com 30 % de lodo 2	226
A50	Resultados das análises feitas na massa cerâmica com 10 % de cinzas do lodo 2	227
A51	Resultados das análises feitas na massa cerâmica com 20 % de cinzas do lodo 2	228
A52	Resultados das análises feitas na massa cerâmica com 30 % de cinzas do lodo 2	229
A53	Resultados das análises feitas na massa cerâmica com 40 % de cinzas do lodo 2	230

Lista de símbolos, abreviaturas e siglas

%	Porcentagem
α	Alfa. Tipo de radiação.
β	Beta. Tipo de radiação.
ϕ	Letra grega representativa da medida de diâmetro.
γ	Radiação gama.
σ_{C_105}	Resistência à compressão dos CPs pós-secagem a 105 °C.
σ_{C_950}	Resistência à compressão dos CPs pós-queima a 950 °C.
σ_{f_105}	Resistência à flexão dos CPs pós-secagem a 105 °C.
σ_{f_950}	Resistência à flexão dos CPs pós-queima a 950 °C.
γ_{pi}	Massa específica aparente dos corpos de prova, pós-imersão.
γ_{pm}	Massa específica aparente dos corpos de prova, pós-moldagem.
γ_{pq}	Massa específica aparente dos corpos de prova, pós-queima.
$\mu Sv/ano$	Micro-Sievert por ano. Submúltiplo da medida de dose efetiva (de radioatividade), recebida em um ano.
^{131}I	Iodo 131 (radionuclídeo).
^{137}Cs	Césio 137 (radionuclídeo).
^{18}F	Fluor 18. (radionuclídeo).
^{201}Tl	Tálio 201 (radionuclídeo).
^{226}Ra	Rádio 226 (radionuclídeo).
^{232}Th	Tório 232 (radionuclídeo).
$^{238}U, ^{235}U$ e ^{234}U	Urânio 238, 235 e 234 (radionuclídeos)
^{32}P	Fósforo 32 (radionuclídeo)
3H	Trítio (radionuclídeo).
40-CFR	Code of Federal Regulation nº 40.
^{40}K	Potássio 40 (radionuclídeo).

^{54}Mn	Manganês 54 (radionuclídeo).
^{57}Co , ^{58}Co , ^{60}Co	Cobalto. Isótopos 57, 58 e 60 (radionuclídeos)
^{65}Zn	Zinco 65 (radionuclídeo).
^7Be	Berilo 7 (radionuclídeo)
^{89}Sr e ^{90}Sr	Estrôncio 89 e 90 (radionuclídeos).
^{99}Tc e $^{99\text{m}}\text{Tc}$	Tecnécio 99 e 99m (radionuclídeos).
A	Absorção d'água. Percentual de aumento de massa após o corpo de prova (tijolo) ter permanecido durante 24 horas mergulhado em água potável, sob temperatura ambiente.
A.	autor
AA.	autores
ABC	Região formada pelos municípios paulistas de Santo André, São Bernardo do Campo e São Caetano do Sul.
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al	Alumínio. Elemento químico.
As	Arsênio. Elemento químico.
ASTM	"American Standard Test Materials" = Associação norte-americana que padroniza testes de materiais.
Ba	Bário. Elemento químico.
BPR	Bureau of Public Roads (norte-americano)
Bq	Becquerel. Medida de radioatividade. 1 Bq = 1 desintegração nuclear por segundo.
Bq/kg	Becquerel por quilograma. Atividade de um determinado radionuclídeo por quilograma de resíduo.
C/kg	Coulomb por quilograma. Medida de energia. Neste caso, medida de exposição à radioatividade ou, a capacidade que apresentam as radiações alfa, beta, gama e X de cederem energia ao meio em que transitam.
Cd	Cádmio. Elemento químico
CEC	"Commission of the European Communities" = Comissão da comunidade européia, criada para estudar os aspectos relacionados com o destino final do lodo de esgoto.
CFR	"Code of Federal Regulation" = Código de Regulamento Federal, é precedido da respectiva numeração, nos EUA.
Ci	Curie. Antiga unidade utilizada para medir a atividade dos radionuclídeos.
cm	Centímetro. Submúltiplo de metro. Unidade de comprimento.
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear, no Brasil.
CO_2	Gás carbônico.

CP	Corpo de prova. Neste caso, trata-se de um tijolo cerâmico maciço, moldado manualmente em formas de madeira de 10 x 5 x 2,5 cm.
Cr	Cromo. Elemento químico.
Cu	Cobre. Elemento químico.
CZ-LD1	Cinzas do lodo 1 (obtida a partir do lodo seco, submetido à temperatura de 900 °C)
CZ-LD2	Cinzas do lodo 2 (idem...)
DEV-S4	Sigla de um teste alemão para lixiviação de metais.
E/S	Razão de diluição entre o líquido (eluente) e os sólidos. Utilizada no teste de solubilização e de lixiviação.
ENR	Ensaio não realizado
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
ETEs	Estações de Tratamento de Esgoto
EUA	Estados Unidos da América
FB	Filtro biológico. Processo de tratamento biológico de esgoto em nível secundário.
Fe	Ferro. Elemento químico.
GAO	“General Accounting Office” escritório ligado ao Congresso Norteamericano que fiscaliza determinadas denúncias.
gss/hab.dia	Gramas de sólidos secos gerados por habitante e por dia. Medida de produção de lodo de esgoto.
Gy	Gray. Unidade de dose de radioatividade absorvida.
ha	Medida de área. 1 hectare = 10.000 m ²
Hg	Mercúrio. Elemento químico.
horiz.	Abreviatura da palavra horizontal.
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICRP	International Committee of Radiation Protection
IPEN-SP	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares do Estado de São Paulo.
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo.
IRD-CNEN	Instituto de Radioproteção e Dosimetria da CNEN, no Brasil
J/kg	Joule por quilograma. Medida de dose de radiação absorvida, chamada de Gray, ou 1 Gy = 1 J/kg. Trata-se da energia concedida pela radiação ionizante por unidade de massa do material irradiado.
JEA	Sigla de um teste japonês para lixiviação de metais.
kg	Quilograma. Unidade de massa.
kg/dm ³	Quilograma por decímetro cúbico. Unidade de massa específica.
kg/L	Quilograma por litro. Unidade de massa específica.

kV	Quilovolt. Múltiplo da unidade de medida de tensão elétrica
LA	Lodos ativados. Processo biológico de tratamento de esgoto em nível secundário
LD1	Lodo 1, oriundo de um sistema convencional de tratamento de esgoto sanitário por lodos ativados, pré-condicionado com cal e cloreto férrico para facilitar o desaguamento, feito em filtro-prensa de placas.
LD2	Lodo 2, oriundo de um sistema de tratamento de esgoto sanitário por reator anaeróbio de fluxo ascendente (RAFA), desidratado naturalmente em leito de secagem.
mA	Mili-ampère. Sub-múltiplo da unidade de corrente elétrica.
m ²	Metro quadrado. Medida de área.
m ³ /dia	Metro cúbico por dia. Medida de vazão.
m ³ /s	Metro cúbico por segundo. Medida de vazão
MC	Massa cerâmica
MC-10-CZ-LD1-A	Massa cerâmica feita com o solo argiloso e 10 % de cinzas do lodo 1, 1ª moldagem.
MC-10-LD1-A	Massa cerâmica feita com o solo argiloso e o lodo 1 (seco a 105 °C). O nº 10 indica a percentagem em peso seco de lodo na mistura. A letra A retrata a 1ª moldagem, a letra B, a 2ª moldagem e a letra C a 3ª moldagem de cada massa cerâmica.
MeV	Mega eletro-volt. Medida de energia de radiação.
Mg	Magnésio. Elemento químico.
mg	Miligramma. Medida de massa.
mg/kg	Miligramma por quilograma. Medida de concentração de uma determinada substância ou elemento sólido num resíduo.
mg/L	Miligramma por litro. Medida de concentração de uma determinada substância ou elemento sólido, num solvente.
mm	Milímetro. Submúltiplo de metro. Unidade de medida de comprimento.
Mn	Manganês. Elemento químico.
Mo	Molibdênio. Elemento químico.
mol/L	Mol por litro. Medida de concentração de uma determinada substância líquida, num solvente.
Mpa	Megapascal. Múltiplo de unidade de pressão. 1 Mpa = 10 ³ Pa
mrem/ano	Mili-rem por ano.
mSv/ano	Mili-Sievert por ano.
Na ¹³¹ I	Iodeto de sódio. Substância radioativa (¹³¹ I) utilizada na medicina para o tratamento do hipertireoidismo.
NBR	Norma brasileira regulamentada pela ABNT.

ND	Não detectado. Relacionado com a medida da concentração de EPTs.
Ni	Níquel. Elemento químico.
NPK	Abreviatura para os nutrientes: nitrogênio, fósforo e potássio
NRDC	“Natural Resources Defense Council” = Conselho de Defesa dos recursos naturais, dos EUA.
Obs.	Observações.
Pa	Pascal. Medida de pressão.
Pb	Chumbo. Elemento químico.
pH	Potencial hidrogeniônico. Valor menor que 7 indica que o meio é ácido, valor = 7 é neutro e acima de 7,0 é básico.
P _{pi}	Peso dos corpos de prova pós-imersão em água potável, por 24 horas, sob temperatura ambiente.
P _{pq}	Peso dos corpos de prova pós-queima em forno-mufla por cerca de 50 horas, sob temperatura máxima de 950 °C.
Pq.	Abreviatura da palavra “parque”.
PS	Peso dos corpos de prova efetivamente secos (após 24 horas em estufa, sob temperatura de 105 °C).
psi	“pounds per square inch”. Libra por polegada quadrada. Medida inglesa de pressão.
P _{umid.}	Peso da massa cerâmica úmida (logo após a moldagem dos corpos de prova).
R	Roentgen. Antiga unidade utilizada para medir a capacidade de ceder energia ao meio em que transitam. Relativo às radiações.
Ra-Be	Rádio-berilo. Radionuclídeos utilizados em fontes portáteis emissoras de nêutrons e de partículas alfa.
rad	Sigla inglesa que expressa uma antiga unidade de dose absorvida “radiation absorbed dose”.
RAFA	Reator anaeróbio de fluxo ascendente. Um dos processos de tratamento biológico de esgoto.
rem	Sigla inglesa que expressa uma unidade de medida antigamente chamada de dose equivalente, “roentgen equivalent on man”, atualmente chamada de dose efetiva e medida em Sievert (Sv).
RESRAD	Sigla de um modelo de simulação, desenvolvido pelos norte-americanos, para avaliar doses de radioatividade.
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
RPM	Rotação por minuto.
RSU	Resíduos sólidos urbanos ou lixo urbano
RV	Retração volumétrica. Percentual de redução de volume pós-queima dos CPs.

SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo.
Se	Selênio. Elemento químico.
SI	Sistema Internacional de Unidades.
SP	Sigla do Estado de São Paulo.
Sv	Sievert. Unidade de dose efetiva. Criada na busca de uma escala comum na área de proteção à radiação ionizante.
Ti	Titânio. Elemento químico.
tss/dia	Tonelada de sólidos secos gerados por dia. Unidade de produção de lodo de esgoto.
UNSCEAR	“United Nation Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation”
USA	“United States of America”
USDOH	“United States Department of Health”
USEPA	“United States Environmental Protection Agency”
USNRC	“United States Nuclear Regulatory Commission”.
V	Vanádio. Elemento químico.
VNF	Valor não fixado.
V _{orig.}	Volume original. Trata-se do volume das formas utilizadas na moldagem de cada CP.
V _{pq}	Volume do corpo de prova pós-queima.
WSDOH	“Washington State Department of Health” = Departamento de Saúde do Estado de Washington, nos EUA.
Z ₀	Limite de concentração de metais, no teste de lixiviação, para o teste padrão alemão.
Zn	Zinco. Elemento químico.

1. INTRODUÇÃO

O lodo de esgoto sanitário é o resíduo gerado nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), como resultado da remoção dos sólidos contidos no esgoto coletado nas redes públicas das cidades, acrescidos dos sólidos biológicos gerados e dos produtos químicos eventualmente incluídos no processo de tratamento. O destino final desse resíduo constitui-se num sério problema, em nível mundial. Nas cidades em que o esgoto é efetivamente tratado, dependendo da técnica utilizada nesse tratamento, o lodo geralmente é produzido em grandes quantidades e exige cuidados especiais para sua disposição final.

Nas etapas finais do tratamento do lodo, este é ainda um líquido viscoso, com percentagem de sólidos da ordem de 2 % a 10 %, sendo que aproximadamente 75 % desses sólidos são de natureza orgânica. Para facilitar e diminuir o volume de transporte e de destino final, é prática comum promover-se o desaguamento do lodo através de equipamentos mecânicos ou em leitos de secagem. Obtém-se, a partir dessa operação, um resíduo semi-úmido (torta), que apresenta uma percentagem de sólidos da ordem de 15 % a 40 %, ou, em outras palavras, uma percentagem de umidade de 60 % a 85 % (Viessman e Hammer, 1985). No entanto, os valores de produção final de lodo são geralmente reportados em base seca, ou seja, numa situação hipotética em que a torta de lodo tivesse sido colocada para secagem à uma temperatura de 105 °C (secagem térmica). Nestas condições ele apresentaria, teoricamente, percentagem de umidade zero. Assim, a unidade de produção de lodo mais utilizada é a tonelada de sólidos secos por dia (tss/dia). Justifica-se a prática de se apresentar a produção em base seca (pós-secagem a

105 °C), justamente por causa da grande variação de pesos e volumes que se observa, dentro da faixa usual de variação de umidade de lodos e tortas de lodos.

Uma perda de massa mais drástica pode ainda ser conseguida pela incineração, quando então a torta é submetida a temperaturas geralmente na faixa de 600 a 700 °C e, nestes casos, além da água, é eliminada também a matéria orgânica, gerando-se as cinzas. Nessas condições o teor de sólidos passaria a ser de 85 a 95 % (Jarosz, 1992).

A produção de lodo, nos processos aeróbios de lodos ativados, é considerada bastante alta. Para fins de planejamento, segundo Vincent e Critchley (1984), os europeus estimam uma produção da ordem de 82 gramas de sólidos secos por habitante e por dia (gss/hab.dia). Para as condições brasileiras, esses números são considerados muito elevados. A SABESP - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, por exemplo, para o sistema composto por 5 grandes ETEs, que deverão tratar o esgoto da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), estimou uma produção de **891 tss/dia** para o ano 2005. Esses números referem-se à etapa final de um plano não concretizado, para a qual estimou-se uma população de **25 milhões de habitantes** na RMSP, gerando uma vazão de esgoto sanitário, a ser tratado, de **52,4 m³/s** (SABESP, 1993).

Na estimativa da SABESP os números de produção diária resultariam bem menores que aqueles utilizados pelos europeus, ou seja, neste caso, resultou numa produção da ordem de **35,6 gss/hab.dia**. Mesmo que esses números estimados se confirmem na prática, deve-se lembrar que a percentagem de umidade nas tortas é, ainda, da ordem de 60 a 85%. Para essa produção de **891 tss/dia**; os volumes esperados estariam numa faixa de **2 000 a 3 000 m³/dia**. Com esses números pode-se ter uma idéia da magnitude do problema a ser enfrentado para a disposição final de todo o lodo gerado, somente na RMSP.

Até alguns anos atrás, a maioria das empresas projetistas das ETEs brasileiras preocupava-se muito mais com o processo de tratamento da fase líquida, limitando-se a colocar em seus projetos, com referência ao lodo, após tratamento, uma seta e as palavras

“destino final”, sem definir onde e nem como fazê-lo. Talvez por esse motivo, quase sempre a postura das concessionárias dos serviços de coleta, transporte e tratamento de esgoto das cidades, era a de “tentar se livrar” desse resíduo. Não exatamente pelos mesmos motivos mas isso, também, acontece em outras partes do mundo, onde as técnicas mais utilizadas para o descarte controlado do lodo são:

- ♦ descarte da torta de lodo em aterros sanitários, juntamente com os resíduos sólidos urbanos (lixo), ou mesmo em aterros específicos projetados para receber o lodo (Mathews, 1992 e 1995).
- ♦ descarte do lodo líquido, bombeado através de tubulações ou, no caso da torta, transportada por barcaças, até o alto-mar, práticas essas já proibidas nos EUA desde 1991 (Hemphill, 1992). Mathews (1992) já relatava uma previsão de proibição na Europa, a partir de 1998.

No entanto, a opção de se fazer o aproveitamento do lodo, notadamente como condicionador de solos, há tempos já é uma realidade em outros países (Reilly, Collier e Forbes 1981; USEPA 1983, 1989 e 1993; Vincent e Critchley, 1984; Pike e Davis, 1984; Aziz e Koe, 1990; Khramenkov, 1990; Anglian Water, 1991; Palazzo e Reynolds, 1991; Hemphill, 1992; Mathews, 1992, 1995 e 1998; Noguchi e Ito, 1992; Lowe, 1993; Steinle, 1993; Hunt et. al. 1994, Stoll e Parameswaran, 1996; Burrows, 1996; Paulsrud e Nedland, 1997; Hall e Zmyslowska, 1997; Yükselen, 1998; Snyman, Jong e Aveling 1998, Snyman, Terblanche e Westhuizen, 2000; Rantala et al. 1999 e 2000; Campbell, 2000; Bridle e Mantele, 2000; Vesilind, 2000; Preez, Merwe e Terblanche, 2000; Mamais et al., 2000; Akrivos et. al. 2000).

No Brasil o aproveitamento do lodo na melhoria de solos agrícolas também vem sendo estudada e recomendada (Santos, 1989 e 1996; Jornal O Estado de São Paulo, 1999; Andreoli et. al. 2000; Bettiol e Camargo, 2000). Dentre as técnicas mais utilizadas no aproveitamento do lodo, em todo o mundo, pode-se citar:

- ♦ utilização direta da torta desidratada ou armazenamento do lodo líquido em lagoas de lodo para posterior **incorporação em solos agrícolas**, ou mesmo na recuperação de áreas degradadas, visando à melhoria das características do solo;
- ♦ compostagem da torta desidratada, geralmente misturada a outros resíduos, com posterior aproveitamento na melhoria de solos agrícolas (Bruce e Fisher, 1984; Bertoldi, Vallini e Pera, 1984; Stentiford, Mara e Taylor, 1984). Esse produto é conhecido como **composto orgânico** e, neste, a soma das parcelas NPK (nitrogênio-fósforo-potássio), naturalmente existentes no lodo, está na faixa de 3 a 5 %;
- ♦ enriquecimento do composto orgânico obtido na compostagem, com fertilizantes minerais, visando transformá-lo no **composto organo-mineral**, cuja soma das parcelas NPK deve, por lei, no caso brasileiro, ser maior do que 12% (Kiehl, 1985);
- ♦ **torta de lodo**, misturada à argila em determinadas proporções, usada na produção de **agregados leves para concreto** (Santos, 1989; Tay, Yip e Show, 1991); ou na **fabricação de tijolos cerâmicos** (Brian, 1984a e b, Alleman e Berman, 1984; Tay, 1987; Slim e Wakefield, 1991). Também as **cinzas** resultantes da incineração da torta de lodo, misturada à argila em determinadas proporções, usadas na **fabricação de tijolos cerâmicos** (Tay, 1987; Trauner, 1993; Anderson et. al. 1996; Wiebusch e Seyfried, 1997), ou blocos com 100% de cinzas (Okuno e Takahashi, 1997), ou como “**filler**” na **fabricação de cimento** (Tay e Show, 1994 e 1997; Onaka, 2000), ou na **fabricação de vidros cerâmicos** (Endo, Nagayoshi e Suzuki, 1997);
- ♦ **produção de óleo combustível** (Bridle e Campbell, 1984; He et. al. 2000). Essa opção ainda não é economicamente viável pois há sobra do produto no mercado mundial, resultante da produção de derivados de petróleo.

Pelo exposto, verifica-se que são justificados os esforços na busca de soluções para a disposição final ou o aproveitamento do lodo de esgoto sanitário. Nesta pesquisa estudar-se-á o aproveitamento desse resíduo na moldagem de tijolos cerâmicos maciços.

2. Objetivos

2.1 Objetivo Geral

Avaliar as condicionantes tecnológicas e ambientais referentes à fabricação de tijolos cerâmicos maciços, utilizando-se como matéria prima 2 diferentes tipos de lodos de esgoto sanitário e suas cinzas, misturados a um solo argiloso em diferentes proporções. Comparar os resultados a padrões nacionais e/ou internacionais e recomendar ou não a utilização desses tijolos na construção civil.

2.2 Objetivos específicos

- Elaborar uma revisão bibliográfica abrangente, considerando os aspectos referentes aos aspectos ambientais e satisfazendo às exigências específicas da Área de Material de Construção Civil;
- Moldar tijolos cerâmicos, inicialmente utilizando apenas o solo argiloso, como matéria prima, para servir como comparativo de resultados (testemunho);
- Moldar tijolos cerâmicos, contendo os lodos de esgoto previamente secos a 105 °C, misturados ao solo argiloso nas proporções de 10, 20 e 30 %, em peso seco;

- Moldar tijolos cerâmicos, contendo as cinzas dos lodos, misturadas ao solo argiloso nas proporções de 10, 20, 30 e 40 %, em peso seco;
- Avaliar a resistência à compressão dos tijolos, após a operação de queima e, dada à peculiaridade desses tijolos, verificar também outros parâmetros, tais como: resistência à compressão antes da queima; massas específicas pós-moldagem, pós-queima e pós-imersão; retração volumétrica pós-queima; absorção d'água pós-imersão e resistência à flexão (antes e após a queima);
- Estudar a compatibilidade ambiental da utilização desses resíduos na fabricação de tijolos cerâmicos para uso na construção civil, em especial os aspectos da liberação de elementos potencialmente tóxicos (EPTs), através de uma caracterização preliminar e da realização de ensaios de solubilização e de lixiviação, além da medição das concentrações de radioatividade no solo, nos lodos e suas cinzas e nas diversas misturas solo-cinzas de lodo);
- Analisar os resultados obtidos, comparando-os às normas e/ou padrões nacionais e/ou internacionais, verificando as proporções mais apropriadas e recomendando ou não o uso desses resíduos na fabricação de tijolos cerâmicos para a construção civil; e,
- Finalmente, avaliar a adequabilidade da metodologia empregada nesta pesquisa visando a uma possível utilização futura, em pesquisas correlatas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Origem e definições

O lodo de esgoto sanitário é o resíduo gerado nas estações de tratamento de esgoto das cidades. O **esgoto sanitário** pode ser definido como uma água residuária, que apresenta, em média, 99,9 % de água e 0,1 % de resíduos, sendo que, geralmente, 75 % dos resíduos são de natureza orgânica e 25 % de inorgânicos (Metcalf & Eddy, 1991). Segundo definição da NBR-9648 (ABNT, 1986), esgoto sanitário é o “*despejo líquido constituído de esgoto doméstico e industrial, água de infiltração e a contribuição pluvial parasitária*”. Esta mesma norma define ainda:

- **Esgoto doméstico** é o “*despejo líquido resultante do uso da água para higiene e necessidades fisiológicas humanas*”;
- **Esgoto industrial** é o “*despejo líquido resultante dos processos industriais, respeitados os padrões de lançamento estabelecidos*”;
- **Água de infiltração** é “*toda água proveniente do subsolo, indesejável ao sistema separador e que penetra nas canalizações*”; e,

- **Contribuição pluvial parasitária** é *“a parcela do deflúvio superficial inevitavelmente absorvida pela rede de esgoto sanitário”*.

Para fins de tratamento, os sólidos presentes no esgoto podem ser classificados como sólidos grosseiros, areias, sólidos sedimentáveis (pelo próprio peso) e sólidos dissolvidos. As ETEs devem possuir unidades capacitadas para remover esses sólidos, de forma a diminuir a carga poluente dessa água, visando devolvê-la a um determinado corpo d'água receptor, com o menor prejuízo possível à qualidade deste.

Existem diversas maneiras de se fazer o tratamento do esgoto sanitário mas, em se tratando de médias e grandes cidades, destaca-se o processo dos lodos ativados, idealizado, em 1914, por Arden e Lockett e que hoje apresenta diversas variantes. No processo convencional de lodos ativados, basicamente pode-se dizer que os sólidos grosseiros são removidos nas grades, a areia nas chamadas caixas de areia, os sólidos sedimentáveis nos chamados decantadores primários (gerando o lodo primário) e os sólidos orgânicos não sedimentáveis passam por reatores biológicos. Nos reatores biológicos a matéria orgânica é adsorvida e degradada nos flocos biológicos presentes (biomassa). A biomassa é removida do líquido por sedimentação, nos chamados decantadores secundários. Parte dessa biomassa é recirculada para o reator, com a finalidade de manter uma quantidade adequada de microrganismos no sistema, melhorando-lhe a eficiência e parte é descartada, gerando o chamado lodo secundário.

A água, após passar pelo decantador secundário, pode ser devolvida aos corpos d'água receptores (quando o tratamento é feito em nível secundário) ou pode sofrer processos posteriores para remoção de patogênicos, nutrientes, metais ou processos ainda mais sofisticados como filtração em membranas, osmose reversa, etc, quando se deseja fazer o reuso direto dessa água, para fins não potáveis, por exemplo.

Os sólidos removidos nas ETEs (lodos primários + secundários) passam ainda, normalmente, por unidades que visam diminuir a percentagem de água (espessamento), diminuir a putrescibilidade e a atividade dos microrganismos (digestão, geralmente

anaeróbia) e pré-condicionamento químico (cal e cloreto férrico ou polímeros), para desidratação, visando diminuir os volumes para a disposição final.

Uma das opções ao tratamento convencional é o reator anaeróbio de fluxo ascendente (UASB). Neste caso, o esgoto geralmente passa apenas pelas unidades de gradeamento e remoção da areia e segue direto para o reator. Neste, a matéria orgânica é biodegradada em meio anaeróbio e o lodo em excesso é retirado periodicamente do reator e na maioria das vezes, é feito o desaguamento em leito de secagem.

3.2 Histórico sobre tratamento de esgoto e o destino final do lodo

A preocupação com o tratamento do esgoto sanitário surgiu primeiramente na Inglaterra, após várias epidemias de cólera, uma delas ocorrida em 1848, com 25.000 vítimas fatais. Aquele país, devido à pouca extensão de seus rios e ao crescimento acelerado de algumas cidades durante a chamada Revolução Industrial, foi, aparentemente, um dos primeiros a sofrer as conseqüências da poluição hídrica, decorrente do lançamento do esgoto (sem tratamento), nos corpos d'água. Foi, também, pioneiro nas pesquisas e na promulgação das primeiras leis sobre saneamento e saúde pública (Metcalf e Eddy, 1977). Em Londres, no ano de 1854, foi estabelecido um marco muito importante; o Dr. John Snow provou, cientificamente, a relação entre certas doenças e a qualidade das águas e em 1857, foi criado o Conselho de Proteção das águas do Rio Tâmis (Azevedo Netto, 1984).

Em 1860, surgiu o dispositivo de Mouras para tratar os lodos de esgoto por processo anaeróbio; em 1865, foram feitos os primeiros experimentos sobre microbiologia de degradação de lodos. Os fundamentos biológicos, que acabariam dando origem ao processo de tratamento de esgoto, através de lodos ativados, começaram a ser investigados, na Inglaterra, em 1882, tendo culminado com o desenvolvimento do citado processo em 1914, por Ardern e Lockett (Metcalf e Eddy, 1977; Azevedo Netto, 1984).

Assim, com o progressivo crescimento das cidades, ocorrido a partir do final do século XIX e início do século XX, outros países seguiram o exemplo inglês e começaram a se preocupar com o tratamento do esgoto. Nos EUA, por exemplo, em 1887 foi construída a Estação Experimental Lawrence, em Massachusetts (Metcalf e Eddy, 1977).

Pode-se afirmar que, a partir daí, os países mais desenvolvidos, em especial a Inglaterra, a maioria dos outros países europeus, os EUA, o Canadá, a extinta União Soviética e o Japão, começaram a tratar o esgoto de suas cidades. Em São Paulo, a ETE Jesus Neto foi a pioneira, em 1936, mas em nível nacional e mesmo em São Paulo, somente a partir da década de 70 começou a ocorrer um certo avanço nessa área, ainda que em poucas cidades. Porém, atualmente, a maioria das cidades brasileiras nem coletam e nem tratam a totalidade do esgoto sanitário produzido.

Quando começaram a tratar o esgoto, os técnicos e administradores de serviços públicos dos países pioneiros logo se deram conta do surgimento de um outro problema a ser resolvido, ou seja, o que fazer com o lodo, gerado na maioria dos processos de tratamento. Assim, as práticas para aproveitamento ou simples disposição do lodo são, também, bastante antigas nesses países. Na década de 70, devido à utilização indiscriminada de certas práticas, com pouco ou nenhum controle ambiental, começou a haver preocupação, por parte da comunidade científica, com a falta de regulamentação.

Segundo Vincent e Critchley (1984), na década de 70, três convenções internacionais, relacionadas na sequência, fixaram acordos para controlar a disposição de resíduos no mar, com o objetivo de proteger a vida e o ambiente marinho. São elas:

- Convenção de Oslo (1972)

A finalidade desta convenção foi a prevenção da poluição marinha, causada por resíduos lançados ao mar (entre eles o lodo de esgoto sanitário), através de navios e aeronaves. Foi assinada e ratificada pelos 13 países banhados pelo Mar do Norte e Atlântico Nordeste, dentre

eles: Inglaterra, País de Gales, Escócia, Bélgica, Dinamarca, França, Alemanha, Irlanda, Holanda, Finlândia, Noruega, Espanha e Suécia.

No Anexo 1 dessa Convenção foram listadas as substâncias proibidas, sendo possível um relaxamento dessa proibição, desde que essas substâncias ocorressem como traços de contaminantes dos resíduos a serem dispostos.

Em resumo: a disposição de lodo de esgoto no mar continuou sendo permitida, desde que as percentagens de substâncias tóxicas fossem inferiores aos padrões estabelecidos e que se obtivesse a necessária licença, conforme previsto no Anexo 3 da Convenção.

- Convenção de Londres (1972)

Esta Convenção foi muito similar à Convenção de Oslo, porém aplicável a todos os mares e oceanos, tendo sido assinada por 60 países, havendo uma pequena diferença das substâncias listadas nos anexos das duas convenções citadas; e,

- Convenção de Paris (1974)

Esta convenção foi assinada pela Comunidade Econômica Européia e mais os 13 países europeus listados na Convenção de Oslo. Foi ratificada por todos os países, exceto a Bélgica, a Irlanda e Luxemburgo. O formato da Convenção de Paris é similar às de Oslo e de Londres, mas aplicável à poluição proveniente de fontes terrestres particularmente via tubulações.

Até a década de 70, uma das práticas mais utilizadas para dar destino final ao lodo era a sua aplicação na melhoria de solos agrícolas. No entanto, descobriu-se que nem todo lodo poderia ser utilizado com essa finalidade. A existência de alguns poluentes nesse resíduo, em especial organismos patogênicos e metais pesados, começava a preocupar a comunidade científica que, sabendo dos efeitos dos mesmos sobre seres humanos e animais, não tinha, no entanto, ainda se aprofundado em pesquisas mais conclusivas. De acordo com Vincent e Critchley (1984), a Comunidade Européia criou uma comissão para estudar o problema e, a partir de 1980, a CEC -

"Commission of the European Communities" encarregou-se da padronização de normas e, em alguns casos, da fixação de estritas limitações à utilização do lodo no solo, válida para os países da Comunidade Européia, estabelecendo as diretrizes básicas a serem observadas. Matthews (1995) afirma que as diretrizes fixadas pela Comunidade Européia, em 1986, serviram de base para que cada país pertencente à Comunidade Européia pudesse adotar sua própria normatização.

Viessman e Hammer (1985) afirmam que, nos Estados Unidos, a essa época, a maior parte do lodo estava sendo disposta no solo, sendo que 3/4 do total era utilizada no condicionamento de solos, e o restante, disposta em aterros sanitários, juntamente com os resíduos sólidos urbanos (RSU) ou em aterros específicos para o lodo. Segundo esses AA., a incineração era onerosa e a disposição oceânica estaria sendo restrita pela legislação. Segundo Hemphill (1992), a proibição de disposição oceânica do lodo de esgoto nos EUA, ocorreu a partir do ano de 1991. Matthews (1992), afirmou que a CEC estava propondo a proibição do lançamento de lodo de esgoto no mar em toda a Europa fixando um prazo para os países se adaptarem. Essa proibição passaria a vigorar a partir de 1998.

Esse A. afirma ainda que o total de lodo de esgoto produzido em 16 países europeus (Bélgica, Alemanha Ocidental, Dinamarca, França, Grécia, Irlanda, Itália, Luxemburgo, Holanda, Portugal, Espanha, Inglaterra, País de Gales, Suécia, Suíça e Áustria), era de 5,5 milhões de tss/ano. Esses dados eram correspondentes ao ano de 1989 para a Inglaterra, País de Gales e Áustria; 1988, para a Suécia; 1987 para a Dinamarca e a Suíça e 1984 para os demais países citados. Desse total produzido:

- 44 % eram dispostos em aterros sanitários (juntamente com os RSU);
- 37 % eram utilizados em solos com finalidades diversas, incluindo agricultura, horticultura, recuperação de solos, florestas e jardins;
- 9 % eram incinerados;

- 7 % dispostos no mar; e,
- 3 % dispostos através de outros métodos, incluindo depósitos na própria ETE, lagoas de lodo, empilhamento, aterros específicos para lodo, etc.

Nos EUA, a norma regulamentadora para lançamento de lodo de esgoto nos solos foi promulgada em 1993 (Hunt et al., 1994; USEPA, 1993). Segundo a USEPA (United States Environmental Protection Agency), isso se deu após a ocorrência dos seguintes fatos: em setembro de 1988, o NRDC - "Natural Resources Defense Council" moveu um processo judicial contra a USEPA, reclamando que a mesma estava mais de dez anos atrasada na elaboração de regulamentos referentes à disposição e/ou aproveitamento do lodo de esgoto municipal e solicitava aos juízes um julgamento sumário, exigindo que esta adotasse regulamentos definitivos, em menos de 1 ano. A audiência foi marcada para janeiro de 1989. Nessa audiência, a USEPA apresentou um esboço de regulamentos e um plano de ação, onde eram previstos prazos para discussões com a comunidade técnica, científica e demais órgãos interessados, a respeito dos números por ela propostos e que se baseavam em resultados de pesquisas obtidos pelo "National Sewage Sludge Survey". O plano previa a promulgação dos regulamentos para outubro de 1991 (USEPA, 1989). Porém, esses regulamentos somente vieram a ser publicados no ano de 1993, através do código conhecido como **40 CFR** ("Code of Federal Regulations"), **parte 503**, que impôs os padrões norte-americanos para uso ou disposição de lodos produzidos por ETEs municipais. Foram fixados limites para dez elementos potencialmente tóxicos (EPTs), no lodo e no solo.

Para fins comparativos, apresenta-se na Tabela 3.1, um resumo sobre as concentrações limites de EPTs, estabelecidas por alguns países, para o lodo passível de utilização em solos agrícolas. Analisando esta tabela, percebe-se que não há ainda consenso sobre os valores. Alguns países europeus são bastante restritivos, como é o caso da Dinamarca e Países Baixos, outros simplesmente adotaram as recomendações da Comunidade Européia. De todos, os mais liberais são os padrões norte-americanos, cujos valores foram também adotados na norma brasileira P-4230 (CETESB, 1999), com exceção do elemento cromo, para o qual essa norma não estabeleceu limite.

Tabela 3.1 - Limites de elementos potencialmente tóxicos (EPTs) no lodo, para fins de uso em solo agrícola, em diversos países (em mg do elemento por kg de lodo)

EPT	CEC Diretriz 86/278 jun/1986	Dinamarca jun/1995	França jan/1984	Alemanha (a) abr./1992	Itália fev/1992	Luxemburgo set./1992	Países Baixos jan/1995	USA (c) fev/1993
As	VNF	VNF	VNF	VNF	VNF	VNF	15	75
Cd	20 - 40	0,8	20	5 - 10	20	40	1,25	85
Cu	1000-1750	1000	1000	800	1000	1750	75	4300
Cr	1000-1750	100	1000	900	(b)	1750	75	3000
Pb	750-1200	1200	800	900	750	1200	100	840
Hg	16 - 25	0,8	10	8	10	25	0,75	57
Mo	VNF	VNF	VNF	VNF	VNF	VNF	VNF	75
Ni	300 - 400	30	200	200	300	400	30	420
Se	VNF	VNF	100	VNF	VNF	VNF	VNF	100
Zn	2500-4000	4000	3000	2000-2500	2500	4000	300	7500
(d)	VNF	VNF	4000 (d)	VNF	VNF	VNF	VNF	VNF

OBS.:

VNF = valor não fixado

(a) Na Alemanha os limites para cádmio e zinco são para solos com valores de pH entre 5 e 6

(b) Na Itália, o cromo é controlado pela análise do solo e verificação da possibilidade do cromo trivalente ser oxidado a um mol ou mais de cromo hexavalente, quando disposto no solo analisado. Se houver tal risco, não poderá ser aplicado lodo no solo em questão.

(c) A norma P-4230 (CETESB, 1999) não definiu limites para o cromo mas adota os mesmos valores para os demais EPTs.

(d) - Na França existe ainda um limite combinado baseado na somatória de concentração de 4 EPTs, quando existentes simultaneamente no lodo: Cu + Cr + Ni + Zn.

Fonte: Adaptado de Santos (1996)

Concomitantemente, em 1992, conforme relatam Martin e Fenner (1997), surgiram problemas que levaram a USEPA e o USNRC – “United States Nuclear Regulatory Commission” a começarem a se preocupar com os níveis de elementos radioativos encontrados no lodo de esgoto. Deve-se ressaltar, no entanto, que não há referência a quaisquer limites nesse sentido no código 40-CFR-503, editado em 1993 (USEPA, 1999). Neste código, a preocupação maior foi com o nível de EPTs e de organismos patogênicos presentes no lodo. Ainda segundo Martin e Fenner (1997), a descoberta de altos níveis de cobalto 60 (^{60}Co), no aterro onde era disposto o lodo de uma ETE, próximo à cidade de Cleveland-Ohio, em 1991, deu origem a um estudo pelo GAO – “General Accounting Office”, sobre o manejo da radioatividade no lodo das ETEs. Segundo esses AA., a concentração de (^{60}Co) liberada na rede de esgoto estava dentro dos limites impostos pelas normas federais. Porém, a radioatividade que, conforme fixa a

norma federal, havia sido antes diluída na descarga (da fonte geradora), ficou ainda mais diluída quando lançada na rede de esgoto (por causa das altas vazões), mas voltou a ser novamente reconcentrada no lodo. Apesar de concluir que não havia riscos à saúde, o USNRC, promoveu um estudo baseado em modelagem matemática para conhecer melhor essa reconcentração de materiais radioativos liberados no esgoto sanitário, de acordo com os regulamentos federais. Esse estudo demonstrou que seria possível, para certos materiais radioativos, mesmo quando lançados no esgoto em concentrações permitidas pela legislação, voltar a se reconcentrar no lodo, principalmente quando este fosse incinerado, quando então a relação entre a massa de materiais radioativos e a massa de sólidos secos é a maior possível.

No relatório EPA-832-R-99-900 (USEPA, 1999), comentou-se que a radioatividade no lodo passou a ser discutida nos EUA ainda na década de 1980, com a descoberta de elevados níveis de materiais radioativos nas cinzas dos incineradores de várias ETEs norte-americanas. O uso do lodo para melhoria de solo agrícola ou a sua disposição em aterros sanitários é costume freqüente nas cidades norte-americanas. No entanto, em algumas regiões a prática de uso agrícola do lodo fica impossibilitada nos meses de inverno, pois o solo fica coberto de neve. Assim, nesses meses, pratica-se a incineração do lodo e o depósito de suas cinzas nos aterros sanitários, juntamente com os RSU. Neste mesmo documento relata-se a formação de uma comissão para realização de um estudo conjunto entre a USEPA e o USNRC, com as seguintes finalidades:

- obter dados sobre os níveis de materiais radioativos no lodo e nas cinzas do lodo em 300 ETEs norte-americanas pré-selecionadas;
- estimar a extensão dessa radioatividade quanto à contaminação provocada por empresas licenciadas pelo USNRC para manipular materiais radioativos ou mesmo aquelas decorrentes de fontes naturais e,
- a partir dos resultados desse trabalho tomar decisões tanto por parte da USEPA quanto pelo USNRC, podendo chegar à mudança das atuais normas regulamentadoras.

Martin e Fenner (1997), relatam que os estudos sobre radioatividade no lodo de esgoto sanitário, nos EUA, passaram a ser desencadeados a partir de uma série de fatos relacionados com o gerenciamento de efluentes líquidos, contendo baixos níveis de radioatividade e cuja origem eram os reatores usados em pesquisas. Até 1992, esses efluentes líquidos podiam ser diluídos e descartados na rede de esgoto, de acordo com o regulamento federal. Em 1992, o USNRC propôs um monitoramento desses efluentes líquidos de maneira a permitir que, certos materiais fracamente radioativos, que vinham sendo lançados na rede de esgoto, passassem a ser imobilizados e dispostos em aterros sanitários municipais, juntamente com os RSU. Houve um grande clamor público a respeito dessa proposta o qual conduziu, não só ao abandono da idéia mas também à exigência de instalação de detectores de raios “ γ ” nas grades de carregamento, à entrada dos aterros sanitários. Essa medida visava a assegurar que tais materiais não viessem a ser depositados nos aterros sanitários.

Durante o inverno de 1992, uma descarga líquida proveniente do tanque do reator de pesquisa de uma Universidade em Cleveland, foi lançada na rede de esgoto, devidamente amparada nos regulamentos da USNRC. Uma vez que a aplicação do lodo em solo agrícola não era factível, por causa da neve, o lodo foi incinerado, reconcentrando os antes diluídos poluentes radioativos, nas cinzas. Essas cinzas foram transportadas para o aterro sanitário da cidade, e lá chegando, passaram pelo detector de radioatividade que havia sido recentemente instalado. O resultado é que essas cinzas tiveram que retornar à origem (ETE), seguindo-se uma investigação a respeito do assunto pelo “Congress General Accounting Office”. Concluíram então que, apesar da descarga desse material na rede de esgoto ter sido uma operação amparada nos regulamentos federais, ficou provado ter havido uma reconcentração nas cinzas do lodo incinerado e passou-se a não mais permitir o descarte desse tipo de material na rede de esgoto (Marino, 1994, Martin e Fenner, 1997).

Os estudos conduzidos por Martin e Fenner (1997), abordaram outro tipo de material radioativo, utilizado nas terapias da tireóide, nos Hospitais da Universidade de Ann Arbor, o iodeto de sódio ($\text{Na } ^{131}\text{I}$), que será comentado mais adiante, nos itens

3.3.2.4 e 3.3.2.5. Percebe-se que a radioatividade no lodo é um assunto, cuja discussão, ainda está no início. Algumas pesquisas isoladas foram desenvolvidas (Ault, 1989; USNRC, 1994, Martin e Fenner, 1997; Brennan, 1997). Outras mais abrangentes foram programadas (USEPA, 1999), mas as conclusões parecem ser ainda incipientes.

Khramenkov (1990), apresentou alguns comentários e dados referentes à cidade de Moscou, capital da extinta União Soviética, na época em que sua população era de 9 milhões de habitantes. As redes de esgoto recebiam uma vazão de aproximadamente 6 milhões de m³/dia, sendo 77 % de origem doméstica e 23 % de origem industrial, totalmente tratada em 3 ETEs. A produção de lodo era de aproximadamente 1.900 tss/dia, sendo que 30 % desse total era desaguado mecanicamente e 70 % em leitos de secagem. Os leitos de secagem ocupavam uma área de 800 ha e estariam gradativamente sendo substituídos por equipamentos mecânicos. Grande parte desse lodo era anteriormente utilizado na agricultura. Porém, devido à descoberta da presença de elementos potencialmente tóxicos, essa utilização estaria sendo limitada. Os EPTs viriam do lançamento de efluentes industriais nas redes, particularmente os de galvanoplastia. Segundo o A., as galvanoplastias lançavam seus efluentes com uma vazão estimada em cerca de 440 m³/dia (aproximadamente 0,007 % do total).

A Anglian Water, entidade que administra as atividades relacionadas com os sistemas de água e esgoto no Reino Unido, publicou, em 1979, um manual para utilização do lodo de esgoto na agricultura. Esse manual, que já estava na 2ª revisão em 1991, preconiza os cuidados que se deve ter na utilização do lodo em solos agrícolas (Anglian Water, 1991).

Steinle (1993) expôs a situação da aplicação de lodos de esgoto em solos rurais da Alemanha. Lá, as pequenas ETEs, após a estabilização do lodo (geralmente através de aeração prolongada), mantinham o lodo líquido armazenado em tanques, até que os fazendeiros viessem buscá-lo, para aplicação em solos agrícolas. Segundo esse A., estaria havendo, nas últimas décadas, parcial desinteresse dos fazendeiros, diminuindo esse tipo de utilização. Isso obrigou algumas comunidades a fazer o desaguamento do lodo com equipamentos mecânicos para posterior aplicação em solos agrícolas e, até mesmo, disposição em aterros sanitários.

Lowe (1993) mostrou preocupação com o destino final do lodo em Hong Kong, em função do crescimento da produção. Falava de estudos para disposição em aterros, em função da distância da cidade até as regiões agrícolas.

Na cidade de São Paulo, na ETE-Leopoldina, estação de tratamento de esgoto sanitário, em nível primário, pertencente à SABESP, foi iniciado, na década de 70, um projeto piloto para produção de agregados leves para concreto, projetado pelo IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas, a partir do lodo de esgoto (Brosch, Alvarinho e Souza, 1976).

Posteriormente, para a mesma ETE, foi idealizado um projeto que previa a utilização conjunta de alguns equipamentos utilizados na fabricação de agregados leves, para a produção de fertilizantes organo-minerais (Santos, 1989). Essa ETE foi posteriormente desativada, em função de um plano mais recente que prevê o tratamento de esgoto, em nível secundário, incluindo toda a RMSP (ver Tabelas 3.2 e 3.3). Os dois projetos citados acabaram sendo também, pelo menos temporariamente, desativados.

Tabela 3.2 - Estimativa de vazões (m^3/s) e produção de lodo (tss/dia), nas ETEs da RMSP.

E T E	PREVISÃO de PRODUÇÃO PARA OS ANOS DE							
	1994		1997		2000		2005	
	vazões	lodo	vazões	lodo	vazões	lodo	vazões	lodo
- Barueri	9,5	141	14,3	212	24,0	316	28,5	422
- ABC	3,0	63	4,5	68	6,0	125	8,5	129
- Pq. Novo Mundo	2,5	62	5,0	125	7,5	187	7,5	187
- São Miguel	1,5	31	3,0	63	4,5	94	6,0	125
- Suzano	1,5	22	1,5	22	1,5	22	1,9	28
Totais:	18,0	319	28,3	490	43,5	744	52,4	891

Fonte: SABESP (1993)

Em 1993, a SABESP fez uma concorrência para contratar os estudos e o planejamento para a disposição do lodo resultante do tratamento de esgoto da RMSP. Essa região ocupa 17 % da área estadual, reunindo 38 municípios, entre eles o município de São Paulo. O censo realizado em 1996, havia indicado uma população de aproximadamente 17 milhões de habitantes. Previu-se tratar o esgoto dessa região, através das cinco estações de tratamento citadas na Tabela 3.2. Todas as 5 ETEs foram projetadas para tratar o esgoto pelo processo de

lodos ativados convencional, no qual a estabilização do lodo é geralmente feita em digestores anaeróbios. Porém, na ETE Parque Novo Mundo, os decantadores primários foram substituídos por peneiras rotativas e os digestores anaeróbios por condicionamento térmico seguido de desidratação mecânica, para o lodo secundário flotado. Para a ETE São Miguel também previu-se o condicionamento térmico do lodo, seguido de desidratação mecânica. Nas ETEs Barueri, Suzano e ABC, a desidratação do lodo estabilizado é feita mecanicamente através de filtros prensa de placas. (SABESP, 1993).

Na época da realização desses estudos, apenas as ETEs Barueri (em operação desde 1984) e Suzano (em operação desde 1980) podiam apresentar alguns dados de produção de lodo mais confiáveis. As demais estavam em construção (foram inauguradas em 1998), sendo os valores da Tabela 3.2 apenas estimativos. Somente na ETE Barueri, durante o ano de 1991, foram produzidas, em média, 152 toneladas por dia de torta de lodo digerido e desidratado, com percentagem de sólidos média de 38% (desvio padrão de 2%), correspondentes a uma vazão média afluyente à ETE de $3,98 \text{ m}^3/\text{s}$. Nos oito primeiros meses de 1992, a média de produção diária foi de 168 t/dia de torta digerida e desidratada, sendo que um volume superior a 150 mil toneladas de lodo estava sendo acumulado no terreno e nas vizinhanças da ETE, aguardando definição dos estudos para solução do problema. A ETE Suzano, com capacidade para $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$, mas operando com apenas $0,4 \text{ m}^3/\text{s}$, por insuficiência de ligações aos interceptores do seu sistema de coleta, já acumulava, na mesma época, cerca de 55 mil toneladas de lodo (SABESP, 1993). Nesses estudos previu-se que a população da RMSP estaria na faixa dos 25 milhões de habitantes, no ano 2005. Na hipótese de se conseguir coletar e tratar todo o esgoto produzido por essa população, conforme previsão apresentada na Tabela 3.2, havia sido estimada uma produção total de lodo de 891 tss/dia, resultando numa produção média “per capita” de 35,6 gss/hab.dia. No entanto, Metcalf e Eddy (1991), estimam que, em média, cada ser humano produz cerca de 120 gss/dia, lançados nas redes de esgoto. Para fins de planejamento, no que se refere ao lodo, após tratamento, os europeus estimam em cerca de 82 gss/hab.dia (Vincent e Critchley, 1984). Se esses números fossem aplicados às 5 grandes ETEs da RMSP, na hipótese de que as mesmas já estivessem tratando todo o esgoto produzido pela população dessa região em 1996 (conforme já citado, cerca de 17 milhões de habitantes), a produção de lodo seria de aproximadamente 1 400 tss/dia.

Posteriormente, houve uma reestimativa da produção de lodo para a RMSP, por parte da SABESP, em cerca de 575 tss/dia, para o ano 2005, face ao não cumprimento dos cronogramas previstos em 1993 (Santos e Tsutiya, 1997 - ver Tabela 3.3).

Tabela 3.3 - Estimativa da produção diária de lodo (ano 2005) nas ETEs do Estado de São Paulo

REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO (1)				
LOCAL DA ETE	TIPO DE TRATAMENTO		Estimativa de produção de lodo	
			(em tss/dia)	(em m ³ /dia) (2)
- BARUERI	- LA - convencional	(3)	227	545
- ABC	- LA - convencional	(3)	85	204
- SUZANO	- LA - convencional	(3)	27	65
- PARQUE NOVO MUNDO	- LA - convencional	(3)	166	400
- SÃO MIGUEL	- LA - convencional	(3)	55	132
- FRANCO DA ROCHA	- FB - filtro biológico	(3)	9	22
- PERUS	- FB - filtro biológico	(3)	6	15
Totais previstos para a Região Metropolitana de São Paulo:			575	1 383
INTERIOR DO ESTADO DE SÃO PAULO				
- SÃO JOSÉ DOS CAMPOS	- LA - aeração prolongada	(3)	8,1	19,5
- PRESIDENTE PRUDENTE	- LA - aeração prolongada	(3)	7,1	17,1
- FRANCA	- LA - convencional	(3)	7,0	16,8
- BOTUCATU	- LA - aeração prolongada	(3)	2,5	6,0
- ASSIS	- LA - aeração prolongada	(3)	1,8	4,4
- ITAPEVA	- LA - aeração prolongada	(3)	1,6	3,9
- TUPÃ	- LA - convencional	(3)	1,4	3,4
Totais previstos para o interior do Estado de São Paulo:			29,5	71,1
LITORAL DO ESTADO DE SÃO PAULO				
- CUBATÃO	- LA - aeração prolongada	(3)	1,3	3,2
- MONGAGUÁ	- LA - BATELADA	(3)	1,2	2,9
- CARAGUATATUBA	- LA - aeração prolongada	(3)	5,3	12,8
- UBATUBA	- LA - aeração prolongada	(3)	2,0	4,8
- ILHA BELA	- LA - BATELADA	(3)	0,9	2,2
Totais previstos para o litoral do Estado de São Paulo:			10,7	25,9

Tabela 3.3 (cont.) - Estimativa da produção diária de lodo (ano 2005) nas ETEs do Est. de São Paulo

Observações:

- (1) A RMSP - Região Metropolitana de São Paulo, abrange a cidade de São Paulo e mais 38 municípios vizinhos. O Estado de São Paulo possui mais de 600 municípios e somente em cerca de 50% deles a SABESP é a concessionária de água e esgoto. Na elaboração desta tabela somente foram considerados os municípios com mais de 50.000 habitantes. Alguns municípios possuem sistemas de tratamento de esgoto por lagoas de estabilização, cuja vantagem é a não remoção do lodo formado.
- (2) O volume de lodo foi estimado para percentagens de sólidos da ordem de 40%
- (3) LA = lodos ativados e FB = filtro biológico.

Fonte: Adaptado de SANTOS e TSUTIYA (1997)

Deve-se ressaltar, a respeito dos dados apresentados na tabela 3.3 que, nem todo o esgoto da RMSP estará sendo coletado e tratado, e que estão incluídos valores de produção de lodo de dois filtros biológicos das cidades de Franco da Rocha e de Perus. Destaque-se ainda que, nesta reflexão sobre números, não se tem a intenção de contestar os valores previstos de produção de lodo, apresentados nas Tabelas 3.2 ou 3.3, mas sim demonstrar que os volumes de produção são significativos e podem vir a ser ainda maiores do que os previstos. Assim, seja qual for o número final de produção de lodo, o problema é bastante sério pois o nível de metais no lodo e a distância de transporte talvez possam vir a ser empecilhos para aplicação desse lodo em áreas agrícolas; além disso, há dificuldades na definição de áreas disponíveis para disposição em aterros específicos para o lodo. Quanto aos níveis de EPTs presentes nos lodos, apresenta-se na Tabelas 3.4 valores encontrados nos lodos de algumas ETEs, nos EUA.

Tabela 3.4 - EPTs encontrados nos lodos de esgoto nos EUA (em mg de EPT por kg de lodo)

EPTs - Elementos Potencialmente Tóxicos	Em lodos estabilizados anaerobiamente (mg/kg)		Em lodos estabilizados aerobiamente (mg/kg)	
- arsênio	10	a <u>230</u>	-	
- cádmio	3	a <u>3.410</u>	5	a <u>2.170</u>
- cromo	24	a <u>28.850</u>	10	a <u>13.600</u>
- cobre	85	a <u>10.100</u>	85	a 2.900
- chumbo	58	a <u>19.730</u>	13	a <u>15.000</u>
- mercúrio	0,5	a <u>10.600</u>	1	a 22
- molibdênio	24	a 30	30	a 30
- níquel	2	a <u>3.520</u>	2	a <u>1.700</u>
- zinco	108	a <u>27.800</u>	108	a <u>14.900</u>

OBS.: Os números em destaque indicam que os limites da norma 40-CFR-parte 503 (USEPA, 1993) foram ultrapassados.

Fonte: Adaptado de USEPA (1983)

Na Tabela 3.5 são apresentados valores de concentração de EPTs e outros metais (em mg do elemento por kg de lodo, em base seca), detectados no lodo de uma ETE, cujo tratamento é uma variante do processo de lodos ativados, por aeração prolongada (valão de oxidação). Essa ETE está situada no Bairro Riacho Grande - São Bernardo do Campo - SP). Apesar de não ultrapassarem os limites hoje impostos pela norma P-4230 (CETESB, 1999), aparentemente não havia explicação para a presença de arsênio, cádmio, chumbo e cromo nesse lodo, por se tratar de um bairro estritamente residencial, situado

em área de proteção a manancial. Descobriu-se posteriormente que essa ETE recebia, sem nenhum tipo de controle, cerca de 3 caminhões limpa-fossas por semana. Acredita-se que as descargas desses caminhões tenham sido responsáveis pela presença dos citados metais. Esse lodo foi objeto de estudo, numa dissertação de mestrado (Nuvolari, 1996).

Tabela 3.5 - EPTs e outros metais presentes no lodo da ETE Riacho Grande - SBC-SP

EPTs e outros metais	unidade	Valores de EPTs no lodo, coletado nas seguintes datas		
		05/06/95	24/08/95	21/09/85
- ARSÊNIO	As mg/kg	13,7	15,2	15,8
- CÁDMIO	Cd mg/kg	< 0,4	< 0,3	< 0,4
- CHUMBO	Pb mg/kg	64,2	76,6	79,0
- COBRE	Cu mg/kg	284,0	183,8	262,0
- CROMO	Cr mg/kg	32,8	36,8	25,2
- MOLIBDÊNIO	Mo mg/kg	< 4,1	< 3,7	< 4,7
- NÍQUEL	Ni mg/kg	< 0,5	< 0,5	< 0,6
- ZINCO	Zn mg/kg	552,9	580,0	620,7
- ALUMÍNIO	Al mg/kg	9 347,0	9 732,0	10 007,0
- BÁRIO	Ba mg/kg	124,7	90,7	122,4
- COBALTO	Co mg/kg	< 0,5	< 0,4	< 0,5
- FERRO	Fe mg/kg	12 447,0	14 447,0	14 660,0
- MAGNÉSIO	Mg mg/kg	3 019,0	3 574,0	2 920,0
- MANGANÊS	Mn mg/kg	101,9	102,4	97,3
- TITÂNIO	Ti mg/kg	40,0	49,6	49,3
- VANÁDIO	V mg/kg	15,7	23,8	19,7

Fonte: Nuvolari (1996)

Na Tabela 3.6 são apresentados valores de concentração de EPTs (em mg do elemento por kg de lodo, em base seca), detectados nos lodos das ETEs Barueri e Suzano, ambas localizadas na RMSP e também em 3 outras ETEs situadas na cidade de Maringá, no Estado do Paraná.

Ao se analisar os valores da Tabela 3.6, pode-se perceber que na ETE Barueri, para algumas datas de coleta, os valores de concentração de níquel ultrapassaram os níveis máximos para lançamento em solos agrícolas, fixados pela norma P-4230 (CETESB, 1999). O mesmo fato ocorreu para os valores de concentração de cromo na ETE Suzano, se comparados com os limites estabelecidos na norma norte-americana CFR-40 (parte

503), uma vez que a norma da CETESB ainda não estabeleceu limites para esse metal. Nas ETEs da cidade de Maringá, os valores de concentração de EPTs ficaram abaixo dos limites, pelo menos para os EPTs efetivamente incluídos nas determinações e para as datas de coleta de amostras consideradas.

Tabela 3.6 - Valores (em mg de EPT por kg de lodo – base seca), no lodo de esgoto de ETEs brasileiras

ETEs BRASILEIRAS	ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS - EPT (mg/kg)										
	As	Cd	Pb	Cu	Cr	Hg	Mo	Ni	Se	Zn	Σ (Cu + Cr + Zn + Ni)
- BARUERI-SP (11/03/93)	ND	9	180	547	611	1,8	27	294	3,0	595	2047
- BARUERI-SP (29/03/93)	7	12	182	570	348	3,5	20	351	0,7	1218	2487
- BARUERI-SP (06/04/93)	17	24	350	1167	984	6,8	34	600	1,7	2469	5221
- BARUERI-SP (14/04/93)	8	11	183	569	334	ENR	16	289	ENR	1154	2346
- BARUERI-SP (17/01/95)	ENR	17	259	1706	893	4,8	ENR	244	ENR	2338	5181
- BARUERI-SP (23/01/95)	ENR	17	113	1470	1005	0,9	ENR	311	ENR	2396	5182
- BARUERI-SP (10/02/95)	ENR	31	195	1265	539	2,2	ENR	432	ENR	1710	3946
- BARUERI-SP (15/02/95)	ENR	28	173	859	566	1,9	ENR	462	ENR	1723	3610
- BARUERI-SP (22/11/95)	ENR	38	322	944	864	1,0	ENR	500	ENR	2403	4711
- BARUERI-SP (29/12/95)	ENR	20	145	501	624	1,0	ENR	283	ENR	2506	3914
- BARUERI-SP (29/01/96)	ENR	20	101	485	590	ND	ENR	239	ENR	2127	3441
- SUZANO-SP (15/03/93)	ND	ND	500	1016	2406	19,2	55	208	1,4	839	4469
- SUZANO-SP (30/03/93)	11	4	485	1070	1921	19,7	52	250	0,7	1997	5238
- SUZANO-SP (14/04/93)	14	3	281	553	859	ENR	24	124	ENR	1096	2632
- SUZANO-SP (27/04/93)	9	5	762	630	895	19,9	6	165	0,5	1391	3081
- SUZANO-SP (17/01/95)	ENR	4	398	1215	2907	32	ENR	190	ENR	2175	6487
- SUZANO-SP (23/01/95)	ENR	1	173	833	3113	19	ENR	210	ENR	2144	6300
- SUZANO-SP (10/02/95)	ENR	6	274	781	2905	22	ENR	184	ENR	1918	5788
- SUZANO-SP (15/02/95)	ENR	8	190	450	2258	55	ENR	231	ENR	1625	4564
- SUZANO-SP (22/11/95)	ENR	23	354	854	3216	2	ENR	266	ENR	2243	6579
- SUZANO-SP (29/12/95)	ENR	2	267	717	3486	42	ENR	235	ENR	2408	6846
- SUZANO-SP (29/01/96)	ENR	7	187	803	3484	15	ENR	269	ENR	2846	7402
- MARINGÁ-PR (ETE-1)	ENR	1,3	523	430	42,5	ENR	ENR	ENR	ENR	910	1383 ⁽¹⁾
- MARINGÁ-PR (ETE-2)	ENR	1,7	248	780	91	0,007	ENR	ENR	ENR	1570	2441 ⁽¹⁾
- MARINGÁ-PR (ETE-3)	ENR	1,8	200	1080	80	0,006	ENR	ENR	ENR	1210	2370 ⁽¹⁾

OBS.: (1) - Não foram feitos ensaios para detecção de níquel. Assim essa somatória ficou prejudicada.

ND = EPT não detectado e ENR = ensaio não realizado

Os números em destaque indicam que os valores limites da norma P-4230 (CETESB, 1999) ou da 40-CFR- parte 503 (USEPA, 1993), foram ultrapassados.

Fontes: Adaptado de Santos (1996) e de Andreoli et al. (2000).

3.3 Aspectos ambientais do uso do lodo em tijolos cerâmicos

3.3.1 Presença de elementos potencialmente tóxicos no lodo

Conforme se pode observar pelos valores apresentados nas Tabelas 3.4, 3.5 e 3.6, a presença de EPTs no lodo de esgoto é um fato incontestável. Percebe-se também que, mesmo nos locais onde se poderia pensar não existir determinados metais, eles aparecem por causa de um ou outro detalhe. Muitas vezes, os níveis de EPTs presentes no lodo ultrapassam mesmo os limites padrões menos conservativos. Assim, torna-se necessária a análise da compatibilidade ambiental dos tijolos feitos com lodo de esgoto sanitário desidratado (torta), ou mesmo com as cinzas do lodo. Não se pode esquecer, também, que muitas argilas podem apresentar altos níveis de alguns metais (Wiebusch et. al. 1998).

Com relação à presença de EPTs no tijolo feito com lodo de esgoto, parece consenso que eventuais problemas geralmente não ocorrem no uso que se faz habitualmente dos tijolos. No entanto, quando o lodo ou suas cinzas apresentam concentrações de EPTs elevadas, através dos mecanismos de solubilização e de lixiviação de metais, pode existir a possibilidade de contaminação do solo que estiver em contato com os entulhos da construção feita com esses tijolos ou ainda pode haver contaminação em função de eventual reúso desses entulhos. Na Alemanha, por exemplo, é costume triturar o entulho de tijolos cerâmicos e reutilizá-lo como base para quadras de tênis (saibro), existindo até uma especificação da granulometria a ser utilizada nesses casos (Wienbusch et. al. 1998).

A lixiviação é definida na NBR-10005 (ABNT, 1987b), como *“a operação de separar certas substâncias contidas nos resíduos industriais, por meio de lavagem e percolação”*. Wienbusch et. al. (1998), que trabalharam com 4 diferentes tipos de cinzas

de lodo, afirmam que não devem ocorrer problemas de lixiviação quando os níveis de metais nas cinzas são baixos. Afirmam, ainda, que se a temperatura de queima dos tijolos for maior do que 1100 °C, a partir da qual começam a ocorrer em maior grau os fenômenos de vitrificação e sinterização, haverá uma maior fixação dos metais na matriz cerâmica e, conseqüentemente, menor quantidade de metais no líquido lixiviado, também chamado de eluente. Esses AA. discutem também qual seria a melhor forma de se fazer o teste de lixiviação (ver comparações na Tabela 3.7).

Tabela 3.7 - Testes de lixiviação usados na Alemanha (A e B), no Japão (1 a 5) e no Brasil (6)

Tipos de testes	Agente de eluição	Valor do pH	Tempo de contato	Preparo da amostra	Razão de diluição	Tipo de agitação
A teste alemão padronizado denominado (DEV-S4)	água deionizada com pH entre 5,7 a 6,5	s/controle	24 horas 1 eluição	< 10 mm ou curva de distribuição de partículas.	10:1	Circulação por cima com ~10 RPM
B teste alemão modificado (com controle de pH)	água deionizada adicionado ácido nítrico diluído	mantido pH = 4,0	24 horas 1 eluição	< 10 mm ou curva de distribuição de partículas.	10:1	Teste em coluna com água bombeada
1 Método japonês (JEA)	água deionizada pH = 5,8 a 6,3	sem controle	24 horas	ϕ = 20 a 50 mm	10:1	agitador horiz. De 200 RPM
2 Método USEPA	água deionizada adição de 0,5 mol/L de ácido acético	mantido pH = 5,0	24 horas	ϕ = 20 a 50 mm	20:1	agitador de 200 RPM
3 Método suíço - saturação inicial de CO ₂	água deionizada previamente saturada com CO ₂ pH = 4,0	sem controle de pH	24 horas	ϕ = 20 a 50 mm	10:1	agitador de 200 RPM
4 Método suíço injeção contínua de CO ₂	água deionizada e contínua injeção de CO ₂	mantido pH = 4,0 a 4,5	24 horas	ϕ = 20 a 50 mm	10:1	agitador de 200 RPM
5 Teste de lixiviação holandês	água deionizada adição de 1 mol/L de ácido nítrico	mantido pH = 4,0	6 horas	ϕ = 20 a 50 mm	100:1	agitador de 200 RPM
6 Norma brasileira NBR-10005 (ABNT, 1987b)	água deionizada e controle de pH = 5,0 com ácido acético 0,5 mol/L	(*) mantido pH = 5,0	24 horas a 28 horas	ϕ < 9,5 mm	16:1	Agitador tipo Jar-test sem especificar rotação

OBS.: (*) Pela norma brasileira citada deve-se tentar manter o pH = 5,0 em várias etapas até um consumo máximo de 4 mL de ácido acético 0,5 mol/L para cada grama de sólidos.

Fontes: Wiebusch et. al (1998) e NBR-10005 (ABNT, 1987b)

Wienbusch et. al. (1998) utilizaram, em suas pesquisas, temperaturas de queima dos tijolos de 1000 °C e 1060 °C e observaram que todos os metais pesados (exceto o cromo), apresentaram valores mais baixos que os limites padrões alemães (denominados Z_0). De maneira geral, para a temperatura de 1000 °C as concentrações de metais no lixiviado atingiram 60 % dos valores limites Z_0 , enquanto que para a temperatura de 1060 °C atingiram 40 %. Segundo esses AA., existem vários parâmetros que podem influenciar os testes de lixiviação: o valor do pH do líquido eluente; a razão de diluição E/S (eluente/sólidos); o tempo de contato dos sólidos com o eluente; a forma de agitação e principalmente a forma de preparação das amostras, principalmente no que se refere ao tamanho das partículas das amostras. Assim, quanto menor a razão de diluição E/S, maior foi a concentração encontrada de metal (em mg por litro de eluente). O valor do pH pode ser afetado pelo agente de diluição e pela alcalinidade das amostras. Conforme pode-se perceber na Tabela 3.7, existem testes de lixiviação com controle de pH (quando este é mantido em torno do valor 4,0 ou 5,0) e também sem controle de pH. Quando não há controle, o valor do pH passa normalmente de 4 ou 5 para até próximo de 10, dependendo da alcalinidade do corpo cerâmico. Assim, para a maioria dos metais (exceto para o cromo e o vanádio, que apresentam alta solubilidade em meio alcalino), quanto menor o pH do eluente, maior a concentração de metais no lixiviado.

Os testes com manutenção do pH ácido, durante todo o tempo de contato, são considerados extremamente rigorosos e visam a reproduzir o efeito de chuvas ácidas ou o efeito da ação de ácidos orgânicos, tais como aqueles oriundos dos processos anaeróbios de decomposição da matéria orgânica (em aterros sanitários e lixões), ou seja, trata-se da pior condição ambiental que pode ocorrer. Quanto ao tamanho das partículas, as pesquisas feitas por Wiebusch et al (1998), apontaram que as amostras trituradas, com diâmetro menor do que 2 mm lixiviam 1,4 a 3,6 vezes mais e as amostras com diâmetro de partículas entre 2 e 20 mm de 0,8 a 1,5 vezes mais que as amostras com diâmetros de partículas entre 20 e 50 mm.

Outros autores também estudaram a lixiviação de metais, a partir de tijolos feitos com lodo ou com cinzas de lodo. Alleman et. al. 1990, comentam que antes de

realizarem suas pesquisas, imaginavam que, pelo baixo ponto de fusão de alguns elementos (As, Se e Cd), haveria grande perda dos mesmos durante a operação de queima dos tijolos. Porém, durante a pesquisa, não detectaram esse comportamento, a não ser quando a concentração de selênio era consideravelmente alta (1000 ppm).

Okuno e Takahashi (1997), realizaram testes de lixiviação utilizando valores de $\text{pH} = 6,0$ e $\text{pH} = 3,0$ nas cinzas de lodo de esgoto e em tijolos feitos com 100 % de cinzas de lodo. Estes foram moldados com alta pressão (98 MPa) e queimados à temperatura de $1025\text{ }^{\circ}\text{C}$. Detectaram apenas o elemento arsênio (As), em baixas concentrações no lixiviado das cinzas (0,07 mg/L para teste feito sob $\text{pH} = 3,0$ e 0,04 mg/L para testes feitos com $\text{pH} = 6,0$), bem abaixo dos limites estabelecidos pela normalização japonesa (que é de 1,5 mg/L para esse elemento). No lixiviado dos tijolos não foi detectado nenhum dos metais pesquisados.

A norma brasileira NBR-10005 (ABNT, 1987b), propõe que o teste de lixiviação seja feito com amostras de 100 gramas de resíduo, com granulometria $< 9,5\text{ mm}$, colocadas sob constante agitação em água destilada e deionizada, razão de diluição eluente/sólido $\text{E/S} = 16:1$ e controle de $\text{pH} = 5,0 \pm 0,2$ através da adição de ácido acético 0,5 mol/L à água, até um limite máximo de 4 mL/g (4 mililitros de ácido acético 0,5 mol/L para cada grama de amostra sólida). Segundo a norma citada, esse controle de pH deve ser feito em várias etapas, conforme descritas na sequência, devendo sempre ser corrigido o pH quando este estiver acima do valor ($5,0 \pm 0,2$) :

- a 1ª etapa após 15 minutos do início da agitação (feita em aparelho tipo Jar-test). A 2ª etapa após 45 minutos. A 3ª etapa após 1h45min; e,
- após 24 horas de agitação, caso o valor do pH resultar $\geq 5,0 \pm 0,2$ deve-se corrigi-lo com ácido acético 0,5 mol/L e continuar agitando mais 4 horas (total 28 horas), desde que não tenha sido consumido ainda o valor máximo de ácido acético previsto (400 mL).

Wiebusch et. al. (1998), afirmam que os limites recomendados na Alemanha, relativos às substâncias perigosas e ao comportamento quanto à lixiviação, dos minerais reciclados existentes nos solos, não são específicos para tijolos feitos com resíduos. Os AA. fizeram então a comparação dos valores obtidos no teste de lixiviação com os limites para reuso ilimitado de solos, reproduzidos na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 - Valores limites para Elementos Potencialmente Tóxicos (EPTs) nos solos e no lixiviado na Alemanha e no Brasil

EPTs		LIMITES NO BRASIL			LIMITES NA ALEMANHA	
		No lixiviado (segundo ABNT, 1987a)			Segundo Wiebusch (1998)	
		No solo (segundo CETESB, 1999)				
		no lixiviado	no solo		no lixiviado	no solo
		(mg/L)	(kg/ha)	(mg/kg) (1)	(mg/L)	(mg/kg)
- ARSÊNIO	As	5,0	41	17	0,010	20
- CÁDMIO	Cd	0,5	39	16	0,002	0,6
- COBRE	Cu	VNF	1 500	625	0,050	40
- CHUMBO	Pb	5,0	300	125	0,020	100
- CROMO TOTAL	Cr	5,0	500 (2)	208	0,015	50
- MERCÚRIO	Hg	0,1	17	7	0,0002	0,3
- NÍQUEL	Ni	VNF	420	175	0,040	40
- SELÊNIO	Se	1,0	100	41	VNF	VNF
- ZINCO	Zn	VNF	2 800	1 167	0,100	120

Obs.: (1) A transformação dos valores fixados na norma P-4320 (CETESB, 1999), em (kg de EPT / ha) de solo para (mg de EPT/ kg de solo), foi feita para se poder comparar com os limites alemães, que foram dessa forma apresentados. Para isso, admitiu-se uma massa específica aparente de 1200 kg/m³ para a camada superficial de 20 cm de solo, tendo sido obtido um fator multiplicativo f = 0,417, que foi então aplicado aos valores em kg/ha.

(2) O valor limite fixado para cromo total no solo, segundo a norma P-4230 (CETESB, 1999) era ainda provisório.

VNF = valor não fixado nos documentos citados.

Fontes: Wiebusch et al. (1998), NBR-10004 (ABNT, 1987a) e Norma P-4230 (CETESB, 1999).

A norma brasileira NBR-10004 (ABNT, 1987a), no seu Anexo G – Listagem nº 7, prevê os valores limites para os EPTs liberados no lixiviado, enquanto que a Norma P-4.230 (CETESB, 1998), fixa os limites para acumulação de EPTs nos primeiros 0,20 m de solo, quando da aplicação de biossólidos. Para fins de comparação esses valores

também foram apresentados na Tabela 3.8. Analisando-se a Tabela 3.8, deve-se ressaltar que, apesar do teste de lixiviação, previsto na norma brasileira NBR-10005 (ABNT, 1987), ser mais rigoroso do que o teste alemão citado (DEV-S4), o que na certa deve resultar numa maior lixiviação, os limites fixados no Brasil, para a maioria dos EPTs, são bem menos conservativos do que os fixados pelos alemães.

No que se refere ao teste de solubilização, descreve-se a seguir, de maneira sucinta, os procedimentos previstos na norma brasileira NBR-10006 (ABNT, 1987c). Segundo a norma deve-se colocar 250 g (base seca) do resíduo, num frasco de 1500 mL, ao qual adiciona-se 1000 mL de água deionizada, agitando-se a amostra em baixa velocidade durante 5 minutos. Em seguida deve-se tampar o frasco e deixá-lo descansar por um período de 7 dias. Filtra-se a solução com dispositivo de filtração guarnecido com filtro de 0,45 µm de porosidade. Preserva-se a amostra com algumas gotas de ácido clorídrico concentrado até atingir pH < 2,0, medindo-se posteriormente as concentrações dos poluentes através de métodos espectrométricos.

Na Tabela 3.9, são apresentados os padrões de EPTs, previstos para o teste de solubilização, no Anexo H - Listagem nº 08 da norma NBR-10004 (ABNT, 1987a).

Tabela 3.9 - Valores limites de EPTs para o teste de solubilização

EPTs		Limite máximo no extrato (mg/L)
- ARSÊNIO	As	0,05
- CÁDMIO	Cd	0,005
- COBRE	Cu	1,0
- CHUMBO	Pb	0,05
- CROMO TOTAL	Cr	0,05
- MERCÚRIO	Hg	0,001
- NÍQUEL	Ni	VNF
- SELÊNIO	Se	0,01
- ZINCO	Zn	5,0

OBS.: VNF = valor não fixado

Fonte: NBR-10004 (ABNT, 1987a)

3.3.2 Presença de elementos radioativos no lodo

3.3.2.1 Radioatividade em resíduos

A partir de um artigo publicado, no Brasil, pelo Instituto de Radioproteção e Dosimetria, vinculado à Comissão Nacional de Energia Nuclear (IRD-CNEN, 2000), surgiu o interesse em se incluir, nesta pesquisa, o estudo da radioatividade, começando por uma pesquisa bibliográfica sobre o assunto, seguida da detecção de radioisótopos no solo, nos lodos de esgoto, na mistura das cinzas com o solo e a verificação da compatibilidade do uso de tijolos feitos com as cinzas dos lodos, na construção de unidades habitacionais.

No artigo citado, os AA. alertaram para a possível presença de elementos radioativos naturais, tais como o Urânio (^{238}U , ^{235}U e ^{234}U), o Tório (^{234}Th), o potássio (^{40}K) e outros, no resíduo a ser inertizado, em quantidades, às vezes, acima dos valores considerados normais. Sugeriam os AA. que se incluísse a radioatividade entre os estudos ambientais a serem realizados, quando da inertização de resíduos, principalmente aqueles oriundos das atividades de mineração, pois a prática de inertizar resíduos estaria se tornando, de certa forma, corriqueira no Brasil. Realmente, pode-se dizer que, nos últimos tempos, quando não se sabe o que fazer com um determinado resíduo, é prática comum estudar-se a sua inertização em concreto ou em corpos cerâmicos. Se o produto final for utilizado, por exemplo, em edificações, estariam os elementos radioativos presentes, interagindo diretamente com os usuários das mesmas.

No Brasil, um dos resíduos que mais vem preocupando os pesquisadores, neste sentido, é o fosfogesso. Trata-se de um sub-produto do processamento da rocha fosfática na indústria de fertilizantes, de altíssima produção (cerca de 69 milhões de toneladas anuais). O fosfogesso vem sendo muito utilizado na fabricação de blocos de construção, gesso de revestimento, divisórias e na indústria do cimento. Apesar de ser apenas um

sulfato de cálcio dihidratado, contém alto nível de impurezas incluindo urânio e tório e seus respectivos produtos de decaimento, originários da rocha matriz (Damasceno e Lima, 1994; Saueia, 1998; Mazzilli e Saueia, 1999; Mazzilli et al., 1999).

Quanto ao lodo de esgoto sanitário, os resultados da pesquisa bibliográfica indicaram que realmente este contém radionuclídeos naturais mas pode também conter outros radionuclídeos, originados de certas práticas na medicina ou pela manipulação autorizada de radioisótopos, principalmente nos países mais avançados, em especial, nos EUA (Sodd, Velten e Saenger, 1975; Ault, 1989; Marino, 1994; USNRC, 1994; Larsen, Stetar e Glass, 1995; Brennan, 1997; Martin e Fenner, 1997; WSDOH, 1997; USEPA, 1999). Percebeu-se ainda que, ao contrário do que pode ocorrer com os EPTs nos tijolos feitos com lodos de esgoto (apresentada no item 3.3.1), os efeitos ambientais referentes à radioatividade estão relacionados com o uso normal desses tijolos nas edificações e a exposição dos usuários dessas edificações aos efeitos da radioatividade.

3.3.2.2 Principais aspectos sobre a radioatividade

A radiação aparece de muitas formas diferentes. Algumas, tais como o calor e luz solares são naturais. Outras, tais como as ondas de rádio, radar e microondas, são fabricadas pelo homem. Algumas podem ser vistas ou sentidas, outras podem ser detectadas ou usadas em aparelhos domésticos tais como rádio, televisão ou forno de microondas. No entanto, aqui se trata de uma outra forma de radiação, a chamada **radiação ionizante**, devido ao efeito elétrico denominado **ionização**, que ocorre quando esta interage com a matéria (Saunders e Tasker, 1991).

A radiação ionizante surge de alguns elementos químicos instáveis, denominados isótopos. O isótopo de um determinado elemento químico tem igual número de prótons, mas difere no número de nêutrons presentes no núcleo desse átomo. A instabilidade dos isótopos está associada a um excesso de energia acumulada, que tende a ser liberada sob

a forma de radiações. Nesse processo, que ocorre naturalmente e é chamado de decaimento, o átomo “livra-se” do excesso de energia e torna-se mais estável. A radiação emitida pode ser pura energia eletromagnética (raios γ), ou conter ainda partículas saídas do núcleo do átomo (partículas α e β). Quando há liberação de partículas, as propriedades químicas do átomo são alteradas e aquele elemento transforma-se em outro. A cadeia de decaimento dos diversos isótopos naturais é bastante grande, mas pode-se citar como exemplo o chamado decaimento α do Urânio 238 (^{238}U), com 92 prótons e 146 nêutrons. Este, ao liberar raios γ e uma partícula α (formada por 2 prótons e 2 nêutrons), transforma-se no elemento Tório 234 (^{234}Th), com 90 prótons e 144 nêutrons. Já no decaimento do tório (^{234}Th) ocorre o chamado decaimento β , no qual há liberação de raios γ , de um elétron e um antineutrino, transformando-o no elemento Protactínio 234 (^{234}Pa), com 91 prótons e 143 nêutrons (IRD-CNEN, 2000).

Saunders e Tasker (1991), ensinam que cada tipo de radiação apresenta uma propriedade diferente. Elas particularmente diferem quanto ao poder de penetração. As partículas α são núcleos de átomos do elemento hélio, constituídas de dois prótons e dois nêutrons. São emitidas espontaneamente, a partir do núcleo dos átomos de elementos pesados, tais como o urânio, tório, polônio, radônio, etc. Sua emissão é acompanhada muitas vezes por partículas beta e/ou raios gama. Segundo Okuno (1992), as partículas alfa, na sua interação com a matéria, ionizam os átomos do meio, produzindo uma densidade de ionização alta, sendo, dessa forma, pequeno seu alcance. Na Tabela 3.10 é apresentado o alcance das partículas alfa e beta, o que mostra, por exemplo, que as partículas alfa, com energia de 5 MeV, são facilmente blindadas por uma camada de 3,5 cm de ar. Deve-se ressaltar que a energia das partículas alfa, emitidas por certos elementos naturais, está nessa faixa de valor.

Saunders e Tasker (1991), confirmam isso quando afirmam que as partículas alfa podem ser impedidas por uma simples folha de papel. No entanto, conforme lembra Furnari (2001), podem causar danos se entrarem em contato direto com as mucosas do corpo humano, por exemplo, a simples aspiração de pó contendo elemento radioativo, pode causar sérios danos às células dos pulmões.

Tabela 3.10 - Alcance das partículas ALFA e BETA no ar, no tecido humano e no alumínio

Energia (MeV)	Alcance das partículas ALFA (cm)			Alcance das partículas BETA (cm)		
	no ar	no tecido humano	no alumínio	no ar	no tecido humano	no alumínio
0,1	-	-	-	12	$1,51 \times 10^{-2}$	$4,3 \times 10^{-3}$
1,0	0,55	$3,3 \times 10^{-3}$	$3,2 \times 10^{-4}$	420	0,50	0,15
2,0	-	-	-	840	1,00	0,34
3,0	1,67	$1,0 \times 10^{-2}$	$9,8 \times 10^{-4}$	-	-	-
5,0	3,50	$2,1 \times 10^{-2}$	$2,1 \times 10^{-3}$	-	-	-

Fonte: Adaptado de Okuno (1992)

As partículas beta podem ser elétrons ou pósitrons. Elas são emitidas espontaneamente a partir do núcleo de átomos radioativos, tais como o trítio (^3H), o fluor_18 (^{18}F), o fósforo_32 (^{32}P) e o iodo_131 (^{131}I). São muito mais penetrantes e produzem uma densidade de ionização menor do que as partículas alfa, de mesma energia. Trabalhadores expostos às partículas beta podem ter a pele e o cristalino dos olhos afetados. No entanto, as partículas beta podem ser facilmente blindadas com placas de acrílico ou de alumínio (Okuno, 1992).

Os nêutrons são produzidos em reações nucleares e podem ser encontrados em grande quantidade nas vizinhanças de reatores nucleares e aceleradores de partículas, quando estes estão em funcionamento. As fontes portáteis de nêutrons são misturas de berílio com emissores de partícula alfa, tais como o rádio, numa fonte de Ra-Be. Os nêutrons, por não possuírem carga elétrica, não produzem ionização direta quando da sua interação com a matéria. No entanto, transferem energia para outras partículas carregadas que ionizam a matéria; são muito penetrantes e podem percorrer grandes distâncias antes de interagir com a matéria, podendo ser blindados com materiais ricos em hidrogênio, tais como a parafina e a água (Okuno, 1992).

Os raios gama são ondas eletromagnéticas muito energéticas e, portanto, muito mais penetrantes que as demais, podendo atravessar todo o corpo humano, afetando a pele, os ossos, o sangue e os órgãos internos. Eles são emitidos a partir de núcleos de átomos radioativos, em geral, concomitantemente com a emissão de partículas alfa e beta. Na sua interação com a matéria produzem elétrons ou pósitrons que, por sua vez,

ionizam a mesma. Para fazer a blindagem de raios gama são utilizados materiais como o chumbo, o concreto e os solos. A espessura de um determinado material, que venha a reduzir a intensidade da radiação à metade, é chamada de camada semi-redutora (Okuno, 1992). Na Tabela 3.11 são apresentadas as camadas semi-redutoras para o tecido humano e para o chumbo, válidas tanto para os raios gama quanto para os raios-X.

Tabela 3.11 - Espessura da camada semi-redutora válida para Raios-X e γ

Energia (MeV)	Espessura da camada semi-redutora para Raios X e γ (cm)	
	no tecido humano	no chumbo
0,1	4,15	0,011
0,5	7,23	0,380
1,0	9,91	0,860

Fonte: Adaptado de Okuno (1992).

Os raios-X foram descobertos há cerca de 100 anos, quando Roentgen trabalhava com um tubo de raios catódicos e, por não saber do que se tratava, lhe deu esse nome. Mais ou menos na mesma época, descobriu-se que certos tipos de átomos pesados emitiam espontaneamente raios penetrantes, aos quais foi dado o nome de raios gama. Hoje se sabe, que ambos os raios possuem exatamente a mesma natureza física. As características dos raios-X são exatamente as mesmas do raio gama (Okuno, 1992).

As radiações α , β e γ são produzidas naturalmente mas também podem ser produzidas artificialmente em reatores nucleares ou aceleradores. Já os raios-X somente podem ser produzidos artificialmente (Saunders e Tasker, 1991). Assim, os tubos de raios-X, quando desligados, deixam de emití-los instantaneamente (Okuno, 1992).

São muitas as unidades de medida utilizadas para se quantificar a radiação e à primeira vista podem causar grande confusão. A Figura 3.1 procura auxiliar nessa compreensão, mostrando esquematicamente as principais unidades e doses.

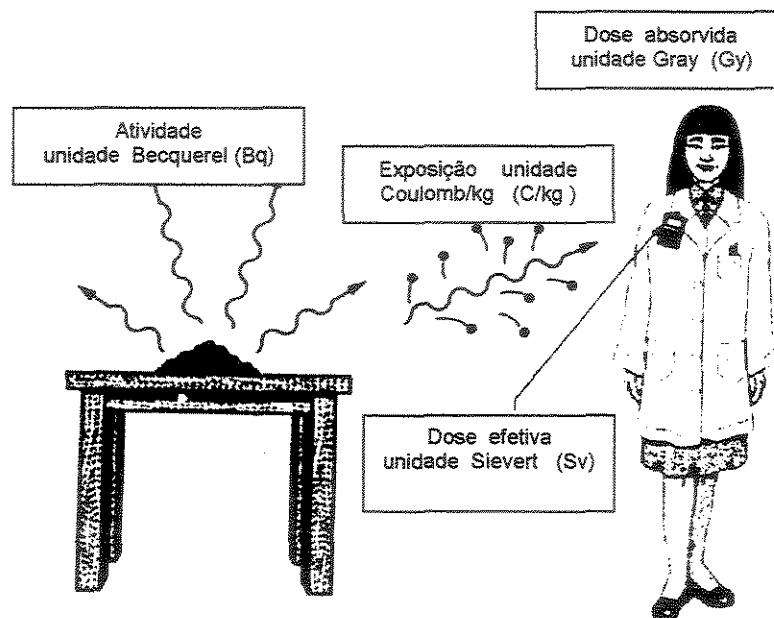


Figura 3.1 - Esquema para elucidar as principais unidades de radiação e de dose

Fonte: Adaptado de Halliday, Resnick e Walker (1995).

Okuno (1992) e RADNET (2001), esclarecem o significado das principais unidades utilizadas para se quantificar a radiação. Uma dificuldade adicional para o leigo é que, em alguns países, ainda são adotadas outras unidades, com nomenclaturas anteriormente propostas, ao invés das atuais unidades do sistema internacional. Esclarecendo melhor a Figura 3.1, tem-se que:

- **ATIVIDADE** - é inerente às próprias características de cada material radioativo. No sistema internacional (SI) a unidade utilizada é o Becquerel (Bq). Convencionou-se que $1 \text{ Bq} = 1$ desintegração por segundo. Para resíduos contendo material radioativo é comum utilizar-se a unidade Bq/kg de resíduo. Em alguns trabalhos encontra-se ainda a antiga unidade para a atividade, o Curie (Ci). Tem-se que $1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$.
- **EXPOSIÇÃO** - trata-se da capacidade que apresentam as radiações alfa, beta, gama e X, de cederem energia ao meio em que transitam. No SI, a unidade de medida de exposição é o C/kg (coulomb/kg). Em alguns trabalhos ainda aparece a unidade antiga,

o roentgen (**R**), tida como a capacidade de ceder 8,78 mJ de energia a 1 kg de ar seco, em condições normais. Tem-se ainda que $1 \text{ R} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$.

- **DOSE ABSORVIDA** - trata-se da energia concedida pela radiação ionizante por unidade de massa do material irradiado. No SI é medida em **gray** (Gy). Convencionou-se que $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$. Em alguns trabalhos ainda aparece a unidade antiga, o **rad** (do inglês “radiation absorbed dose”). Tem-se que $1 \text{ rad} = 0,01 \text{ Gy}$. Um enunciado típico que envolve essa unidade é o seguinte “uma dose de $3 \text{ Gy} = 300 \text{ rad}$, de raios gama, quando absorvida pelo corpo inteiro, num pequeno intervalo de tempo, provocará a morte de 50% das pessoas a ela expostas”.
- **DOSE EFETIVA** - no SI, a unidade é o **sievert** (Sv). Esta unidade foi criada na busca de uma escala comum que permitisse o cálculo dos limites de dose, necessários para estabelecer padrões de segurança quanto à radiação. É definida como o produto da dose absorvida por um certo fator de conversão de dose, o qual depende das chamadas rotas de entrada (inalação ou ingestão), do nível de desobstrução do pulmão, quando se trata de inalação; da porção considerada do intestino delgado, quando se trata de ingestão; bem como do órgão em questão.

Segundo RADNET (2001), a USEPA produziu uma separata com tabelas de fatores de conversão para inalação e ingestão, considerando as gônadas, os seios, os pulmões, a medula vermelha, os ossos, a tireóide, etc, assim como a dose efetiva para o corpo todo. Em alguns trabalhos e livros ainda aparece a unidade antiga de dose equivalente (hoje chamada de dose efetiva), o **rem** (abreviatura em inglês de “roentgen equivalent on man”). Tem-se que $1 \text{ rem} = 0,01 \text{ Sv}$.

3.3.2.3 Fontes naturais de radiação

Este item foi totalmente baseado numa publicação inglesa sobre radiação (Saunders e Tasker, 1991).

O planeta Terra está repleto de radiações naturais. Essa radiação vem do espaço e também da própria Terra. O ar que se respira e quase toda comida e bebida são naturalmente radioativos. Essa radiação não é produto da ação do homem. É chamada de radiação de fundo (“background”) ou radiação natural e existe desde a origem do universo. A dose anual média de radiação natural, recebida pela população em geral, é de 2,4 mSv. No entanto, somente para fins comparativos, Saunders e Tasker (1991) adotaram 1 mSv (1 milisievert) como sendo a unidade natural de radiação. Deve-se ressaltar que 1 mSv é também o limite de dose para o público em geral, estabelecido pelo ICRP (“International Committee of Radiation Protection”). A Terra é continuamente bombardeada por partículas de alta energia vindas do espaço e produzidas no núcleo dos átomos. Muitos desses núcleos são fragmentos lançados pelo Sol, mas alguns vêm de outros fenômenos ocorridos no espaço, talvez até de outras galáxias. Como estes núcleos ou partículas primárias atingem a Terra, colidindo antes com a camada atmosférica, estas são quebradas em partículas secundárias. Este constante e invisível fluxo de radiação é chamado de radiação cósmica. Em média, todos recebem 1/4 da unidade natural de radiação (cerca de 0,25 mSv/ano), advindas dessa fonte. Porém, isso se aplica às pessoas que vivem perto ou ao nível do mar. Pessoas que vivem ou trabalham em grandes altitudes recebem altas doses de radiação por causa da menor camada de ar.

Pessoas que vivem por volta de 1.500 metros de altitude, altura de uma típica estação de esqui, recebem uma dose cerca de 2 vezes maior do que ao nível do mar. À 6.000 metros de altitude, onde a espessura da camada atmosférica é muito fina, recebem cerca de 1 milésimo de unidade por hora, equivalente a cerca de nove unidades por ano (9 mSv/ano).

A 10.000 metros, altura de voo de uma aeronave a jato, os passageiros e tripulantes recebem cerca de 5 milésimos de unidade por hora ou 45 unidades por ano (45 mSv/ano). A 15.000 metros, altura de voo do avião Concorde, essa dose passa a 10 milésimos de unidade por hora, ou cerca de 90 unidades por ano (90 mSv/ano).

A radiação cósmica é extra terrestre, mas a Terra tem também sua própria fonte de radiação. A radiação terrestre vem diretamente das rochas e da crosta terrestre. Algumas rochas e minerais, notadamente o granito, mas também o arenito e o calcário, contêm traços dos elementos

urânio e tório, que são naturalmente radioativos. Essas rochas, ao longo do tempo, dão origem a solos levemente radioativos, contendo os chamados elementos radioativos primordiais ^{238}U , ^{232}Th e ^{40}K (urânio, tório e potássio). Construções feitas de pedra são tão radioativas quanto a rocha original. Outros materiais de construção, tais como os tijolos e o concreto também contêm substâncias levemente radioativas.

A quantidade de radiação recebida do solo, das casas e locais de trabalho variam com a geologia local e com os materiais de construção utilizados. A dose anual no Reino Unido, vinda dessas fontes, varia em média de 1/3 a 2/3 de uma unidade (0,33 a 0,67 mSv/ano). Porém, na localidade de Cornwall (Inglaterra), a dose média anual, advinda desse tipo de fonte, aproxima-se da unidade (1 mSv/ano), por causa da geologia onde há predominância do granito e de sua larga utilização como material de construção.

O urânio e o tório presentes nas rochas, solos e construções decaem produzindo os gases radônio (^{222}Rn) e o torônio (^{220}Rn), sendo o radônio mais comum que o torônio, pois a meia-vida deste último é de apenas 54 microsegundos. Como esses gases geralmente escapam para o ar aberto, rapidamente se dispersam na atmosfera. Porém, se estes forem liberados em porões ou em paredes de construção, apresentam dificuldades de escapar e suas concentrações podem aumentar muito. Isso, no entanto, pode ser evitado com uma boa ventilação. Assim, edifícios fechados, sem uma boa ventilação podem ser um ótimo abrigo para o gás radônio. O radônio e o torônio juntos são responsáveis por mais da metade das 2,4 unidades de radiação que, como já foi dito, é a dose média anual recebida pela população, advindas das fontes naturais. A dose média proporcionada por esses gases, no Reino Unido, é de 1,3 unidades (1,3 mSv/ano). Essa dose varia com a geologia local, mas em Cornwall, a dose média anual é de 6 unidades (6 mSv/ano), apesar de existirem casas em que a dose média anual aproxima-se de 100 unidades (100 mSv/ano).

Todos os alimentos e bebidas, inclusive a água, são levemente radioativos. As plantas absorvem do solo os minerais radioativos e elementos traço que existem dispersos ou dissolvidos na água presente nos solos. Dessa maneira a radioatividade entra na cadeia alimentar humana. Uma dieta média fornece uma dose anual de 1/3 da unidade (0,33 mSv/ano). Alguns alimentos,

tais como a castanha do Pará, chá, café e pão são naturalmente mais radioativos que outros, mas isso não quer dizer que tais alimentos devam ser evitados. Na Tabela 3.12 apresenta-se a atividade de algumas substâncias naturais e outras antropogênicas.

Tabela 3.12 - Atividade de algumas substâncias naturais e outras fabricadas pelo homem

SUBSTÂNCIA	ATIVIDADE (Bq)
- 1 kg de café	1×10^3
- 1 pessoa adulta	3×10^3
- 10 kg de granito	$1,2 \times 10^4$
- 25 kg do fertilizante super - fosfato	$1,25 \times 10^5$
- 1 kg de resíduo (com baixo nível de radioatividade)	1×10^6
- 1 tonelada de cinzas de carvão	2×10^6
- 1 ampola de isótopo para diagnóstico médico	7×10^7
- 1 kg de resíduo (com nível intermediário de radioatividade)	1×10^8
- 1 tonelada de urânio = 1 kg de resíduos vitrificados e com alto nível de radioatividade	1×10^{10}
- Fonte para radioterapia	1×10^{11}

Fonte: Adaptado de Saunders e Tasker (1991).

3.3.2.4 Fontes de radiação na medicina

Segundo Saunders e Tasker (1991), a radiação é usada na medicina de duas maneiras; em baixas doses para o diagnóstico de doenças ou em altas doses para matar células cancerígenas. A mais conhecida das fontes médicas de radiação é o diagnóstico por raios X. A maior parte dos diagnósticos são feitos nos dentes, tórax e ossos das pernas ou dos braços, em todo o mundo. Ainda segundo esses AA., um simples raio X do tórax aplica uma dose de 1/15 da unidade (0,07 mSv). No entanto, as doses variam de um equipamento para outro. Materiais radioativos podem também ser utilizados para estudar alguns processos do metabolismo e também para localizar tumores. Em média, as doses de radiação de tais investigações estão entre 1 e 10 unidades (1 e 10 mSv).

As maiores dosagens aplicadas na medicina são aquelas para tratar o câncer. Estas podem ser muito altas, um tratamento típico envolve não mais 10 e sim milhares de unidade,

usualmente estendidas por várias semanas de aplicação. Cuidados extremos são tomados para focar essas aplicações precisamente sobre o tumor, tornando a possibilidade de danos às células vizinhas, a mais baixa possível (Saunders e Tasker, 1991).

Martin e Fenner (1997), explicam que o iodeto de sódio radioativo (Na^{131}I) é um composto comumente usado na medicina para tratamento de doenças da tireóide. Outros compostos podem ser também usados em procedimentos médicos e em pesquisas. Segundo o USNRC (1996) apud Martin e Fenner (1997), cerca de 750.000 diagnósticos por mapeamento da tireóide são feitos a cada ano, nos Estados Unidos. Cada procedimento desses utiliza cerca de 0,01 a 0,1 mCi ($3,7 \times 10^5$ a $3,7 \times 10^6$ Bq) de (Na^{131}I). Outras 50.000 aplicações na tireóide são feitas anualmente como tratamento para o hipertireoidismo, no qual é ministrado iodo radioativo, que se concentra na tireóide do paciente e cujo objetivo é matar grande parte das células dessa glândula. Outros cerca de 10.000 tratamentos de câncer da tireóide são feitos a cada ano nos EUA. Um grande centro médico regional, tal como o da Universidade de Michigan, faz de 80 a 100 tratamentos a cada ano, cada um deles utiliza cerca de 10 mCi ($3,7 \times 10^8$ Bq) de (Na^{131}I) e entre 40 a 60 pacientes de câncer recebem por ano doses terapêuticas de Na^{131}I , que variam de 150 a 350 mCi ($5,6 \times 10^9$ a $1,3 \times 10^{10}$ Bq), dependendo das particularidades de cada caso. Portanto, dependendo de cada caso, nos dejetos orgânicos de certos pacientes (fezes e urina), podem ser encontrados elementos radioativos, lançados na rede de esgoto.

3.3.2.5 Radioatividade no lodo de esgoto sanitário

Face ao exposto anteriormente, pode-se dizer que a presença de elementos radioativos no lodo de esgoto, tanto os naturais como os manipulados pelo homem é perfeitamente justificável pois, como se viu, os alimentos apresentam radioatividade natural, o homem usa esses alimentos e lança seus dejetos (fezes e urina) no esgoto. Nos hospitais alguns procedimentos médicos podem resultar no lançamento direto de radioatividade nas redes de esgoto ou indiretamente via excreta dos pacientes. Viu-se também que o homem manipula elementos radioativos e os efluentes líquidos contendo

esses elementos podem ser, em certos casos, lançados na rede de esgoto. Assim, nas estações de tratamento de esgoto, ao se retirar os sólidos presentes no líquido (lodo), é perfeitamente normal que sejam encontrados tais elementos radioativos. O Departamento de Saúde da cidade de Washington nos EUA (WSDOH, 1997), enumera alguns caminhos pelos quais os materiais radioativos, tanto os antropogênicos quanto os naturais, provindos de diferentes fontes, adentram aos sistemas de esgoto, daquele país:

- os elementos radioativos; iodo (^{131}I) e o tecnécio ($^{99\text{m}}\text{Tc}$) são usados em grande número de procedimentos médicos. Muitas vezes esses elementos são injetados nos pacientes e adentram ao sistema de esgoto através dos seus excretas;
- um grande número de empresas são licenciadas para utilizar ou possuir materiais radioativos para uso industrial ou para pesquisas. O material radioativo, para que seja disposto na rede de esgoto necessita estar na forma solúvel. No entanto, é possível que alguns deles possam se concentrar no lodo das ETEs; e,
- tanto os materiais radioativos naturais quanto aqueles remanescentes de testes nucleares podem adentrar às redes de esgoto através das águas pluviais, da água potável ou dos excretas humanos.

Em 1994, o WSDOH (1997), coletou amostras de lodo de 6 ETEs e realizou em seus laboratórios algumas análises de concentração dos elementos radioativos encontrados, cujos resultados são apresentados na Tabela 3.13. Nessa tabela são apresentados os valores extremos encontrados no lodo. No entanto, para avaliar os possíveis efeitos dos materiais radioativos presentes no lodo sobre a saúde, foram utilizados alguns cenários para estudos em modelos de simulação que correspondessem às situações mais próximas da realidade e não aos casos extremos. Após analisarem possíveis cenários, um deles foi selecionado para a avaliação qualitativa e dois foram selecionados para uma avaliação quantitativa. A exposição dos trabalhadores das ETEs foi avaliada apenas qualitativamente, por causa da geometria dos tubos, tanques e reservatórios, utilizados para transportar e armazenar esgoto e lodo nas ETEs, cuja complexidade

tornava impossível o uso de modelos. Além disso, a movimentação dos trabalhadores na ETE variava muito para que se estabelecesse um valor a ser utilizado no modelo.

Tabela 3.13 - Radioisótopos encontrados no lodo de esgoto pelo WSDOH (1997)

ISÓTOPO	MEIA-VIDA	Maior concentração (base seca)		PROVÁVEL ORIGEM
		em pCi/g	em Bq/kg	
Berílio (^7Be)	53 dias	6,1	225,7	natural
Cobalto (^{57}Co)	270 dias	0,05	1,9	(1)
Cobalto (^{58}Co)	71 dias	0,17	6,3	(1)
Cobalto (^{60}Co)	5,2 anos	24,2	895,4	industrial
Césio (^{137}Cs)	30,2 anos	0,69	25,5	testes nucleares e industrial
BETA TOTAL	-	46,0	1242,0	natural
Iodo (^{131}I)	8 dias	32,8	1213,6	(1)
Potássio (^{40}K)	$1,2 \times 10^9$ anos	5,7	210,9	natural
Manganês (^{54}Mn)	312 dias	0,4	14,8	industrial
Estrôncio (^{88}Sr)	50,5 dias	0,87	32,2	(1)
Estrôncio (^{90}Sr)	29,9 anos	0,52	19,2	testes nucleares
Tecnécio (^{99}Tc)	$2,1 \times 10^5$ anos	44	1628	(1) ou industrial
Tálio (^{201}Tl)	3 dias	15,2	562,4	(1)
URÂNIO TOTAL	-	57,2	2116,4	natural ou industrial
Urânio (^{234}U)	$2,4 \times 10^5$ anos	42,7	1579,9	natural ou industrial
Urânio (^{235}U)	$7,0 \times 10^8$ anos	2,3	85,1	natural ou industrial
Urânio (^{238}U)	$4,5 \times 10^9$ anos	12,3	455,1	natural ou industrial
Zinco (^{65}Zn)	243,9 dias	3,9	144,3	industrial

OBS.: (1) Uso do radioisótopo na medicina

Fonte: Adaptado de WSDOH (1997)

O WSDOH (1997) concluiu que a exposição dos trabalhadores das ETEs à radioatividade, sob circunstâncias normais e níveis medidos, resultaria em valores relativamente baixos. Se houvesse necessidade de informações adicionais eles se dispunham a selecionar alguns trabalhadores para um programa de monitoramento. Para a avaliação quantitativa, selecionaram os fazendeiros e seus familiares, que recebiam e

manipulavam o lodo a ser aplicado em solos agrícolas e também os trabalhadores expostos no caso do uso de lodo como cobertura nos aterros sanitários. Utilizaram o modelo RESRAD, que não inclui isótopos com meia-vida inferior a 180 dias, e não incluíram também o potássio-40 (^{40}K) por se tratar de um isótopo de ocorrência natural, cujas concentrações no lodo ficaram abaixo de muitos solos analisados pelo WSDOH. Na Tabela 3.14 é apresentado um resumo dos resultados desses estudos.

Tabela 3.14 - Resultados dos estudos do WSDOH (1997) para as doses de exposição

LODO DA E.T.E	Máxima dose no cenário dos fazendeiros e seus familiares		Dose ocupacional imediata no cenário do aterro sanitário		Dose ocupacional após 30 anos no cenário do aterro sanitário	
	mrem/ano	$\mu\text{Sv/ano}$	mrem/ano	$\mu\text{Sv/ano}$	mrem/ano	$\mu\text{Sv/ano}$
- Renton	0,003	0,03	0,009	0,09	0,002	0,02
- Bremerton	0,006	0,06	0,03	0,3	0,004	0,04
- Seattle	0,004	0,04	0,01	0,1	0,005	0,05
- Wenatchee	0,003	0,03	0,005	0,05	0,003	0,03
- Tacoma	0,002	0,02	0,004	0,04	0,002	0,02
- Richland	2	20	12	120	0,5	5

Fonte: Adaptados de WSDOH (1997)

Mesmo a ETE de Richland apresentando valores bem acima dos demais, baseados nos resultados dos estudos (Tabela 3.14) e considerando-se o limite de exposição (para o público em geral) de 100 mrem/ano (1 mSv/ano), o WSDOH concluiu não haver indicação de que os níveis de radioatividade encontrados no lodo de esgoto pudessem causar riscos à saúde e que tanto o uso como condicionador de solos quanto como cobertura em aterros sanitários poderiam ser considerados seguros.

Martin e Fenner (1997), relataram que a maior parte do (Na^{131}I) administrado aos pacientes nos centros médicos, adentram à rede de esgotos via excretas desses pacientes. Uma estimativa feita nos EUA, em 1993, mostrou que foram realizados cerca de 8 milhões de estudos e diagnósticos médicos utilizando materiais radioativos (USNRC, 1996 apud Martin e Fenner, 1997), com tendência a aumentar esse número a cada ano. A maioria desses estudos

utiliza o Tecnécio ^{99m}Tc . O centro médico da Universidade de Michigan realiza cerca de 10.000 procedimentos médicos utilizando materiais radioativos a cada ano, utilizando cerca de 1.000 curies ($3,7 \times 10^7 \text{ Bq}$) de ^{99m}Tc anualmente e a maior parte deste material radioativo vai para o esgoto, através dos excretas dos pacientes.

Ainda segundo Martin e Fenner (1997), o estudo do comportamento do ^{99m}Tc no esgoto é difícil por causa de sua relativamente curta meia-vida (apenas 6 horas). Assim, a sua presença no lodo, na maioria das vezes não é detectada pois os processos de tratamento levam tempo infinitamente maior do que essas 6 horas. Conseqüentemente, o estudo do comportamento e o eventual destino da radioatividade no sistema de esgoto, no trabalho desses AA., teve seu foco centrado nas descargas radioativas do Na^{131}I (iodeto de sódio) nas redes, decorrentes dos tratamentos administrados aos pacientes do centro médico da Universidade de Michigan.

Martin e Fenner (1997), comentaram que o uso de materiais radioativos na medicina, nos EUA, é regulamentado pela USNRC, de acordo com o Código Federal (Code of Federal Regulations CFR - n.º 10 partes 20 e 35). Por outro lado, qualquer instituição que utiliza materiais radioativos deve possuir uma licença para adquiri-los e/ou para ministrá-los aos pacientes; mas os próprios pacientes e seus excretas acabam ficando isentos de regulamentos. A licença permite descarregar 1 curie por ano ($3,7 \times 10^{10} \text{ Bq/ano}$) diretamente no esgoto sanitário, mas os excretas dos pacientes ficam excluídos desse limite, uma vez que não é feito nenhum controle nesse sentido. Segundo os AA., em razão disso, seria necessário coletar e preservar os excretas desses pacientes pois é comum administrarem a eles 1 Ci ($3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$) ou mais de Na^{131}I por semana, num grande centro médico universitário.

Apesar da liberação de materiais radioativos nos sistemas de esgoto resultar em uma boa diluição, o líquido é transportado para as estações de tratamento, nas quais é processado e o lodo resultante acaba reconcentrando uma quantidade significativa da radioatividade presente no esgoto. Na ETE de Oak Ridge, Tennessee, que recebe e trata esgoto de uma rede, na qual muitos laboratórios comerciais e públicos descarregam resíduos líquidos radioativos, foi estabelecido em 1994, um programa de monitoramento para determinar se o lodo processado foi

aplicado no solo e quais as conseqüências desse uso (Larsen et. al. 1995, apud Martin e Fenner, 1997).

Martin e Fenner (1997) afirmaram que os estudos anteriores ao deles, realizados com o iodo radioativo em sistemas de esgoto, haviam se limitado a medir essa radioatividade ou a determinar a eficiência de remoção (como exemplo citam Moss, 1973; Sodd *et al.* (1975) e Marino, 1994). Tais estudos não correlacionaram os níveis de radioatividade no lodo com a sua entrada no sistema, nem estudaram as conseqüências da manipulação do lodo, tais como a liberação para a atmosfera de seus elementos radioativos, durante a incineração. Moss relatou que apenas $7,0 \times 10^{10}$ Bq de Na^{131}I foi liberado no decorrer de todo o ano de 1971 em Cincinnati - Ohio e Sodd *et al.* relataram que pelo menos 7×10^8 Bq por semana ($3,6 \times 10^9$ Bq/ano), foi administrado aos pacientes em 1975. Os estudos de Moss e Sodd *et al.* indicaram que o Na^{131}I foi medido no lodo de esgoto mas não fizeram correlações com as doses administradas aos pacientes.

Martin e Fenner (1997) mediram os níveis de radioatividade no lodo da ETE - Ann Arbor, Michigan, rastreando os tratamentos por radioiodo de dois pacientes do Hospital da Universidade de Michigan e aplicando modelos de simulação para estimar as doses potenciais de radiação, decorrentes da liberação de (Na^{131}I), quando da incineração do lodo de esgoto.

Os resultados mostraram que apenas cerca de 1,1 % da substância radioativa Na^{131}I , administrada terapeuticamente aos pacientes, foram detectados no lodo primário da ETE. As doses de radiação, a partir da incineração do lodo foram calculadas em 0,048 mrem (0,48 μSv) para um trabalhador da ETE, simulando um período no qual o sistema de filtração do incinerador apresentasse falhas, condição essa que pode ser considerada de máxima exposição, tendo sido considerados dois dias de trabalho de 9 horas cada, nessas condições. Os resultados calculados para um trabalhador com exposição típica (com o sistema de filtração funcionando e um período de 22 semanas de incineração), representaria uma dose efetiva de 0,066 mrem (0,66 μSv) . Um trabalhador exposto a ambas as condições durante o período de incineração, a dose calculada seria de 0,11 mrem (1,1 μSv). Para um membro da população das redondezas, a dose equivalente efetiva foi calculada em 0,003 mrem (0,03 μSv) para um período de 22 semanas de

incineração. A exposição de ambos, tanto dos trabalhadores quanto do público em geral representa uma pequena fração da dose anual típica, que é de 100 mrem (1,0 mSv), excluindo o radônio, ou 300 mrem (3,0 mSv) se incluído o radônio.

Os AA. detectaram ainda que o tempo de transporte do iodo radioativo para a estação de tratamento resultou num tempo mais longo que o do esgoto normal, possivelmente pela retenção do iodo no material orgânico presente nas paredes internas das tubulações. Concluíram que o iodeto de sódio (Na^{131}I) no lodo, na época do ano em que este é aplicado em solos agrícolas, apresenta pouca importância por causa do decaimento que ocorre antes que o mesmo possa vir a atingir o público potencial.

Quanto à incineração do lodo, que é feita nos meses de inverno, concluíram que essa operação libera diretamente o (Na^{131}I) do lodo para a atmosfera e igualmente expõe tanto os trabalhadores quanto a população, a uma radiação relativamente baixa, bem menor que 1 % da radiação limite para o público. No entanto, apenas 1 % do iodo radioativo administrado aos pacientes foi imediatamente medido no lodo primário. O destino da radioatividade remanescente não foi objeto do estudo e portanto não ficou claramente estabelecida. Os AA. especularam que uma parte dos resíduos não removidos na decantação primária poderia estar sendo removida nos tratamentos secundários e terciários mas, quase que com certeza a maior parte deve ter passado pelas unidades de tratamento e descarregada, em concentrações bastante diluídas, no efluente final da ETE (Martin e Fenner, 1997).

As agências norte-americanas USNRC e USEPA decidiram conjuntamente investigar 900 ETEs e escolheram 300 delas para um estudo mais completo (USEPA, 1999). O prazo estimado para a apresentação dos resultados era de 2 anos mas estes ainda não foram divulgados. Apresentaram no entanto, no apêndice B daquele relatório, o resultado de um estudo piloto, realizado em 9 ETEs, no qual foram comparadas as faixas de valores de radioatividade, obtidas no lodo e suas cinzas, com aquelas concentrações comumente encontradas em solos, no fosfato utilizado em fertilizantes e em materiais de construção (Tabela 3.15).

Tabela 3.15 - Radioatividade encontrada no lodo e suas cinzas (9 ETEs) e típica concentração em solos, no fosfato usado como fertilizante e nos materiais de construção (valores em Bq/kg - base seca)

ISÓTOPO	nos solos	nos fosfatos	nos materiais de construção	nos lodos de esgoto (9 ETEs)	nas cinzas de lodo (9 ETEs)
Berílio (^7Be)	VND	VND	VND	ND a 814	148 a 481
Bismuto (^{212}Bi)	3,7 a 129,5	3,7 a 170,2	3,7 a 136,9	ND a 74	ND a 74
Bismuto (^{214}Bi)	3,7 a 140,6	148 a 5180	92,5 a 186,9	ND a 74	0,7 a 592
Cobalto (^{60}Co)	VND	VND	VND	ND a 222	ND
Cromo (^{61}Cr)	VND	VND	VND	ND a 148	ND
Césio (^{137}Cs)	3,7 a 9,6	VND	VND	ND a 37	1,1 a 3,0
Trítio (^3H)	VND	VND	VND	ND a 64,8	ND
Iodo (^{125}I)	VND	VND	VND	ND a 37	ND a 11,1
Iodo (^{131}I)	VND	VND	VND	ND a 2590	ND a 148
Potássio (^{40}K)	100 a 703	1184 a 5946	29,6 a 1110	74 a 296	518 a 592
Protactínio ($^{234\text{m}}\text{Pa}$)	3,7 a 140,6	148 a 5180	7,4 a 186,9	ND a 555	ND a 333
Chumbo (^{212}Pb)	3,7 a 129,5	< 3,7 a 170,2	3,7 a 136,9	7,4 a 74	37 a 74
Chumbo (^{214}Pb)	3,7 a 140,6	148 a 5180	7,4 a 185	ND a 74	74 a 629
Plutônio (^{238}Pu)	VND	VND	VND	ND a 1,1	ND a 0,4
Plutônio (^{239}Pu)	VND	VND	VND	ND a 3	ND a 0,4
Rádio (^{223}Ra)	< 3,7 a 7,4	7,4 a 244,2	< 3,7 a 9,3	ND a 2,2	ND
Rádio (^{224}Ra)	3,7 a 129,5	< 3,7 a 170,2	3,7 a 137,3	ND a 37	18,5 a 148
Rádio (^{226}Ra)	3,7 a 140,6	3,7 a 888	3,7 a 129,5	37 a 1073	111 a 925
Rádio (^{228}Ra)	3,7 a 129,5	< 3,7 a 170,2	3,7 a 136,9	ND a 74	74 a 333
Estrôncio (^{89}Sr)	VND	VND	VND	ND a 259	ND a 29,6
Estrôncio (^{90}Sr)	VND	VND	VND	ND a 25,9	ND
Tório (^{227}Th)	< 3,7 a 7,4	7,4 a 244,2	< 3,7 a 7,4	ND a 3,7	ND
Tório (^{228}Th)	3,7 a 129,5	< 3,7 a 170,2	3,7 a 136,9	ND a 37	ND a 74
Tório (^{230}Th)	3,7 a 140,6	148 a 5180	7,4 a 185	ND a 37	18,5 a 74
Tório (^{232}Th)	3,7 a 129,5	< 3,7 a 170,2	3,7 a 136,9	0,4 a 33,3	14,8 a 37
Tório (^{234}Th)	3,7 a 140,6	148 a 5180	7,4 a 185	ND a 444	74 a 185
Tálio (^{201}Tl)	VND	VND	VND	ND a 888	ND
Tálio (^{208}Tl)	3,7 a 129,5	< 3,7 a 170,2	3,7 a 136,9	ND a 18,5	ND a 22,2
Urânio (^{234}U)	3,7 a 140,6	148 a 5180	7,4 a 185	7,4 a 1628	185 a 296
Urânio (^{235}U)	< 3,7 a 7,4	7,4 a 244,2	< 3,7 a 7,4	ND a 111	ND a 51,8
Urânio (^{238}U)	3,7 a 140,6	148 a 5180	7,4 a 186,9	7,4 a 444	74 a 185

OBS.: VND = valor não disponível e ND = elemento radioativo não detectado

Fonte: Adaptado a partir do apêndice B do relatório EPA-832-R-99-900 (USEPA, 1999).

3.3.2.6 Radioatividade nos materiais de construção civil

Os materiais radioativos de ocorrência natural, também conhecidos pela sigla “NORM”, abreviatura em inglês de “Naturally Occurring Radioactive Materials” sempre fizeram parte de tudo o que existe no planeta Terra. Em se tratando de materiais de construção, uma vez que os solos e rochas predominam como matéria prima na fabricação de cimento, tijolos, blocos, pisos, azulejos, etc., os radioisótopos presentes nessa matéria prima estarão, também, normalmente incorporados ao produto final. Para os materiais de construção é comum estudar-se a presença dos radioisótopos primordiais urânio, tório e seus produtos de decaimento, assim como também o potássio (Kathren, 1998; Malanca *et. al.*, 1995).

Os radionuclídeos pesados podem ser caracterizados por 4 séries radioativas, também chamadas de cadeias de decaimento. Três dessas séries são encontradas na natureza e cada uma delas é encabeçada por um isótopo de urânio ou de tório, cujas meias-vidas são muito longas, quando comparadas com a presumível idade da Terra. Todas essas séries finalizam com um isótopo estável de chumbo. A chamada série $4n$, também conhecida como a série do tório, é encabeçada pelo ^{232}Th , finalizando com o ^{208}Pb , isótopo estável de chumbo, cuja abundância é de 51,55 %. A série $4n+2$, do urânio, é encabeçada pelo ^{238}U , finalizando com o ^{206}Pb , isótopo estável do chumbo, cuja abundância é de 26,26 %. A série $4n+3$ é encabeçada pelo ^{235}U , também conhecida como a série do actínio e finaliza com outro isótopo estável de chumbo, o ^{207}Pb , cuja abundância é de 20,8 % (Kathren, 1998).

Três isótopos de urânio são encontrados na natureza; o ^{238}U , cuja abundância em peso é de 99,27 %; o ^{235}U , com abundância de 0,72 % e o ^{234}U , membro da série $4n+2$, com abundância de apenas 0,0057 %. Em termos de concentração de radioatividade pode-se considerar que o ^{238}U apresenta 98 % do total, o ^{234}U cerca de 2 %, sendo, portanto, praticamente desprezível a atividade do ^{234}U . A maioria das rochas da crosta terrestre contém urânio, para as quais estima-se uma concentração média, em

peso, de 2,7 mg/kg ou uma concentração de atividade de 33 Bq/kg. As rochas fosfatadas, geralmente utilizadas na produção de fertilizantes, apresentam concentrações relativamente altas de urânio, na faixa de 10 a 100 mg/kg ou 122 a 1220 Bq/kg (Kathren, 1998).

Em se tratando do tório, de ocorrência natural, praticamente 100 % em peso, aparece na forma do isótopo ^{232}Th , apesar de que outros isótopos, tais como o ^{230}Th , também possam ser encontrados. É, também, um elemento largamente difundido na crosta terrestre, sendo porém mais abundante em rochas ácidas do que nas alcalinas. Em média, a concentração de tório em rochas e solos continentais está na faixa de 9 a 10 mg/kg. Assim, este ocorre cerca de 4 vezes mais do que o urânio, em peso. Porém, como o tório apresenta uma atividade específica menor do que a do urânio, ou seja, $4,07 \times 10^6$ Bq/kg para o tório contra $12,21 \times 10^6$ Bq/kg para o urânio, a concentração de atividade média de ambos acaba resultando, praticamente, a mesma (Kathren, 1998).

Em alguns locais, no entanto, o tório ocorre em grandes concentrações nos solos. No Brasil, isso acontece em algumas áreas litorâneas com ocorrência de areias monazíticas, muito comuns nos Estados do Espírito Santo e Rio de Janeiro e, também, em algumas regiões do Estado de Minas Gerais (UNSCEAR, 2000).

Kathren (1998), ensina que a monazita é uma terra rara insolúvel, com minerais ricos em fosfatos de cério, lantânio e tório. Uma monazita típica contém cerca de 10 % de tório, em peso. Quando misturada com o mineral ilmenita, resulta na chamada “areia preta”. Esta é a origem das famosas areias pretas monazíticas, presentes em algumas regiões turísticas das costas brasileiras. As altas concentrações de tório e outros membros da cadeia 4n de decaimento, nas areias monazíticas, dão origem a altas doses externas de radiação. As doses externas, a uma altura de 1,00 m acima desses solos, chegam a várias dezenas de $\mu\text{Gy} / \text{hora}$, em total contraste com outras regiões típicas da crosta terrestre, onde a dose média é de apenas $0,05 \mu\text{Gy} / \text{hora}$. Nas residências situadas nas regiões de areia monazítica têm sido detectadas doses de várias dezenas de mGy / ano , ou seja, muito próximas e, às vezes até excedendo, aos níveis de exposição ocupacional permissíveis. Os cerca de 12000 residentes no Balneário de Guarapari, no Estado do

Espírito Santo, recebem em média, uma dose equivalente anual (no corpo todo), de 6,4 mSv (640 mrem), proveniente da radiação externa natural; ou seja, cerca de seis vezes maior que o limite para exposição da população em geral, que é de 1,0 mSv/ano (100 mrem/ano) e próximo de 1/8 do limite anual proposto para exposição ocupacional, que é de 50 mSv/ano (5 rem/ano).

É interessante observar que, a despeito dessas relativas altas doses naturais de radiação, que em alguns casos ultrapassam os níveis permissíveis para exposição ocupacional, não tem sido documentada incidência de câncer nessas populações, apesar de terem sido relatadas alterações cromossômicas, tanto em Kerala (India), quanto em Gwandong (China), regiões estas onde também ocorrem as areias monazíticas (Beir, 1990).

O potássio também é amplamente distribuído na crosta terrestre, com concentrações variando de 0,1 % nas rochas calcárias a até mais de 4 % em alguns granitos. Nas rochas da crosta terrestre, a concentração de radioatividade média do ^{40}K é de 620 Bq/kg (ou 17 pCi/g), com o basalto apresentando, em média, cerca da metade desse valor. Alguns granitos, particularmente aqueles com baixos teores de cálcio e sienito, podem apresentar concentrações acima de 1800 Bq/kg ou 50 pCi/g. Nos solos, a atividade do ^{40}K é relativamente baixa, em média de 440 Bq/kg ou 12 pCi/g (Kathren, 1998).

No entanto, Klement (1982), alerta que as práticas de adubação agrícola podem aumentar consideravelmente esses valores, já tendo sido observados valores até 10 vezes maiores que os originais em algumas regiões de práticas agrícolas intensivas.

Tanto o tório da série $4n$ quanto o urânio da série $4n+2$, incluem isótopos de rádio. Considerando-se que as concentrações de atividade do tório e do urânio são praticamente iguais em solos e rochas, o mesmo pode-se dizer dos isótopos de rádio ^{228}Ra e do ^{226}Ra , cujas concentrações de atividade em solos e rochas são, em média, de umas poucas dezenas de Bq/kg ou 1 pCi/g (UNSCEAR, 1982).

O isótopo ^{226}Ra é particularmente importante, tendo sido extraído e concentrado em várias atividades; industrial, comercial, médica e educacional. O rádio decai para o gás radônio (^{222}Rn), através de emissão alfa e, portanto, é a cabeça de uma importante sub-série que inclui o radônio. Diferentemente do urânio e do tório, o rádio é particularmente importante pois é solúvel, podendo ser levado pelas águas e lixiviar pelos solos, formando compostos que podem ser absorvidos por plantas e animais e, como membro pertencente ao grupo 2^a da Tabela Periódica, da mesma forma que o cálcio, pode ser metabolizado tanto por plantas quanto por animais (Kathren, 1998).

Mallanca et. al. (1995), afirmam estar bem definidas as duas formas de exposição humana à radioatividade proveniente de fontes naturais. A chamada **exposição interna** é atribuída à ingestão de alimentos contendo radioatividade e também à inalação do gás radônio. A chamada **exposição externa** é atribuída aos raios cósmicos e aos raios gama emitidos pelos elementos radioativos presentes nos solos, rochas e nos materiais de construção.

Segundo Mazzilli e Saueia (1999), ao se estudar a radioatividade presente nos materiais de construção é comum adotar-se um índice; o **Ra (equiv.)** chamado de “atividade equivalente do rádio”. Esse índice é definido pela Eq. 3.1:

$$\text{Ra (equiv.)} = C(^{226}\text{Ra}) + 1,43 C(^{232}\text{Th}) + 0,077 C(^{40}\text{K}) \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Onde: $C(^{226}\text{Ra})$, $C(^{232}\text{Th})$ e $C(^{40}\text{K})$ são as concentrações de atividade do rádio, do tório e do potássio, presentes num determinado material de construção.

OBS.: A Eq. 3.1 é baseada na estimativa de que 1 Bq/kg de ^{226}Ra , 0,7 Bq/kg de ^{232}Th e 13 Bq/kg de ^{40}K produzem o mesmo valor de dose advinda da radiação gama (Beretka e Mathew (1985) apud Mazzilli e Saueia (1999)).

Segundo Beretka e Mathew (1985) apud Mallanca et al. (1995), o uso de materiais de construção, nos quais a **Ra (equiv)** resultar maior do que **370 Bq/kg** é desencorajado na Austrália.

Já Mazzilli e Saueia (1999) afirmam que, para fazer comparações das doses efetivas, decorrentes da presença de radioatividade nos materiais de construção com o de outras fontes, diferentes padrões para exposição interna são disponíveis na literatura, tais como Swedjemark (1977); OECD (1979) e Steger et. al. (1992).

A Eq. 3.2, por exemplo, é uma relação que utiliza as concentrações de atividade do rádio, do tório e do potássio, presentes nos materiais de construção, para calcular a dose de radiação gama correspondente, fixando, ainda, que esta não deve exceder **1 mSv/ano**. Esta expressão, segundo Mazzilli e Saueia (1999) foi proposta por Swedjemark, em 1977.

$$[C (^{226}\text{Ra}) \div 370] + [C (^{232}\text{Th}) \div 260] + [C (^{40}\text{K}) \div 4810] \leq 1 \quad (\text{Eq.3.2})$$

Steger et. al. (1992), apud Mazzilli e Saueia (1999), adicionaram um termo à expressão 3.2, que permite incluir a radioatividade adicional, proveniente da inalação do radônio e de sua família, expressa pela Eq. 3.3. É adotada para avaliar a radioatividade dos materiais de construção em edifícios habitacionais, na Áustria.

$$\{ [C (^{226}\text{Ra}) \div 740] . (1 + 0,1 . \varepsilon . \rho . d) \} + [C (^{232}\text{Th}) \div 520] + [C (^{40}\text{K}) \div 9620] \leq 1 \quad (\text{Eq. 3.3})$$

onde: ε = fração do radônio liberada pelas paredes. Mazzilli e Saueia (1999), adotaram $\varepsilon = 0,1$

ρ = massa específica das paredes. Mazzilli e Saueia (1999), adotaram $\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$.

d = espessura das paredes. Mazzilli e Saueia (1999), adotaram $d = 0,30\text{m}$.

Mazzili e Saueia (1999), ressaltam ainda que na Eq. 3.3 não se pretende avaliar a dose de radioatividade total dentro de um determinado compartimento residencial, uma

vez que não são considerados o radônio emanado a partir do solo e nem a radiação externa, ou seja, considera-se apenas a radioatividade proveniente dos materiais de construção.

Ainda segundo esses AA., as Eq. 3.4 e 3.5 expressam o padrão adotado na Suécia, sendo que a de nº 3.4 refere-se a edifícios existentes e a de nº 3.5 a novos edifícios e foram recomendadas por um grupo de trabalho sueco do Instituto de Radioproteção.

$$[C(^{226}\text{Ra}) \div 1000] + [C(^{232}\text{Th}) \div 700] + [C(^{40}\text{K}) \div 10000] \leq 1 \quad (\text{Eq. 3.4})$$

$$[C(^{226}\text{Ra}) \div 300] + [C(^{232}\text{Th}) \div 200] + [C(^{40}\text{K}) \div 3000] \leq 1 \quad (\text{Eq. 3.5})$$

Através das Eq. 3.4 e 3.5 pode-se perceber que existe, na Suécia, uma preocupação em se adotar maior rigor na padronização para edifícios novos do que para edifícios já existentes.

3.4 Materiais cerâmicos e suas principais propriedades

3.4.1 Breve histórico

A história registra que o homem primitivo escondia-se em cavernas quando queria se abrigar das intempéries ou fugir dos animais ferozes. Porém, em determinados locais, não existiam cavernas em número suficiente para atender ao crescimento populacional e então o homem começou a construir abrigos de madeira ou mesmo de pedras, logicamente nos locais onde existiam esses tipos de materiais, em quantidades suficientes. O emprego dos materiais cerâmicos, obtidos pelo cozimento de argilas, primeiramente ao sol, material hoje conhecido por “adobe” e posteriormente queimado ao

fogo, iniciou-se nos locais onde a pedra escasseava e eram abundantes os materiais argilosos (Petrucci, 1976).

Por utilizar matéria prima abundante em quase todas as regiões da Terra, os materiais cerâmicos sempre foram relativamente baratos, tornando-se essencial na história da humanidade. Pode-se dizer que a argila, como matéria prima para confecção de tijolos, utensílios e ornamentos domésticos, foi o principal material utilizado desde os primórdios da humanidade na Terra.

Até os textos bíblicos mais antigos registram o uso de tijolos, como por exemplo, no que se refere à construção da Torre de Babel. Em Gênesis, capítulo 11, versículos 2 a 4 pode-se ler: “E disseram uns aos outros: *vamos façamos tijolos e cozamo-los ao fogo*” e depois disseram “*Vamos, façamos para nós uma cidade e uma torre cujo cimo atinja aos céus*”. E também em Êxodo, capítulo 1º, versículos 13 e 14, a respeito da construção das cidades de Pitom e Ramsés, no Egito, pelos escravos hebreus: “*Impunham-lhes (referindo-se aos egípcios como seus algozes), a mais dura servidão e amarguravam-lhes a vida com duros trabalhos na argamassa e na fabricação de tijolos*”. Poder-se-ia então gastar páginas e mais páginas enumerando os povos que fizeram intenso uso de materiais cerâmicos, reportando-se historicamente aos tempos mais antigos e chegando aos tempos atuais. Porém, com o intuito de abreviar este item pode-se dizer que, atualmente, apesar da existência de diversos outros materiais de construção, os produtos cerâmicos ainda continuam em uso e em evidência, em razão de suas diversas qualidades: razoável resistência mecânica, durabilidade, estética, conforto acústico e térmico e ainda o preço relativamente baixo (Petrucci, 1976).

3.4.2 A matéria prima dos produtos cerâmicos

Os produtos cerâmicos utilizados na construção são obtidos pela moldagem, secagem e cozimento de materiais argilosos. A matéria prima empregada na fabricação

desses produtos são as argilas e os desengordurantes (hoje mais conhecidos como fundentes), sendo as primeiras a matéria prima ativa e os segundos os materiais inertes que diminuem a plasticidade (Petrucchi, 1976). Para Verçosa (1979), nos materiais cerâmicos a argila fica aglutinada por uma pequena quantidade de vidro, que surge pela ação de cocção sobre os componentes da argila.

Na norma brasileira NBR-7181 (ABNT, 1984c), as argilas são definidas como *“aqueles solos cujo diâmetro das partículas é menor do que 5 μm (5 micra), com alta plasticidade quando umidecidas e quando secas formam torrões de difícil desagregação pela pressão dos dedos”*. Essa é uma definição que visa apenas classificar os solos quanto à granulometria. Os ceramistas estudam as argilas mais a fundo. Segundo Petrucci (1976), denomina-se *“argila ao conjunto de minerais, compostos principalmente de silicatos de alumínio hidratados, formados na crosta terrestre pela desintegração de rochas ígneas, sob a ação incessante dos agentes atmosféricos”*. Sua origem mais comum são os feldspatos (minerais existentes nos granitos e pórfiros) mas também podem se formar a partir de gnaisses e micaxistos. Esse material possui a propriedade de formar, com a água, uma pasta plástica suscetível de conservar a forma modelada, de secar e de endurecer sob a ação do calor.

Verçosa (1979), afirma que as argilas são constituídas, essencialmente, de partículas cristalinas extremamente pequenas, formadas por um número restrito de substâncias denominadas argilo-minerais. Uma argila pode ter um ou mais argilo-minerais. Os argilo-minerais são silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio, comumente com alguma percentagem de álcalis e alcalinos terrosos. Em meio a esses elementos básicos podem estar sílica, alumina, mica, ferro, cálcio, magnésio, matéria orgânica, etc. Ressalte-se que aí estão incluídos os elementos formadores do vidro. Como os argilo-minerais são resultantes da desagregação do feldspato presente nas rochas ígneas, por ação da água e do gás carbônico e como as rochas ígneas e os feldspatos são de diversos tipos, há também diversos tipos de argilo-minerais. Ocorrem, então, depósitos de natureza extremamente variada. Não existem duas jazidas de argila rigorosamente iguais. Às vezes, há diferenças acentuadas até mesmo numa mesma jazida.

Os tipos de argilo-minerais e seus componentes conferem algumas características importantes ao material cerâmico. Verçosa (1979) ensina que o caulim, por exemplo, é uma argila com amplo predomínio da caulinita, pó de cor branca que é a matéria prima para a porcelana. A caulinita, apesar de ser a mais pura forma de argilo-minerais, ainda assim, apresenta algumas impurezas como grãos de areia, óxido de ferro e outros elementos. Conforme o seu grau de pureza, pode ser usado para porcelana, louças, azulejos, refratários ou outros materiais. O óxido de ferro, normal nas rochas ígneas, comumente mistura-se com a caulinita e dá a cor vermelha ou amarelada da maioria das argilas. Em outros casos, o óxido de ferro gera pintas ou manchas e também reduz a sua propriedade de ser refratária.

O mesmo A. explica ainda que a presença da sílica livre (areia) reduz a plasticidade e o trincamento, além de diminuir a retração e facilitar a secagem. A alumina livre, conforme o tipo, pode diminuir ou aumentar o ponto de fusão. Esta reduz a plasticidade e a resistência mecânica, mas, também, diminui as deformações. Os álcalis baixam o ponto de fusão e dão porosidade o que vem a facilitar a secagem e o cozimento (queima), mas, também, reduzem a plasticidade. O cálcio age como fundente e clareia a cerâmica. A matéria orgânica, embora possa conferir maior plasticidade, torna a argila mais porosa. É ela que determina a cor escura da argila antes da queima. Durante a queima, a matéria orgânica é volatilizada. Isso acontece na faixa de temperatura entre 350 ° e 650 °C. Assim, a cor vermelha ou amarelada retorna ao material após a queima. Deve-se ressaltar que o lodo de esgoto sanitário, a ser misturado à argila nesta pesquisa, na sua maior parte é composto de matéria orgânica.

Segundo Verçosa (1979), a água é de extrema importância pois integra as argilas sob três diferentes formas:

- água de constituição, também chamada de absorvida ou de inchamento – é aquela que faz parte da estrutura da molécula;

- água de plasticidade, ou adsorvida - é aquela que adere à superfície das partículas coloidais; e,
- água de capilaridade, também chamada de água livre ou de poros - é aquela que preenche os poros e vazios.

Isso tudo tem importância na queima do material cerâmico, pois cada tipo de água só poderá ser eliminada a uma determinada temperatura, conforme se verá no item seguinte.

3.4.3 Principais propriedades das argilas

As três propriedades mais importantes das argilas são a plasticidade, a retração e o efeito do calor. Assim:

- **PLASTICIDADE E RETRAÇÃO:** um corpo plástico é definido como aquele que pode ser continuamente deformado sem ocorrência de ruptura. É o caso das argilas molhadas. Sabe-se que, ao se adicionar lentamente água a uma argila previamente seca, inicialmente ela se desagrega com facilidade e não permite moldagem. A partir de um determinado teor de umidade, a argila permite a formação de um bloco monolítico, permitindo a moldagem. Este ponto é chamado de limite de plasticidade (LP). Se a água continuar a ser adicionada, o corpo argiloso vai se tornando menos consistente e com tendência a se tornar fluido. Este teor de umidade é chamado de limite de liquidez (LL). A diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade é chamado índice de plasticidade (IP). Quanto maior o IP, maior a plasticidade. Existem ensaios padronizados para se determinar esses limites. A determinação do limite de plasticidade é de enorme importância para se poder conhecer previamente a quantidade de água a ser adicionada a uma argila para que esta se torne plástica e permita a moldagem. A moldagem manual só se torna possível com um teor de

umidade levemente superior ao do índice de plasticidade. Segundo Verçosa (1979), o LP pode variar de 10 % para as chamadas argilas gordas a até 50 % para as chamadas argilas magras. A importância disso se reflete no índice de retração, ou seja, quanto maior a quantidade de água presente, maior a retração pós-queima. É fato notório que os corpos cerâmicos, moldados a partir de uma massa plástica, com um certo teor de umidade, se deixados ao ar livre, começam a perder essa umidade. No lugar antes ocupado pela água evaporada vão ficando vazios e, conseqüentemente o conjunto retrai-se. Essa retração é proporcional ao teor de umidade e varia, também, com a composição da argila; segundo Verçosa (1979), quanto mais caulinita, maior a retração. Um efeito negativo da retração é que, pelo fato dela não ser absolutamente uniforme, os corpos cerâmicos podem vir a se deformar ou mesmo a apresentar trincas. Assim, todos os fatores que aumentam a plasticidade (o que é considerado bom), também aumentam a retração (o que é considerado ruim);

- EFEITOS DO CALOR: Pracidelli (1981), ressalta a importância do processo de queima na qualidade do produto cerâmico e ensina que, durante o processo de queima, à medida que a temperatura aumenta, verificam-se os seguintes fenômenos:
 - um pouco acima da temperatura de 100 °C, ocorre a eliminação da água higroscópica ou de capilaridade, isto é, da umidade remanescente na peça, que ocorre quando a secagem não foi absolutamente perfeita ou se a peça tiver reabsorvido umidade do ambiente;
 - a 200 °C mais ou menos, dá-se a eliminação da água coloidal (também chamada de plasticidade ou água adsorvida), aquela que permanece nas partículas da argila, mesmo com uma boa secagem;
 - entre 350 °C e 650 °C, dá-se a decomposição das substâncias orgânicas, com liberação da água de constituição e a eliminação de gás carbônico (CO₂). Essas substâncias podem estar contidas nas argilas em maior ou menor quantidade. Nesta

faixa de temperaturas começa, também, a dissociação dos sulfetos e dos sulfatos, com a liberação de gás sulfuroso;

- entre 800 °C e 950 °C, dá-se a decomposição dos carbonatos, como por exemplo, os calcários e dolomitas, com liberação de gás carbônico (CO₂);
- a partir de 900 °C verifica-se a reação química da sílica e da alumina com os elementos fundentes, reação que dá lugar à formação de sílico-aluminatos complexos, que proporcionam ao corpo cerâmico as características de dureza, estabilidade e resistência a vários agentes químicos; e,
- acima de 1000 °C, a temperatura máxima de queima para cerâmica vermelha, há variação de características de acordo com a composição química e mineralógica da massa, proporcionando a dureza, a compactação e a impermeabilidade (sinterização) desejadas.

Verçosa (1979) afirma que *“a qualidade de um produto cerâmico depende, acima de tudo, da quantidade de vidro formado, que é ínfima nos tijolos e grande nas porcelanas”*. Para os tijolos feitos com lodo, a temperatura de queima dos tijolos é importante na questão da fixação de EPTs na matriz cerâmica, conforme visto no item 3.3.1. Prevê-se, também, que a queima desses tijolos, pela grande quantidade de matéria orgânica presente no lodo (geralmente em torno de 30 a 50 %), trará como consequência uma maior quantidade de vazios e, portanto, uma menor massa específica aparente.

3.4.4 Principais propriedades dos corpos cerâmicos

Verçosa (1979), afirma ainda que é bastante extensa a faixa de variação das propriedades das cerâmicas, dependendo da constituição, cozimento, processo de

moldagem, etc. Em relação ao peso, existem cerâmicas mais leves do que a água e outras de grande peso.

O mesmo A. define volume aparente como *“o volume de água deslocado por uma peça já saturada por 24 horas de imersão em água”*. Assim, define-se peso específico aparente como a relação entre o peso da peça seca ao ar e seu volume aparente.

Afirma ainda esse A. que, a resistência ao desgaste depende muito da quantidade de vidro formado durante o processo de queima, a absorção de água depende do grau de compactação durante a moldagem, das constituições iniciais, etc. A absorção, também chamada de porosidade aparente, é a percentagem de aumento de peso que a peça apresenta após 24 horas de imersão em água, relacionada com o seu peso seco. Já a resistência mecânica depende muito da quantidade de água usada na moldagem. A experiência demonstra que os produtos cerâmicos são tanto mais resistentes quanto mais homogênea, fina e cerrada a sua granulação, e quanto melhor o cozimento ou queima, além do grau de vitrificação que, como já foi salientado, depende do valor da temperatura utilizada e das características dos materiais empregados.

3.4.5 Tijolos feitos com lodo de esgoto

Deve-se salientar que o maior entusiasmo no uso de lodos de esgoto sanitário para a fabricação de produtos cerâmicos, fica por conta dos ambientalistas. No Brasil, percebe-se que os ceramistas são geralmente avessos à introdução de substâncias que possam diminuir a qualidade de seus produtos.

Sabe-se que os lodos de esgoto sanitário, quando misturados à argila na forma de torta (lodos desaguados em leitos de secagem ou através de processos mecânicos), ou seja, quando estes ainda apresentam percentual de umidade da ordem de 60 a 85 % e, considerando-se ainda as mesmas condições de fabricação dos tijolos feitos apenas com

argila, normalmente provocam diminuição da resistência, podem causar trincas na secagem das peças, exigindo assim cuidados especiais na secagem e no próprio manuseio do lodo, por conta da eventual presença de microrganismos patogênicos, etc. Para os ceramistas, talvez as únicas vantagens sejam; a expansão do tempo de utilização de uma determinada jazida e uma certa economia de água, se a torta de lodo for utilizada sem uma secagem adicional.

Apesar disso, foram feitas no Brasil algumas pesquisas com utilização de resíduos sólidos (não especificamente o lodo de esgoto), misturados à argila em corpos cerâmicos. Como exemplo, pode-se citar Pracidelli (1983), que pesquisou a utilização de serragem de madeira e de bagaço de cana de açúcar. Da Silva e Belo (1996), utilizaram um resíduo orgânico não tóxico, gerado na indústria petroquímica, misturado à argila, para a obtenção de tijolos maciços e blocos cerâmicos e Nascimento, Almeida Filho e Zakon (2000), utilizaram cinzas de resíduos sólidos urbanos (lixo), na fabricação de materiais cerâmicos.

Percebe-se, no entanto, que a utilização do lodo de esgoto é mais freqüente nos países ou regiões onde a terra ou o custo da mesma é um fator altamente limitador às formas tradicionais de descarte do lodo, tais como: a disposição em aterros sanitários junto com os RSU (lixo); a utilização como cobertura das camadas de RSU (substituindo o solo normalmente utilizado); ou ainda em aterros exclusivos. É o caso das cidades situadas em ilhas, nas quais o processo de incineração, transformando o lodo em cinzas, com a finalidade de diminuição dos volumes, é uma forte tendência, que apesar de ser considerada ainda de alto custo (varia de US 100 a US 400 por tonelada seca), segundo O'Dette (1999), em alguns países vem também sendo muito utilizado.

Assim é que, em Singapura, com Tay (1987), Tay e Show (1991, 1994 e 1997), Tay, Yip e Show (1991), há relatos de pesquisas com a utilização de lodo de esgoto e suas cinzas na fabricação de tijolos, de cimento, de agregados leves para concreto, etc.

No Japão, aplicando alta tecnologia na prensagem e na queima, estão sendo aproveitadas, principalmente, as cinzas do lodo para a fabricação de tijolos, inclusive um

tipo de tijolo com 100 % de cinzas (Okuno e Takahashi, 1997), na fabricação de vidro cerâmico (Endo, 1997) e também de cimento Portland (Onaka, 2000).

Brian (1984a e 1984b), Alleman e Berman (1984), Slim e Wakefield (1991), Trauner (1993), também relatam suas pesquisas com tijolos feitos com lodo de esgoto e/ou cinzas de lodo nos EUA. Assim como Anderson et. al. (1996), no Reino Unido e Wiebusch e Seyfried (1997), na Alemanha.

Tay e Show (1997), apresentaram os resultados dos principais parâmetros cerâmicos, por eles obtidos para os tijolos feitos com torta de lodo de esgoto e com as cinzas de lodo, e compararam com os resultados de outros pesquisadores, tais como Alleman e Berman (1984) e Trauner (1993). Nas Tabelas 3.16 e 3.17 são apresentados alguns desses resultados.

Tabela 3.16 - Comparação de resultados obtidos por diferentes pesquisadores, para os principais parâmetros cerâmicos, nos tijolos feitos com lodo de esgoto sanitário (torta).

% de lodo na mistura em peso seco	Massa específica (kg/dm ³)		Absorção d'água (%)		Retração pós-queima (%)		Resist. à compressão (MPa)	
	Alleman e Berman (1984)	Tay (1987)	Alleman e Berman (1984)	Tay (1987)	Alleman e Berman (1984)	Tay (1987)	Alleman e Berman (1984)	Tay (1987)
0,0	2,09	2,38	6,4	0,03	-	9,91	34,5	87,2
4,0	1,94	-	7,5	-	-	-	30,6	-
8,6	1,91	-	8,6	-	-	-	26,2	-
10,0	-	2,32	-	0,74	-	10,15	-	59,9
13,9	1,80	-	10,0	-	-	-	24,0	-
20,0	1,76	2,24	13,6	1,37	-	10,84	20,7	45,9
27,3	1,63	-	15,8	-	-	-	18,0	-
30,0	-	2,17	-	2,58	-	12,26	-	39,5
40,0	-	1,98	-	3,63	-	12,87	-	37,9

OBS.: Alleman e Berman (1984), conformação por prensagem e temperatura de queima 1100 °C

Tay (1987), conformação por extrusão e temperatura de queima de 1080 °C

Fontes: Alleman e Berman (1984); Tay (1987) e Tay e Show (1997).

Tabela 3.17 - Resultados obtidos por diferentes pesquisadores, para os principais parâmetros cerâmicos, nos tijolos feitos com as cinzas de lodo de esgoto sanitário.

% de cinzas de lodo na mistura em peso	Massa específica (kg/dm ³)			Absorção d'água (%)			Retração pós-queima (%)			Resist. à compressão (MPa)		
	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
0	2,39	1,88	-	0,03	13,3	-	9,91	1,0	-	87,2	43,0	-
10	2,42	1,69	-	0,07	18,8	-	9,55	1,1	-	85,7	30,0	-
20	2,46	1,56	-	0,11	19,4	-	9,10	2,1	-	80,0	20,0	-
30	2,50	1,50	-	1,39	22,5	-	9,36	3,5	-	70,7	18,0	-
40	2,55	-	-	1,52	-	-	9,79	-	-	70,5	-	-
50	2,58	-	-	1,70	-	-	10,51	-	-	69,4	-	-
100	-	-	1,6	-	-	-	-	-	8-14	-	-	78-196

OBS.:

- (1) Resultados obtidos por Tay e Show (1997) que fizeram a conformação por extrusão e utilizaram temperatura de queima de 1080 °C;
- (2) Resultados obtidos por Trauner (1991), que fez a conformação por prensagem e utilizou temperatura de queima de 1040 °C;
- (3) Resultados obtidos por Okuno e Takahashi (1997), que fizeram a conformação por prensagem e utilizaram temperatura de queima de 1025 °C

Fontes: Tay e Show (1997), Trauner (1991), Okuno e Takahashi (1997).

Analisando-se os resultados e demais dados apresentados nas Tabelas 3.16 e 3.17, percebe-se que foram utilizados métodos diferentes de conformação, diferentes temperaturas de queima, logicamente também diferentes materiais argilosos, etc., o que, a princípio, torna difícil a comparação de resultados. Porém, o que mais chama a atenção são os valores de resistência à compressão que foram obtidos por esses pesquisadores, muito acima dos valores mínimos padronizados no Brasil para os tijolos maciços, pela norma brasileira NBR-7170 (ABNT, 1983b) e apresentados na Tabela 3.18. Alleman e Berman (1984), afirmaram que o valor mínimo para a resistência à compressão, fixado pela ASTM é de 3000 psi (20,7 MPa).

Tabela 3.18 - Resistência mínima à compressão em relação à categoria do tijolo maciço

Categoria	Resistência mínima à compressão (MPa)
A	1,5
B	2,5
C	4,0

Fonte: NBR-7170 (ABNT, 1983b)

4. METODOLOGIA

4.1 Resumo dos procedimentos utilizados nesta pesquisa

Neste item 4.1 é apresentado um resumo geral dos procedimentos utilizados nesta pesquisa. No item 4.2 são explicitados os materiais, dispositivos e equipamentos e a partir do item 4.3, todos os procedimentos foram melhor detalhados.

Estudou-se o aproveitamento de 2 diferentes tipos de lodos de esgoto, aqui denominados **LD1** e **LD2**, ambos provenientes da Estação de Tratamento de Esgoto Jesus Neto, situada no Bairro do Ipiranga, São Paulo – SP. Esses resíduos foram misturados a um solo argiloso, em diferentes proporções, adiante explicitadas, com o objetivo de se preparar massas cerâmicas e com elas moldar, manualmente, tijolos cerâmicos maciços.

O **LD1** é a mistura do lodo removido no decantador primário e do excesso de lodo secundário, proveniente de um reator de lodos ativados. Após a sua remoção nos decantadores, este lodo passa pelas seguintes unidades de processamento: espessamento (para diminuição de volumes), digestão anaeróbia (para diminuir a putrescibilidade e a atividade dos microrganismos), condicionamento químico com cal e cloreto férrico (para a melhoria das características de separação sólido-líquido), ou seja, para facilitar o desaguamento, que é feito mecanicamente num filtro-prensa de placas.

O LD2 é gerado na mesma ETE mas provém de um RAFA – Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente e sai dessa unidade sem passar por nenhum outro tipo de tratamento posterior, nem mesmo o condicionamento químico para o desaguamento, pois este é feito de forma natural (por evaporação e infiltração), num leito de secagem, ao ar livre.

Previu-se que a presença da cal, utilizada no condicionamento químico do LD-1, deveria provocar uma substancial diferença de pH entre o LD1 e o LD2 (no caso do LD1 um pH básico). No que se refere à utilização como matéria prima para confecção de tijolos, isto deveria interferir negativamente em algumas características cerâmicas do tijolo feito com o LD1, porém deveria interferir positivamente na questão da não solubilização de alguns metais.

As amostras de lodo foram coletadas na ETE, na forma de um resíduo semi-sólido (lodo desaguado, também chamado de torta). Antes da mistura com o solo, para a preparação das massas cerâmicas, os lodos LD1 e LD2 foram previamente destorroados, secos sob temperatura de 105 °C (aqui chamados de lodo seco) e passados na peneira de abertura 2 mm. Parte desse material já peneirado foi submetido à queima sob temperatura de 900 °C (aqui chamados de cinzas de lodo). Cada diferente resíduo ficou armazenado em recipientes plásticos com tampa, antes de sua efetiva utilização.

O solo argiloso foi coletado num sítio em Nazaré Paulista, SP e, após ter sido seco ao ar e passado na peneira de abertura 2 mm, foi armazenado em recipientes plásticos com tampa. Para fazer as 15 diferentes massas cerâmicas (MCs), o solo foi misturado com cada um dos dois tipos de lodo e suas cinzas, nas seguintes proporções: 1 MC foi feita só com o solo argiloso (testemunho), 3 MCs (10, 20 e 30 %) com o lodo seco LD1; 3 MCs (10, 20 e 30 %) com o lodo seco LD2; 4 MCs (10, 20, 30 e 40 %), com cinzas do LD1 e, finalmente, 4 MCs (10, 20, 30 e 40 %) com cinzas do LD2.

As massas cerâmicas foram preparadas, adicionando água ao solo ou à mistura solo-lodo, numa percentagem de água 2 a 3 % superior ao valor do limite de

plasticidade obtido para o solo e adicionada mais água sempre que a massa não se apresentava suficientemente plástica para se obter uma boa moldagem. Os materiais secos foram previamente misturados, numa masseira apropriada, durante cerca de 10 minutos e, só depois de bem homogeneizada, foi adicionada a água.

A moldagem dos corpos de prova foi feita manualmente, utilizando-se formas de madeira, obtendo-se tijolos maciços de pequeno tamanho (dimensões nominais de 10 x 5 x 2,5 cm). Esses tijolos foram submetidos aos processos normais de secagem ao ar, por um período mínimo de 10 e máximo de 16 dias, posterior secagem em estufa a 105 °C, por 24 horas, e queima a 950 °C, de acordo com um diagrama de queima (tempo x temperatura), fixado a partir de testes de resistência à compressão do produto final, previamente executados com a massa feita apenas com a argila. Através desses corpos de prova foram medidos os principais parâmetros de controle dos tijolos, tais como: massa específica, retração volumétrica, absorção d'água e resistência final à compressão e à flexão, antes e após a queima, utilizando-se as metodologias descritas no item 4.5. O objetivo era conhecer as principais características tecnológicas de cada massa cerâmica, para permitir determinar a máxima percentagem de resíduo recomendada para cada um dos 4 diferentes tipos de resíduos ensaiados.

Foram também determinadas as concentrações dos seguintes EPTs - elementos potencialmente tóxicos (As, Cd, Pb, Cr, Cu, Ni, Se, Zn) e de outros metais (Al, Ba, Ca, Fe, Mg, Mn, K, Si, Na e Ti), tanto no lodo quanto no solo, através de testes prévios no solo seco ao ar, no LD-1 e LD-2 secos a 105 °C e nos lodos LD-1 e LD-2, isentos de matéria orgânica (após queima a 600 °C), conforme detalhado nos itens 4.3.9 e 4.4.5. Essas concentrações foram comparadas aos padrões para lançamento em solo agrícola que é uma das opções para o aproveitamento do lodo.

Foram feitos testes de lixiviação e de solubilização no produto final, utilizando-se os procedimentos descritos nos itens 4.5.3.15 e 4.5.3.16, com amostras preparadas após a ruptura dos corpos de prova, dentre aqueles moldados com a maior percentagem de cinzas de lodo, ou seja, nas 2 situações de maior concentração possível de EPTs (solo +

40 % de cinzas do LD-1, solo + 40 % de cinzas do LD-2). Mediu-se as concentrações dos mesmos EPTs e demais metais listados no parágrafo anterior.

Conforme relatado no item 3.3.2, a presença de materiais radioativos no lodo de esgoto sanitário é um assunto que está entrando agora na pauta das preocupações das autoridades ambientais norte-americanas, não só quanto ao aproveitamento do lodo como também na manipulação do mesmo pelos trabalhadores das ETEs. Por esse motivo, foram também determinadas as concentrações (em mg/kg e Bq/kg), presentes no lodo e no solo, para os seguintes elementos radioativos: urânio (^{238}U e ^{234}U); tório (^{232}Th) e potássio (^{40}K).

Os elementos anteriormente assinalados são todos de origem natural e para determinar suas concentrações utilizou-se os procedimentos descritos nos itens 4.3.10 e 4.4.6. Os radioisótopos anteriormente citados apresentam os maiores valores de meia-vida (ver Tabela 3.13). Podem ser considerados como elementos de maior preocupação para efeitos de longo prazo, se incorporados aos tijolos, através do lodo ou do solo.

Preparou-se ainda amostras de uma mistura de solo seco ao ar com as cinzas do LD-1 e do LD-2, conforme procedimentos descritos no item 4.5.3.17. Nestas amostras foram medidas as concentrações dos radionuclídeos rádio (^{226}Ra), tório (^{232}Th) e potássio (^{40}K). Com esses resultados foi possível estimar as consequências de uma eventual utilização das cinzas desses lodos, como material de construção, em termos de exposição pública à radioatividade. Para essa estimativa foram utilizadas as expressões 3.1 a 3.5, apresentadas no item 3.3.2.6.

Na Tabela 4.1 é apresentado um resumo geral dos ensaios e procedimentos utilizados nesta pesquisa, relacionando o item em que o mesmos foram detalhados.

No item 4.2 são apresentados os materiais, dispositivos e equipamentos e nos itens 4.3 a 4.5 foram detalhados os ensaios e procedimentos. No item 4.6 foi apresentado o procedimento para tratamento estatístico dos resultados obtidos nesta pesquisa.

Tabela 4.1 - Resumo geral dos ensaios e procedimentos utilizados nesta pesquisa

DISCRIMINAÇÃO		VER ITEM
ENSAIOS E PROCEDIMENTOS NO SOLO ARGILOSO		4.3
Escolha do material argiloso a ser utilizado		4.3.1
Análise granulométrica do solo		4.3.2
Limite de plasticidade do solo		4.3.3
Limite de liquidez do solo		4.3.4
Teor de umidade hidrocópica do solo		4.3.5
Perda de massa do solo à temperatura de 600°C		4.3.6
Valor do pH do solo		4.3.7
Caracterização dos argilo-minerais presentes no solo		4.3.8
Concentração de elementos potencialmente tóxicos no solo		4.3.9
Concentração de elementos radioativos no solo		4.3.10
ENSAIOS E PROCEDIMENTOS NOS LODOS DE ESGOTO SANITÁRIO		4.4
Teor de umidade higroscópica nos lodos e cinzas		4.4.1
Perda de massa dos lodos à temperatura de 600°C		4.4.2
Valor do pH dos lodos e de suas cinzas		4.4.3
Caracterização dos minerais presentes nos lodos e em suas cinzas		4.4.4
Concentração de elementos potencialmente tóxicos nos lodos		4.4.5
Concentração de elementos radioativos nos lodos		4.4.6
ENSAIOS E PROCEDIMENTOS NAS MASSAS CERÂMICAS		4.5
Nomenclatura adotada		4.5.1
Procedimentos preliminares		4.5.2
Procedimentos complementares		4.5.3
Determinação do volume original " $V_{orig.}$ " de cada forma de tijolo		4.5.3.1
Massa específica aparente pós-preparação de cada MC " γ_{pp} "		4.5.3.2
Teor de umidade das MCs na moldagem dos CPs		4.5.3.3
Perdas de massa das MCs à temperatura de 600°C		4.5.3.4
Perdas de massa durante a secagem ao ar		4.5.3.5
Secagem à temperatura de 105°C e pesagem		4.5.3.6
Queima à temperatura de 950°C e pesagem		4.5.3.7
Absorção d'água pós-imersão "A"		4.5.3.8
Retração volumétrica pós-queima "RV"		4.5.3.9
Massa específica aparente úmida pós-moldagem " $\gamma_{pm.}$ "		4.5.3.10
Massa específica aparente pós-queima " γ_{pq} "		4.5.3.11
Massa específica aparente pós-imersão em água " γ_{pi} "		4.5.3.12
Resistência à compressão pós-secagem e pós-queima		4.5.3.13
Resistência à flexão pós-secagem e pós-queima		4.5.3.14
Concentração de EPTs - teste de solubilização		4.5.3.15
Concentração de EPTs - teste de lixiviação		4.5.3.16
Concentração de radionuclídeos nas misturas solo-cinzas de lodo		4.5.3.17
Tabulação e tratamento estatístico dos resultados		4.6

4.2 Materiais, dispositivos e equipamentos

O solo e os lodos utilizados já foram descritos no item 4.1. Para a realização dos ensaios e procedimentos previstos na Tabela 4.1, estão listados nas respectivas normas de ensaio os principais materiais, dispositivos e equipamentos, bem como suas características. No entanto, em função de alguns procedimentos adaptados, utilizados nesta pesquisa e, particularmente, nestes casos, teve-se que ter à disposição:

- balanças com capacidades de 200 g , de 2 kg e de 25 kg; e com sensibilidades de 0,01 g , de 0,1 g e de 25 g respectivamente;
- estufa com controle de temperatura entre 0° e 200 °C;
- forno-mufla com controle de temperatura na faixa entre 0° e 1200 °C;
- aparelho de dispersão da argila e hexametáfosfato de sódio (para dispersão);
- densímetro de bulbo e termômetro graduado em 0,5 °C e faixa de 0° a 50 °C;
- cronômetro digital e relógio despertador para laboratório;
- Peneiras: com aberturas 9,5 - 4,0 - 2,0 - 1,2 – 0,6 – 0,42 – 0,297 – 0,15 e 0,075 mm;
- escova com cerdas metálicas (para limpeza das peneiras);
- agitador mecânico de peneiras;
- cápsulas de porcelana de pequeno e médio tamanhos;
- espátulas de variados tamanhos;
- gabarito cilíndrico de vidro com 3 mm de diâmetro;

- placa de vidro esmerilhada (com 30 cm de lado);
- aparelho de Casagrande, acompanhado de cinzel apropriado;
- dessecador;
- masseira para mistura seca do solo-lodo e mistura úmida das massas cerâmicas (ver Figuras A43 e A44 - Anexos). Utilizada masseira de pão, com capacidade de 7,0 kg;
- medidor eletropotenciométrico de pH;
- vidrarias e utensílios de laboratório químico tais como: béquer, proveta, bureta c/ suporte, pipeta, de várias capacidades, bastões de vidro para agitação manual etc.;
- prensa hidráulica com capacidade para medir de 0 a 2500 kgf, com precisão de leitura de 5 kgf (ver Figuras A45 a A47 - Anexos); utilizada no ensaio de compressão dos tijolos, dotada dos dispositivos previstos na NBR-6460 (ABNT, 1983a).
- recipientes de alumínio (formas) para conter o lodo , para secagem em estufa;
- recipientes de cerâmica, de tamanho apropriado, utilizado para conter o lodo no forno-mufla, à temperatura de 900 °C, na sua transformação em cinzas;
- recipientes de plástico, com tampa, para armazenagem de lodos, cinzas e solos já secos e prontos para a mistura nas massas cerâmicas;
- luvas de borracha para manuseio das massas cerâmicas úmidas e máscaras de proteção contra poeira, utilizadas no preparo e manuseio de solo e lodo secos;
- dispositivo para medida de pequenas cargas de ruptura (até 30 kgf), com precisão de 0,25 g. Foi utilizado para a realização do ensaio de resistência à flexão dos tijolos (ver esquema na Figura 4.1, e fotos nas Figuras A49 e A50 nos Anexos);

Chapas de aço, vazadas, de 2300 g cada, colocadas uma a uma sobre as outras, até a ruptura. Ajuste fino com água.

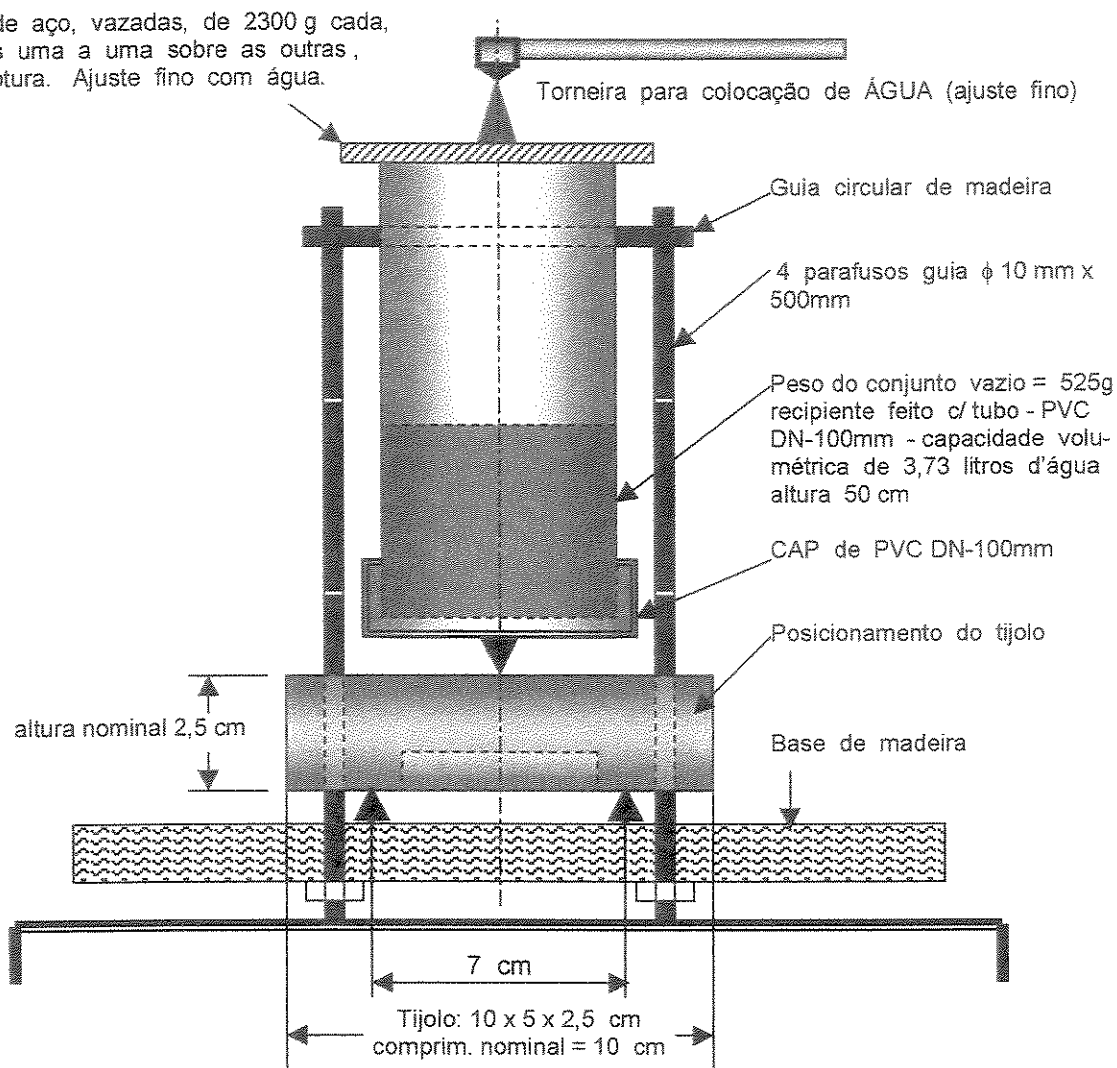


Figura 4.1 - Corte esquemático do dispositivo para medida da carga de ruptura à flexão

- recipientes de plástico (bandejas), para manuseio das massas cerâmicas, durante a conformação dos corpos de prova;
- formas de madeira, utilizadas na moldagem dos tijolos, com dimensões nominais de 10 x 5 x 2,5 cm;
- dispositivo para medida do volume final dos corpos de prova (ver esquema na Figura 4.2 e foto na Figura A52 nos Anexos);

PROCEDIMENTO

- pesar o bequer vazio, P_B ;
- estabilizar o nível do recipiente (tubo de PVC DN-100mm com CAP na parte inferior);
- posicionar o bequer embaixo do ladrão (tubo latão $\phi = 8\text{mm}$);
- colocar o tijolo no recipiente;
- esperar a estabilização do nível;
- pesar o bequer com o líquido vertido pelo ladrão P_T ;
- medir a temperatura da água;
- verificar a massa específica correspondente ME_A (Tabela 4.2);
- calcular o volume do tijolo:

$$V_{\text{tij.}} = (P_T - P_B) \div ME_A$$

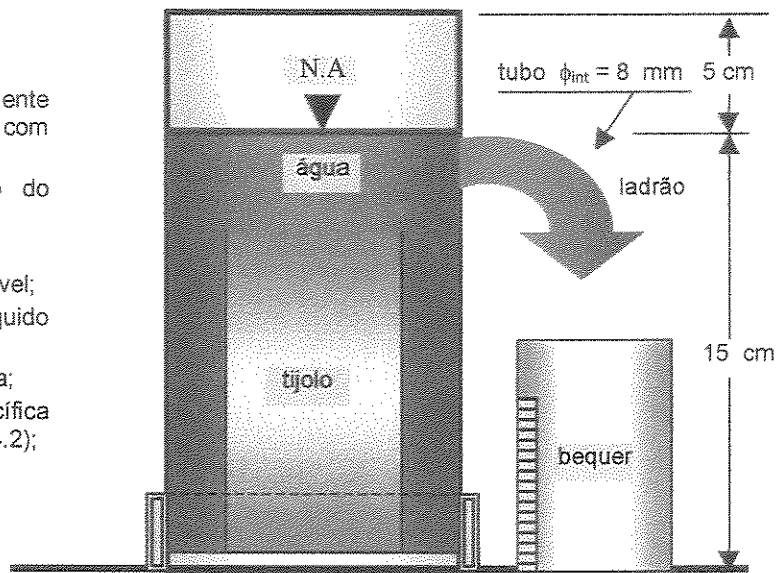


Figura 4.2 - Dispositivo e procedimento para medida do volume final dos corpos de prova

Tabela 4.2 - Variação da massa específica da água com a temperatura

Temperatura da água T ($^{\circ}\text{C}$)	Massa específica da água ME_A (g/L)	Temperatura da água T ($^{\circ}\text{C}$)	Massa específica da água ME_A (g/L)
14	999,28	21	998,04
15	999,13	22	997,82
16	998,98	23	997,59
17	998,81	24	997,35
18	998,64	25	997,10
19	998,45	26	996,84
20	998,23	27	996,57

Fonte: Adaptado de Azevedo Netto et. al. (1998)

- dispositivo (recipiente de 2 litros e agitador magnético), usados no preparo da amostra para o teste de lixiviação;
- equipamentos e dispositivos para determinação da concentração de elementos radioativos no solo e nos lodos. O detector de radiação gama de Iodeto de sódio, dopado com Tálcio $[\text{Na.I.Tl}]$, modelo 802, da marca Canberra, pertence ao Laboratório de Vidros e Datação da FATEC-SP.

4.3 Ensaios e procedimentos no solo argiloso

4.3.1 Escolha do material argiloso a ser utilizado

Foram coletados 3 diferentes tipos de solos argilosos e escolhido aquele que apresentou melhor desempenho, como matéria prima para massas cerâmicas, após terem sido submetidos aos seguintes procedimentos e ensaios:

- Análise granulométrica de solos. Utilizada a NBR-7181 (ABNT, 1984c) – ver item 4.3.2);
- Limite de plasticidade de solos, “LP”. Utilizada a NBR-7180 (ABNT, 1984b) – ver item 4.3.3);
- Limite de liquidez de solos, “LL”. Utilizada a NBR-6459 (ABNT, 1984a) – ver item 4.3.4);
- Determinação da umidade higroscópica (do solo armazenado após secagem ao ar). Utilizado método gravimétrico por secagem em estufa a 105 ° C, até peso constante – ver item 4.3.5);
- Determinação da perda de massa à temperatura de 600 °C (por 1 hora), num forno-mufla (ver item 4.3.6). Essa perda pode ser associada à percentagem de matéria orgânica presente no solo. Quanto maior a percentagem de matéria orgânica maior a perda de massa durante a operação de queima dos corpos cerâmicos.

Ao mesmo tempo, foram preparadas massas cerâmicas com esses 3 tipos de solos, para uma avaliação da trabalhabilidade das mesmas. Com elas foram moldados corpos de prova (tijolos maciços conformados manualmente em formas de madeira com 10 x 5 x 2,5

cm), para observar certos aspectos visuais relacionados à qualidade dos mesmos (trincas, empenamentos por retração na secagem ao ar etc), além da determinação da resistência à compressão dos CPs, fatores determinantes na escolha do solo mais apropriado,

O solo escolhido foi sempre coletado na mesma jazida, previamente destorroado e colocado num recipiente apropriado (bandeja metálica), para secagem ao ar, em ambiente coberto. Após a secagem, esse solo foi peneirado na peneira nº 10-ASTM (abertura de 2,0 mm), descartando-se a porção retida nessa peneira. A porção de solo que passou pela peneira nº 10 foi, então, estocada em recipiente plástico, com tampa, para ser posteriormente utilizada nas massas cerâmicas.

4.3.2 Análise granulométrica do solo

Foram feitos ensaios para obtenção da curva granulométrica do solo, utilizando-se os procedimentos previstos na norma brasileira NBR-7181 (ABNT, 1984c). Através da curva granulométrica pôde-se identificar as percentagens de areia, silte e argila, presentes no solo escolhido. Somando-se aos resultados de LL, LP e IP (ítems 4.3.3 e 4.3.4), foi possível então classificar esse solo, utilizando-se o método do BPR (Vargas, 1977).

4.3.3 Limite de plasticidade do solo

O limite de plasticidade do solo foi determinado através dos procedimentos previstos na norma brasileira NBR-7180 (ABNT, 1984b). O valor obtido serviu como base para se fixar a quantidade de água a ser adicionada à massa cerâmica. Para obtenção de uma massa cerâmica com plasticidade adequada à moldagem manual, o teor

de umidade da mesma deverá estar ligeiramente superior ao limite de plasticidade do material.

4.3.4 Limite de liquidez do solo

O limite de liquidez do solo foi determinado através dos procedimentos previstos na norma brasileira NBR-6459 (ABNT, 1984a). O valor obtido serviu como base para o cálculo do índice de plasticidade $IP = LL - LP$ (Vargas, 1977).

4.3.5 Teor de umidade higroscópica do solo

Antes da preparação de cada massa cerâmica, fez-se a determinação do teor de umidade higroscópica do solo seco ao ar, através da secagem em estufa a 105 °C, conforme procedimentos a seguir descritos:

- tomou-se 3 cápsulas de porcelana, identificando-as com lápis de grafite. Estas foram levadas posteriormente a um forno mufla, à temperatura de 600 °C, por um tempo mínimo de 1 hora. Em seguida foram deixadas para esfriar em dessecador e pesou-se, anotando o valor P_1 de cada uma delas (peso da cápsula vazia, isenta de umidade e/ou de resíduos orgânicos);
- preencheu-se as cápsulas com (10 g $\pm$ 0,1 g) do solo previamente seco ao ar e anotou-se o valor $P_2 = P_1 + \text{peso da amostra de solo}$. Levou-se as cápsulas à estufa, à temperatura de 105 °C por 1 hora, esfriou-se em dessecador, pesou-se e repetiu-se essa operação até a obtenção do peso constante P_3 ;
- calculou-se o teor de umidade do solo seco ao ar (h), através da Eq. 4.1:

$$h = [(P_2 - P_3) \div (P_3 - P_1)] \times 100 \quad [\%] \quad (\text{Eq. 4.1})$$

- calculou-se a média aritmética do teor de umidade obtido com as três amostras.

4.3.6 Perda de massa do solo à temperatura de 600 °C

Foi determinada a percentagem de perda de massa do solo em questão (Δ_{M600}), obtida a partir da média aritmética de 3 amostras, conforme procedimentos a seguir descritos:

- utilizou-se as mesmas amostras citadas no item 4.3.5, levadas ao forno-mufla, sob temperatura de 600 °C, pelo tempo de 1 hora. Esfriou-se em dessecador e pesou-se, obtendo o valor P_4 . Calculou-se a perda de massa, sob temperatura de 600 °C, através da Eq. 4.2:

$$\Delta_{M600} = [(P_3 - P_4) \div (P_3 - P_1)] \times 100 \quad [\%] \quad (\text{Eq. 4.2})$$

Obs.: Quanto maior a perda de massa a 600 °C maior é o teor de matéria orgânica presente, podendo-se esperar maiores perdas de massa na queima da massa cerâmica.

4.3.7 Valor do pH do solo

Para determinar o valor do pH do solo, utilizou-se a média aritmética de 3 amostras e o procedimento preconizado por Raij et al. (1987), a seguir descrito:

- pesou-se ($10 \pm 0,1$ g) de solo e colocou-se em um bequer de 40 ml. Adicionou-se 25 ml de água destilada e agitou-se com um bastão de vidro por 15 minutos. Deixou-se em repouso por 1 hora e mediu-se o valor do pH com medidor eletropotenciométrico.

4.3.8 Caracterização dos argilo-minerais presentes no solo

É um ensaio de caracterização que permite aos especialistas (ceramistas), conhecer e prever o comportamento da massa cerâmica feita com determinado solo, de acordo com os argilo-minerais presentes e conforme algumas características citadas no item 3.4.2. A determinação dos argilo-minerais no solo, foi feita pelo método de análise qualitativa por difratometria de raio-X, através do procedimento DQ-LCFM-PE-004, utilizando difratômetro RIGAKU RINT- 2000, radiação K-alfa do cobre, com intensidade de corrente de 20 mA e tensão de 40 kV. Essas análises foram feitas no Laboratório de Caracterização Física de Materiais, do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT-SP).

4.3.9 Concentração de elementos potencialmente tóxicos no solo

Visando conhecer as concentrações de elementos potencialmente tóxicos (EPTs), no solo, determinou-se 8 dos 10 elementos constantes da listagem da USEPA, no 40 CFR - parte 503 (USEPA, 1993). Foram eles: arsênio (As), cádmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), chumbo (Pb), níquel (Ni), selênio (Se) e zinco (Zn). As concentrações de outros metais foram também determinadas: alumínio (Al), bário (Ba), cálcio (Ca), ferro (Fe), magnésio (Mg), manganês (Mn), potássio (K), sódio (Na) e titânio (Ti). Porém, por incompatibilidade do método utilizado não foi possível determinar as concentrações de mercúrio e de molibdênio, que também fazem parte da listagem de EPTs da USEPA. As amostras foram preparadas em um forno microondas Questron – QW-3000, pelo método

EPA-3051 - “Solubilização dos elementos potencialmente disponíveis, sem permitir alteração da estrutura cristalina de nitratos” (USEPA, 1986). A leitura dos espectros foi feita num equipamento conhecido como ICP - “Inductively Coupled Argon Plasma Emission Spectrometry”. Tanto a preparação das amostras quanto as leituras foram feitas no Laboratório de Espectrometria de Emissão e Absorção Atômica do Instituto de Química da USP - São Paulo.

4.3.10 Concentração de elementos radioativos no solo

A preparação das amostras a serem ensaiadas foi feita por secagem do material a 105 °C, peneiramento na peneira de nº 50-ASTM (abertura de 0,297mm) e adensamento cuidadoso em uma cápsula circular de plástico transparente, com diâmetro $\phi = 6,2$ cm e altura de 2,2 cm e cujo volume aproximado é de 66,4 cm³. Essas cápsulas foram colocadas num detector de radiação gama de iodeto de sódio, dopado com tálio [NaI (Tl)], modelo 802, marca Canberra, pertencente ao Laboratório de Vidros e Datação da FATEC-SP. O tempo de leitura foi de 5×10^4 segundos. Com esse equipamento foi possível estimar a concentração de atividade (em Bq/kg), dos seguintes radionuclídeos naturais: urânio (²³⁸U, ²³⁵U), Tório (²³²Th) e de potássio (⁴⁰K), utilizando-se a Eq. 4.3.

$$C = A \div (E \cdot T \cdot I \cdot P) \quad [\text{Bq/kg}] \quad (\text{Eq. 4.3})$$

onde: C = concentração de atividade do radionuclídeo considerado (Bq/kg);

A = área líquida (net) do pico correspondente à radiação gama considerada (Bq/s);

E = eficiência de contagem (dado fornecido na listagem do aparelho) para a energia de radiação gama considerada (adimensional);

T = tempo útil de medida (s);

I = probabilidade de emissão por desintegração para a transição gama considerada (adimensional variável para cada radionuclídeo); e,

P = peso da amostra utilizada em cada cápsula (kg).

Através da concentração de atividade de cada amostra “C” (Bq por kg de amostra), e da atividade específica “A_E” característica intrínseca de cada radionuclídeo (Bq por mg de radionuclídeo) foi possível determinar a concentração em peso “C_P” (em mg/kg ou ppm), aplicando-se a Eq. 4.4.

$$C_P = C \div A_E \quad (\text{mg/kg}) \quad (\text{Eq. 4.4})$$

OBS.: Uma vez que o urânio natural medido é a soma do (²³⁸U + ²³⁵U + ²³⁴U) e, dada a maior abundância do urânio-238 (²³⁸U), nos cálculos visando a determinação da concentração em peso C_P, utilizou-se a atividade específica desse radionuclídeo que é de 12,21 Bq/mg. Para o tório (²³²Th), considerou-se A_E = 4,07 Bq/mg e para o potássio (⁴⁰K) considerou-se A_E = 31,56 x 10⁻³ Bq/mg.

4.4 Ensaios e procedimentos nos lodos de esgoto sanitário

As amostras de lodos de esgoto sanitário, utilizadas nesta pesquisa, foram coletadas na forma de um resíduo contendo uma certa percentagem de umidade (torta) e para sua utilização nas massas cerâmicas, foram previamente submetidas aos seguintes procedimentos preliminares:

- Destorroamento e secagem em estufa à temperatura de 105 °C, peneiramento na peneira nº 10-ASTM (abertura de 2,0 mm) e armazenamento em recipientes de plástico com tampa;

- Parte do lodo já peneirado foi levado ao forno-mufla, sob temperatura de 900°C, para a obtenção das cinzas do lodo, que também foram armazenadas separadamente, em recipientes de plástico, com tampa.

4.4.1 Teor de umidade higroscópica nos lodos e cinzas

Antes da mistura do lodo ou das cinzas do lodo com a argila, para obtenção das massas cerâmicas nas proporções citadas no item 4.1, foi feita a determinação do teor de umidade higroscópica das amostras de lodo seco ou das cinzas, seguindo-se os mesmos procedimentos descritos em 4.3.5 para o solo. A umidade higroscópica, assim obtida, foi considerada na determinação da massa seca, a ser adicionada quando da mistura da massa cerâmica, conforme exemplo apresentado adiante, no item 4.5.3.

4.4.2 Perda de massa dos lodos à temperatura de 600°C

Foi feita a determinação da perda de massa das amostras de lodo, após submetê-lo à temperatura de 600 °C, seguindo-se os mesmos procedimentos descritos em 4.3.6 para o solo.

4.4.3 Valor do pH dos lodos e de suas cinzas

Foi feita a determinação do valor do pH das amostras de lodo (seco a 105 °C) e também das amostras de suas cinzas (pós-queima a 900 °C), seguindo-se os mesmos procedimentos descritos em 4.3.7 para o solo.

4.4.4 Caracterização dos minerais presentes nos lodos e em suas cinzas

Foi feita a determinação dos minerais presentes no lodo e em suas cinzas, utilizando-se o método de análise qualitativa por difratometria de raio-X, descrito no item 4.3.8 para o solo.

4.4.5 Concentração de elementos potencialmente tóxicos nos lodos

Foi feita a determinação do teor de EPTs e demais metais, listados em 4.3.9, nas amostras de lodo desidratado (LD1 e LD2 secos a 105°C) e também nas amostras de lodos isentos de matéria orgânica (pós-queima a 600 °C), utilizando-se os mesmos procedimentos descritos em 4.3.9 para o solo.

4.4.6 Concentração de elementos radioativos nos lodos

As amostras de lodo, utilizadas na determinação da concentração de radionuclídeos, foram colhidas em 2 diferentes datas: 08/02/2001 e 15/03/2001 e, neste caso, foram utilizadas 3 amostras para cada tipo de lodo e para cada data de coleta. A preparação das amostras foi feita da mesma forma descrita em 4.3.10 para o solo.

A determinação da concentração de atividade (em Bq/kg), para os radionuclídeos naturais: urânio ($^{238}\text{U} + ^{235}\text{U} + ^{234}\text{U}$), tório (^{232}Th) e potássio (^{40}K), presentes nos lodos LD1 e LD2 (secos a 105 °C), bem como o cálculo da concentração em peso (mg do radionuclídeo por kg de resíduo), foram feitas, utilizando-se os mesmos procedimentos e as equações 4.3 e 4.4, apresentados em 4.3.10 para o solo.

4.5 Ensaios e procedimentos nas massas cerâmicas

4.5.1 Nomenclatura adotada

Antes de discorrer sobre os procedimentos adotados para as massas cerâmicas é necessário descrever o critério para se identificar cada uma delas. Por exemplo:

- **MC-0-A, B ou C** - as letras iniciais “MC” indicam a abreviatura de “massa cerâmica”, o nº zero significa 0 % de lodo de esgoto na massa, ou seja, apenas o solo argiloso. As letras A, B ou C, ao final significam, respectivamente, a 1ª, 2ª ou 3ª moldagens de corpos de prova, feitas em datas diferentes, porém com a mesma massa cerâmica. A MC-0 foi considerada como testemunho, para comparação com as demais;
- **MC-10-LD1 ou LD2 -A, B, ou C** - trata-se da massa cerâmica com 10 % de lodo tipo 1 ou tipo 2 secos a 105 °C. O nº 10 significa a percentagem de lodo na massa seguindo-se a identificação do lodo, ou seja, **LD1** para o lodo desaguado em filtro-prensa (que recebeu cal e cloreto férrico como auxiliares no desaguamento) ou **LD2** para o lodo desaguado em leito de secagem. Da mesma forma, as letras A, B ou C significam a 1ª, 2ª ou 3ª moldagem;
- **MC-10-CZ-LD1 ou LD2-A ou B** – trata-se da massa cerâmica com 10 % de cinzas do lodo tipo 1 ou de cinzas de lodo tipo 2. O nº 10 significa a percentagem de cinzas na massa e as letras A ou B significam a 1ª ou 2ª moldagens. No caso das massas cerâmicas feitas com cinzas de lodos só foram feitas 2 moldagens para cada diferente massa cerâmica.

No total, trabalhou-se com 15 diferentes massas cerâmicas e 37 moldagens em datas diferentes: MC-0-A, B e C; MC-10-LD1-A, B e C; MC-20-LD1-A, B e C; MC-30-LD1-A, B e C; MC-10-CZ-LD1-A e B; MC-20-CZ-LD1-A e B; MC-30-CZ-LD1-A e B; MC-40-CZ-LD1-A e B; MC-10-LD2-A, B e C; MC-20-LD2-A, B e C; MC-30-LD2-A, B e C; MC-10-CZ-LD2-A e B; MC-20-CZ-LD2-A e B; MC-30-CZ-LD2-A e B e MC-40-CZ-LD2-A e B.

4.5.2 Procedimentos preliminares

Numa fase preliminar, trabalhou-se apenas com a massa cerâmica MC-0. Durante esta fase procurou-se obter as melhores condições em termos de trabalhabilidade da massa cerâmica, verificando-se os aspectos de facilidade de moldagem e desmoldagem dos corpos de prova e buscando-se otimizar e adotar um diagrama de queima (tempo x temperatura), que viesse a propiciar os melhores resultados em termos de resistência final à compressão dos corpos de prova (CPs), minimização de trincas, etc.

Para se estabelecer o diagrama tempo x temperatura de queima das massas cerâmicas, foi realizado um ensaio com a MC-0, tomando-se 6 amostras da mesma, com pesos úmidos na faixa de 30 a 50 g e adotando-se o seguinte procedimento:

- foram preparadas 6 cápsulas de porcelana, mesmo procedimento já detalhado no item 4.3.5, visando à obtenção do peso de cada cápsula vazia; isenta de umidade e/ou substâncias orgânicas P_1 . Na pesagem foi utilizada balança com precisão de 0,01 g. As amostras foram colocadas nas cápsulas e obtidos os pesos úmidos P_2 de cada uma delas;
- as cápsulas foram então colocadas por 24 horas em estufa, sob temperatura de 105 °C, retiradas e esfriadas em dessecador, pesando-se posteriormente e obtendo-se os pesos secos P_3 . Isso possibilitou o cálculo do teor de umidade das amostras, conforme Eq. 4.1, apresentada no item 4.3.5. Obtidos os pesos P_3 , as cápsulas foram colocadas em um forno-mufla, por 1 hora, regulando-se a temperatura inicial para 150 °C. As cápsulas foram então retiradas da mufla, esfriadas em dessecador e pesadas para verificação da perda de massa ocorrida nessa faixa de temperatura, obtendo-se o peso P_4 . Mantendo-se sempre um tempo total de 1 hora no forno, esse procedimento foi repetido para os seguintes valores de temperatura: 200 °C; 250 °C; 300 °C; 400 °C; 500 °C; 600 °C; 700 °C; 800 °C; 900 °C e 1200 °C.

- foram então calculados os percentuais de perda de massa de cada amostra, para cada faixa de temperatura ($\Delta M_{(T^{\circ}C)}$). Estas perdas foram relacionadas com os respectivos pesos secos a 105 °C, utilizando-se a Eq. 4.5:

$$\Delta M_{(T^{\circ}C)} = [(P_3 - P_4) \div (P_3 - P_1)] \times 100 \quad (\%) \quad (\text{Eq. 4.5})$$

Para cada valor de temperatura foram plotadas as percentagens de perdas, bem como as percentagens de perdas acumuladas, em um gráfico, a partir do qual pode-se escolher alguns diagramas tempo x temperatura, a serem testados. Os testes foram feitos moldando-se tijolos (10 x 5 x 2,5 cm), com massas cerâmicas feitas apenas com o solo argiloso e determinando-se a resistência à compressão desses tijolos, conforme procedimento detalhado em 4.5.3.13.

Os diagramas tempo x temperatura, escolhidos para estes testes, foram comparados entre si em função da resistência à compressão final obtida nos corpos de prova, queimados segundo esses diagramas. Após a escolha do diagrama mais conveniente, este foi utilizado em todas as demais queimas. Após concluída esta otimização dos procedimentos para a massa cerâmica com percentual “zero” de lodo, os valores médios obtidos nestes testes (otimizados) serviram de “testemunho”, ou seja, como parâmetros comparativos para as demais massas cerâmicas. Iniciou-se, então as misturas utilizando as diversas percentagens de lodos ou de cinzas de lodo, conforme citadas no item 4.5.1.

4.5.3 Procedimentos complementares

Para se garantir as proporções desejadas (em peso e base seca) dos resíduos utilizados e do solo argiloso, foi feito o ensaio de umidade higroscópica, tanto do solo quanto do lodo ou de suas cinzas, antes da preparação de cada massa cerâmica. O valor médio do teor de umidade higroscópica serviu para se fazer a estimativa da quantidade de solo, lodo e água a serem utilizados, quando da preparação das massas cerâmicas. Por

exemplo, ao se preparar 6 kg de massa cerâmica (em base seca), pretendendo-se trabalhar com teor de umidade de 30 % na massa, utilizar 20 % de lodo seco a 105 °C e portanto 80 % de solo argiloso, para um solo com teor de umidade higroscópica de 5 % e um lodo com teor de umidade hidros cópica de 2 %, ter-se-ia:

- Quantidade de solo a ser utilizada: $6000 \text{ g} \times 0,8 \times 1,05 = 5040 \text{ g}$
- Quantidade de lodo a ser utilizada: $6000 \text{ g} \times 0,2 \times 1,02 = 1224 \text{ g}$
- Quantidade de água a ser utilizada: $6000 \text{ g} \times 0,3 = 1800 \text{ g}$. Porém o solo e os resíduos já possuíam uma certa umidade e, portanto, foi necessário descontar desse valor bruto a água presente no solo ($4800 \times 0,05 = 240 \text{ g}$) e no lodo ($1200 \times 0,02 = 24 \text{ g}$); chegando-se portanto ao valor final de **1536 g** de água a ser adicionada.

As misturas foram feitas numa masseira, do tipo utilizado para o preparo de massas de pão, modelo MB-1-07 da marca Lieme, com 7,0 kg de capacidade. Para se obter uma boa homogeneização, o solo e os resíduos foram colocados na masseira ainda secos e misturados por, pelo menos, 10 minutos, antes da colocação da água. Iniciou-se sempre a mistura com uma percentagem de água 2 a 3 % superior ao limite de plasticidade do solo, adicionando-se mais água na masseira (cerca de 1 % de cada vez), quando necessário, com a finalidade de se obter uma MC suficientemente plástica e que permitisse a moldagem manual dos CPs (tijolos maciços de 10 x 5 x 2,5 cm).

Todas as MCs permaneceram em descanso por pelo menos 2 dias após a mistura e antes da moldagem dos CPs, visando com isso a completa hidratação da argila. Para não permitir contato com o ar atmosférico, evitando o indesejável endurecimento por perda d'água, as MCs eram convenientemente acondicionadas em sacos plásticos vedados. Foram sempre preparados cerca de 6,0 kg de massa cerâmica (base seca) para cada MC diferente, dentre aquelas feitas com os lodos secos a 105 °C e cerca de 4,0 kg (base seca), para as massas que continham cinzas de lodo. Além dos testes previstos nos itens 3.5.3.2 a 3.5.3.15, as MCs foram avaliadas, levando-se em conta os seguintes quesitos:

- aspectos de trabalhabilidade no manuseio da massa crua: procurou-se observar eventuais facilidades ou dificuldades quando da moldagem e desmoldagem dos CPs; e,
- aspectos visuais: para cada MC foram observadas eventuais diferenças de cor, manchas, trincas, etc, tanto nos CPs após secagem à temperatura de 105 °C quanto após a queima à temperatura de 950 °C.

Uma vez que, após os testes não destrutivos descritos nos itens 3.5.3.2 a 3.5.3.13, os CPs foram rompidos ou à compressão ou à flexão, preservou-se sem ruptura, um corpo de prova seco a 105 °C e outro dentre os queimados a 950 °C, de cada MC e sempre dentre os da 1ª moldagem, como testemunho de cor e demais aspectos.

Os CPs foram moldados manualmente. Para obter a necessária conformação foram utilizadas formas de madeira com as dimensões de um tijolo com tamanho nominal reduzido (10 x 5 x 2,5 cm). As dimensões reduzidas dos CPs tinham a finalidade de permitir a queima de pelo menos 8 CPs de cada vez, pois o forno-mufla disponível era também de pequenas dimensões (12 x 12 x 22 cm). Sempre que a queima era de 8 tijolos colocava-se 4 tijolos na parte inferior do forno e 4 na parte superior, sobre uma grelha de aço inox devidamente perfurada, apoiada sobre dois pedaços de piso cerâmico.

Da MC-0, feita apenas com argila e de cada MC feita com o lodo seco à temperatura de 105 °C, numa 1ª moldagem, resultaram 8 corpos de prova, sendo 2 deles mantidos como testemunhos de cor; 1 após secagem a 105 °C e outro após a queima a 950 °C. Os demais (6 CPs) foram rompidos para obtenção do valor da resistência à compressão (pós-queima). As sobras das MCs do testemunho (MC-0) e aquelas feitas com lodo seco à temperatura de 105 °C foram armazenadas em sacos plásticos vedados, para serem utilizadas numa 2ª e 3ª moldagens, nas quais foram obtidos mais 20 CPs (10 para cada moldagem). Desses, 5 foram rompidos por flexão e 5 por compressão (após secagem a 105 °C); mais 4 foram rompidos por compressão, totalizando 10 CPs rompidos por compressão pós-queima. Os restantes 6 CPs foram rompidos por flexão, pós-queima.

De cada MC, preparada com cinzas de lodos, foram feitas apenas 2 moldagens, num total de 20 CPs; 2 deles foram preservados como testemunhos de cor e aspecto, 8 foram rompidos por compressão após secagem a 105 °C e 10 rompidos por compressão após queima a 950 °C. Para essas MCs não se avaliou a resistência à flexão, por dois motivos. O primeiro motivo foi de ordem operacional, ou seja, tinha-se muita dificuldade na obtenção das cinzas, em quantidades suficientes. Em cada operação, obtinha-se apenas cerca de 180 a 200 g. O outro motivo foram os resultados obtidos para a resistência à flexão dos demais CPs que já haviam sido ensaiados. Observou-se que qualquer pequena trinca, comum nesse tipo de tijolo, influiu de forma determinante nos resultados, não se podendo, portanto, confiar plenamente nos mesmos. Ressalte-se que a resistência à flexão não é um item normatizado, já que os tijolos maciços, no seu uso normal, são solicitados apenas à compressão. Antes da ruptura de cada CP foram avaliados outros parâmetros não destrutivos, descritos nos itens 4.5.3.2 a 4.5.3.12.

4.5.3.1 Determinação do volume original “V_{orig.}” de cada forma de tijolo

Foram utilizadas, inicialmente, 8 formas passando a 10 formas posteriormente; todas elas de madeira, com tamanho nominal de 10 x 5 x 2,5 cm. Antes da medição do volume de cada forma foi feita uma selagem interna, com duas demãos de seladora para madeira. O volume das formas foi determinado preenchendo-se as mesmas com água e medindo-se o volume de água utilizado. Para medir o volume foi utilizada uma bureta graduada, com capacidade de 100 ml.

Antes da moldagem de cada CP, cada forma foi revestida com uma fina camada de vaselina para evitar que a massa aderisse à mesma. Logo em seguida era obtido o peso de cada forma vazia. Incluindo-se este procedimento, todas as pesagens subsequentes, salvo expressa indicação contrária, foram feitas em uma mesma balança, com precisão de 0,1 g.

4.5.3.2 Massa específica aparente pós-preparação de cada MC “ γ_{PP} ”

Após a preparação de cada MC, esta era devidamente embalada em sacos plásticos, do qual procurou-se retirar cuidadosamente o ar e, em seguida, era determinado seu peso ($P_{MC,pp}$), em balança com precisão de 25 g. O volume dessas massas cerâmicas ($V_{MC,pp}$) foi determinado através de um dispositivo, semelhante ao da Figura 3.2, porém de maiores dimensões (balde plástico com cerca de 17 litros). Estas medidas possibilitaram a determinação da massa específica aparente úmida pós-preparação (γ_{PP}), dividindo-se o peso úmido da MC ($P_{MC,pp}$) pelo seu volume ($V_{MC,pp}$), de acordo com a Eq. 4.6:

$$\gamma_{PP} = P_{MC,pp} \div V_{MC,pp} \quad [\text{kg/dm}^3] \quad (\text{Eq. 4.6})$$

4.5.3.3 Teor de umidade das MCs na moldagem dos CPs

A determinação do teor de umidade das massas cerâmicas, no momento da moldagem dos corpos de prova, foi feita por gravimetria, através da coleta de 3 amostras de cada massa cerâmica, com peso entre 20 e 40 g e colocando-as em estufa à temperatura de 105 °C, utilizando os mesmos procedimentos descritos em 4.3.5 para o solo, excetuando-se quanto ao valor do peso das amostras da massa cerâmica.

4.5.3.4 Perdas de massa das MCs à temperatura de 600°C

As perdas de massa à temperatura de 600 °C foram determinadas, colocando-se as mesmas 3 amostras submetidas à secagem a 105 °C, num forno-mufla a 600 °C, adotando-se os procedimentos descritos em 4.3.6 para o solo.

4.5.3.5 Perdas de massa durante a secagem ao ar

Durante o acompanhamento das perdas de massa dos CPs, na secagem ao ar, foram feitas as pesagens de cada um deles, nos dias úteis, pelo menos 1 vez por dia, desde o momento da moldagem (tempo de exposição ao ar $T_E = 0$), até pelo menos o início da estabilização da secagem ao ar. Na 1ª pesagem, após a moldagem, obteve-se o peso úmido ($P_{umid.}$). Com os dados das diversas pesagens foram elaborados gráficos utilizando-se as percentagens de perdas de massa acumuladas (Δ_M), relacionadas com o peso seco PS de cada CP, em função do tempo de exposição ao ar (T_E). As perdas de massa de cada CP, por secagem ao ar, foram acompanhadas, nas primeiras moldagens, por 10 dias, pois a estabilização das perdas de massa aconteciam por volta do 7º dia. Com a necessidade de modificação do procedimento de secagem, adiante explicada, passou-se a acompanhar a secagem ao ar por cerca de 16 dias. Em condições normais de secagem ao ar (no laboratório), à temperatura ambiente e, para a MC-0, a estabilização das perdas estava ocorrendo por volta do 7º dia após a conformação. No entanto, a partir das massas cerâmicas que receberam mais de 20 % de lodo desidratado percebeu-se que a secagem nos primeiros dias estava ocorrendo de forma muito rápida, resultando em muitas trincas nos corpos de prova. A partir daí, desde o momento da conformação até o 7º dia, passou a ser colocado um dispositivo de confinamento sobre os CPs (caixa de madeira que permitia entrada de ar apenas pela parte inferior), procurando com isso diminuir a velocidade de perda d'água e minimizar as trincas. A partir de então, percebeu-se que o prazo de estabilização passou a ocorrer por volta do 14º dia.

4.5.3.6 Secagem à temperatura de 105 °C e pesagem

Após a secagem ao ar, os CPs foram colocados em estufa, a 105 °C, por um período de 24 horas e, em seguida, feita a determinação do peso seco “PS” de cada um

deles. Este foi considerado o peso seco efetivo de cada CP, tratando-se de um valor referencial, utilizado em alguns cálculos, em especial, nos procedimentos descritos nos itens 4.5.3.5, 4.5.3.7 e 4.5.3.8.

4.5.3.7 Queima à temperatura de 950 °C e pesagem

A queima dos corpos de prova foi feita por aquecimento progressivo do forno-mufla, utilizando o diagrama tempo x temperatura estabelecido. A calibragem inicial foi feita para a temperatura de 200 °C, seguindo-se um incremento de 100 °C e permanência por um período de 1,5 horas, atingindo a temperatura máxima de 950 °C. O aquecimento progressivo, com duração total de 10,5 horas, foi seguido de mais 3,5 horas, sob temperatura de 950 °C totalizando 14 horas. O esfriamento dos CPs foi feito na própria mufla, após a sua calibragem para a temperatura ambiente. O diagrama de esfriamento do forno-mufla (da marca Quimis tipo Q-318-D21), utilizado nessa pesquisa, foi previamente levantado e mostrou um período de tempo de 34 a 36 horas, desde a temperatura de 950 °C até a temperatura ambiente. Com isso, cada operação de queima tinha uma duração total entre 48 e 50 horas. Somente após o total esfriamento, os CPs eram retirados da mufla, seguindo-se imediatamente à pesagem, obtendo-se o peso pós-queima “P_{pq}”. O cálculo do percentual de perda de massa pós-queima “Δ_{M,pq}” foi feito de acordo com a Eq. 4.7:

$$\Delta_{M,pq} = [(PS - P_{pq}) \div PS] \times 100 \quad [\%] \quad (\text{Eq. 4.7})$$

4.5.3.8 Absorção “A” pós-imersão em água

Para o cálculo do percentual de absorção d’água de cada CP, determinou-se previamente o peso de cada um deles, após terem permanecido mergulhados em água, por um período de 24 horas, à temperatura ambiente. Escorreu-se o excesso de água,

enxugando a superfície com um pano e pesou-se em seguida. O valor obtido foi chamado de peso pós-imersão “ P_{pi} ”. Para o cálculo do percentual de absorção d’água “ A ” utilizou-se a Eq. 4.8:

$$A = [(P_{pi} - PS) \div PS] \times 100 \quad [\%] \quad (\text{Eq. 4.8})$$

4.5.3.9 Retração volumétrica pós-queima “RV”

Como critério para verificação do percentual de retração volumétrica, levou-se em conta o quociente entre a diferença de volumes (volume original da forma “ $V_{orig.}$ ” menos o volume final do corpo de prova pós-queima “ V_{pq} ”), e o volume original da forma de madeira, multiplicado por 100, conforme Eq. 4.9.

$$RV = [(V_{orig.} - V_{pq}) \div V_{orig.}] \times 100 \quad [\%] \quad (\text{Eq. 4.9})$$

O volume do CP pós-queima (V_{pq}) foi obtido mergulhando-se o corpo de prova saturado (após este ter permanecido 24 horas imerso em água, à temperatura ambiente), utilizando o dispositivo e o procedimento apresentados na Figura 3.2. O critério para determinação do volume original (da forma de madeira), foi apresentado no item 4.5.3.1.

4.5.3.10 Massa específica aparente úmida pós-moldagem “ γ_{pm} ”

A massa específica aparente úmida de cada CP “ γ_{pm} ” foi calculada utilizando-se o peso úmido ($P_{umid.}$) de cada CP (trata-se da 1ª pesagem após a conformação, conforme acompanhamento previsto no item 4.5.3.5) e o volume original da forma “ $V_{orig.}$ ” (obtido conforme descrito no item 4.5.3.1), utilizando-se a Eq. 4.10:

$$\gamma_{pm} = P_{umid.} \div V_{orig.} \quad [kg/dm^3] \quad (Eq. 4.10)$$

4.5.3.11 Massa específica aparente pós-queima “ γ_{pq} ”

A massa específica aparente de cada CP pós-queima “ γ_{pq} ” foi calculada utilizando-se os valores do peso pós-queima “ P_{pq} ” (obtido conforme item 4.5.3.7) e o volume pós-queima “ V_{pq} ” (obtido conforme item 4.5.3.9). Foi utilizada a Eq. 4.11.:

$$\gamma_{pq} = P_{pq} \div V_{pq} \quad [kg/dm^3] \quad (Eq. 4.11)$$

4.5.3.12 Massa específica aparente pós-imersão em água “ γ_{pi} ”

A massa específica aparente de cada CP pós-imersão “ γ_{pi} ” em água por 24 horas, à temperatura ambiente, foi calculada utilizando-se os valores do peso pós-imersão “ P_{pi} ” (obtido conforme item 4.5.3.8) e o volume pós-queima “ V_{pq} ” (obtido conforme item 4.5.3.9), utilizando-se a Eq. 4.12:

$$\gamma_{pi} = P_{pi} \div V_{pq} \quad [kg/dm^3] \quad (Eq. 4.12)$$

4.5.3.13 Resistência à compressão pós-secagem e pós-queima

Para a verificação da resistência à compressão dos CPs foram utilizados os procedimentos prescritos na norma brasileira NBR-6460 (ABNT, 1983a).

Na ruptura dos CPs, foi utilizada uma prensa hidráulica automática, da marca Shimadzu, operando na faixa de carga de 0 a 2500 kgf (0 a 24 500 N), com precisão de 5 kgf.

Para a determinação da área transversal média de cada CP, utilizada no cálculo da tensão de ruptura, foi medida cada face do mesmo, em três pontos localizados a $\frac{1}{4}$, no $\frac{1}{2}$ e a $\frac{3}{4}$ de cada lateral, calculando-se a média aritmética das larguras de cada lado. A área de cada face foi calculada multiplicando-se as larguras correspondentes e, finalmente, calculou-se a média aritmética final para cada CP.

No caso dos CPs rompidos à compressão após a operação de queima, os mesmos permaneceram 24 horas imersos em água, à temperatura ambiente, antes da ruptura, conforme prescreve a NBR-6460 (ABNT, 1983a). No caso dos CPs rompidos após secagem a 105 °C (não há normatização para este caso), esse procedimento não foi possível pois o tijolo, não queimado, tem a tendência de desmanchar-se na água. O número de CPs ensaiados à compressão foi apresentado no item 4.5.3.

4.5.3.14 Resistência à flexão pós-secagem e pós-queima

Não existe norma da ABNT para determinação da resistência à flexão para os tijolos maciços não estruturais. Foi utilizada, com as adaptações abaixo explicitadas, a norma brasileira para tijolos refratários NBR-6113 (ABNT, 1980).

A principal adaptação referiu-se às dimensões dos tijolos que, neste caso, eram menores do que aquelas fixadas pela citada norma. A distância entre os cutelos inferiores, no dispositivo de ruptura (ver Figura 3.1), foram também menores (neste caso adotou-se 7 cm). A fórmula para cálculo da tensão de ruptura, prescrita na norma citada (Eq. 4.13), leva em conta a distância entre os cutelos de apoio e pôde então ser utilizada.

$$\sigma_f = (3 P \times \ell) \div (2 a^2 \times b) \quad [\text{Pa}] \quad (\text{Eq. 4.13})$$

onde:

σ_f = tensão de ruptura à flexão (Pa)

P = Carga atingida no momento da ruptura (N)

ℓ = distância entre os cutelos de apoio (neste caso adotou-se 7 cm) (cm)

a = altura do CP (foi efetivamente medida em cada caso) (cm)

b = largura do CP (foi efetivamente medida em cada caso) (cm)

Outra adaptação refere-se à imersão dos corpos de prova antes da ruptura. A norma NBR-6113 (ABNT, 1980), que como já foi citado, trata de tijolos refratários, não se refere a nenhuma imersão. Neste caso, para os tijolos rompidos à flexão, pós-queima a 950 °C, resolveu-se fazer a imersão dos mesmos em água, por 24 horas, à temperatura ambiente. Para os tijolos rompidos à flexão, pós-secagem a 105 °C, pelos mesmos motivos já explicitados em 4.5.3.13, não foi feita prévia imersão em água. O número de CPs ensaiados à flexão foi explicitado no item 4.5.3.

4.5.3.15 Concentração de EPTs - teste de solubilização

Foi feita a determinação de 8 elementos potencialmente tóxicos e demais metais (os mesmos já explicitados no item 3.3.9) para as massas cerâmicas com 40 % de cinzas. Foi escolhida a massa cerâmica com 40 % de cinzas uma vez que esta é a situação mais crítica em termos de concentração de metais no resíduo. O teste simula uma situação em que os tijolos já tivessem sido utilizados e/ou descartados em entulhos e eventualmente

deixados em bota-fora. Para o preparo das amostras foram utilizados os procedimentos prescritos na norma NBR-10006 (ABNT, 1987c). A leitura das concentrações de EPTs foi feita no Laboratório de Espectrometria de Emissão e Absorção Atômica do Instituto de Química da USP - São Paulo, utilizando-se um espectrômetro conhecido como ICP – “Inductively Coupled Argon Plasm Emmission Spectrometry”.

4.5.3.16 Concentração de EPTs - teste de lixiviação

Foi feita a determinação de 8 elementos potencialmente tóxicos e demais metais (os mesmos já explicitados no item 3.3.9) para as massas cerâmicas com 40 % de cinzas, também simulando uma situação em que os tijolos já tivessem sido utilizados ou descartados e eventualmente deixados em bota-fora. Para o preparo das amostras foram utilizados os procedimentos prescritos na norma brasileira NBR-10005 (ABNT, 1987b). A leitura das concentrações presentes nas amostras foi feita no Laboratório de Espectrometria de Emissão e Absorção Atômica do Instituto de Química da USP - São Paulo. Foi utilizado um espectrômetro conhecido como ICP – “Inductively Coupled Argon Plasm Emmission Spectrometry”.

4.5.3.17 Concentração de radionuclídeos nas misturas solo-cinzas de lodo

Foram preparadas amostras com misturas do solo argiloso e as cinzas do LD-1 e do LD-2, todos previamente passados na peneira de abertura 0,297 mm. Foram utilizadas 10, 20, 30 e 40 % de cinzas na mistura, totalizando 8 amostras. Foram utilizadas as cinzas pois estas, ao serem submetidas a altas temperaturas (neste caso elas foram obtidas a 900 °C), perdem massa em razão da volatilização da matéria orgânica, presente no lodo. Portanto, contêm, no mais alto grau de concentração possível, os radionuclídeos considerados.

Estas 8 amostras foram colocadas em cápsulas plásticas apropriadas, seladas por 30 dias antes de efetuar as medições, visando com esse procedimento estabelecer o equilíbrio entre o radônio (^{220}Rn) e seus produtos de decaimento, de meia-vidas curtas. A contagem foi feita por espectrometria gama, com tempo de exposição de 50000 segundos, utilizando um detector de germânio hiper-puro, tipo GEM-15200, da marca EG & G, pertencente ao Laboratório do Departamento de Radioproteção Ambiental do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares de São Paulo (IPEN-SP). A concentração de atividade das amostras foi obtida utilizando-se a Eq. 4.3, apresentada no item 4.3.10. Com esses resultados foi possível estimar as possíveis consequências de uma eventual utilização das cinzas desses lodos, como material de construção, em termos de exposição pública à radioatividade. Para essa estimativa foram utilizados as expressões 3.1 a 3.5, apresentadas no item 3.3.2.6.

4.6 Tabulação e tratamento estatístico dos resultados

Os resultados obtidos nesta pesquisa foram lançados em tabelas e gráficos apresentados no capítulo 5 - Resultados e nos Anexos. Sempre que possível foram estabelecidas correlações, caso por exemplo da correlação entre o tempo de exposição dos corpos de prova na secagem ao ar e a perda média de massa correspondente. Quanto aos principais resultados tecnológicos e ambientais, sempre que possível, calculou-se as médias e os desvios padrões, aplicando-se posteriormente o teste “T”, que possibilita avaliar a possibilidade estatística de rejeição de dados. Nesta pesquisa, alguns resultados (devidamente discriminados nas respectivas tabelas), foram rejeitados, quando aplicada a metodologia proposta no Standard Methods (APHA, AWWA e WEF, 1998), abaixo discriminada, para um grau de desconfiança de 5 %. A metodologia utilizada para a rejeição de dados (teste “T”) determina que se faça o cálculo da média “ μ ” e do desvio padrão “ σ ” para o número “n” de amostras, calculando-se o valor “T”, para os valores extremos obtidos; máximo “MAX” e mínimo “MIN”, de acordo com as Eqs. 4.14 e 4.15, abaixo discriminadas:

$$T = \frac{(\text{MAX} - \mu)}{\sigma} \quad (\text{Eq. 4.14})$$

$$T = \frac{(\mu - \text{MIN})}{\sigma} \quad (\text{Eq. 4.15})$$

O valores de “T”, obtidos através das Eqs. 4.14 e 4.15 foram comparados com os valores apresentados na Tabela 3.3. Quando o valor “T” calculado era maior que o valor crítico da tabela, considerado o número “n” de amostras, então o valor em questão era rejeitado, para o nível de significância de 95 % ou grau de desconfiança de 5 %.

Tabela 3.3 - Valores críticos para o teste “T” com 5 % de desconfiança

Número de amostras “n”	Valores críticos para um nível de desconfiança de 5 %
3	1,15
4	1,46
5	1,67
6	1,82
7	1,94
8	2,03
9	2,11
10	2,18
12	2,29
14	2,37
15	2,41
16	2,44
18	2,50
20	2,56
30	2,74
40	2,87
50	2,96
60	3,03
100	3,21
120	3,27

Fonte: APHA, AWWA e WEF (1998)

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Forma de apresentação dos resultados

As tabelas e figuras, contendo os resultados detalhados obtidos nesta pesquisa, são apresentadas nos ANEXOS. Neste capítulo serão apresentadas as tabelas e figuras com o resumo dos resultados e a discussão dos mesmos.

5.2 Escolha do solo argiloso utilizado

Foram coletados 3 tipos de solos argilosos e que apresentavam características visuais diferentes. O chamado solo 1, era de coloração amarelo-alaranjado; o solo 2, de coloração marron e o solo 3, de coloração vermelha.

Para escolher o solo a ser utilizado, cada um deles foi previamente submetido à análise granulométrica, visando a se conhecer os teores de areia, silte e argila presentes (ver Figuras A1 a A3 dos anexos).

Na Tabela 5.1 apresenta-se um resumo dos resultados obtidos no ensaio de granulometria dos três solos estudados.

Tabela 5.1 - Resumo dos resultados dos ensaios de granulometria nos solos 1, 2 e 3

SOLO	Teores médios de areia, silte e argila (%)		
	AREIA	SILTE	ARGILA
1	61	5	34
2	64	8	28
3	54	21	25

OBS.: Ver detalhes nas Figuras A1 a A3 dos Anexos

Analisando-se os dados da Tabela 5.1 percebe-se que, dentre os três solos estudados, o solo 1 foi o que apresentou maior percentagem de argila (34 %). Até certo ponto, quanto maior o teor de argila do solo melhores são suas características quando utilizado como material cerâmico, principalmente em termos de resistência. Realmente, o solo 1 foi o que apresentou melhores resultados em termos de trabalhabilidade da massa cerâmica, aspecto e resistência à compressão dos tijolos com ele moldados. Foi, portanto, o solo escolhido para o prosseguimento da presente pesquisa.

5.3 Resultados dos ensaios de caracterização do solo escolhido

Na Tabela 5.2 apresenta-se os resultados dos ensaios de caracterização do solo escolhido. Este apresentou coloração amarelo-alaranjada, 61 % de areia, 5 % de silte e 34 % de argila; limite de plasticidade de 25,4 %; limite de liquidez de 37,4 % e índice de plasticidade de 12,0 %. Adotando-se o método de classificação proposto pelo BPR - "Bureau of Public Roads", trata-se de um solo argiloso, constituído de argila inorgânica de mediana plasticidade e resistência, do tipo **A6** (Vargas, 1977). Esta classificação mostra que a resistência a ser esperada para os tijolos feitos com a massa cerâmica pura ou testemunho (MC-0), deveria situar-se numa faixa mediana. Os resultados apresentados na Tabela 5.12, mostraram uma resistência média à compressão, obtida para os 10 CPs ensaiados, de **4,38 MPa** com desvio padrão de **0,57 MPa**. Assim, se o solo é de mediana resistência devem existir outros com resistências consideravelmente maiores do que este e, então, as conclusões apresentadas neste trabalho, a respeito das percentagens máximas de

lodos para a fabricação de tijolos cerâmicos maciços só podem ser consideradas quando utilizados; o método de moldagem manual, o solo e os resíduos com as mesmas características dos utilizados nesta pesquisa.

Tabela 5.2 - Resultados dos ensaios de caracterização no solo argiloso

Discriminação dos ensaios realizados		Unidade	Resultados
• Limites de Atterberg:		-	-
• Limite de plasticidade (LP)		%	25,4
• Limite de liquidez (LL)		%	37,4
• Índice de plasticidade: $IP = LL - LP$		%	12,0
• Variação da umidade higroscópica (do solo seco ao ar)		%	1,4 a 7,2
• Variação da perda de massa (à temperatura de 600 °C)		%	7,4 a 8,2
• pH (10 g de solo diluído em 25 mL de água destilada)		-	5,1
• DRX (Ensaio qualitativo por Difractometria de Raios X): A análise da amostra desse solo revelou a presença de óxido de silício (quartzo alfa); hidróxido de alumínio (gibbsita); mineral do grupo da caulinita; mineral do grupo das micas (provavelmente muscovita) e mineral do grupo dos feldspatos (provavelmente microclínio).			
• Concentração de elementos potencialmente tóxicos (EPTs) ⁽¹⁾		UNIDADE	QUANTIDADE
• Arsênio	(As)	(mg/kg)	0,27
• Cádmio	(Cd)	(mg/kg)	0,39
• Chumbo	(Pb)	(mg/kg)	2,53
• Cobre	(Cu)	(mg/kg)	4,07
• Cromo	(Cr)	(mg/kg)	19,6
• Níquel	(Ni)	(mg/kg)	2,73
• Selênio	(Se)	(mg/kg)	1,21
• Zinco	(Zn)	(mg/kg)	14,5
• Concentração de outros metais ⁽¹⁾		UNIDADE	QUANTIDADE
• Alumínio	(Al)	(mg/kg)	63 900
• Bário	(Ba)	(mg/kg)	31,3
• Cálcio	(Ca)	(mg/kg)	771
• Ferro	(Fe)	(mg/kg)	20 000
• Magnésio	(Mg)	(mg/kg)	414
• Manganês	(Mn)	(mg/kg)	39,2
• Potássio	(K)	(mg/kg)	796
• Silício	(Si)	(mg/kg)	120
• Sódio	(Na)	(mg/kg)	215
• Titânio	(Ti)	(mg/kg)	132
• Concentração de radionuclídeos naturais ⁽¹⁾		-	-
• Tório-232	^{232}Th	(mg/kg)	17,5
• Urânio natural	$U_{\text{nat.}} = ^{238}\text{U} + ^{235}\text{U}$	(mg/kg)	4,6
• Potássio-40	^{40}K	(mg/kg)	913,1

OBSERVAÇÕES:

1. Os resultados dos ensaios de elementos potencialmente tóxicos "EPTs", demais metais e radioisótopos radioativos são apresentados em mg do elemento por kg de solo.

Analisando-se os demais resultados apresentados na Tabela 5.2, verifica-se que os valores de umidade higroscópica medidos variou entre 1,4 e 7,2 %. A cada preparação de massa cerâmica obteve-se uma média da umidade de 3 amostras do solo armazenado em recipientes plásticos com tampa, após secagem ao ar. O teor de sólidos voláteis (perda de massa sob temperatura de 600 °C) variou de 7,4 a 8,2 %. Serviu para se comparar com os teores de SV dos lodos (que resultaram bem maiores) e como uma estimativa da perda de massa na operação de queima das MCs. O pH médio obtido a partir de 3 amostras de solo foi 5,1. A acidez do solo pode influenciar numa maior solubilização de metais pesados, com exceção do cromo e do vanádio, cuja solubilização ocorre a pH básicos (Wienbusch *et. al.*, 1998). Já a presença da caulinita, detectada no ensaio de DRX, denota uma maior propensão à retração das massas cerâmicas pós-queima (Verçosa, 1979). As concentrações de elementos potencialmente tóxicos, demais metais, bem como de radionuclídeos presentes no solo foram comparados aos dos lodos e suas cinzas e comentados no item 5.4.2.

5.4 Ensaios de caracterização dos lodos e suas cinzas

5.4.1 Coleta dos lodos e ensaios preliminares

Os lodos foram coletados na forma de torta semi-desidratada. No momento da coleta, o aspecto da torta do LD1 (desaguado em filtro prensa e pré-condicionado com cal e cloreto férrico), era o de um material pastoso, de cor cinza escura. Após contato prolongado com o ar e, principalmente após a sua secagem em estufa, ocorreu alteração para uma coloração marron. No momento da coleta, a torta do LD2 era também de coloração cinza escura mas, ao contrário do lodo 1, manteve essa coloração, mesmo após a secagem em estufa. Foram feitas duas coletas, em datas distintas: 08/02/2001 e 15/03/2001. O material coletado na 1ª data foi utilizado nas massas cerâmicas feitas com o lodo seco à temperatura de 105 °C e o material da 2ª coleta foi queimado à

temperatura de 900 °C para obtenção das cinzas. Foram realizados ensaios preliminares, apresentados na Tabela 5.3, com os seguintes objetivos:

- determinação do **teor de umidade “h₁”**, valor esse que relaciona a quantidade de água presente na amostra da torta, com a sua massa total seca;
- determinação da **percentagem de umidade “h₂”**, que relaciona a quantidade de água presente na amostra da torta com a sua massa total úmida;
- perda média de massa à temperatura de 600 °C “ $\Delta_{M,600}$ ”, também conhecida como percentagem de sólidos voláteis, e;
- a perda média de massa quando o lodo seco a 105 °C foi submetido à queima, sob temperatura de 900 °C “ $\Delta_{M,900}$ ”, para a obtenção das cinzas.

Tabela 5.3 - Resultados dos ensaios preliminares nos lodos de esgoto

Tipo de lodo	UMIDADE DO LODO [%]		$\Delta_{M,600}$	$\Delta_{M,900}$
	h ₁	h ₂	[%]	[%]
LD1 - 1ª coleta	150,9	60,1	39,2	-
LD1 - 2ª coleta	201,3	66,8	35,1	41,0
LD2 - 1ª coleta	94,7	48,6	52,9	-
LD2 - 2ª coleta	115,2	53,5	49,4	48,1

Os resultados apresentados na Tabela 5.3 mostraram que o LD1, lodo desaguado em filtro prensa de placas, pré-condicionado com cal e cloreto férrico, apresentou umidade um pouco maior do que o LD2 (este último desaguado naturalmente em leito de secagem). Esses valores dão uma indicação de quanto seriam as perdas de massa desses dois tipos de lodos, no caso de se pretender fazer a secagem térmica das tortas, antes do seu destino final.

Os valores medidos para o teor de sólidos voláteis dos lodos (perda de massa sob temperatura de 600 °C) e apresentados na Tabela 5.3, mostraram para o LD1 uma perda menor do que para o LD2, certamente pela presença da cal usada para auxiliar no desaguamento do LD1 (cerca de 20 % em volume). Porém, tanto o LD1 quanto o LD2 apresentaram percentagens de sólidos voláteis consideravelmente maiores do que o solo (o que já era esperado). Já as perdas de massa, sob temperaturas de 900 °C, medidas quando da transformação dos lodos (secos a 105 °C) em cinzas, mostraram também uma perda média maior para o LD2 (também já esperada). Esses resultados já davam uma primeira indicação dos valores a serem esperados relativos às perdas de massas durante a operação de queima do produto final; ou seja, a perda da água coloidal (que ocorre por volta de 200 °C), a volatilização das substâncias orgânicas (entre 350 e 650 °C) e, no caso das massas feitas com cinzas, as perdas de massa ocorridas por decomposição dos carbonatos (entre 800 e 950 °C). Os resultados de perdas de massa pós-queima para as diversas massas cerâmicas são resumidos na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Perdas de massa pós-queima das diversas massas cerâmicas (%)

Tipo de lodo ou de cinzas	Percentagem de lodo ou de cinzas na massa cerâmica				
	0 %	10 %	20 %	30 %	40 %
TESTEMUNHO	10,56	-	-	-	-
LD1	-	13,85	16,69	20,19	-
CZ-LD1	-	9,87	9,20	8,96	8,70
LD2	-	13,88	18,13	22,67	-
CZ-LD2	-	11,07	11,94	12,25	12,63

OBS.: TESTEMUNHO = Massa cerâmica feita apenas com solo argiloso (com 0 % de lodo)

LD1 = lodo oriundo de um sistema de lodos ativados, condicionado com cal e cloreto férrico e desaguado em filtro-prensa de placas. Posteriormente seco à temperatura de 105 °C em laboratório;

CZ-LD1 = material anteriormente descrito pós-queima sob temperatura de 900 °C;

LD2 = lodo oriundo de um reator anaeróbio de fluxo ascendente desidratado em leito de secagem, sem pré-condicionamento químico. Posteriormente seco a 105 °C;

CZ-LD2 = material anteriormente descrito, pós-queima sob temperatura de 900 °C.

Analisando-se os resultados apresentados na Tabela 5.4, pôde-se verificar que:

- as percentagens de perdas de massa das MCs (pós-queima) foram crescentes com o aumento da percentagem de lodos (secos a 105 °C) na massa cerâmica, sendo os maiores valores para o LD2, mostrando coerência com os resultados apresentados na Tabela 5.3 e anteriormente comentados;
- houve tendência de decréscimo das perdas de massa das MCs (pós-queima) com o aumento da percentagem de cinzas do LD1 na massa cerâmica, o que também é coerente pois as cinzas já haviam perdido a massa volátil quando de sua queima; e,
- no caso das cinzas do LD2 ocorreu, inexplicavelmente, um comportamento diferente, com uma leve tendência de crescimento das perdas de massa das MCs pós-queima, com o aumento da percentagem de cinzas nas massas cerâmicas, sugerindo-se futuras pesquisas para se estabelecer as razões de tal comportamento.

5.4.2 Resultados dos ensaios de caracterização dos lodos e cinzas

Os resultados dos ensaios de caracterização dos lodos e respectivas cinzas são apresentados na Tabela 5.5. A faixa de valores de umidade higroscópica apresentada foi considerada a partir dos valores máximos e mínimos obtidos nos ensaios feitos em 3 amostras de cada vez, recolhidas no recipiente de armazenamento, antes da preparação de cada massa cerâmica. No caso dos lodos secos a 105 °C e também no caso das cinzas, pôde-se observar que o LD2 apresentou maior umidade higroscópica do que o LD1.

Percebeu-se ainda que em dias secos os valores de umidade higroscópica obtidos eram menores que em dias chuvosos, corroborando o fato, já perfeitamente estabelecido, de que esse parâmetro está diretamente relacionado com a umidade relativa do ar, que é geralmente maior em dias chuvosos.

Tabela 5.5 - Resultados dos ensaios de caracterização dos lodos e suas cinzas

Discriminação dos ensaios realizados	UNID.	RESULTADOS			
		LD1	CZ-LD1	LD2	CZ-LD2
• Umidade higroscópica	%	1,4 a 5,6	0,8 a 2,3	6,3 a 8,3	0,7 a 5,9
• pH (10 g de resíduo em água destilada))	-	8,6 e 9,2	10,2	4,6 e 5,4	3,8
• DRX - Ensaio qualitativo por Difractometria de Raios X, realizado no LD1 (seco a 105 °C) : A análise da amostra desse resíduo revelou a presença de óxido de silício (quartzo alfa); carbonato de cálcio (calcita); mineral do grupo das micas (provavelmente muscovita); silicato básico de magnésio (talco); sulfato de cálcio di-hidratado (gipso); mineral do grupo da caulinita; hidróxido de magnésio (brucita) e de material não cristalino.					
• DRX (Ensaio qualitativo por Difractometria de Raios X) nas cinzas do LD1 : A análise da amostra desse resíduo revelou a presença de carbonato de cálcio (calcita); óxido de silício (quartzo alfa); sulfato de cálcio (anidrita); mineral do grupo das micas (provavelmente muscovita); silicato básico de magnésio (talco) e de material não cristalino.					
• DRX (Ensaio qualitativo por Difractometria de Raios X) no LD2 (seco a 105 °C) : A análise da amostra desse resíduo revelou a presença de óxido de silício (quartzo alfa); sulfato de cálcio hemi-hidratado (bassanita); mineral do grupo da caulinita; mineral do grupo das micas (provavelmente muscovita); silicato básico de magnésio (talco) e de material não cristalino.					
• DRX (Ensaio qualitativo por Difractometria de Raios X) nas cinzas do LD2 : A análise da amostra desse resíduo revelou a presença de sulfato de cálcio (anidrita); óxido de silício (quartzo alfa); silicato básico de magnésio (talco); mineral do grupo das micas (provavelmente muscovita) e de material não cristalino.					
Concentração de elementos potencialmente tóxicos (EPTs) ⁽¹⁾	UNID.	RESULTADOS			
		LD1	LD2	CZ-LD1	CZ-LD2
• Arsênio (As)	(mg/kg)	2,26	5,72	4,24	7,00
• Cádmio (Cd)	(mg/kg)	0,52	1,03	1,28	1,56
• Chumbo (Pb)	(mg/kg)	57,6	24,7	67,6	39,8
• Cobre (Cu)	(mg/kg)	13,8	557	261	673
• Cromo (Cr)	(mg/kg)	54,3	625	311	977
• Níquel (Ni)	(mg/kg)	18,7	739	148	1096
• Selênio (Se)	(mg/kg)	0,80	0,94	1,64	2,07
• Zinco (Zn)	(mg/kg)	369	1649	1136	1981
Concentração de outros metais ⁽¹⁾	UNID.	LD1	LD2	CZ-LD1	CZ-LD2
• Alumínio (Al)	(mg/kg)	30848	42480	50166	88996
• Bário (Ba)	(mg/kg)	41,5	418	219	619
• Cálcio (Ca)	(mg/kg)	100167	6930	98087	26715
• Ferro (Fe)	(mg/kg)	20808	34450	63635	59720
• Magnésio (Mg)	(mg/kg)	8433	1258	3024	2921
• Manganês (Mn)	(mg/kg)	521	77,1	156	179
• Potássio (K)	(mg/kg)	1996	732	1219	3016
• Silício (Si)	(mg/kg)	581	257	76,6	305
• Sódio (Na)	(mg/kg)	185	227	672	1235
• Titânio (Ti)	(mg/kg)	1507	1024	2700	2127
Concentração de radionuclídeos naturais ⁽¹⁾	UNID.	LD1	LD2	CZ-LD1	CZ-LD2
• Tório-232 ²³² Th	(mg/kg)	13,1	35,3	-	-
• Urânio natural $U_{nat} = {}^{238}U + {}^{235}U$	(mg/kg)	4,8	12,8	-	-
• Potássio-40 ⁴⁰ K	(mg/kg)	1062,5	1826,2	-	-

OBSERVAÇÕES:

1. Os resultados dos ensaios de EPTs, demais metais e radionuclídeos são apresentados em mg do elemento por kg de resíduo.

Comentando-se os resultados apresentados na Tabela 5.5 deve-se esclarecer que os valores de pH dos lodos e de suas cinzas foram obtidos a partir da média de 3 amostras, sendo o primeiro valor o da 1ª coleta e o 2º valor o da 2ª coleta. No caso das cinzas apresentou-se um valor único pois as cinzas foram obtidas com o material da 2ª coleta. Como se pode observar, o valor medido para o pH do LD1 (seco a 105 °C) foi 8,6 na 1ª coleta e 9,2 na 2ª coleta. As cinzas do LD1 apresentaram valor médio de pH = 10,2. Para o LD2 os valores de pH foram respectivamente de 4,6 na 1ª coleta e de 5,4 na 2ª coleta. O valor do pH das cinzas do LD2 foi 3,8. Como os lodos são de uma mesma ETE, essa diferença nos valores de pH são, provavelmente, devidos à presença da cal utilizada no pré-condicionamento para o desaguamento do LD1 (o LD2, desaguado em leito de secagem, não recebeu produtos químicos). Esses resultados levavam a crer que os tijolos feitos com o LD1 e suas cinzas deveriam apresentar um caráter básico e com o LD2 um caráter ácido. Isso realmente foi constatado, pelo menos para os tijolos feitos com 40 % de cinzas do LD1 e LD2 (ver Tabela 5.24). Obteve-se um valor de pH = 8,6 no início do ensaio de lixiviação para os tijolos feitos com 40 % de cinzas do LD1 e um valor de pH = 5,4 para os tijolos feitos com 40 % de cinzas do LD2. Ao final dos 7 dias de descanso, previstos para o ensaio de solubilização, foram obtidos os valores de pH = 8,8 e 6,9 respectivamente para os tijolos feitos com 40 % de cinzas do LD1 e do LD2.

Na Tabela 5.6 e Figura 5.1 são apresentados os limites máximos de concentração de EPTs no lodo para fins de aplicação em solos agrícolas, válidos para o Estado de São Paulo (ver norma P-4230 - CETESB, 1999) e comparados aos valores de concentração de EPTs medidos no solo, no LD1, LD2 e em suas cinzas. Deve-se ressaltar que este assunto não guarda nenhuma correspondência com os objetivos desta pesquisa. Para utilização em tijolos cerâmicos deve-se comparar com os limites previstos na NBR-10004 (ABNT, 1987a), após ensaios de solubilização e de lixiviação no produto final, obedecendo normas NBR-10005 e NBR-10006 (ABNT-1987 b e c), conforme procedimentos e resultados apresentados na Tabela 5.24 e Figura 5.15 e discutidos no item 5.5.6.9. No entanto, aproveitou-se os dados obtidos apenas para verificar se os lodos em questão poderiam, eventualmente, vir a ser utilizados em solos agrícolas.

Tabela 5.6 - Limites, comparados aos valores de EPTs medidos: no solo, no LD1, no LD2 e cinzas do LD1 e LD2

EPT	LIMITES ⁽¹⁾	SOLO	LD1	CZ-LD1	LD2	CZ-LD2
arsênio	75	0,3	2,3	4,2	5,7	7
cádmio	85	0,4	0,5	1,3	1,0	1,6
chumbo	840	2,5	57,6	67,6	24,7	39,8
cobre	4300	4,1	13,8	261	557	673
cromo	3000	19,6	54,3	311	625	977
níquel ⁽²⁾	420	2,7	18,7	148	739	1096
selênio	100	1,2	0,8	1,6	0,9	2,1
zinco	7500	14,5	369	1136	1649	1981

⁽¹⁾ Limites da norma P-4230 (CETESB, 1999), para aplicação de lodo em solo agrícola

⁽²⁾ Os valores medidos no LD2 e suas cinzas ultrapassaram o limite fixado na norma P-4230 para o níquel.

LD1 = oriundo de sistema convencional de lodos ativados, desidratado em filtro prensa, condicionado com cal e cloreto férrico

LD2 = lodo oriundo de reator anaeróbio de fluxo ascendente (RAFA) desidratado em leito de secagem sem produtos químicos

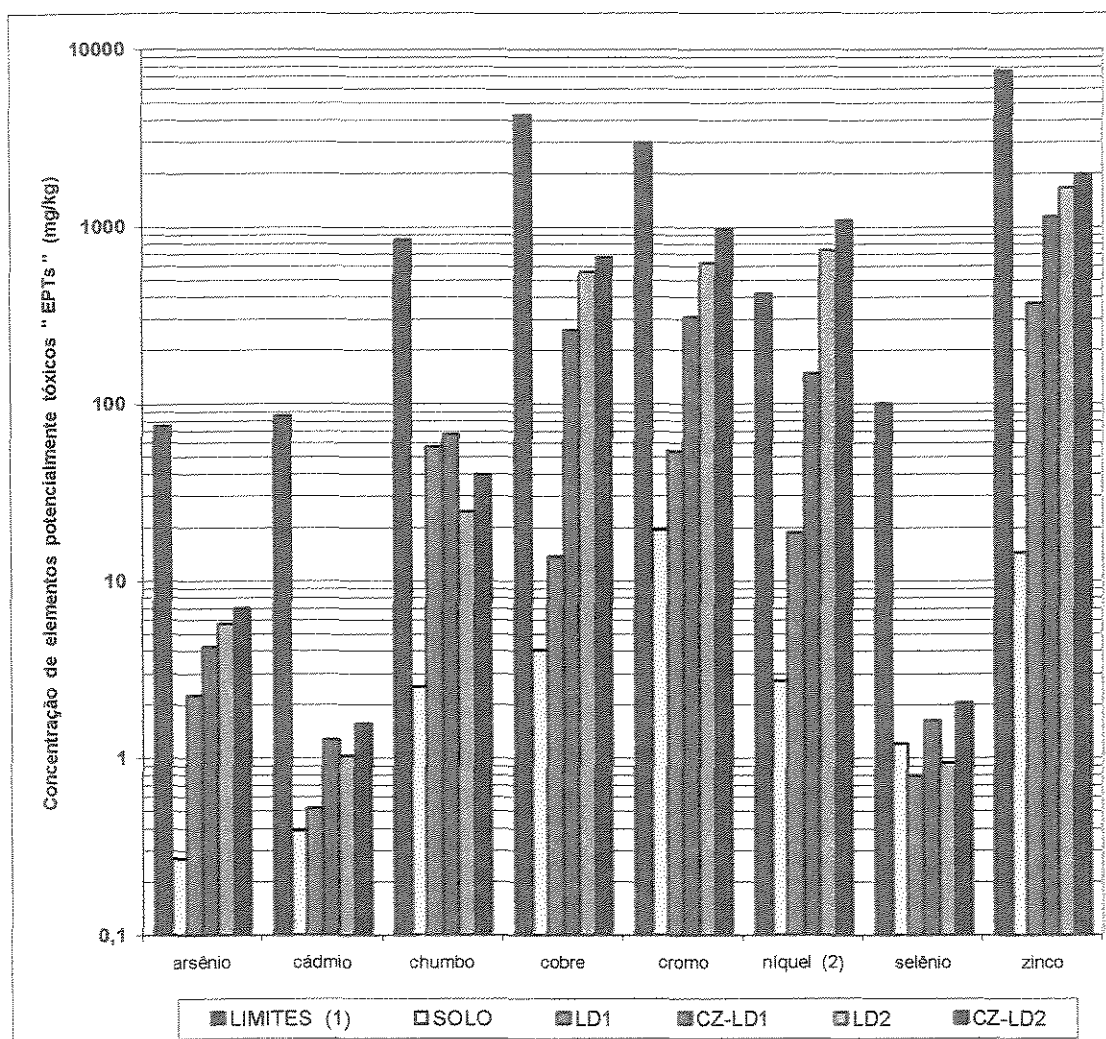


Figura 5.1 - Limites, comparados aos valores de EPTs medidos: no solo, no LD1 e LD2 e suas cinzas

Analisando-se os resultados das concentrações de EPTs e demais metais no solo no LD1, no LD2 e respectivas cinzas, apresentados nas Tabelas 5.2, 5.5 e 5.6 e Figura 5.1, verifica-se que:

- o solo apresentou valores de concentração de EPTs sempre bem menores que os lodos e suas cinzas (resultado coerente e já esperado);
- com exceção do chumbo, todos os demais EPTs medidos no LD1 e suas cinzas apresentaram concentrações menores que o LD2 e respectivas cinzas;
- para todos os EPTs verificou-se uma maior concentração nas cinzas quando comparadas aos lodos secos a 105 °C (o que também já era esperado); e,
- no caso do LD2 e suas cinzas o elemento níquel excedeu os limites da norma P-4230 (CETESB, 1999) e, assim, este lodo não poderia ser usado para fins agrícolas.

Quanto aos resultados obtidos para os demais metais medidos (Tabelas 5.2 e 5.5), deve-se destacar:

- o solo apresentou menor concentração de metais que os lodos, excetuando-se: o alumínio, para o qual apenas as cinzas do LD2 tiveram maior concentração que o solo; o potássio, para o qual o LD2 apresentou menor concentração que o solo; o silício, cujas cinzas do LD1 apresentaram menor concentração que o solo, e o sódio, para o qual o LD1 apresentou menor concentração do que o solo;
- o LD1 apresentou concentrações maiores de metais do que o LD2, para os seguintes elementos: cálcio (o que já esperado), por causa da cal usada na desidratação do LD1; magnésio, manganês, potássio, silício e titânio;
- para os demais elementos medidos: alumínio, bário, ferro e sódio, o LD2 apresentou concentrações maiores do que o LD1;

- as cinzas mostraram-se também mais concentradas em metais do que os lodos secos a 105 °C, exceções feitas ao cálcio, ao magnésio, ao manganês, ao potássio e ao silício, presentes no LD1 em maior quantidade do que em suas cinzas; e,
- no caso do LD2, para todos os metais foi observada uma maior concentração nas cinzas, quando comparadas ao lodo seco a 105 °C.

Era de se esperar que a concentração de todos os metais, quando medidos nas cinzas do lodo, fossem maiores que nos lodos secos a 105 °C por causa da acumulação que vai ocorrendo à medida que se provoca a queima de sólidos voláteis, excetuando-se naturalmente aqueles metais que volatilizam sob temperaturas menores do que 900 °C. Isso realmente ocorreu com o LD2 mas não com o LD1, conforme se pôde constatar pelos resultados apresentados para alguns metais (cálcio, magnésio, manganês, potássio e silício).

Os valores médios obtidos para as concentrações dos radionuclídeos tório (^{232}Th), urânio ($^{238}\text{U} + ^{235}\text{U}$) e potássio (^{40}K), presentes nos solos e nos lodos, são apresentados nas tabelas 5.2, 5.5 e 5.7. Na Tabela 5.7 são apresentados todos os resultados obtidos e da sua análise, pode-se perceber que:

- comparando-se os valores médios obtidos para o LD1 com os do solo, verifica-se que o LD1 apresentou menor concentração de tório, praticamente igual concentração de urânio e maior concentração de potássio;
- comparando-se os valores médios obtidos para o LD2 com os do solo, verifica-se que o LD2 apresentou 2 vezes maior concentração de tório e de potássio e 2,8 vezes maior concentração de urânio;
- comparando-se os valores obtidos para o LD1 com os do LD2 percebe-se que este último apresenta uma concentração média 2,7 vezes maior do que a do LD1 para o tório e o urânio, e 1,7 vezes maior para o potássio; e,

Tabela 5.7 - Concentrações de radionuclídeos (média $\pm$ desvio-padrão) nos lodos e no solo

Amostra	Data da coleta	CONCENTRAÇÕES DE RADIONUCLÍDEOS NOS LODOS E NO SOLO					
		^{232}Th		$U_{\text{nat.}} = ^{238}\text{U} + ^{235}\text{U}$		^{40}K	
		mg . kg ⁻¹	Bq . kg ⁻¹	mg . kg ⁻¹	Bq . kg ⁻¹	mg . kg ⁻¹	Bq . kg ⁻¹
LD1-A	08/02/01	9,7 $\pm$ 0,3	39,5 $\pm$ 1,2	4,4 $\pm$ 0,1	53,7 $\pm$ 1,2	0	0
LD1-B	"	13,3 $\pm$ 0,4	54,1 $\pm$ 1,6	4,7 $\pm$ 0,1	57,4 $\pm$ 1,2	1245,2 $\pm$ 166,0	39,3 $\pm$ 5,2
LD1-C	"	14,2 $\pm$ 0,4	57,8 $\pm$ 1,6	5,0 $\pm$ 0,1	61,0 $\pm$ 1,2	415,1 $\pm$ 83,0	13,1 $\pm$ 2,7
LD1-D	15/03/01	13,7 $\pm$ 0,4	55,8 $\pm$ 1,6	4,8 $\pm$ 0,1	58,6 $\pm$ 1,2	1743,3 $\pm$ 166,0	55,0 $\pm$ 5,2
LD1-E	"	13,5 $\pm$ 0,4	55,0 $\pm$ 1,6	4,7 $\pm$ 0,1	57,4 $\pm$ 1,2	332,1 $\pm$ 0,0	10,5 $\pm$ 0,0
LD1-F	"	14,2 $\pm$ 0,4	57,8 $\pm$ 1,6	4,9 $\pm$ 0,1	59,8 $\pm$ 1,2	1577,3 $\pm$ 166,0	49,8 $\pm$ 5,2
Média (LD1)		13,1	53,3	4,8	58,0	1062,6	33,5
Desv. padrão (LD1)		1,7	6,9	0,2	2,5	655,0	20,7
LD2-A	08/02/01	29,7 $\pm$ 0,9	120,9 $\pm$ 4,2	12,3 $\pm$ 0,3	150,2 $\pm$ 3,7	996,2 $\pm$ 83,0	31,5 $\pm$ 2,7
LD2-B	"	36,7 $\pm$ 1,1	149,4 $\pm$ 4,5	12,1 $\pm$ 0,3	147,7 $\pm$ 3,7	2075,4 $\pm$ 249,0	65,5 $\pm$ 7,9
LD2-C	"	37,6 $\pm$ 1,1	153,0 $\pm$ 4,5	12,7 $\pm$ 0,3	155,1 $\pm$ 3,7	2905,5 $\pm$ 332,1	91,7 $\pm$ 10,5
LD2-D	15/03/01	34,4 $\pm$ 1,0	140,0 $\pm$ 4,1	13,3 $\pm$ 0,3	168,5 $\pm$ 3,7	1162,2 $\pm$ 83,0	36,7 $\pm$ 2,7
LD2-E	"	36,1 $\pm$ 1,1	146,9 $\pm$ 4,5	12,8 $\pm$ 0,3	156,3 $\pm$ 3,7	1862,3 $\pm$ 166,0	57,6 $\pm$ 5,2
LD2-F	"	37,5 $\pm$ 1,1	152,6 $\pm$ 4,5	13,1 $\pm$ 0,3	160,0 $\pm$ 3,7	1992,4 $\pm$ 166,0	62,8 $\pm$ 5,2
Média (LD2)		35,3	143,8	12,8	156,3	1826,3	57,6
Desv. padrão (LD2)		3,0	12,2	0,6	7,4	69,1	21,8
SOLO		17,5	71,2	4,6	56,2	913,2	28,8
SOLO (desv. padr.)		0,5	2,0	0,1	1,2	83,0	2,7
Comparando-se os valores médios:							
(LD1 $\div$ solo)		0,7	0,7	1,0	1,0	1,2	1,2
(LD2 $\div$ solo)		2,0	2,0	2,8	2,8	2,0	2,0
(LD2 $\div$ LD1)		2,7	2,7	2,7	2,7	1,7	1,7

- finalmente e, apenas para fins comparativos, se forem somadas as concentrações de radioatividade (em Bq/kg) dos 3 elementos analisados, o LD1 soma uma concentração de radioatividade de 144,8 Bq/kg, o LD2 357,7 Bq/kg e o solo 156,2 Bq/kg, mostrando que tanto o solo quanto o LD1, apresentam radioatividade dentro de uma faixa considerada normal mas o LD2 apresenta cerca de 2,5 vezes mais radioatividade que o LD1 e cerca de 2,3 vezes mais radioatividade do que o solo. A razão disso só pode ser detectada através de um balanço de massa, que não foi objeto deste trabalho e, portanto, fica como sugestão para futuras pesquisas.

5.5 Resultados dos ensaios realizados nas massas cerâmicas

5.5.1 Diagrama tempo x temperatura de queima dos tijolos

O diagrama tempo x temperatura de queima utilizado nesta pesquisa é apresentado na Figura A4 dos Anexos. Nos testes preliminares, esse diagrama foi o que apresentou melhores resultados em termos de resistência final à compressão dos CPs. Os vários diagramas testados foram baseados no perfil de subida e descida da temperatura, característico do forno-mufla utilizado (Q-318 – D21 da Quimis) e no resultado do ensaio preliminar de perda de massa, realizado com a massa cerâmica preparada com o solo argiloso, conforme detalhado no item 4.5.2 e cujos resultados são apresentados na Tabela A1 e Figura A5 dos Anexos. O forno utilizado tem características de velocidade de subida da temperatura muito rápida, indo da temperatura ambiente até 950 °C em apenas 1,5 horas. Assim, houve necessidade do estabelecimento de patamares, nos quais os corpos de prova pudessem permanecer mais tempo sob determinadas temperaturas, durante a operação de queima, visando a evitar choques térmicos que pudessem resultar em trincas no produto final. O perfil de queda da temperatura (com o forno desligado) é suficientemente lento (cerca de 34 horas para voltar à temperatura ambiente); não tendo sido necessário o estabelecimento de patamares.

5.5.2 Moldagem dos corpos de prova

Para a massa cerâmica MC-0 (feita só o solo argiloso ou testemunho) e cada uma das 6 massas cerâmicas preparadas com as misturas solo-lodo (secos a 105 °C), nas percentagens de 10, 20 e 30 % de lodo na mistura, foram feitas 3 moldagens de CPs (tijolos maciços de 10 x 5 x 2,5 cm), em diferentes datas, identificadas pelas letras A, B e C. Na primeira delas (moldagem “A”) foram moldados 8 corpos de prova e nas demais

10 corpos de prova cada, num total de 28 corpos de prova para cada diferente massa cerâmica. Para cada uma das 8 massas cerâmicas preparadas com a mistura solo e cinzas de lodo (queimadas a 900 °C), nas percentagens estipuladas de 10, 20, 30 e 40 % de cinzas dos lodos na mistura, foram feitas 2 moldagens de 10 corpos de prova cada, em datas diferentes, identificadas pelas letras A e B, totalizando 20 corpos de prova por massa cerâmica feitas com cinzas. No total geral foram moldados 356 corpos de prova.

5.5.3 Teor de umidade dos corpos de prova pós-moldagem “h_{PM}”

Os resultados de todos os ensaios cerâmicos, incluindo os relativos ao teor de umidade pós-moldagem de cada corpo de prova, são apresentados nas Tabelas A39 a A53 dos Anexos. Na Tabela 5.8 é apresentado um resumo dos valores médios obtidos para cada uma das massas cerâmicas relativos apenas ao teor de umidade pós-moldagem.

Tabela 5.8 - Teor de umidade pós-moldagem “h_{PM}” nas diversas massas cerâmicas (%)

Tipo de lodo ou de cinzas	Percentagem de lodo ou de cinzas na massa cerâmica				
	0 %	10 %	20 %	30 %	40 %
TESTEMUNHO	30,05	-	-	-	-
LD1	-	32,82	36,61	39,34	-
CZ-LD1	-	36,64	36,38	38,65	41,15
LD2	-	32,35	31,48	31,88	-
CZ-LD2	-	33,11	31,93	34,62	36,59

OBS.: TESTEMUNHO = Massa cerâmica feita apenas com solo argiloso (com 0 % de lodo)

LD1 = lodo oriundo de um sistema de lodos ativados, condicionado com cal e cloreto férrico e desaguado em filtro-prensa de placas,. Posteriormente seco à temperatura de 105 °C em laboratório;

CZ-LD1 = material anteriormente descrito pós- queima sob temperatura de 900 °C;

LD2 = lodo oriundo de um reator anaeróbio de fluxo ascendente, desaguado em leito de secagem, sem pré-condicionamento químico. Posteriormente seco a 105 °C.

CZ-LD2 = material anteriormente descrito, pós-queima sob temperatura de 900 °C.

Analisando-se os resultados apresentados na tabela 5.8, pode-se observar que:

- a moldagem manual das massas cerâmicas só foi possível a partir de teores de umidade superiores ao limite de plasticidade do solo argiloso, que neste caso foi de 25,4 %. Para a MC-0 (testemunho), resultou num valor médio $h_{PM} = 30,05 \%$;
- quando se fez a mistura com os lodos e suas cinzas nas diversas percentagens previstas, houve necessidade de aumentar a quantidade de água para tornar a massa cerâmica mais trabalhável e esta foi maior no caso do LD1 e suas cinzas (por exemplo, para a MC-40-CZ-LD1 chegou a 41,15 %). Esse comportamento provavelmente pode mais uma vez ser explicado pela presença da cal usada no desaguamento desse lodo; e,
- observou-se ainda uma tendência de aumentar a h_{PM} com o aumento da percentagem de lodos na mistura, com exceção das MCs feitas com o LD2 (seco a 105 °C), cuja moldagem se tornou possível mantendo-se os valores de h_{PM} numa faixa com pequenas variações (31,48 a 32,35 %).

5.5.4 Acompanhamento da secagem ao ar de cada corpo de prova

O acompanhamento da secagem ao ar, para cada CP, foi feito através da pesagem dos mesmos, durante um período mínimo de 10 e máximo de 16 dias, pelo menos 1 vez ao dia e apenas nos dias úteis. Utilizou-se balança analítica com precisão de 0,1 g.

Com esses dados foram calculadas as perdas acumuladas de massa (em gramas) e as percentagens de perda de massa acumulada, em relação ao peso seco de cada CP, ao longo do tempo de secagem ao ar. Os resultados destas últimas foram apresentados nas Tabelas A2 a A38 dos Anexos.

Talvez em razão do tamanho reduzido dos corpos de prova, estes aderiam firmemente às fôrmas, não se conseguindo fazer a desmoldagem imediatamente. Assim, os CPs permaneceram nas respectivas formas de madeira, durante um certo período de tempo. Excetuando-se as moldagens MC-0-A e MC-10-LD1-A, cuja retirada das formas foi feita no 2º dia pós-moldagem e da MC-40-CZ-LD1-A, no 8º dia, para os demais CPs a desmoldagem foi feita no 7º dia (ver Fig. A53 e A54 nos Anexos). Excetuando-se as massas cerâmicas identificadas como MC-0-A e MC-10-LD1-A, cuja secagem ao ar foi feita sem nenhum confinamento, a MC-20-LD1-A, cujo confinamento foi feito durante todo o período de secagem e a MC-40-CZ-LD1-B, cujo desconfinamento foi feito no 8º dia, todos os demais corpos de prova permaneceram nas fôrmas, sob confinamento, até o 7º dia e sem confinamento no período de tempo restante, durante o período de secagem ao ar. O confinamento visava a evitar trincas de retração, causadas pela secagem muito rápida. Para obtê-lo cobriu-se os corpos de prova com uma caixa de madeira, permitindo a troca de ar apenas por uma fresta na parte inferior (ver Fig. A55 e A56 nos Anexos).

Para as massas cerâmicas MC-0-A, MC-10-LD1-A e MC-20-LD1-A foi elaborado 1 gráfico de perda acumulada de massa ao longo do tempo de secagem ao ar. Para todas as demais massas cerâmicas foi elaborado 1 gráfico válido até o 7º dia (tempo em que os corpos de prova estiveram conformados e confinados) e outro do 7º dia em diante (após a retirada da forma e o desconfinamento). Foram obtidas as equações que expressam as percentagens de perda média acumulada de massa em relação ao peso seco, ao longo do tempo (Ver Figuras A6 a A42 dos Anexos). Na tabela 5.9 apresentam-se os números de corpos de prova de cada moldagem, as respectivas equações de perda média de massa Δ_M (em % do peso seco), em função do tempo de exposição ao ar T_e (em dias), o coeficiente de correlação R^2 , bem como o período de validade de cada equação, para cada uma das 15 diferentes massas cerâmicas, totalizando as 37 moldagens de corpos de prova. Na Tabela 5.10 apresentam-se as perdas médias acumuladas de cada MC, calculadas através das equações obtidas para cada MC. Na Figura 5.2 apresentam-se os gráficos e equações que representam a média geral das perdas acumuladas de massa, durante a secagem ao ar.

Tabela 5.9 - Equações de perdas médias de massa durante a secagem ao ar

MASSAS CERÂMICAS e nº de CPs	Equações de perdas médias de massa Δ_M (em % do peso seco), em função do tempo de exposição ao ar T_E (em dias)	
MC-0-A (8 CPs)	$\Delta_M = -0,0008.T_E^5 + 0,0323.T_E^4 - 0,4296.T_E^3 + 1,9494.T_E^2 + 1,7792.T_E + 0,726$	$(R^2 = 0,999)$ válida até o 10º dia
MC-0-B (10 CPs)	$\Delta_M = -0,016.T_E^3 + 0,1469.T_E^2 + 0,762.T_E + 0,1116$	$(R^2 = 0,9987)$ válida até o 7º dia
	$\Delta_M = -0,01.T_E^4 + 0,4566.T_E^3 - 7,7371.T_E^2 + 59,538.T_E - 162,31$	$(R^2 = 0,9962)$ do 7º ao 16º dias
MC-0-C (10 CPs)	$\Delta_M = 0,0027.T_E^3 - 0,0285.T_E^2 + 1,0005.T_E + 0,0697$	$(R^2 = 0,9991)$ válida até o 7º dia
	$\Delta_M = -0,2697.T_E^2 + 8,3938.T_E - 38,185$	$(R^2 = 0,9988)$ válida do 7º ao 15º dias
MC-10-LD1-A (8 CPs)	$\Delta_M = 0,0078.T_E^4 - 0,1662.T_E^3 + 0,7887.T_E^2 + 3,7455.T_E + 0,3379$	$(R^2 = 0,9991)$ válida até o 10º dia
MC-10-LD1-B (10 CPs)	$\Delta_M = -0,0121.T_E^3 + 0,1271.T_E^2 + 0,9317.T_E + 0,0226$	$(R^2 = 0,9992)$ válida até o 7º dia
	$\Delta_M = -0,3052.T_E^2 + 9,1464.T_E - 39,478$	$(R^2 = 0,9994)$ válida do 7º ao 16º dias
MC-10-LD1-C (10 CPs)	$\Delta_M = 0,055.T_E^3 - 0,4187.T_E^2 + 1,8835.T_E + 0,0994$	$(R^2 = 0,9998)$ válida até o 7º dia
	$\Delta_M = 0,0176.T_E^3 - 0,8486.T_E^2 + 13,892.T_E - 49,933$	$(R^2 = 0,9914)$ válida do 7º ao 16º dias
MC-20-LD1-A (8 CPs)	$\Delta_M = 0,0117.T_E^3 - 0,1751.T_E^2 + 2,2729.T_E - 0,1612$	$(R^2 = 0,9986)$ válida até o 7º dia
	$\Delta_M = -0,1376.T_E^2 + 5,0189.T_E - 16,312$	$(R^2 = 0,995)$ válida do 7º ao 16º dias
MC-20-LD1-B (10 CPs)	$\Delta_M = -0,0083.T_E^3 + 0,0643.T_E^2 + 1,0942.T_E + 0,208$	$(R^2 = 0,9937)$ válida até o 7º dia
	$\Delta_M = -0,2674.T_E^2 + 8,4095.T_E - 37,282$	$(R^2 = 0,9971)$ válida do 7º ao 16º dias
MC-20-LD1-C (10 CPs)	$\Delta_M = -0,03.T_E^3 + 0,2603.T_E^2 + 0,6478.T_E + 0,0007$	$(R^2 = 0,9991)$ válida até o 7º dia
	$\Delta_M = -0,1934.T_E^2 + 7,1039.T_E - 32,602$	$(R^2 = 0,9988)$ válida do 7º ao 16º dias
MC-30-LD1-A (8 CPs)	$\Delta_M = 0,0348.T_E^3 - 0,3614.T_E^2 + 2,1592.T_E + 0,1497$	$(R^2 = 0,9942)$ válida até o 7º dia
	$\Delta_M = 0,0344.T_E^3 - 1,46.T_E^2 + 21,416.T_E - 79,983$	$(R^2 = 0,9993)$ válida do 7º ao 16º dias
MC-30-LD1-B (10 CPs)	$\Delta_M = -0,0145.T_E^3 + 0,2016.T_E^2 + 0,8077.T_E + 0,0065$	$(R^2 = 0,9986)$ válida até o 7º dia
	$\Delta_M = 0,0032.T_E^5 - 0,1974.T_E^4 + 4,7429.T_E^3 - 55,502.T_E^2 + 318,31.T_E - 703,55$	$(R^2 = 0,9964)$ do 7º - 16º
MC-30-LD1-C (10 CPs)	$\Delta_M = 0,0408.T_E^3 - 0,35.T_E^2 + 1,5118.T_E + 0,1227$	$(R^2 = 0,995)$ válida até o 7º dia
	$\Delta_M = -0,0589.T_E^3 + 1,8827.T_E^2 - 16,24.T_E + 49,511$	$(R^2 = 0,9969)$ válida do 7º ao 16º dias
MC-10-CZ-LD1-A (10 CPs)	$\Delta_M = 0,0156.T_E^3 - 0,1605.T_E^2 + 1,2529.T_E + 0,0101$	$(R^2 = 0,9985)$ válida até o 7º dia
	$\Delta_M = -0,0175.T_E^3 + 0,2041.T_E^2 + 5,2939.T_E - 34,149$	$(R^2 = 0,9997)$ válida do 7º ao 15º dias
MC-10-CZ-LD1-B (10 CPs)	$\Delta_M = 0,0048.T_E^3 + 0,0163.T_E^2 + 1,1055.T_E + 0,1409$	$(R^2 = 0,9991)$ válida até o 7º dia
	$\Delta_M = 0,0774.T_E^3 - 2,0714.T_E^2 + 22,485.T_E - 71,517$	$(R^2 = 0,9981)$ válida do 7º ao 12º dias
MC-20-CZ-LD1-A (10 CPs)	$\Delta_M = -0,0258.T_E^3 + 0,295.T_E^2 + 0,0779.T_E + 0,1482$	$(R^2 = 0,9973)$ válida até o 7º dia
	$\Delta_M = 0,0112.T_E^3 - 0,6514.T_E^2 + 12,858.T_E - 54,897$	$(R^2 = 0,9984)$ válida do 7º ao 16º dias
MC-20-CZ-LD1-B (10 CPs)	$\Delta_M = 0,029.T_E^3 - 0,2938.T_E^2 + 1,5842.T_E + 0,0448$	$(R^2 = 0,9996)$ válida até o 7º dia
	$\Delta_M = -0,0087.T_E^3 + 0,1873.T_E^2 + 2,0618.T_E - 13,572$	$(R^2 = 0,9974)$ válida do 7º ao 16º dias
MC-30-CZ-LD1-A (10 CPs)	$\Delta_M = -0,0062.T_E^3 + 0,0594.T_E^2 + 0,736.T_E + 0,0799$	$(R^2 = 0,9996)$ válida até o 7º dia
	$\Delta_M = 0,016.T_E^3 - 1,024.T_E^2 + 19,799.T_E - 86,668$	$(R^2 = 0,9996)$ do 7º ao 16º dias
MC-30-CZ-LD1-B (10 CPs)	$\Delta_M = 0,0138.T_E^3 - 0,0934.T_E^2 + 1,0822.T_E + 0,1229$	$(R^2 = 0,9993)$ válida até o 7º dia
	$\Delta_M = 0,0146.T_E^4 - 0,7154.T_E^3 + 12,487.T_E^2 - 88,783.T_E + 228,25$	$(R^2 = 0,9967)$ do 7º ao 15º dias

continua

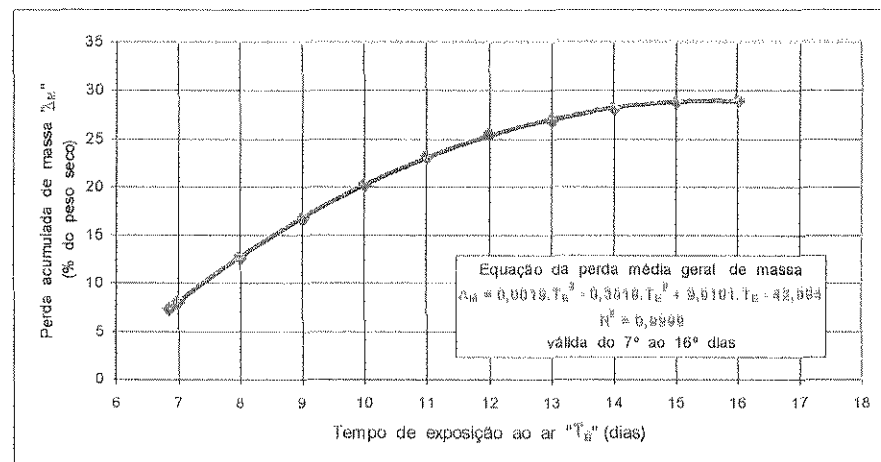
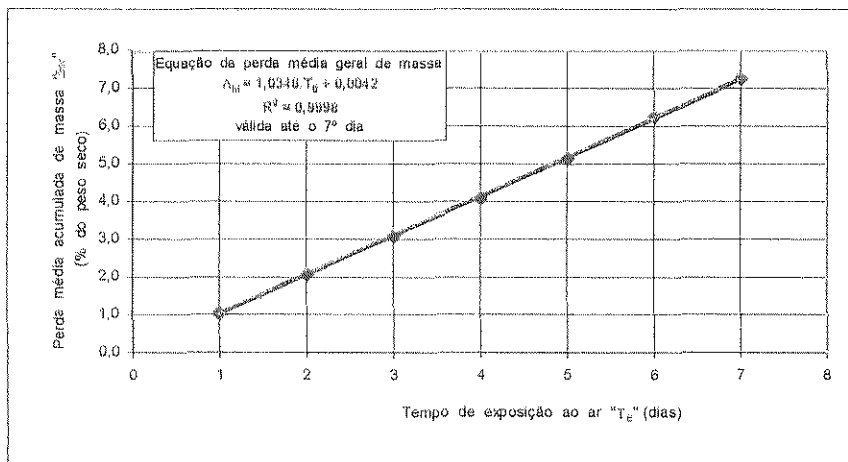
Tabela 5.9 - Equações de perdas médias de massa durante a secagem ao ar (continuação)

MASSAS CERÂMICAS e nº de CPs	Equações de perdas médias de massa Δ_M (em % do peso seco), em função do tempo de exposição ao ar T_E (em dias)
MC-40-CZ-LD1-A (10 CPs)	$\Delta_M = 0,0197.T_E^3 - 0,123.T_E^2 + 1,3475.T_E + 0,046$ ($R^2 = 0,9976$) válida até o 7º dia $\Delta_M = -0,0351.T_E^3 + 1,182.T_E^2 - 9,7469.T_E + 32,407$ ($R^2 = 0,9979$) do 7º ao 16º dias
MC-40-CZ-LD1-B (10 CPs)	$\Delta_M = 0,0181.T_E^3 - 0,1549.T_E^2 + 0,9708.T_E + 0,0495$ ($R^2 = 0,9998$) válida até o 8º dia $\Delta_M = 0,054.T_E^3 - 2,2521.T_E^2 + 33,225.T_E - 141,52$ ($R^2 = 0,9992$) do 8º ao 16º dias
MC-10-LD2-A (8 CPs)	$\Delta_M = 0,0041.T_E^3 + 0,0088.T_E^2 + 0,4876.T_E + 0,0491$ ($R^2 = 0,9984$) válida até o 7º dia $\Delta_M = -0,2616.T_E^2 + 8,3698.T_E - 39,404$ ($R^2 = 0,9996$) válida do 7º ao 16º dias
MC-10-LD2-B (10 CPs)	$\Delta_M = -0,008.T_E^3 + 0,035.T_E^2 + 0,9673.T_E + 0,0109$ ($R^2 = 0,9988$) válida até o 7º dia $\Delta_M = -0,0077.T_E^4 + 0,3402.T_E^3 - 5,6203.T_E^2 + 43,628.T_E - 121,43$ ($R^2 = 0,9989$) do 7º ao 16º dias
MC-10-LD2-C (10 CPs)	$\Delta_M = 0,0149.T_E^3 - 0,1384.T_E^2 + 1,0806.T_E + 0,0103$ ($R^2 = 0,9993$) válida até o 7º dia $\Delta_M = 0,0373.T_E^3 - 1,7244.T_E^2 + 26,595.T_E - 107,99$ ($R^2 = 0,9957$) válida do 7º ao 16º dias
MC-20-LD2-A (8 CPs)	$\Delta_M = 0,0109.T_E^3 - 0,0704.T_E^2 + 0,927.T_E + 0,0996$ ($R^2 = 0,9974$) válida até o 7º dia $\Delta_M = 0,016.T_E^3 - 0,9229.T_E^2 + 16,652.T_E - 69,349$ ($R^2 = 0,9992$) válida do 7º ao 16º dias
MC-20-LD2-B (10 CPs)	$\Delta_M = -0,0339.T_E^3 + 0,285.T_E^2 + 0,9489.T_E + 0,0423$ ($R^2 = 0,9989$) válida até o 7º dia $\Delta_M = 0,0134.T_E^3 - 0,7224.T_E^2 + 12,948.T_E - 50,65$ ($R^2 = 0,9926$) válida do 7º ao 16º dias
MC-20-LD2-C (10 CPs)	$\Delta_M = 0,0139.T_E^3 - 0,1466.T_E^2 + 1,2272.T_E - 0,0338$ ($R^2 = 0,9956$) válida até o 7º dia $\Delta_M = 0,0166.T_E^3 - 0,8861.T_E^2 + 15,427.T_E - 63,455$ ($R^2 = 0,9989$) válida do 7º ao 16º dias
MC-30-LD2-A (8 CPs)	$\Delta_M = -0,0151.T_E^3 + 0,1075.T_E^2 + 1,0907.T_E + 0,1654$ ($R^2 = 0,9993$) válida até o 7º dia $\Delta_M = 0,0217.T_E^3 - 1,0544.T_E^2 + 17,072.T_E - 66,929$ ($R^2 = 0,9987$) válida do 7º ao 16º dias
MC-30-LD2-B (10 CPs)	$\Delta_M = -0,0008.T_E^3 - 0,0391.T_E^2 + 1,2541.T_E + 0,0262$ ($R^2 = 0,9981$) válida até o 7º dia $\Delta_M = -0,012.T_E^3 + 0,2482.T_E^2 + 1,1873.T_E - 9,3035$ ($R^2 = 0,9969$) válida do 7º ao 16º dias
MC-30-LD2-C (10 CPs)	$\Delta_M = -0,0122.T_E^3 + 0,1588.T_E^2 + 0,3031.T_E + 0,1226$ ($R^2 = 0,9973$) válida até o 7º dia $\Delta_M = 0,0163.T_E^4 - 0,7656.T_E^3 + 12,782.T_E^2 - 86,656.T_E + 209,98$ ($R^2 = 0,9993$) do 7º ao 16º dias
MC-10-CZ-LD2-A (10 CPs)	$\Delta_M = -0,0141.T_E^3 + 0,1468.T_E^2 + 1,0615.T_E + 0,1137$ ($R^2 = 0,9994$) válida até o 7º dia $\Delta_M = 0,028.T_E^3 - 1,3255.T_E^2 + 21,06.T_E - 81,624$ ($R^2 = 0,9998$) válida do 7º ao 15º dias
MC-10-CZ-LD2-B (10 CPs)	$\Delta_M = 0,0242.T_E^3 - 0,2202.T_E^2 + 1,4452.T_E + 0,088$ ($R^2 = 0,9995$) válida até o 7º dia $\Delta_M = 0,0156.T_E^3 - 0,9571.T_E^2 + 17,747.T_E - 74,29$ ($R^2 = 0,9994$) válida do 7º ao 15º dias
MC-20-CZ-LD2-A (10 CPs)	$\Delta_M = -0,0391.T_E^3 + 0,4022.T_E^2 + 0,2023.T_E + 0,1865$ ($R^2 = 0,9949$) válida até o 7º dia $\Delta_M = 0,0056.T_E^3 - 0,4424.T_E^2 + 9,9403.T_E - 41,525$ ($R^2 = 0,9992$) válida do 7º ao 16º dias
MC-20-CZ-LD2-B (10 CPs)	$\Delta_M = -0,0025.T_E^3 + 0,0012.T_E^2 + 0,9333.T_E + 0,0134$ ($R^2 = 0,9989$) válida até o 7º dia $\Delta_M = 0,0188.T_E^4 - 0,8226.T_E^3 + 12,682.T_E^2 - 77,798.T_E + 166,58$ ($R^2 = 0,9996$) do 7º ao 16º dias
MC-30-CZ-LD2-A (10 CPs)	$\Delta_M = -0,0062.T_E^3 + 0,0594.T_E^2 + 0,736.T_E + 0,0799$ ($R^2 = 0,9996$) válida até o 7º dia $\Delta_M = 0,016.T_E^3 - 1,024.T_E^2 + 19,799.T_E - 86,668$ ($R^2 = 0,9996$) do 7º ao 16º dias
MC-30-CZ-LD2-B (10 CPs)	$\Delta_M = 0,0006.T_E^3 + 0,0046.T_E^2 + 0,9772.T_E + 0,0997$ ($R^2 = 0,9992$) válida até o 7º dia $\Delta_M = -0,3495.T_E^2 + 10,421.T_E - 47,942$ ($R^2 = 0,9961$) válida do 7º ao 15º dias
MC-40-CZ-LD2-A (10 CPs)	$\Delta_M = 0,0221.T_E^3 - 0,2136.T_E^2 + 1,3617.T_E + 0,0168$ ($R^2 = 0,9989$) válida até o 7º dia $\Delta_M = -0,0157.T_E^4 + 0,761.T_E^3 - 13,769.T_E^2 + 111,8.T_E - 322,64$ ($R^2 = 0,9966$) 7º ao 16º dias
MC-40-CZ-LD2-B (10 CPs)	$\Delta_M = 0,0181.T_E^3 - 0,1549.T_E^2 + 0,9708.T_E + 0,0495$ ($R^2 = 0,9998$) válida até o 7º dia $\Delta_M = -0,0004.T_E^3 - 0,2838.T_E^2 + 9,2592.T_E - 43,394$ ($R^2 = 0,9992$) válida do 7º ao 16º dias

Tabela 5.10 - Perdas médias de massa de cada massa cerâmica (MC) na secagem ao ar
(valores obtidos a partir das equações apresentadas na Tabela 5.9)

Tempo "T _E " (dias)	TESTEMUNHO			MCs FEITAS COM LD1 (seco a 105 °C)									MCs FEITAS COM CINZAS DO LD1								MCs FEITAS COM LD2 (seco a 105 °C)									MCs FEITAS COM CINZAS DO LD2								Média
				10%			20%			30%			10%			20%			30%		40%		10%			20%			30%		40%							
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	A	B	A	B	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	A	B	A	B					
1	4,1	1,0	1,0	4,7	1,1	1,6	1,9	1,4	0,9	2,0	1,0	1,3	1,1	1,4	0,5	1,4	0,9	1,1	1,2	0,9	0,5	1,0	1,0	1,0	1,2	1,1	1,3	1,2	0,6	1,3	1,3	0,8	0,9	0,9	1,1	1,2	0,9	1,1
2	9,1	2,1	2,0	9,8	2,3	2,6	3,8	2,6	2,1	3,3	2,3	2,1	2,0	2,7	1,3	2,3	1,7	2,0	2,3	1,5	1,1	2,0	1,7	1,8	2,8	1,9	2,7	2,4	1,3	2,7	2,3	1,9	1,9	1,7	2,1	2,1	1,5	2,1
3	14,4	3,3	2,9	14,8	3,6	3,5	5,4	3,8	3,5	4,3	3,9	2,6	2,7	4,0	2,3	2,9	2,7	2,9	3,4	2,1	1,7	3,0	2,4	2,5	4,5	2,7	4,0	3,4	2,1	4,2	3,1	3,4	2,8	2,7	3,1	2,8	2,1	3,1
4	19,0	4,5	3,8	19,3	5,0	4,5	6,9	5,1	4,8	5,2	5,5	3,2	3,5	5,5	3,5	3,5	3,6	3,8	4,6	2,6	2,4	3,9	3,1	3,4	6,2	3,4	5,3	4,4	3,1	5,8	3,9	4,9	3,6	3,6	4,1	3,5	2,6	4,1
5	22,3	5,6	4,7	22,9	6,3	5,9	8,3	6,2	6,0	6,3	7,3	4,0	4,2	7,2	4,7	4,2	4,5	4,9	6,1	3,3	3,2	4,7	3,8	4,3	7,7	4,2	6,4	5,2	4,1	7,3	4,8	6,4	4,4	4,5	5,2	4,2	3,3	5,2
6	24,4	6,5	5,6	25,4	7,6	8,2	9,7	7,3	6,8	7,6	9,0	5,4	5,1	9,0	5,7	5,2	5,3	6,2	7,9	4,2	4,2	5,3	4,7	5,5	8,7	5,1	7,3	6,0	5,0	8,7	6,1	7,4	5,1	5,3	6,3	5,3	4,2	6,3
6,85	25,4	7,1	6,5	26,8	8,5	11,0	11,0	8,1	7,0	9,2	10,3	7,2	6,1	10,7	6,2	6,4	5,9	7,6	9,7	5,2	5,1	5,7	5,7	6,6	9,0	6,0	7,8	6,5	5,7	9,7	7,4	7,9	5,7	5,9	7,2	6,4	5,2	7,3
6,85	26,4	7,2	6,7	26,8	8,9	11,1	11,6	8,2	7,0	9,3	10,7	7,7	6,1	10,7	6,2	6,5	6,0	8,2	9,8	5,2	5,7	6,1	5,8	6,6	9,1	6,0	7,9	6,6	6,0	9,8	7,5	8,0	5,8	6,0	7,3	6,8	5,4	7,4
7	25,5	7,9	7,4	26,9	9,6	11,8	12,1	8,5	7,6	10,2	11,7	7,9	6,9	10,9	7,0	7,1	7,2	8,3	10,1	5,5	6,4	6,8	6,5	7,5	9,2	6,8	8,4	7,1	6,2	10,5	8,4	8,3	8,4	7,2	8,0	8,6	7,4	8,1
8	25,9	11,6	11,7	27,6	14,2	15,9	15,0	12,9	11,9	15,5	15,5	9,9	12,3	15,4	12,0	10,5	14,4	10,7	12,1	7,8	10,8	10,5	13,5	13,0	13,6	11,7	13,3	9,9	9,6	16,4	14,4	12,6	11,7	14,4	13,1	15,9	12,3	12,7
9	26,1	14,1	15,5	27,9	18,1	19,2	17,7	16,7	15,7	19,6	17,0	12,9	17,3	19,5	16,2	13,8	20,2	14,9	14,8	14,5	14,7	13,5	18,9	17,4	17,1	15,7	17,1	12,7	14,2	21,0	19,3	16,2	17,3	20,2	17,5	20,0	16,7	16,8
10	26,9	16,0	18,8	28,5	21,5	21,7	20,1	20,1	19,1	22,6	18,2	16,5	21,7	23,6	19,7	17,1	24,9	19,7	18,0	19,5	18,1	16,0	22,8	20,9	20,0	18,8	20,1	15,4	19,0	24,4	23,1	19,2	22,2	24,9	21,3	22,5	20,4	20,2
11	-	17,7	21,5	-	24,2	23,6	22,2	22,9	22,1	24,7	20,1	20,3	25,6	28,2	22,6	20,2	28,5	24,1	21,5	23,3	21,0	18,5	25,5	23,4	22,2	21,1	22,2	17,8	23,9	26,9	25,9	21,7	25,7	28,5	24,4	24,1	23,6	23,1
12	-	19,6	23,7	-	26,3	25,0	24,1	25,1	24,8	26,2	22,6	24,0	28,5	33,8	25,0	23,1	31,1	27,5	25,0	26,2	23,4	21,0	27,3	25,2	23,9	22,8	23,6	19,9	25,8	28,6	27,8	23,7	27,6	31,1	26,8	25,7	26,2	25,6
13	-	21,7	25,4	-	27,8	25,9	25,7	26,9	27,1	27,3	25,0	27,2	30,7	-	26,8	26,8	32,8	29,6	28,3	28,4	25,2	23,4	28,3	26,3	25,0	23,8	24,5	21,7	27,1	29,7	28,9	25,2	28,2	32,8	28,5	27,3	28,1	27,3
14	-	23,5	26,5	-	28,8	26,5	27,0	28,0	28,9	28,1	26,6	29,5	31,9	-	28,2	28,1	33,7	30,6	31,3	30,4	26,5	25,5	28,7	26,8	25,8	24,4	25,0	23,0	27,4	30,3	29,4	26,3	28,1	33,7	29,5	28,9	29,5	28,2
15	-	24,7	27,0	-	29,0	26,9	28,0	28,7	30,4	28,9	27,1	30,7	32,1	-	29,2	30,1	33,9	30,7	33,7	32,4	27,3	26,8	28,8	26,8	26,3	24,6	25,1	23,9	27,4	30,5	29,2	26,9	28,5	33,9	29,7	29,9	30,3	28,8
16	-	24,5	27,1	-	28,7	27,2	28,8	28,8	31,6	29,8	26,5	30,4	-	-	29,9	31,7	33,5	30,9	35,3	34,7	27,5	26,7	28,9	26,4	26,5	24,5	25,2	24,1	28,0	-	-	27,2	31,1	33,5	-	29,4	30,5	28,8

OBS.: O valor assinalado (amarelo) foi rejeitado estatisticamente. A secagem ao ar das massas cerâmicas MC-0-A, MC-10-LD1-A e MC-20-LD1-A foi diferente das demais e por isso não foram levadas em conta no cálculo das médias. B



Figuras 5.2_a e b - Gráficos e equações que representam a média geral das perdas de massa na secagem dos corpos de prova ao ar

Nas Tabelas A2 a A38 e Figuras A6 a A42 dos Anexos foram apresentadas as perdas de massa ao longo do tempo de secagem ao ar e as equações médias resultantes, para os corpos de prova moldados nas mesmas datas. Na Tabela 5.9 foram resumidas todas essas equações médias e na Tabela 5.10 foram apresentadas as perdas médias de massa acumuladas, ao longo do tempo de secagem ao ar, aplicando-se as equações médias obtidas para cada uma das massas cerâmicas. Na figura 5.2 foram mostradas as curvas resultantes da aplicação da média dos resultados da Tabela 5.10 e duas equações gerais, consideradas como média das médias. A equação 5.1 resultou numa reta com coeficiente de correlação $R^2 = 0,9998$ e é considerada válida até o 7º dia.

$$\Delta_M = 1,0346 \cdot T_E + 0,0042 \quad (\text{Eq. 5.1})$$

A equação 5.2 resultou numa curva polinomial de 3º grau com coeficiente de correlação $R^2 = 0,9999$ e é considerada válida do 7º ao 16º dia.

$$\Delta_M = 0,0019 \cdot T_E^3 - 0,3518 \cdot T_E^2 + 9,6101 \cdot T_E - 42,594 \quad (\text{Eq. 5.2})$$

Com elas pode-se eventualmente prever, em termos médios, a perda de massa acumulada Δ_M , em função do tempo de exposição ao ar T_E . Deve-se ressaltar, no entanto, que essas equações somente são válidas para os corpos de prova moldados e mantidos nas formas e em confinamento até o 7º dia e retirados das formas e desconfinados após o 7º dia. Se houver mudança na matéria prima utilizada também não se pode garantir a validade das mesmas. Analisando-se os resultados apresentados nas tabelas e figuras citadas, percebeu-se que:

- mesmo entre os corpos de prova de uma mesma moldagem houve grande variação na velocidade de perda de massa durante a secagem ao ar. Porém, a estabilização final dessas perdas ocorreu geralmente num mesmo período de tempo;
- se comparadas as perdas médias de massa durante a secagem ao ar entre as diversas massas cerâmicas, há variações. Percebeu-se, já durante as medições, uma diferença de

resultados entre os dias secos e os dias chuvosos. Essa diferença está relacionada com a umidade relativa do ar. Nos dias chuvosos, em geral, a umidade relativa do ar aumentava, causando a diminuição da troca de umidade com a atmosfera, diminuindo conseqüentemente as perdas de massa. Nos dias mais secos ocorria o inverso.

5.5.5 Resumo dos dados e observações sobre as massas cerâmicas

Na Tabela 5.11 são apresentados os seguintes dados: datas de preparação das massas cerâmicas e de moldagem dos corpos de prova; teor de umidade higroscópica do solo e do resíduo (lodo seco a 105 °C ou de suas cinzas), obtida antes da preparação de cada massa cerâmica; massa específica aparente pós-preparação de cada massa cerâmica e massa específica média dos corpos de prova obtidos em cada moldagem; perdas de massa a 600 °C, também chamada de teor de sólidos voláteis, para cada massa cerâmica, na data de cada moldagem; eventuais observações durante a preparação, a moldagem, a secagem e principalmente sobre os produtos finais, de cada massa cerâmica.

De maneira geral ocorreram trincas e más-conformações, mesmo nos CPs da MC-0 (testemunho). Os melhores resultados em termos de trabalhabilidade e conformação, que são critérios visuais e subjetivos, observados apenas durante a manipulação das MCs e na moldagem e desmoldagem dos CPs; além do menor índice de trincas (ver Tabela 5.11), ocorreu com as massas cerâmicas feitas com as cinzas do LD2. Para as massas feitas com 20 e 30 % do LD1 ocorreram manchas esbranquiçadas superficiais nos CPs e para a massa feita com 40 % de cinzas do LD1, a superfície superior em relação à posição de secagem e contrária ao rebaixo de cada CP ficou totalmente branca, provavelmente por causa da exsudação da cal. As trincas foram particularmente prejudiciais quando os CPs foram submetidos ao ensaio de resistência à flexão. Qualquer trinca, por pequena que fosse, induzia à ruptura e aparentemente influenciava nos resultados. Apesar disso, aplicado o teste “T” não houve rejeição estatística de resultados, provavelmente por causa do pequeno número de corpos de prova ($n = 5$ ou 6 , conforme o caso).

Tabela 3.11 - Resumo de dados e observações gerais sobre as massas cerâmicas

MASSA CERÂMICA	molda-gem	DATAS		umid. higroscóp. (%)		massa específica (kg/dm ³)		Perda de massa a 600 °C	OBSERVAÇÕES (ver legenda no final da tabela)
		preparo da MC	moldagem dos CPs	do solo	do resíduo	da MC pós-prep.	média CPs pós-mold.		
MC-0	A		12/03/01				1,88	10,5	TR e CD nos CPs 1 e 4
	B	09/03/01	21/05/01	7,0	-	1,46	1,88	10,5	TR nos CPs 9 e 10
	C		28/05/01				1,87	10,5	TR nos CPs 4, 5 e 10
MC-10-LD1	A		19/03/01				1,82	13,0	TR nos CPs: 1, 3, 4, 5, 7 e 8
	B	16/03/01	04/06/01	6,0	5,5	1,54	1,78	13,0	TR nos CPs: 1 a 4 e CD no CP-10
	C		11/06/01				1,81	13,0	TR nos CPs 4 e 8 e TRT nos CPs 2 e 9
MC-20-LD1	A		16/04/01				1,77	14,5	TR no CP 1, ME em todos os CPs
	B	11/04/01	18/06/01	6,0	5,5	1,54	1,76	14,5	TR nos CPs 1 a 5, 7 e 10, TRT no CP 9 e ME em todos
	C		25/06/01				1,78	14,5	TR nos CPs 2, 4, 7 e 8 TRT no CP 3 e ME em todos
MC-30-LD1	A		14/05/01				1,69	15,6	ME e ASP em todos os CPs
	B	09/05/01	16/07/01	1,4	1,5	1,60	1,68	15,6	TR nos CPs: 1, 2, 5, 7 e 9 CD no 10, ME e ASP em todos
	C		23/07/01				1,68	15,6	TR nos CPs: 2 e 7, CD no 4, 9 e 10, ME e ASP em todos
MC-10-CZ-LD1	A		19/11/01				1,83	8,7	TR nos CPs 1 a 4
	B	13/11/01	26/11/01	5,3	1,8	1,69	1,81	9,5	TR nos CPs 1, 3, 6* e 9.
MC-20-CZ-LD1	A		05/11/01				1,82	8,0	TR nos CPs: 1, 2, 5, 6* a 10, CD no CP6, CR todos
	B	30/10/01	12/11/01	5,2	1,1	1,65	1,81	8,0	TR nos CPs 5, 7, 9 e 10, CD no 6, 7 e 10, CR todos
MC-30-CZ-LD1	A		22/10/01				1,79	7,8	TR nos CPs 1 a 4, 6, 8 a 10, CR em todos os CPs
	B	19/10/01	29/10/01	4,7	1,7	1,76	1,80	7,8	TR nos CPs 1, 3, 4 e 10, CR em todos os CPs
MC-40-CZ-LD1	A		01/10/01				1,78	7,1	TR, CR e CB em todos CPs
	B	24/09/01	08/10/01	6,0	0,8	1,72	1,77	7,4	TR nos CPs: 1, 4, 5, 8 a 10, CR e CB em todos CPs
MC-10-LD2	A		30/07/01				1,76	9,5	TR no CP1 e CD no CP4
	B	24/07/01	20/08/01	6,3	7,7	1,76	1,79	11,8	TR nos CPs: 1, 3, 4, 8 a 10
	C		27/08/01				1,78	12,0	TR nos CPs: 1, 5, 6, 7 e 9 e TRT no CP3
MC-20-LD2	A		06/08/01				1,69	15,6	CD no CP1, ASP em todos os CPs
	B	31/07/01	03/09/01	6,7	7,4	1,72	1,72	17,3	CD nos CPs 2 e 6, ASP em todos os CPs
	C		10/10/01				1,71	16,8	ASP em todos os CPs

continua...

Tabela 5.11 - Resumo de dados e observações gerais sobre as massas cerâmicas (CONTINUAÇÃO)

MASSA CERÂMICA	molda- gem	DATAS		umid. higroscóp. (%)		massa específica (kg/dm ³)		Perda de massa a 600 °C	OBSERVAÇÕES (ver legenda no final da tabela)
		preparo da MC	moldagem dos CPs	do solo	do resíduo	da MC pós-prep.	média CPs pós-mold.		
MC-30-LD2	A		13/08/01				1,64	20,9	CD nos CPs: 1, 4, 6, 8 a 10, ASP em todos os CPs
	B	07/08/01	17/09/01	6,3	6,5	1,62	1,68	21,0	ASP em todos os CPs
	C		24/09/01				1,67	17,1	TR no CP10 e ASP em todos os CPs
MC-10-CZ-LD2	A		01/04/02				1,82	10,5	TR nos CPs 2 e 9
	B	26/03/02	08/04/02	5,0	4,2	1,84	1,88	10,3	Nenhuma TR nos CPs – ótima conformação em todos
MC-20-CZ-LD2	A		18/03/02				1,86	9,8	TR nos CPs 2, 5, 6 e 9
	B	12/03/02	25/03/02	4,5	2,7	1,79	1,82	10,7	TR nos CPs 4, 6, 7 e 9 - CD no CP-10
MC-30-CZ-LD2	A		04/03/02				1,80	9,4	Todos os CPs apresentaram TR laterais de retração
	B	27/02/02	11/03/02	4,4	2,0	1,62	1,82	9,5	TR nos CPs 8, 9 e 10 – CD nos CPs 1, 2, 8, 9 e 10
MC-40-CZ-LD2	A		18/02/02				1,77	9,5	TR nos CPs: 7 e 10, CD no CP-9, CME em todos CPs
	B	15/02/02	25/02/02	4,3	5,3	1,72	1,80	9,8	Aspecto excelente, sem trincas, CME em todos CPs
LEGENDA		MC = massa cerâmica CP = corpo de prova (tijolo maciço de 10 x 5 x 2,5 cm) CZ = cinza dos lodos (obtida a partir da queima a 900 °C do lodo que havia sido previamente seco a 105 °C) LD1 = lodo tipo 1 (oriundo de um sistema de lodos ativados, desaguado em filtro-prensa de placas, condicionado com cal e cloreto férrico) LD2 = lodo tipo 2 (oriundo de um reator anaeróbico de fluxo ascendente, desaguado em leito de secagem, sem condicionamento químico) TR = trincas transversais (geralmente de pequena monta) nos corpos de prova. Quando o (*) segue o nº do CP, a trinca era significativa. TRT = trinca transversal total (que provocou inclusive a ruptura do CP em duas partes) CD = conformação defeituosa do CP (falha impossível de detectar na hora da moldagem, pois só se torna visível na desmoldagem do CP) ME = manchas esbranquiçadas superficiais nos CPs (provável eflorescência da cal usada no condicionamento químico para desaguamento) ASP = aspecto poroso na superfície e com muitas trincas e defeitos localizados nas bordas dos CPs CR = coloração rosada (tanto nos CPs queimados quanto naqueles secos a 105 °C), característica dos CPs feitos com cinzas do LD1 CB = coloração branca na superfície superior dos CPs feitos com 40 % de cinzas do LD1 (provável efeito da cal) CME = coloração muito escura (característica dos CPs feitos com cinzas do LD2, antes da queima). Após a queima a cor voltou ao normal.							

5.5.6 Resultados dos ensaios cerâmicos realizados em cada CP

Conforme detalhado no item 4.5.3, cada um dos 356 corpos de prova moldados nesta pesquisa foi primeiramente submetido a uma série de ensaios não destrutivos. Excetuando-se os dois CPs de cada massa cerâmica, preservados como testemunhos de aspecto e cor, escolhidos na primeira moldagem de cada MC (um CP pós-secagem em estufa à temperatura de 105 °C e outro pós-queima a 950 °C), os demais foram rompidos para determinação da resistência à flexão ou à compressão.

Nas Tabelas A39 a A53 dos Anexos são apresentados os resultados individuais obtidos para cada corpo de prova, bem como as médias aritméticas obtidas para cada uma das 15 diferentes massas cerâmicas, descartados os resultados duvidosos através da aplicação do teste “T”, definido no item 4.6, para um grau de desconfiança de 5 %. Os resultados descartados estão devidamente identificados nas tabelas correspondentes. Na Tabela 5.12 são apresentadas as médias e os desvios padrões de todos os parâmetros listados nos itens 4.5.3.1 a 4.5.3.14, para as 15 diferentes massas cerâmicas. Nas Tabelas 5.13 a 5.20 e Figuras 5.3 a 5.10 são apresentados os valores numéricos e respectivos gráficos que expressam as médias aritméticas obtidas nesta pesquisa, para cada MC, comparados aos obtidos por outros pesquisadores (valores já apresentados nas Tabelas 3.16 e 3.17 do capítulo 3). Os parâmetros escolhidos para comparação com outros resultados da literatura definem as principais características dos corpos cerâmicos e são a seguir discriminados: massa específica aparente pós-queima, (ver definição no item 4.5.3.11); absorção d’água pós-imersão, (ver definição no item 4.5.3.8); retração volumétrica pós-queima, (ver definição no item 4.5.3.9) e resistência à compressão pós-queima (ver definição no item 4.5.3.13). Todos estes parâmetros foram medidos para o testemunho e para os demais tijolos feitos com lodo de esgoto e respectivas cinzas.

Na Figura 5.11 é apresentado o gráfico e a equação que expressam a correlação existente entre a massa específica aparente pós-queima e a correspondente resistência à compressão pós-queima para os corpos de prova moldados nesta pesquisa.

Tabela 5.12 - MÉDIA "μ" E DESVIO-PADRÃO "σ" DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA CADA MASSA CERÂMICA

Descr.	Unid.	TESTEMUNHO		MASSAS CERÂMICAS FEITAS COM LD1								MASSAS CERÂMICAS FEITAS COM CINZAS DO LD1								MASSAS CERÂMICAS FEITAS COM LD2						MASSAS CERÂMICAS FEITAS COM CINZAS DO LD2							
		0%		10%		20%		30%		10%		20%		30%		40%		10%		20%		30%		10%		20%		30%		40%			
		μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ		
P _{unid.}	g	236,57	2,30	227,40	3,13	222,31	2,21	212,38	2,20	229,42	1,76	229,54	2,89	226,56	2,14	223,80	2,25	224,28	2,30	215,72	3,61	210,36	3,65	233,08	4,52	231,92	4,05	228,97	3,42	225,43	3,82		
PS	g	181,92	2,64	171,21	2,61	162,75	2,60	152,42	1,80	168,22	3,80	168,32	2,45	163,40	1,62	158,57	2,15	169,77	2,05	164,07	2,75	159,50	2,62	175,13	4,19	175,92	3,20	170,09	2,37	165,05	2,85		
n _{PM}	%	30,05	1,16	32,82	0,50	36,61	1,80	39,34	0,52	36,64	2,17	36,38	0,71	38,65	0,28	41,15	1,13	32,35	0,92	31,48	0,67	31,88	0,33	33,11	0,97	31,93	0,39	34,62	1,26	36,59	0,32		
P _{pq}	g	162,43	3,00	147,96	2,11	136,29	2,06	122,03	1,71	151,94	3,48	152,76	2,89	149,01	1,75	143,84	1,87	146,51	2,01	135,41	2,40	123,15	1,60	155,59	3,91	155,51	3,28	149,27	2,32	144,58	2,99		
Δ _{M,pq}	%	10,56	0,50	13,85	0,39	16,69	0,60	20,19	0,68	9,87	0,30	9,20	0,39	8,96	0,38	8,70	0,54	13,88	0,40	18,13	0,40	22,67	0,40	11,07	0,39	11,94	0,63	12,25	0,73	12,63	1,03		
P _{pl}	g	199,53	3,48	185,80	3,89	179,20	3,79	169,28	3,47	191,06	5,14	194,14	5,77	192,24	3,70	191,20	4,28	184,70	2,99	176,15	2,66	168,84	3,46	198,26	5,17	202,82	4,30	197,67	1,82	197,12	3,52		
A	%	9,94	0,49	8,17	2,01	9,69	1,80	10,78	2,17	13,56	1,70	15,44	2,31	17,52	2,15	21,31	2,39	8,58	0,86	7,13	1,30	6,01	1,53	13,12	0,51	15,02	0,89	16,63	1,19	18,20	2,23		
V _{orig}	dm³	0,1263	0,0006	0,1263	0,0006	0,1263	0,0006	0,1263	0,0006	0,1263	0,0006	0,1263	0,0006	0,1263	0,0006	0,1263	0,0006	0,1263	0,0006	0,1263	0,0006	0,1263	0,0006	0,1263	0,0006	0,1263	0,0006	0,1263	0,0006	0,1263	0,0006		
V _{pq}	dm³	0,0986	0,0021	0,0972	0,0021	0,0969	0,0032	0,0969	0,0035	0,0990	0,0034	0,1008	0,0044	0,1010	0,0026	0,1021	0,0027	0,0996	0,0019	0,0998	0,0027	0,0997	0,0038	0,1030	0,0022	0,1080	0,0024	0,1074	0,0024	0,1063	0,0027		
RV	%	21,88	1,72	22,89	1,66	23,27	2,34	23,24	2,75	21,63	2,67	20,17	3,49	20,08	1,94	19,05	2,12	21,83	1,98	20,97	2,11	21,01	2,89	18,50	1,57	14,51	1,72	14,97	1,84	15,82	2,17		
γ _{PM}	kg/dm³	1,87	0,02	1,79	0,03	1,77	0,02	1,70	0,04	1,82	0,02	1,82	0,02	1,80	0,02	1,77	0,01	1,78	0,02	1,71	0,02	1,67	0,03	1,85	0,03	1,84	0,03	1,81	0,02	1,78	0,03		
γ _{pq}	kg/dm³	1,85	0,02	1,52	0,02	1,41	0,04	1,26	0,04	1,55	0,04	1,52	0,05	1,47	0,03	1,41	0,03	1,47	0,01	1,35	0,03	1,24	0,04	1,51	0,01	1,44	0,01	1,39	0,02	1,36	0,02		
γ _{pl}	kg/dm³	2,02	0,02	1,91	0,04	1,85	0,04	1,75	0,04	1,95	0,04	1,93	0,05	1,90	0,02	1,87	0,02	1,85	0,02	1,77	0,02	1,69	0,04	1,93	0,01	1,88	0,01	1,85	0,02	1,84	0,03		
σ _{C₁₀₅}	MPa	3,63	0,41	2,85	0,64	2,92	0,16	2,40	0,08	3,05	0,22	2,66	0,24	2,80	0,62	2,75	0,28	2,37	0,27	2,36	0,18	2,09	0,25	3,73	0,23	3,27	0,27	2,95	0,06	3,35	0,38		
σ _{C₉₅₀}	MPa	4,38	0,57	3,39	0,47	2,49	0,57	1,52	0,08	3,23	0,56	4,10	0,76	4,03	0,55	3,92	0,33	2,68	0,41	2,02	0,45	1,17	0,21	3,21	0,39	2,74	0,73	3,27	0,58	2,96	0,37		
σ _{L₁₀₅}	MPa	0,82	0,11	0,81	0,36	0,85	0,50	0,39	0,09	-	-	-	-	-	-	-	-	0,85	0,12	0,47	0,05	0,42	0,02	-	-	-	-	-	-	-	-		
σ _{L₉₅₀}	MPa	0,40	0,06	0,56	0,26	0,44	0,24	0,29	0,08	-	-	-	-	-	-	-	-	0,51	0,12	0,31	0,09	0,27	0,05	-	-	-	-	-	-	-	-		

LEGENDA:

P_{unid.} = peso da massa cerâmica úmida (logo após a moldagem dos CPs)
 PS = peso dos CPs efetivamente secos (após 24 horas em estufa a 105 °C)
 n_{PM} = teor de umidade dos CPs pós-moldagem = [(P_{unid.} - PS) / PS] x 100
 P_{pq} = peso dos CPs pós-queima (a 950 °C)
 Δ_{M,pq} = perda de massa dos CPs pós-queima = [(PS - P_{pq}) / PS] x 100
 P_{pl} = peso dos CPs pós-imersão em água, 24 horas, temperatur. ambiente
 A = percentual de absorção d'água = [(P_{pl} - PS) / PS] x 100
 V_{orig.} = volume original das formas de cada CP

V_{pq} = volume do corpo de prova pós-queimaRV = percentual de retração volumétrica = [(V_{orig.} - V_{pq}) / V_{orig.}] x 100γ_{PM} = massa específica aparente do CP pós-moldagem = P_{unid.} / V_{orig.}γ_{pq} = massa específica aparente do CP pós-queima a 950 °C = P_{pq} / V_{pq}γ_{pl} = massa específica aparente do CP pós-imersão em água = P_{pl} / V_{pq}σ_{C₁₀₅} = resistência à compressão dos CPs pós-secagem a 105 °Cσ_{C₉₅₀} = resistência à compressão dos CPs pós-queima a 950 °Cσ_{L₁₀₅} = resistência à flexão dos CPs pós-secagem a 105 °Cσ_{L₉₅₀} = resistência à flexão dos CPs pós-queima a 950 °C

CPs = corpos de prova, tijolos maciços de 10 x 5 x 2,5 cm

Tabela 5.13 - Comparação da massa específica aparente pós-queima para tijolos feitos com lodo de esgoto (em kg/dm³)

% de lodo na mistura	Alleman e Berman (1984)	Tay (1987)	esta pesquisa com	
			LD1 seco a 105 °C	LD2 seco a 105 °C
0,0	2,09	2,38	1,65	1,65
4,0	1,94			
8,6	1,91			
10,0		2,32	1,52	1,47
13,9	1,80			
20,0	1,76	2,24	1,41	1,36
27,3	1,63			
30,0		2,17	1,26	1,24
40,0		1,98		

Tabela 5.14 - Comparação da absorção d'água pós-imersão para tijolos feitos com lodo de esgoto (em %)

% de lodo na mistura	Alleman e Berman (1984)	Tay (1987)	esta pesquisa com	
			LD1 seco a 105 °C	LD2 seco a 105 °C
0,0	6,4	0,03	9,9	9,9
4,0	7,5			
8,6	8,6			
10,0		0,74	8,2	8,6
13,9	10,0			
20,0	13,6	1,37	9,7	7,1
27,3	15,8			
30,0		2,58	10,8	6,0
40,0		3,63		

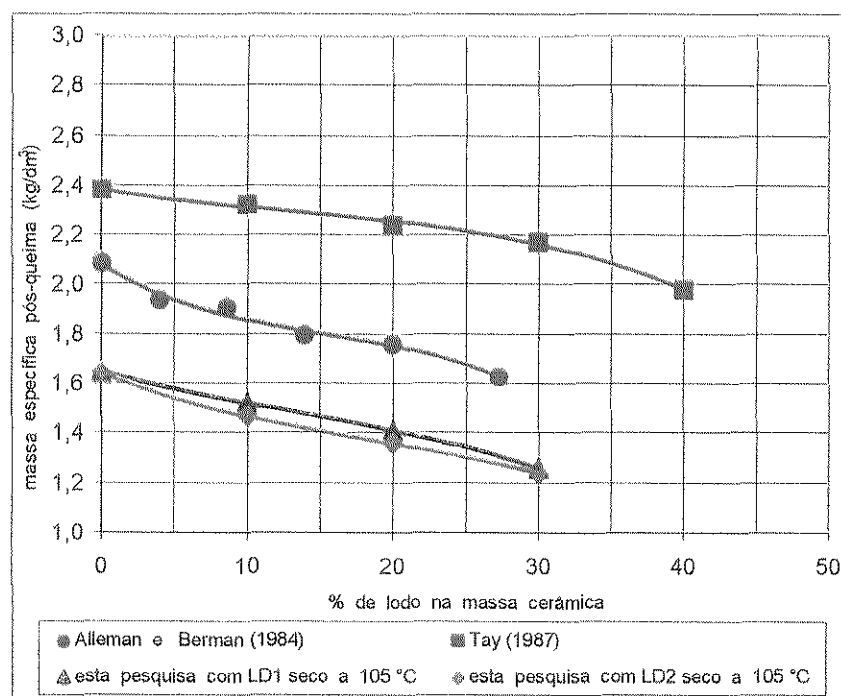


Figura 5.3 - Comparação da massa específica aparente pós-queima para tijolos feitos com lodo de esgoto

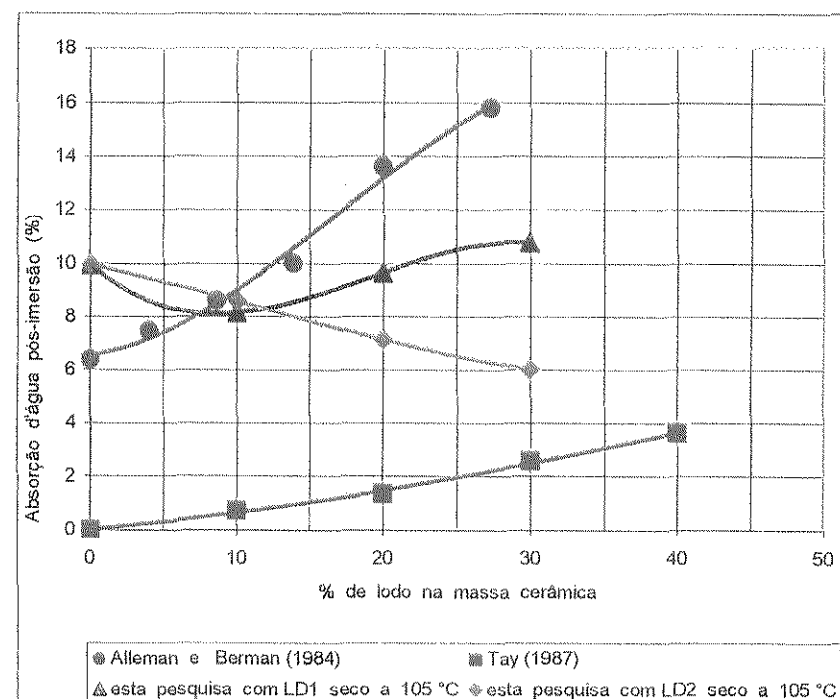


Figura 5.4 - Comparação da absorção d'água pós-imersão para tijolos feitos com lodo de esgoto

Tabela 5.15 - Comparação da retração volumétrica pós-queima para tijolos feitos com lodo de esgoto (em %)

% de lodo na mistura	Alleman e Berman (1984)	Tay (1987)	esta pesquisa com	
			LD1 seco a 105 °C	LD2 seco a 105 °C
0,0		9,9	21,9	21,9
4,0				
8,6				
10,0		10,2	23,0	21,8
13,9				
20,0		10,8	23,3	21,0
27,3				
30,0		12,3	23,2	21,0
40,0		12,9		

Tabela 5.16 - Comparação da resistência à compressão pós-queima para tijolos feitos com lodo de esgoto (em MPa)

% de lodo na mistura	Alleman e Berman (1984)	Tay (1987)	esta pesquisa com	
			LD1 seco a 105 °C	LD2 seco a 105 °C
0,0	34,5	87,2	4,4	4,4
4,0	30,6			
8,6	26,2			
10,0		59,9	3,4	2,7
13,9	24,0			
20,0	20,7	45,9	2,8	2,0
27,3	18,0			
30,0		39,5	1,5	1,2
40,0		37,9		

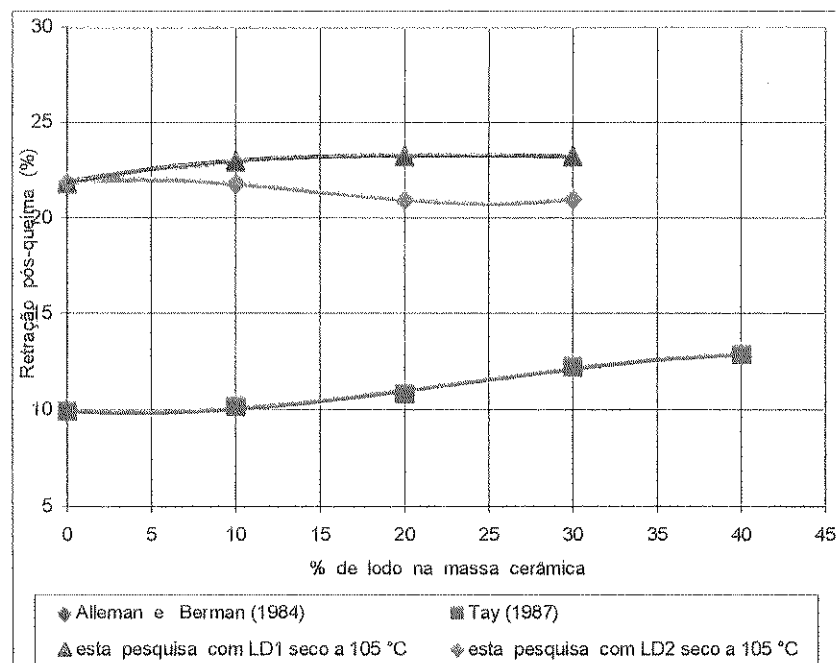


Figura 5.5 - Comparação da retração volumétrica pós-queima para tijolos feitos com lodo de esgoto

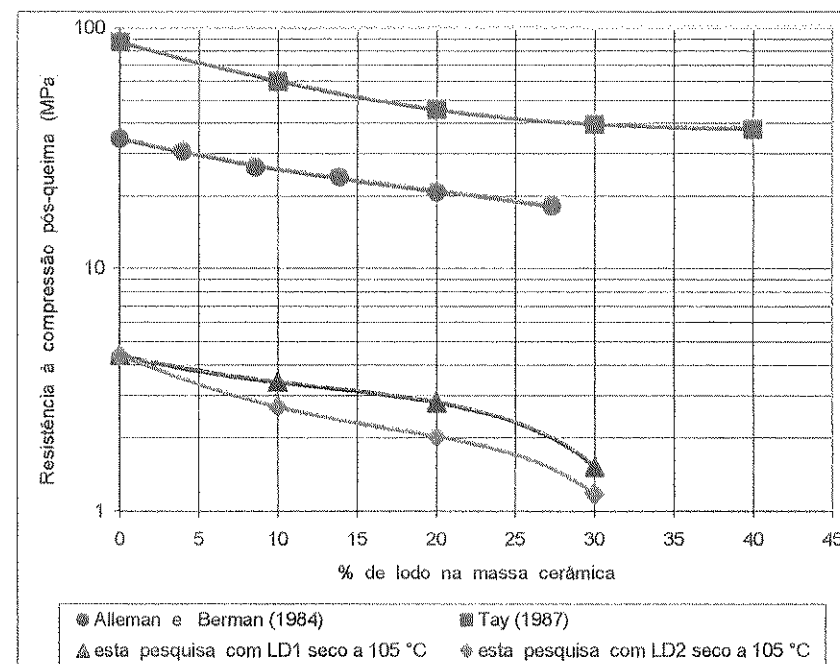


Figura 5.6 - Comparação da resistência à compressão pós-queima para tijolos feitos com lodo de esgoto

Tabela 5.17 - Comparação da massa específica aparente pós-queima para tijolos feitos com cinzas de lodo (em kg/dm³)

% de cinzas na mistura	Tay (1987)	Trauner (1991)	Okuno e Takahashi (1997)	esta pesquisa com	
				CINZAS LD1	CINZAS LD2
0	2,39	1,88		1,65	1,65
10	2,42	1,69		1,55	1,51
20	2,46	1,56		1,52	1,44
30	2,50	1,50		1,47	1,39
40	2,55			1,41	1,36
50	2,58				
100			1,60		

Tabela 5.18 - Comparação da absorção d'água pós-imersão para tijolos feitos com cinzas de lodo (em %)

% de cinzas na mistura	Tay (1987)	Trauner (1991)	Okuno e Takahashi (1997)	esta pesquisa com	
				CINZAS LD1	CINZAS LD2
0	0,03	13,3		9,9	9,9
10	0,07	18,8		13,6	13,1
20	0,11	19,4		15,4	15,0
30	1,39	22,5		17,5	16,6
40	1,52			21,3	18,2
50	1,70				
100					

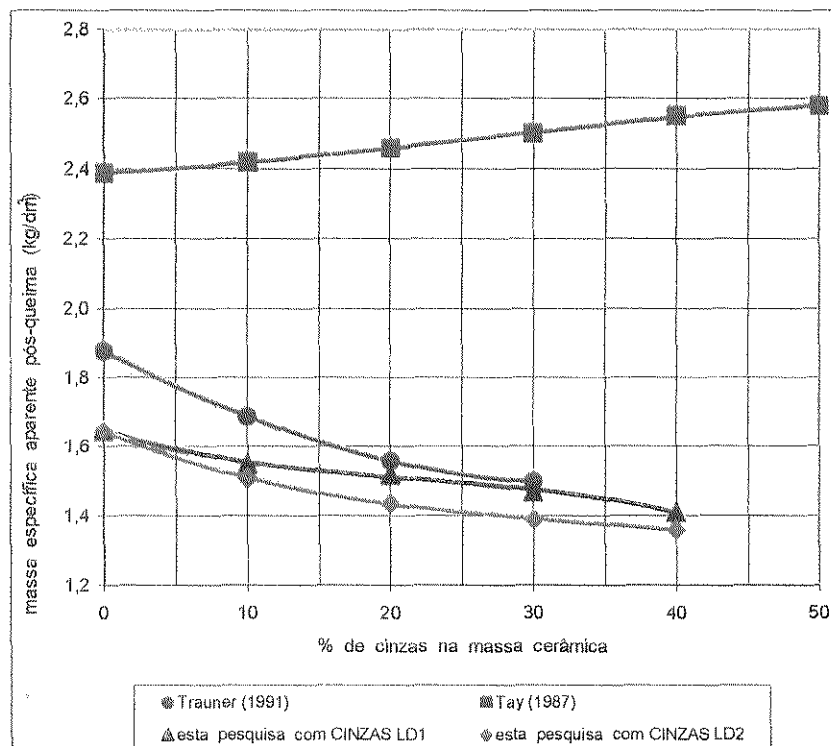


Figura 5.7 - Comparação da massa específica aparente pós-queima para tijolos feitos com cinzas de lodo

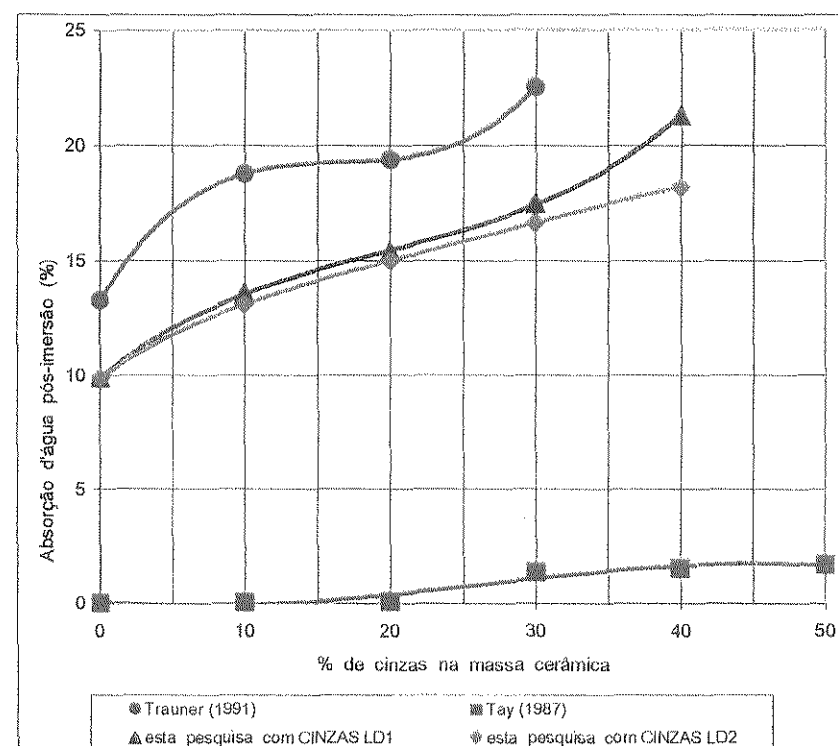


Figura 5.8 - Comparação da absorção d'água pós-imersão para tijolos feitos com cinzas de lodo

Tabela 5.19 - Comparação da retração volumétrica pós-queima para tijolos feitos com cinzas de lodo (em %)

% de cinzas na mistura	Tay (1987)	Trauner (1991)	Okuno e Takahashi (1997)	esta pesquisa com	
				CINZAS LD1	CINZAS LD2
0	9,9	1,0		21,9	21,9
10	9,6	1,1		21,6	18,5
20	9,1	2,1		20,2	14,5
30	9,4	3,5		20,1	15,0
40	9,8			19,1	15,8
50	10,5				
100					

8 a 14

Tabela 5.20 - Comparação da resistência à compressão pós-queima para tijolos feitos com cinzas de lodo (em MPa)

% de cinzas na mistura	Tay (1987)	Trauner (1991)	Okuno e Takahashi (1997)	esta pesquisa com	
				CINZAS LD1	CINZAS LD2
0	87,2	43,0		4,4	4,4
10	85,7	30,0		3,2	3,2
20	80,0	20,0		4,1	2,7
30	70,7	18,0		4,0	3,3
40	70,5			3,0	3,0
50	69,4				
100					

78 a 196

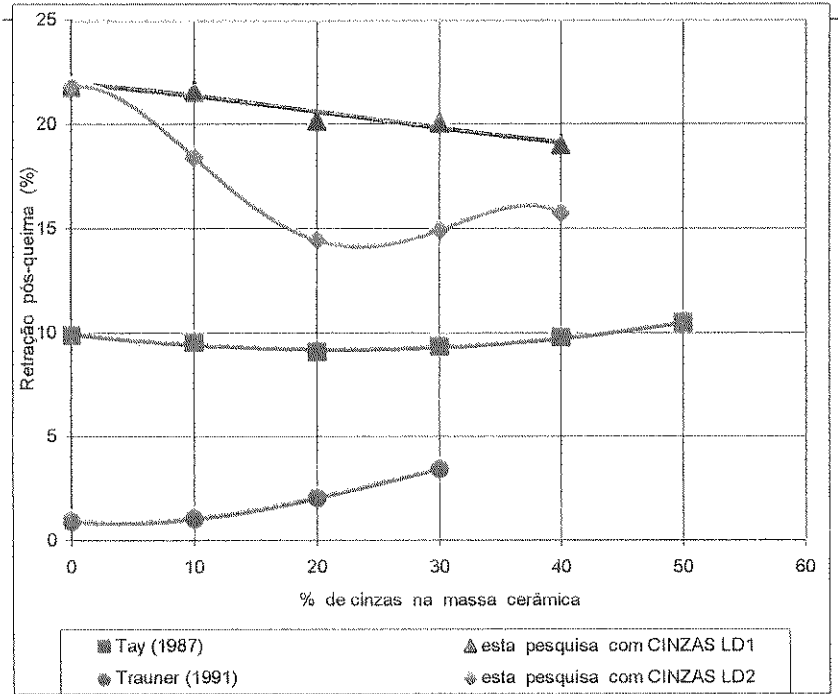


Figura 5.9 - Comparação da retração volumétrica pós-queima para tijolos feitos com cinzas de lodo

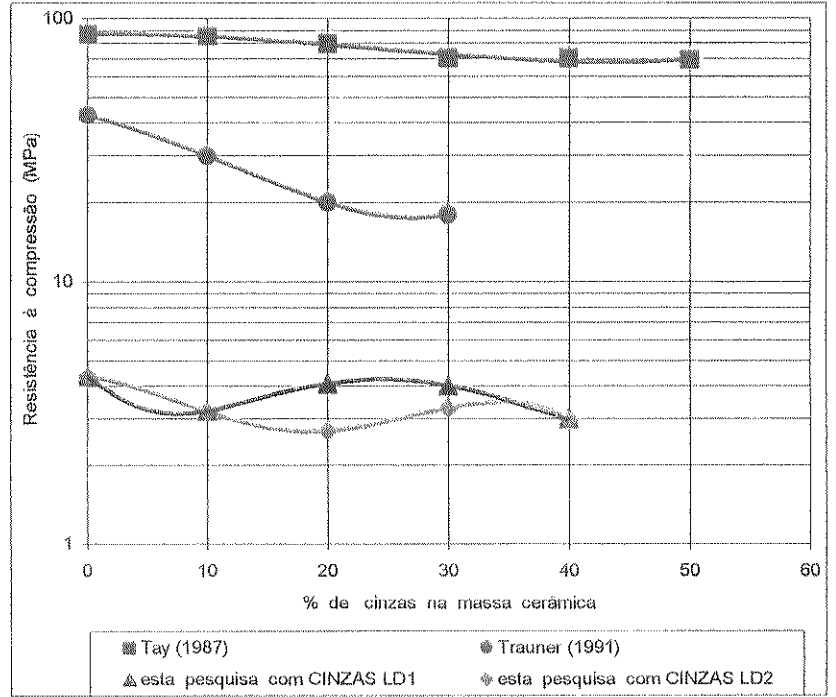


Figura 5.10 - Comparação da resistência à compressão pós-queima para tijolos feitos com cinzas de lodo

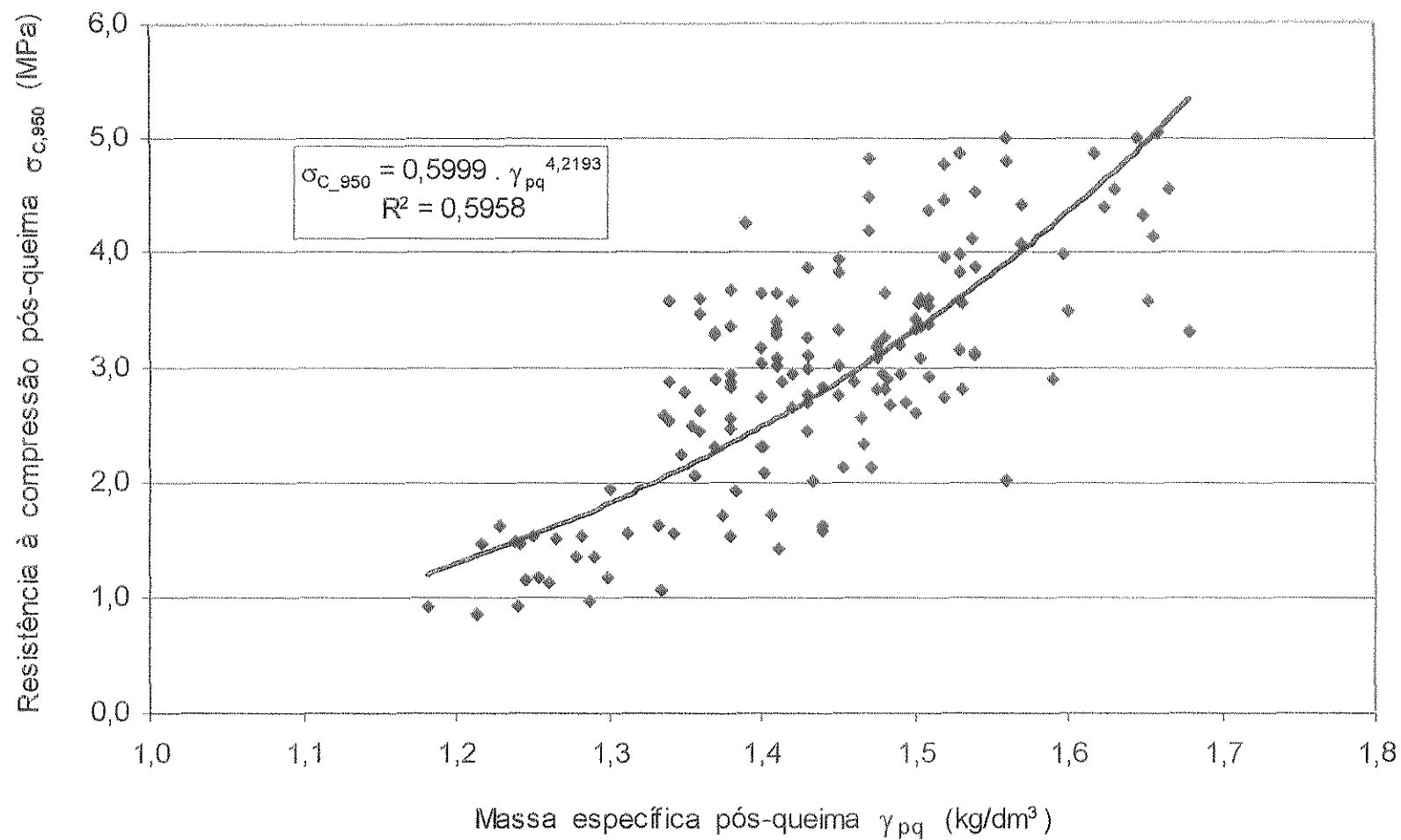


Figura 5.11 - Correlação entre a massa específica e a resistência à compressão pós-queima

Serão discutidos, primeiramente, os principais parâmetros referentes às massas cerâmicas, incluindo os resultados obtidos por outros pesquisadores, apresentados nas Tabelas 5.13 a 5.20 e Figuras 5.3 a 5.10 para as MCs preparadas com os lodos e suas cinzas, e que são: a massa específica aparente pós-queima “ γ_{pm} ”; o percentual de absorção de água “A”; o percentual de retração volumétrica pós-queima “RV” e, finalmente, a resistência à compressão pós-queima à temperatura de 950 °C “ $\sigma_{C_{950}}$ ”.

5.5.6.1 Massa específica aparente pós-queima “ γ_{pq} ”

Na Tabela 5.13 e Figura 5.3 são apresentados os resultados médios para a **massa específica aparente pós-queima**, obtidos nesta pesquisa, através da **moldagem manual** dos CPs, com percentagens de LD1 e de LD2 (secos a 105 °C) variando de 0 a 30 % e temperatura máxima de queima de 950 °C, além dos resultados obtidos por outros pesquisadores, que utilizaram métodos de moldagem e temperaturas de queima diferentes; Alleman e Berman (1984) utilizaram **prensagem mecânica** e temperatura máxima de queima de 1100 °C e Tay (1987), fez a moldagem por **extrusão** e temperatura máxima de queima de 1080 °C. Apesar de, obviamente, terem sido utilizadas também matérias-primas diferentes (lodo e solo argiloso), fatores esses que, a princípio, limitam o valor das comparações, pode-se perceber que:

- a moldagem por extrusão (que geralmente possui um sistema a vácuo para remoção do ar presente na massa cerâmica), resultou nos maiores valores para a massa específica dos tijolos, vindo em seguida a prensagem mecânica e por último a moldagem manual (o que pode ser considerado normal);
- todos os resultados mostraram haver uma tendência de diminuição da massa específica aparente com o aumento da percentagem de lodo na massa cerâmica, o que também já era esperado pois, durante a queima dos tijolos, ocorre a volatilização da matéria

- orgânica presente no lodo. Isso pode ser considerado um aspecto positivo da utilização de lodo para essa finalidade pois irá refletir numa diminuição do peso da estrutura;
- Tay (1987), obteve uma massa específica de $2,38 \text{ kg/dm}^3$ para o testemunho (0 % de lodo), baixando para $1,98 \text{ kg/dm}^3$ com 40 % de lodo na massa cerâmica;
 - Alleman e Berman (1984), obtiveram massa específica de $2,09 \text{ kg/dm}^3$ para o testemunho, baixando para $1,63 \text{ kg/dm}^3$ com 27,3 % de lodo na MC;
 - Nesta pesquisa, obteve-se massa específica de $1,65 \text{ kg/dm}^3$ para o testemunho, baixando para $1,26$ e $1,24 \text{ kg/dm}^3$ respectivamente para MCs com 30 % de LD1 e 30 % de LD2.

Conforme já foi salientado nos capítulos 1 e 2, a utilização mais nobre do lodo de esgoto sanitário é no condicionamento ou melhoria de solos agrícolas. Quando essa prática, por qualquer razão não se torna possível, várias cidades, no exterior, vêm fazendo a incineração do lodo, com a finalidade de diminuir drasticamente os volumes para disposição final, tradicionalmente feita em aterros sanitários ou aterros exclusivos. Alguns pesquisadores e até fabricantes de cerâmica já perceberam que, utilizando as cinzas resultantes para a fabricação de tijolos cerâmicos, ao invés da torta de lodo, obtinha-se melhores resultados pois a torta contém razoável percentagem de matéria orgânica, cujas características são mais propícias para a melhoria de solos agrícolas do que para inertização em massas cerâmicas. Por esse motivo, apesar de não ser ainda uma prática comum a incineração de lodos no Brasil, foi incluída nesta pesquisa também a utilização de cinzas, obtidas em laboratório. O lodo que havia sido previamente seco a 105°C , foi então submetido à queima em forno-mufla, à temperatura de 900°C e posteriormente foi misturado ao solo argiloso nas MCs, para moldagem dos tijolos cerâmicos.

Na Tabela 5.17 e Figura 5.7 são apresentados os resultados para a **massa específica aparente pós-queima**, obtidos nesta pesquisa através da **moldagem manual** dos CPs, com percentagens de **cinzas** do LD1 e de LD2, variando de 0 a 40 % e

temperatura máxima de queima de 950 °C, além dos resultados obtidos por outros pesquisadores, que utilizaram métodos de moldagem e temperaturas de queima diferentes; Tay (1987), fez a moldagem por **extrusão** e utilizou temperatura máxima de queima de 1080 °C, Trauner (1991), fez a moldagem por **prensagem mecânica** e temperatura máxima de queima de 1040 °C e Okuno e Takahashi (1997), fizeram os tijolos utilizando 100 % de cinzas de lodo, moldagem **por prensagem** sob pressão de 98 MPa e utilizaram temperatura máxima de queima de 1025 °C. Apesar de, obviamente, terem sido utilizadas também matérias-primas diferentes (tanto as cinzas de lodo quanto o solo argiloso), fatores esses que, a princípio, limitam o valor das comparações, pode-se perceber que:

- Tay (1987), registrou um aumento da massa específica com o aumento das percentagens de cinzas de lodo na MC, obtendo para o testemunho 2,39 kg/dm³, aumentando para 2,58 kg/dm³ quando a percentagem de cinzas era de 50 %;
- Trauner (1991), ao contrário, relatou um decréscimo do valor da massa específica dos tijolos, tendo obtido para o testemunho 1,88 kg/dm³, diminuindo para 1,50 kg/dm³, quando a percentagem de cinzas era de 30 %;
- Okuno e Takahashi obtiveram massa específica de 1,60 kg/dm³, para os tijolos feitos com 100 % de cinzas de lodo; e,
- Nesta pesquisa, os resultados mostraram, a exemplo do que foi obtido por Trauner (1991), um decréscimo da massa específica com o aumento da percentagem de cinzas de lodo na MC, tendo-se obtido para o testemunho 1,65 kg/dm³, decrescendo o valor para 1,41 kg/dm³ para uma percentagem de 40 % de cinzas do LD1 e 1,36 kg/dm³ para uma percentagem de 40 % de cinzas do LD2, nas respectivas MCs.

A partir dos resultados obtidos pelos pesquisadores citados, pode-se deduzir que, mesmo com a matéria prima utilizada nesta pesquisa, porém com outros métodos de conformação (prensagem ou extrusão), e eventualmente, temperaturas de queima mais altas, poderiam ser conseguidos resultados diferentes dos obtidos nesta pesquisa (maiores

valores) para a massa específica aparente pós-queima. Sugere-se pesquisas utilizando-se outros métodos de conformação e temperaturas de queima mais altas.

5.5.6.2 Absorção d'água pós-imersão "A"

Na Tabela 5.14 e Figura 5.4 são apresentados os resultados médios para **absorção d'água pós-imersão**, obtidos nesta pesquisa para os CPs moldados com 10 a 30 % de lodo na MC, bem como os resultados obtidos por outros pesquisadores. A partir desses resultados pode-se perceber que:

- os menores valores de absorção d'água foram obtidos por Tay (1987), que também havia obtido os maiores valores de massa específica, mostrando total coerência pois, realmente, quanto menos vazios tiverem os tijolos menor também será a absorção de água dos mesmos. Alleman e Berman obtiveram valores coerentemente intermediários e nesta pesquisa foram obtidos os maiores valores. No entanto a tendência observada pelos dois pesquisadores citados foi de crescimento da absorção d'água com o aumento da percentagem de lodo nas misturas, o que não foi observado na presente pesquisa;
- Tay (1987), obteve 0,03 % de absorção d'água para o testemunho, atingindo 3,63 % para 40 % de lodo na mistura;
- Alleman e Berman (1984), obtiveram 6,4 % para o testemunho e 15,8 % para a massa cerâmica com 27,3 % de lodo na mistura; e,
- Na presente pesquisa obteve-se 9,9 % para o testemunho. Para o LD1 houve decréscimo para 8,2 % na MC-10 seguido de uma leve tendência de crescimento para as demais; MC-20 (9,7 %) e MC-30 (10,8 %). Para o LD2 a tendência foi de decréscimo da absorção d'água com o aumento da percentagem de lodo na mistura, atingindo 6,0 % para a MC-30.

Os resultados obtidos para os CPs feitos com o LD2 (decréscimo da absorção d'água com o aumento da percentagem de lodo na mistura), à primeira vista parecem ser incoerentes, principalmente quando se raciocina apenas quanto à questão das perdas por volatilização da matéria orgânica, ocorridas durante a queima dos tijolos. Analisando-se os teores de sólidos voláteis (perda de massa pós-queima a 600 °C), que ficaram na faixa de 7,4 a 8,2 % para o solo (ver Tabela 5.2), de 39,2 % para o LD1 e de 52,9 % para o LD2 (ver Tabela 5.3), verifica-se que o teor de sólidos voláteis do solo foi bem menor do que nos dois lodos e que o LD2 apresentou maiores valores. Assim, qualquer acréscimo nas percentagens de lodo nas MCs deveria resultar numa maior perda de massa por volatilização durante a queima dos tijolos, o que realmente ocorreu (ver Tabela 5.4). Essa maior perda de massa deveria resultar também em maiores índices de vazios nos tijolos e para as MCs feitas com o LD2 esse fenômeno deveria ser mais acentuado. Isso também ocorreu pois as massas específicas aparentes pós-queima diminuíram com o aumento da percentagem de lodo nas massas (ver Tabela 5.13). Seria lógico que, com mais vazios no produto final, deveriam ocorrer maiores percentuais de absorção d'água pós-queima, o que ocorreu com o LD1 mas não com o LD2. Devem existir, portanto, outras razões para este comportamento e talvez possam estar relacionadas com reações entre os elementos químicos presentes no LD2, durante o processo de queima. Como este tipo de análise não fazia parte do escopo da presente pesquisa, sugere-se futuros estudos nesse sentido uma vez que a diminuição da absorção d'água é um aspecto positivo para os produtos cerâmicos.

Na Tabela 5.18 e a Figura 5.8 são apresentados os resultados médios de **absorção d'água pós-imersão**, obtidos nesta pesquisa para os CPs moldados com 10 a 40 % de cinzas do LD1 e do LD2, bem como os resultados obtidos por outros pesquisadores. Pode-se perceber que:

- Tay (1987), registrou um crescimento dos valores de absorção d'água com o aumento da percentagem de cinzas de lodo na MC, tendo obtido para o testemunho **0,03 %** aumentando para **1,70 %** para uma percentagem de cinzas na MC de 50 %;

- Trauner (1991), também registrou um crescimento (porém mais acentuado) dos valores de absorção com o aumento da percentagem de cinzas de lodo na MC, tendo obtido para o testemunho 13,3 % aumentando para 22,5 % quando a percentagem de cinzas na MC foi de 30 %;
- Okuno e Takahashi (1997), não apresentaram os resultados para a absorção d'água;
- Nesta pesquisa, os resultados tiveram a mesma tendência relatada pelos dois primeiros pesquisadores citados, ou seja, um aumento do percentual de absorção d'água com o aumento da percentagem de cinzas nas MCs, tanto para os CPs feitos com as cinzas do LD1 quanto aqueles feitos com as cinzas do LD2, apesar de ter havido um crescimento menor da absorção quando utilizadas as cinzas do LD2. Obteve-se, em média para o testemunho, uma absorção de água pós-imersão de 9,94 %. Para as MCs feitas com 40 % de cinzas do LD1 obteve-se 21,31 % e para as MCs feitas com 40 % de cinzas do LD2 obteve-se 18,20 %.

5.5.6.3 Retração volumétrica pós-queima “RV”

Na Tabela 5.15 e Figura 5.5 são apresentados os resultados médios para a **retração volumétrica pós-queima**, obtidos nesta pesquisa para os CPs moldados com 10 a 30 % de lodo na MC, e os resultados obtidos por Tay (1987), uma vez que Alleman e Berman não reportaram tais resultados. Deve-se ressaltar que é comum a ocorrência de retração em corpos cerâmicos mas a retração exagerada é indesejável pois pode induzir a trincas. No caso dos tijolos maciços, no entanto, pequenas trincas não chegam a se constituir em grande problema.

A comparação de resultados fide retração ficou prejudicada pois mediu-se, na presente pesquisa, a retração total (volumétrica) e não ficou claro no trabalho de Tay se a retração é volumétrica ou linear. Além disso, a metodologia adotada nesta pesquisa para medir a retração volumétrica apresentou uma falha. Apesar da medida do volume final

pós-queima de cada CP poder ser considerada perfeita, a medida do volume original real de cada corpo de prova era impossível de ser feita na hora da moldagem. Assim, considerou-se como sendo o próprio volume da forma de madeira em que este foi moldado. No entanto, alguns CPs apresentaram falhas de conformação, não ocupando totalmente o volume da forma. Como estes permaneciam nas respectivas formas geralmente durante 7 dias era impossível detectar essas falhas na hora da conformação dos CPs. Quando da desmoldagem já tinha ocorrido boa parte da retração e então o volume inicial real não podia ser medido.

Conclui-se, portanto, que o valor da retração volumétrica real era menor do que o registrado para os CPs que apresentaram falhas de conformação. Feitas essas ressalvas e analisando-se os resultados pode-se perceber que:

- Tay (1987), obteve um crescimento da retração com o aumento da percentagem de lodo na mistura, variando de 9,9 % para o testemunho a 12,9 % para 40 % de lodo na mistura; e,
- na presente pesquisa obteve-se uma retração volumétrica de 21,9 % para o testemunho, observando-se para o LD1 um crescimento com o aumento da percentagem de lodo na mistura, chegando a 23,2 % para a MC-30. No entanto, para o LD2 houve leve decréscimo, chegando a 21,0 % para a MC-30.

Na Tabela 5.19 e na Figura 5.9 são apresentados os resultados médios para a **retração pós-queima**, obtidos nesta pesquisa para os CPs moldados com 10 a 40 % de cinzas do LD1 e do LD2, bem como os resultados obtidos por outros pesquisadores. Analisando-se os resultados, com a ressalva na metodologia utilizada nesta pesquisa, pode-se perceber que:

- Tay (1987), registrou um decréscimo dos valores de retração com o aumento da percentagem de cinzas de lodo na MC até a percentagem de 20 % de cinzas e um leve crescimento para as demais percentagens. Obteve 9,9 % para o testemunho,

decrecendo para 9,1 % com 20 % de cinzas e crescendo novamente para 10,5 % com 50 % de cinzas na massa cerâmica;

- Trauner (1991), registrou um crescimento dos valores de retração com o aumento da percentagem de cinzas de lodo na MC, tendo obtido 1,0 % de retração para o testemunho e 3,5 % para a MC com 30 % de cinzas;
- Okuno e Takahashi obtiveram, para os tijolos feitos com 100 % de cinzas, valores de retração na faixa de 8 a 14 %;
- Nesta pesquisa, obteve-se para o testemunho, 21,9 % de retração. Para as MCs feitas com as cinzas do LD1 houve uma tendência de decréscimo linear da retração com o aumento da percentagem de lodo na MC, obtendo-se 19,1 % para a MC-40. Para as cinzas do LD2 observou-se um comportamento diferente; houve uma tendência de queda do valor da retração até a MC-20 com 14,5 % e posterior aumento de valor atingindo 15,8 % para a MC-40, seguindo, porém de forma mais acentuada, a tendência observada por Tay (1987).

5.5.6.4 Resistência à compressão pós-queima “ $\sigma_{C,950}$ ”

Na Tabela 5.16 e Figura 5.6 são apresentados os resultados médios de **resistência à compressão pós-queima**, obtidos nesta pesquisa para 10 CPs por MC, moldados com 10 a 30 % de lodo, além dos resultados obtidos por outros pesquisadores. Deve-se ressaltar que a resistência à compressão é, dentre os demais parâmetros já analisados, o único para o qual são fixados limites na norma brasileira NBR-7170 (ABNT, 1983b). Esta norma classifica os tijolos maciços comuns em três classes de resistência à compressão: a resistência mínima para o tijolo classe A é de 1,5 MPa, para os da classe B é de 2,5 MPa e para os da classe C é de 4,0 MPa. Analisando-se estes resultados, pode-se perceber que:

- os resultados obtidos por Alleman e Berman (1984), Tay (1987), e os desta pesquisa, mostram que há uma clara tendência de diminuição da resistência à compressão à medida que se aumenta a percentagem de lodo na MC;
- Tay (1987), que fez a moldagem por extrusão, obteve para o testemunho, um valor médio de 87,2 MPa, baixando para 37,9 MPa quando a percentagem de lodo era de 40 % na MC;
- Alleman e Berman (1984), que moldaram os tijolos por prensagem, obtiveram para o testemunho, uma resistência média à compressão de 34,5 MPa, baixando para 18,0 MPa, para os tijolos feitos com 27,3 % de lodo na MC;
- na presente pesquisa, o valor obtido para a **resistência à compressão pós-queima**, para os tijolos feitos com 0 % de lodo (testemunho), foi de **$4,38 \pm 0,57$ MPa** (média $\pm$ desvio padrão, para $n = 10$ CPs). Na tabela A39 dos Anexos pode-se constatar que o menor valor obtido foi de **3,31 MPa**. Se comparados os valores estabelecidos na norma citada, com o valor médio obtido, esses tijolos seriam enquadrados na classe “C”. Porém, se adotado o critério do valor mínimo (que é o correto), seriam classe “B”;
- para os tijolos feitos com 10 % de LD1, obteve-se **$3,39 \pm 0,47$** . Na Tabela A40 dos Anexos verifica-se que o valor mínimo foi de **2,67 MPa**. Assim, utilizando qualquer um dos critérios de comparação, esses tijolos seriam enquadrados na classe “B”;
- para os tijolos feitos com 20 % de LD1, obteve-se **$2,49 \pm 0,47$ MPa**. Na Tabela A41 dos Anexos verifica-se que apenas um dos CPs, dentre os 10 ensaiados, ficou abaixo do valor mínimo de 1,5 MPa (para a classe A), ou seja, **1,43 MPa**. Assim, se adotado o critério do valor médio, esses tijolos poderiam ser enquadrados na classe “A”. Porém, se adotado o critério do valor mínimo, essa percentagem já não poderia ser usada, pois o mínimo obtido está abaixo do estabelecido para a classe “A”. Deve-

se ressaltar que esse valor mínimo de 1,43 MPa não foi descartado estatisticamente, quando da aplicação do teste “T”;

- para os tijolos feitos com 30 % de LD1, obteve-se **1,52 ± 0,08 MPa**. Na Tabela A42 dos Anexos verifica-se que o valor mínimo de 0,93 MPa, bem como o valor máximo de 1,95 MPa, foram rejeitados estatisticamente, quando aplicado o Teste “T”. Para os demais 8 CPs ensaiados, o mínimo foi de **1,36 MPa**. Pelo critério do valor médio esses tijolos seriam ainda enquadrados na classe A. Porém pelo critério do valor mínimo essa percentagem também já não poderia ser usada, pelos mesmos motivos anteriormente expostos;
- para os tijolos feitos com 10 % de LD2, obteve-se para a resistência à compressão **2,68 ± 0,41 MPa**. Na Tabela A47 dos Anexos verifica-se que o valor mínimo obtido foi de **2,02 MPa**. Pelo critério do valor médio esses tijolos poderiam ser enquadrados na Classe “B” e pelo critério do valor mínimo seriam da classe “A”;
- para os tijolos feitos com 20 % de LD2, obteve-se **2,02 ± 0,45 MPa**. Na Tabela A48 dos Anexos verifica-se que o valor mínimo obtido foi de **1,06 MPa**. Se adotado o critério do valor médio os tijolos poderiam ser enquadrados na classe “A”. Pelo critério do valor mínimo essa percentagem não poderia ser usada, pelos mesmos motivos anteriormente expostos;
- para os tijolos feitos com 30 % de LD2, obteve-se **1,17 ± 0,47 MPa**. Na Tabela A49 dos Anexos verifica-se que o valor mínimo obtido foi de **0,87 MPa**. Por qualquer um dos critérios essa percentagem não poderia ser usada, pelos mesmos motivos anteriormente expostos;

Conclui-se, em se tratando de tijolos maciços e levando-se em conta os resultados obtidos nesta pesquisa para a resistência à compressão pós-queima, único parâmetro normatizado, que:

- os tijolos feitos com o LD1 apresentaram resistência à compressão um pouco superior aos feitos com o LD2 para as mesmas percentagens de lodo nas MCs;
- tanto para os tijolos feitos com LD1 quanto para os tijolos feitos com LD2, a máxima percentagem de lodo na mistura, dentre as estudadas, que ainda atende à norma brasileira NBR-7170 (ABNT, 1983b), seria a de 10 %.

No entanto, a partir dos resultados obtidos por outros pesquisadores, que adotaram processos de moldagem e temperaturas de queima diferentes, pode-se deduzir que, mesmo com a matéria prima utilizada nesta pesquisa, porém, com outros métodos de conformação (prensagem ou extrusão), e eventualmente, temperaturas de queima mais altas, poderiam ser conseguidos resultados diferentes dos obtidos nesta pesquisa (maiores valores) para a resistência à compressão pós-queima. Isso poderia alterar, e radicalmente, as conclusões ora apresentadas e, por esse motivo, sugere-se outras pesquisas neste sentido.

Na Tabela 5.20 e na Figura 5.10 são apresentados os resultados médios referentes à **resistência à compressão pós-queima**, obtidos nesta pesquisa para os tijolos feitos com 10 a 40 % de cinzas do LD1 e LD2, além dos resultados obtidos por outros pesquisadores, podendo-se perceber que:

- Os resultados apresentados pelos outros pesquisadores mostraram que há uma tendência de diminuição da resistência à compressão pós-queima à medida que se aumenta a percentagem de cinzas de lodo na MC, porém menos acentuada do que quando se utiliza o lodo (no caso desta pesquisa, seco a 105 °C);
- Tay (1987), que fez a moldagem por extrusão, obteve para o testemunho, um valor médio de resistência à compressão pós-queima de **87,2 MPa**, baixando para **69,4 MPa** quando a percentagem de lodo era de 50 % na MC;

- Trauner (1991), que fez a moldagem por prensagem, obteve para o testemunho, um valor médio de **43,0 MPa**, baixando para **18,0 MPa**, para uma percentagem de cinzas de lodo de 30 %;
- Okuno e Takahashi, que também fizeram a moldagem por prensagem, para os tijolos feitos com 100 % de cinzas, obtiveram valores extremamente altos de resistências à compressão, na faixa de **78 a 196 MPa**;
- Nesta pesquisa, com tijolos moldados manualmente, obteve-se para o testemunho, uma resistência à compressão de **$4,38 \pm 0,57$ MPa** (média $\pm$ desvio padrão), mas o comportamento foi um pouco diferente dos demais pesquisadores, no que se refere às massas que receberam cinzas de lodo. Houve uma tendência inicial de queda da resistência para a MC com 10 % de cinzas do LD1, tendo-se obtido **$3,23 \pm 0,56$ MPa**, seguida de uma tendência de aumento da resistência tendo atingido, para 20 % de cinzas **$4,10 \pm 0,76$ MPa** e para 30 % de cinzas **$4,03 \pm 0,55$ MPa**, caindo novamente para **$3,02 \pm 0,33$ MPa** para uma percentagem de 40 % de cinzas na MC.
- Quanto às cinzas do LD2, também se registrou uma tendência inicial de queda linear da resistência para a MC com até 20 % de cinzas do LD1, tendo-se obtido **$2,74 \pm 0,73$ MPa**, seguida de uma tendência de aumento da resistência tendo atingido, para 30 % de cinzas **$3,27 \pm 0,58$ MPa**, caindo novamente para **$2,96 \pm 0,37$ MPa** para 40 % de cinzas na MC.

Assim, resumindo o exposto e, levando-se em conta apenas os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão de cada corpo de prova, comparando-os aos valores mínimos estabelecidos na norma brasileira NBR-7170 (ABNT-1983-b), pode-se afirmar que, adotando-se o método de moldagem manual, solos argilosos com características semelhantes ao utilizado, cinzas obtidas a partir da queima (sob temperatura de 900 °C) dos lodos previamente secos (à temperatura de 105 °C) e a queima dos CPs à temperatura de 950 °C, tanto o LD1 quanto o LD2 poderiam ser inertizados em tijolos cerâmicos maciços com até 40 % de cinzas de lodo na massa cerâmica (em peso e base

seca), pois, como pode ser constatado pela análise das Tabelas A43 a A46 e A50 a A53 dos Anexos, nenhum corpo de prova, dentre aqueles moldados com cinzas de lodo, apresentou resistência à compressão menor do que 1,5 MPa.

5.5.6.5 Correlação entre a massa específica e a resistência à compressão

Na Figura 5.11 é apresentado um gráfico e a equação resultante da correlação entre as massas específicas aparentes pós-queima “ γ_{pq} ” e as resistências à compressão pós-queima “ $\sigma_{C,950}$ ” obtidas para 150 CPs. Percebe-se que há uma tendência de correlação mas com certa dispersão dos resultados. Foi obtida a equação 5.3, com coeficiente de correlação $R^2 = 0,5958$ ($n = 150$) que poderia ser utilizada, para uma previsão aproximada e em termos médios, da resistência à compressão a ser esperada, a partir da medida da massa específica, naturalmente válida nas mesmas condições gerais e apenas nos intervalos considerados.

$$\sigma_{C,950} = 0,5999 \gamma_{pq}^{4,2193} \quad (\text{Eq. 5.3})$$

5.5.6.6 Resistência à compressão dos CPs (crus e pós-queima)

Apesar de não previstos nas normas brasileiras, nesta pesquisa foram também realizados ensaios de resistência à compressão para os CPs crus (após a secagem dos mesmos a 105 °C), parâmetro esse aqui denominado “ $\sigma_{C,105}$ ”. Deve-se ressaltar que a norma brasileira NBR-6460 (ABNT, 1983a), que fixa os procedimentos para o ensaio de resistência à compressão dos tijolos maciços (apenas após a queima), prevê que os tijolos sejam cortados ao meio, ligados entre si e feito acabamento com argamassa de cimento e areia (ver Fig. A48 nos Anexos). Após a cura da argamassa estes CPs devem permanecer mergulhados em água potável, durante 24 horas, à temperatura ambiente, antes da

realização do ensaio. Este procedimento foi adotado para os corpos de prova rompidos pós-queima mas, no caso dos CPs crus, estes se desmancharam na água, quando dos testes preliminares e por isso não foram mais colocados na água. Assim, deve-se levar em conta essa diferença de procedimentos ao se analisar os resultados obtidos.

Na Tabela 5.21 e Figura 5.12 são apresentados os resultados médios e os gráficos correspondentes às resistências à compressão dos CPs crus e pós queima. Comparando esses resultados pode-se perceber que:

- para o testemunho, ou seja, a massa cerâmica feita apenas com o solo argiloso, obteve-se maior resistência à compressão para os CPs rompidos pós-queima (4,38 MPa) do que para os CPs rompidos crus (3,63 MPa);
- para 10 % de lodo (seco a 105 °C) na MC, a tendência anterior se manteve, tendo-se obtido para os CPs rompidos pós-queima e crus respectivamente; para o LD1 (3,39 e 2,85 MPa) e para o LD2 (2,68 e 2,37 MPa);
- para 20 % de lodo (seco a 105 °C) na MC, a tendência anterior se alterou, ou seja, os CPs rompidos pós-queima apresentaram menor resistência do que os rompidos crus, tendo-se obtido respectivamente; para o LD1 (2,49 e 2,92 MPa) e para o LD2 (2,02 e 2,36 MPa);
- para 30 % de lodo (seco a 105 °C) na MC, a tendência anterior se manteve, ou seja, os CPs rompidos pós-queima apresentaram menor resistência do que os rompidos crus, tendo-se obtido respectivamente; para o LD1 (1,52 e 2,40 MPa) e para o LD2 (1,17 e 2,09 MPa);
- para 10 % de cinzas de lodo na MC, a tendência inicial se manteve, tendo-se obtido para os CPs rompidos pós-queima e crus respectivamente; para as cinzas do LD1 (3,23 e 3,05 MPa) e para as cinzas do LD2 (3,73 e 3,21 MPa);

Tabela 5.21 - Comparação das resistências médias à compressão dos tijolos rompidos crus e pós-queima

% de lodo ou de cinzas	Resistência à compressão do tijolo cru (em MPa)					Resistência à compressão do tijolo queimado (em MPa)				
	Testemunho	LD1	CZ-LD1	LD2	CZ-LD2	Testemunho	LD1	CZ-LD1	LD2	CZ-LD2
0	3,63	-	-	-	-	4,38	-	-	-	-
10	-	2,85	3,05	2,37	3,73	-	3,39	3,23	2,68	3,21
20	-	2,92	2,66	2,36	3,27	-	2,49	4,10	2,02	2,74
30	-	2,40	2,80	2,09	2,95	-	1,52	4,03	1,17	3,27
40	-	-	2,75	-	3,35	-	-	3,02	-	2,96

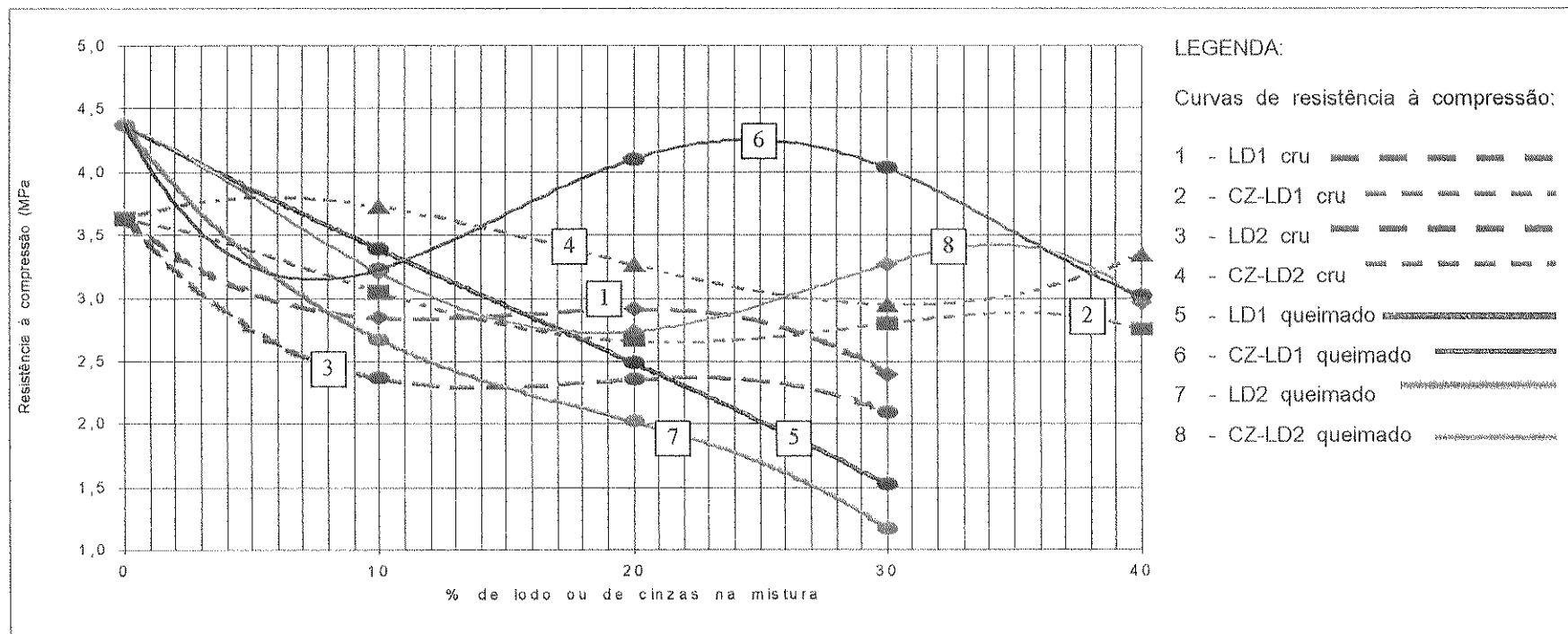


Figura 5.12 - Comparação das resistências médias à compressão dos tijolos rompidos crus e pós-queima

- para 20 % de cinzas de lodo na MC, ocorreram resultados diferentes, a tendência inicial se alterou apenas no caso das cinzas do LD2, ou seja, os CPs rompidos pós-queima apresentaram menor resistência do que os rompidos crus, tendo-se obtido respectivamente; para as cinzas do LD1 (4,10 e 2,66 MPa) e para as cinzas do LD2 (2,74 e 3,27 MPa);
- para 30 % de cinzas de lodo na MC, nos dois casos os CPs rompidos pós-queima apresentaram maior resistência do que os rompidos crus, tendo-se obtido respectivamente; para as cinzas do LD1 (4,03 e 2,80 MPa) e para as cinzas do LD2 (3,27 e 2,95 MPa);
- para 40 % de cinzas de lodo na MC, ocorreram novamente resultados diferentes, a tendência inicial se alterou apenas no caso das cinzas do LD2, ou seja, os CPs rompidos pós-queima apresentaram menor resistência do que os rompidos crus, tendo-se obtido respectivamente; para as cinzas do LD1 (3,02 e 2,75 MPa) e para as cinzas do LD2 (2,96 e 3,35 MPa);

Como se pôde perceber, os tijolos não queimados apresentaram razoável resistência à compressão. Porém, é fato conhecido que apresentam baixa resistência ao contato com a água, ou seja, podem desmanchar-se facilmente sob a ação da água. Face aos resultados de resistência obtidos, sugere-se pesquisas de produtos ou técnicas para impermeabilização da superfície desses tijolos, que sejam compatíveis ou mesmo de menor custo do que a operação de queima.

Ainda com os resultados de resistência à compressão apresentados na Tabela 5.21 e Figura 4.12, pode-se comparar o comportamento dos dois tipos de lodos e suas cinzas, quando os CPs foram rompidos crus:

- para os CPs moldados com o lodo seco a 105 °C houve uma coincidência de comportamentos entre o LD1 e o LD2, ou seja, uma tendência de queda da resistência inicial desde o testemunho até para 10 % de lodo na MC, tendo-se obtido

respectivamente (2,85 e 2,37 MPa), seguido de uma certa estabilização da resistência para 20 % de lodo na MC (na verdade um pequeno crescimento no caso do LD1), tendo-se obtido respectivamente (2,92 e 2,36 MPa) e finalmente uma queda para 30 % de lodo na MC, tendo-se obtido respectivamente (2,40 e 2,09 MPa). Ressalte-se que obteve-se maiores resistências à compressão, com os CPs rompidos crus, para o LD1 do que para o LD2 em todas as MCs, o que talvez possa ser explicado pela presença da cal utilizada no desaguamento do LD1;

- para os CPs moldados com as cinzas dos lodos e rompidos crus, houve uma leve tendência de queda da resistência inicial, desde o testemunho até 20 % de cinzas na MC (no caso das cinzas do LD1). No caso das cinzas do LD2, um leve crescimento até 10 % seguido de um decréscimo até 30 % de cinzas, seguindo-se um pequeno crescimento com 40 %. Obteve-se, para os CPs feitos com as cinzas do LD1 e do LD2, respectivamente: para 10 % de cinzas (3,05 e 3,73 MPa), para 20 % de cinzas (2,66 e 3,27 MPa), para 30 % de cinzas (2,80 e 2,95 MPa) e finalmente para 40 % de cinzas na MC, (2,75 e 3,35 MPa). Ressalte-se que no caso dos CPs rompidos à compressão (crus), aqueles feitos com as cinzas do LD2 apresentaram sempre maiores resistências à compressão do que aqueles feitos com as cinzas do LD1.

5.5.6.7 Resistência à flexão dos CPs (crus e pós-queima)

Os ensaios de resistência à flexão, apesar de não previstos nas normas brasileiras para tijolos cerâmicos maciços, foram também realizados nesta pesquisa para os CPs crus (ou seja, pós-secagem a 105 °C) aqui denominados “ $\sigma_{f_{105}}$ ” e pós-queima a 950 °C ou “ $\sigma_{f_{950}}$ ” (ver Figura A51 nos Anexos).

Deve-se ressaltar que, neste caso, os ensaios de resistência à flexão foram realizados apenas nos CPs feitos com lodo seco a 105 °C, pelos motivos apontados no item 4.5.3, ou seja, qualquer trinca geralmente interfere e diminui o valor obtido. Neste

caso, apesar da discrepância de alguns resultados obtidos para os CPs trincados, não houve descarte estatístico de resultados, quando aplicado o teste “T”. Os CPs que apresentaram trincas foram devidamente identificados nas respectivas Tabelas A39 a A42 e A47 a A49 dos Anexos.

Também no caso do ensaio à flexão os CPs, após a queima, foram mergulhados em água potável, durante 24 horas, à temperatura ambiente, antes da realização do ensaio. Pelos mesmos motivos já citados no item 5.5.6.6, ou seja, temia-se que os mesmos se desfizessem se mantidos na água por 24 horas, no caso dos CPs crus, esse procedimento não foi adotado. Assim, também aqui deve-se levar em conta essa diferença de procedimentos na análise dos resultados obtidos.

Na Tabela 5.22 e Figura 5.13 apresentam-se os resultados e gráficos comparativos entre a resistência média à flexão σ_f e a resistência média à compressão σ_C , para os CPs rompidos crus e pós-queima. Analisando-se esses resultados, pode-se perceber que:

- para o testemunho obteve-se maior resistência à flexão nos CPs rompidos crus quando comparados aos CPs rompidos pós-queima, tendo-se obtido para os CPs crus $\sigma_{f_{105}} = 0,82 \text{ MPa}$ e para os CPs pós-queima $\sigma_{f_{950}} = 0,40 \text{ MPa}$. Comparando-se aos resultados obtidos para a resistência à compressão, os valores obtidos para a resistência à flexão nesta pesquisa, podem ser representados pelas seguintes expressões: $\sigma_{f_{105}} = 0,23 \cdot \sigma_{C_{105}}$ e $\sigma_{f_{950}} = 0,09 \cdot \sigma_{C_{950}}$;
- para 10 % de lodo na MC, também observa-se a mesma tendência anterior, ou seja maior resistência à flexão dos CPs rompidos crus do que pós-queima. Para o LD1 obteve-se $\sigma_{f_{105}} = 0,81 \text{ MPa}$ e $\sigma_{f_{950}} = 0,56 \text{ MPa}$ e para o LD2 $\sigma_{f_{105}} = 0,85 \text{ MPa}$ e $\sigma_{f_{950}} = 0,51 \text{ MPa}$. Comparando-se aos resultados obtidos para a resistência à compressão, os valores obtidos para a resistência à flexão nesta pesquisa, podem ser representados pelas seguintes expressões: para o LD1 $\sigma_{f_{105}} = 0,28 \cdot \sigma_{C_{105}}$ e $\sigma_{f_{950}} = 0,17 \cdot \sigma_{C_{950}}$ e para o LD2 $\sigma_{f_{105}} = 0,36 \cdot \sigma_{C_{105}}$ e $\sigma_{f_{950}} = 0,19 \cdot \sigma_{C_{950}}$;

Tabela 5.22 - Comparação das resistências médias à flexão e à compressão dos tijolos rompidos crus e pós-queima

% de lodo na massa ceram.	Resistência dos tijolos rompidos à flexão (em MPa)						Resistência dos tijolos rompidos à compressão (em MPa)					
	Testemunho		tijolos crus		tijolos queimados		Testemunho		tijolos crus		tijolos queimados	
	cru	queim.	LD1	LD2	LD1	LD2	cru	queim.	LD1	LD2	LD1	LD2
0	0,82	0,40	-	-	-	-	3,63	4,38	-	-	-	-
10	-	-	0,81	0,85	0,56	0,51	-	-	2,85	2,37	3,39	2,68
20	-	-	0,85	0,47	0,44	0,31	-	-	2,92	2,36	2,49	2,02
30	-	-	0,39	0,42	0,29	0,27	-	-	2,40	2,09	1,52	1,17

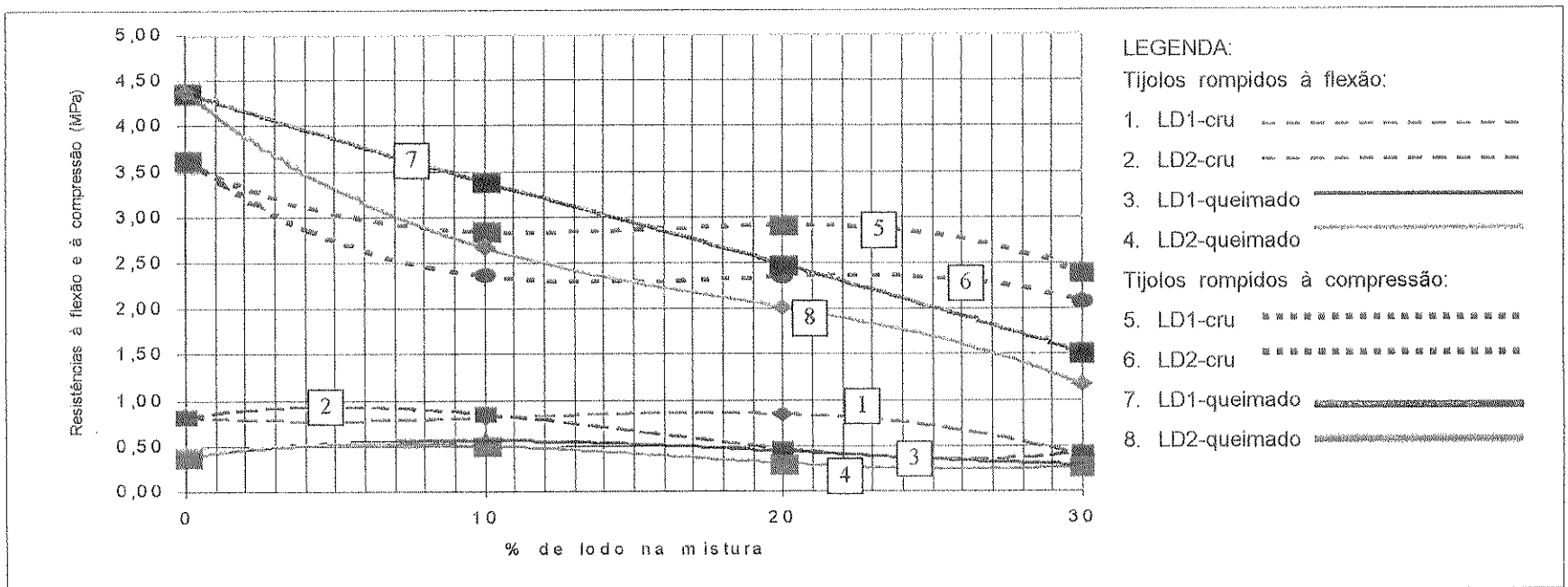


Figura 5.13 - Comparação das resistências médias à flexão e à compressão dos tijolos rompidos crus e pós-queima

- para 20 % de lodo na MC, também observa-se a mesma tendência anterior, ou seja maior resistência à flexão dos CPs rompidos crus do que pós-queima. Para o LD1 obteve-se $\sigma_{f_{105}} = 0,85 \text{ MPa}$ e $\sigma_{f_{950}} = 0,44 \text{ MPa}$ e para o LD2 $\sigma_{f_{105}} = 0,47 \text{ MPa}$ e $\sigma_{f_{950}} = 0,31 \text{ MPa}$. Comparando-se aos resultados obtidos para a resistência à compressão, os valores obtidos para a resistência à flexão, podem ser representados pelas seguintes expressões: para o LD1 $\sigma_{f_{105}} = 0,29 \cdot \sigma_{C_{105}}$ e $\sigma_{f_{950}} = 0,18 \cdot \sigma_{C_{950}}$ e para o LD2 $\sigma_{f_{105}} = 0,20 \cdot \sigma_{C_{105}}$ e $\sigma_{f_{950}} = 0,15 \cdot \sigma_{C_{950}}$;
- para 30 % de lodo na MC, também observa-se a mesma tendência anterior, ou seja maior resistência à flexão dos CPs rompidos crus do que pós-queima. Para o LD1 obteve-se $\sigma_{f_{105}} = 0,39 \text{ MPa}$ e $\sigma_{f_{950}} = 0,29 \text{ MPa}$ e para o LD2 $\sigma_{f_{105}} = 0,42 \text{ MPa}$ e $\sigma_{f_{950}} = 0,27 \text{ MPa}$. Comparando-se aos resultados obtidos para a resistência à compressão, os valores obtidos para a resistência à flexão, podem ser representados pelas seguintes expressões: para o LD1 $\sigma_{f_{105}} = 0,16 \cdot \sigma_{C_{105}}$ e $\sigma_{f_{950}} = 0,19 \cdot \sigma_{C_{950}}$ e para o LD2 $\sigma_{f_{105}} = 0,20 \cdot \sigma_{C_{105}}$ e $\sigma_{f_{950}} = 0,23 \cdot \sigma_{C_{950}}$.

A maior resistência à flexão obtida para os CPs rompidos crus quando comparados aos CPs queimados talvez possa ser atribuída ao fato dos CPs crus não terem sido colocados em água antes da ruptura, como foi feito com os CPs queimados. Talvez também possa ser explicada pela presença de fibras nos lodos. É prática comum, entre aqueles que fazem produtos cerâmicos não queimados (adobe), a introdução de raspas de madeira e outras fibras na massa cerâmica, para aumentar-lhe a resistência. De qualquer maneira, sugerem-se pesquisas no sentido de se descobrir as causas disto.

5.5.6.8 Massas específicas: pós-moldagem, pós-queima e pós-imersão

Na Tabela 5.23 e Figura 5.14 são apresentados os valores médios obtidos para as massas específicas aparentes: pós-moldagem " γ_{pm} ", pós-queima " γ_{pq} " e pós-imersão " γ_{pi} ", obtidos nesta pesquisa com as massas cerâmicas preparadas com 0 % de lodos

(testemunho), com 10 a 30 % de lodos secos a 105 °C e com 10 a 40 % de cinzas de lodos. Analisando-se os resultados obtidos pode-se perceber que:

- em todos os casos houve tendência de decréscimo das massas específicas com o aumento da percentagem de lodos e cinzas de lodo na MC, decréscimo este menos acentuado no caso de massas cerâmicas feitas com as cinzas dos lodos;
- os valores da massa específica pós-imersão, para a mesma percentagem de lodos e suas cinzas, mostraram-se maiores que os valores de massa específica pós-moldagem. Foram obtidos os seguintes valores:
- para o testemunho: $\gamma_{pi} = 2,02 \text{ kg/dm}^3$ e $\gamma_{pm} = 1,87 \text{ kg/dm}^3$ (cerca de 8,0 % a mais);
- com 10 % de LD1: $\gamma_{pi} = 1,91 \text{ kg/dm}^3$ e $\gamma_{pm} = 1,79 \text{ kg/dm}^3$ (cerca de 6,7 % a mais);
- com 20 % de LD1: $\gamma_{pi} = 1,85 \text{ kg/dm}^3$ e $\gamma_{pm} = 1,77 \text{ kg/dm}^3$ (cerca de 4,5 % a mais);
- com 30 % de LD1: $\gamma_{pi} = 1,75 \text{ kg/dm}^3$ e $\gamma_{pm} = 1,70 \text{ kg/dm}^3$ (cerca de 2,9 % a mais);

Percebe-se claramente uma tendência de diminuição dos valores das massas específicas e também uma diminuição da diferença (ver percentuais) entre as massas específicas pós-imersão e pós-moldagem à medida que se aumentou a percentagem do LD1 na massa cerâmica. No primeiro caso pode-se explicar essa diminuição pois o lodo, que apresenta maior quantidade de matéria orgânica que o solo, apresenta também menor massa específica do que o solo (esse comportamento já era esperado). No segundo caso, com maior percentagem de lodo talvez tenha havido um melhor preenchimento dos vazios por partículas sólidas na massa cerâmica durante a sua preparação e, conseqüentemente, maior eliminação do ar presente. Sugere-se pesquisas adicionais para o 2º caso.

- com 10 % de cinzas do LD1 na massa cerâmica: $\gamma_{pi} = 1,95 \text{ kg/dm}^3$ e $\gamma_{pm} = 1,82 \text{ kg/dm}^3$ (cerca de 7,1 % a mais);

Tabela 5.23 - Comparação das massas específicas aparentes pós-moldagem, pós-queima e pós-imersão

% de lodo ou de cinzas na MC	Massa espec. apar. pós-moldagem (kg/dm ³)					Massa espec. apar. pós-queima (kg/dm ³)					Massa espec. apar. pós-imersão (kg/dm ³)				
	Teste-munho	LD1	CZ-LD1	LD2	CZ-LD2	Teste-munho	LD1	CZ-LD1	LD2	CZ-LD2	Teste-munho	LD1	CZ-LD1	LD2	CZ-LD2
0	1,87	-	-	-	-	1,65	-	-	-	-	2,02	-	-	-	-
10	-	1,79	1,82	1,78	1,85	-	1,52	1,55	1,47	1,51	-	1,91	1,95	1,85	1,93
20	-	1,77	1,82	1,71	1,84	-	1,41	1,52	1,35	1,44	-	1,85	1,93	1,77	1,88
30	-	1,70	1,80	1,67	1,81	-	1,26	1,47	1,24	1,39	-	1,75	1,90	1,69	1,85
40	-	-	1,77	-	1,78	-	-	1,41	-	1,36	-	-	1,87	-	1,84

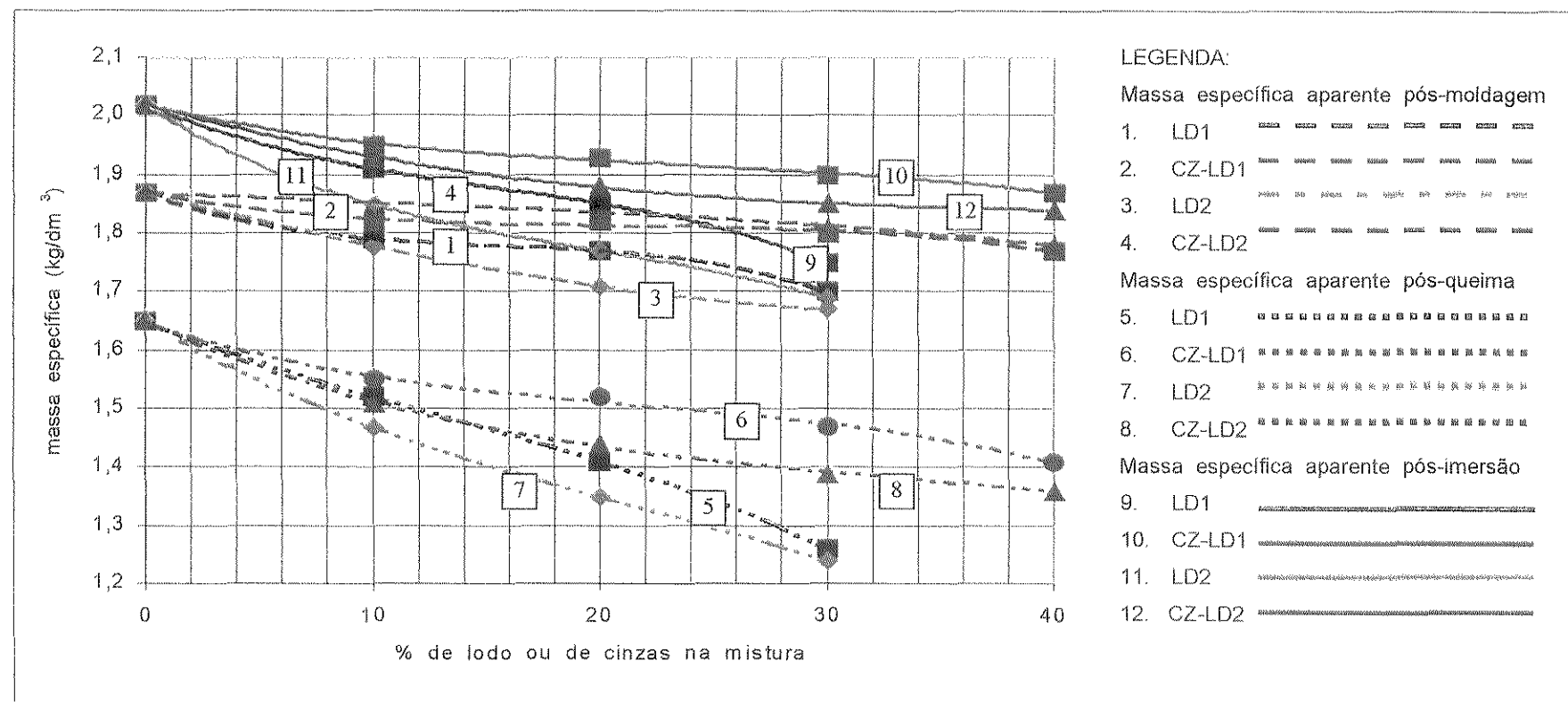


Figura 5.14 - Comparação das massas específicas aparentes pós-moldagem, pós-queima e pós-imersão

- com 20 % de cinzas do LD1: $\gamma_{pi} = 1,93 \text{ kg/dm}^3$ e $\gamma_{pm} = 1,82 \text{ kg/dm}^3$ (cerca de 6,0 % a mais);
- com 30 % de cinzas do LD1: $\gamma_{pi} = 1,90 \text{ kg/dm}^3$ e $\gamma_{pm} = 1,80 \text{ kg/dm}^3$ (cerca de 5,6 % a mais);
- para 40 % de cinzas do LD1: $\gamma_{pi} = 1,87 \text{ kg/dm}^3$ e $\gamma_{pm} = 1,77 \text{ kg/dm}^3$ (cerca de 5,7 % a mais);

No caso das cinzas do LD1 também houve uma tendência de diminuição dos valores das massas específicas à medida que se aumentou a percentagem de cinzas na massa cerâmica, porém menos acentuadas do que no caso do lodo. A diminuição das diferenças (ver percentuais) entre as massas específicas pós-imersão e pós-moldagem, ocorreu mas também não foi muito acentuada. É provável que as cinzas, por já terem perdido a matéria orgânica por volatilização durante o processo de queima, apresentem uma massa específica maior do que a do lodo e portanto o aumento de sua percentagem na massa cerâmica não venha a influir tanto na diminuição das massas específicas. Quanto às MCs feitas com o LD2, obteve-se os seguintes valores:

- com 10 % de LD2: $\gamma_{pi} = 1,85 \text{ kg/dm}^3$ e $\gamma_{pm} = 1,78 \text{ kg/dm}^3$ (cerca de 3,9 % a mais);
- com 20 % de LD2: $\gamma_{pi} = 1,77 \text{ kg/dm}^3$ e $\gamma_{pm} = 1,71 \text{ kg/dm}^3$ (cerca de 3,5 % a mais);
- com 30 % de LD2: $\gamma_{pi} = 1,69 \text{ kg/dm}^3$ e $\gamma_{pm} = 1,67 \text{ kg/dm}^3$ (cerca de 1,2 % a mais);

Ou seja, manteve-se a tendência observada e anteriormente relatada para o LD1, porém de maneira mais acentuada, o que também pode ser explicado pela maior presença de matéria orgânica no LD2 quando comparada com o LD1. Quanto às MCs feitas com as cinzas do LD2, obteve-se os seguintes valores:

- com 10 % de cinzas do LD2 na massa cerâmica: $\gamma_{pi} = 1,93 \text{ kg/dm}^3$ e $\gamma_{pm} = 1,85 \text{ kg/dm}^3$ (cerca de 4,3 % a mais);
- com 20 % de cinzas do LD2: $\gamma_{pi} = 1,88 \text{ kg/dm}^3$ e $\gamma_{pm} = 1,84 \text{ kg/dm}^3$ (cerca de 2,2 % a mais);
- com 30 % de cinzas do LD2: $\gamma_{pi} = 1,85 \text{ kg/dm}^3$ e $\gamma_{pm} = 1,81 \text{ kg/dm}^3$ (cerca de 2,2 % a mais);
- com 40 % de cinzas do LD2: $\gamma_{pi} = 1,84 \text{ kg/dm}^3$ e $\gamma_{pm} = 1,78 \text{ kg/dm}^3$ (cerca de 3,4 % a mais);

Os percentuais anteriormente destacados (entre parênteses) revelam basicamente que haviam vazios na massa cerâmica pós-moldagem, preenchidos por ar. Esses vazios poderiam ser diminuídos com a adoção de outros métodos de moldagem (prensagem ou principalmente a extrusão). As massas específicas pós-queima já foram objeto de análise no item 5.5.6.1.

5.5.6.9 Ensaios de solubilização e de lixiviação

Nas Tabelas 5.24 e 5.25 e Figuras 5.15 e 5.16 são apresentados e comparados os resultados dos ensaios de solubilização e lixiviação, com os limites prescritos na norma NBR-10004 (ABNT, 1987a). Os limites para EPTs já foram apresentados na Tabela 3.8 (limites no líquido lixiviado) e Tabela 3.9 (limites para o líquido submetido ao teste de solubilização). O teste de solubilização serve para classificar o resíduo como **inerte** e, neste caso, nenhum elemento pode ultrapassar as concentrações limites fixadas na norma ou **não inerte**, quando algum elemento aparece em maiores concentrações do que o limite. Já o teste de lixiviação serve para classificar o resíduo como **perigoso**, se algum dos elementos ultrapassar as concentrações limites fixadas na norma.

Tabela 5.24 - Procedimentos detalhados e controle dos ensaios de solubilização e de lixiviação

1. Ensaio de solubilização:

- Conforme determina a NBR-10006 (ABNT, 1987-c), foram colocados 250 g das amostras (de granulometria controlada, passando 100 % pela peneira de 9,5 mm), em 1000 ml de água destilada e deionizada;
- Agitou-se a mistura por 5 minutos e preservou-se por 7 dias;
- Mediu-se o pH final, obtendo-se para a MC-40-CZ-LD1 um valor de pH = 8,8 e para a MC-40-CZ-LD2 o valor do pH foi de 6,9;
- Parte do líquido foi centrifugado e cerca de 100 ml foi preservado com 2 a 3 gotas de ácido nítrico concentrado, obtendo-se um valor de pH < 3. Esse líquido foi levado para leitura de metais no IQ-USP (conforme descrito no item 3.5.17). Os resultados são apresentados na Tabela 4.22 e Figura 4.15.

2. Ensaio de lixiviação:

- Conforme determina a NBR-10005 (ABNT, 1987-b), foram colocados 100 g de amostras de tijolos feitos com 40 % de cinzas do LD1 e do LD2 (de granulometria controlada, passando 100 % pela peneira de 9,5 mm), em 1600 ml de água destilada e deionizada. Agitando-se a mistura mediu-se o pH inicial e controlou-se o valor próximo a 5,0, acidificando-a com ácido acético (HAc) de concentração 0,5 mol/L. Após 24 horas completou-se com água destilada e deionizada conforme procedimento da norma. Os tempos de leitura, valores de pH obtidos em cada leitura e o consumo acumulado de ácido HAc (em ml) são apresentados abaixo.

Tempo (h)		Valor do pH		Consumo acumulado de HAc (ml)		OBSERVAÇÕES
CZ-LD1	CZ-LD2	CZ-LD1	CZ-LD2	CZ-LD1	CZ-LD2	
0	0	8,6	5,4	4,4	6,0	A cada leitura, manteve-se o valor do pH em $5,0 \pm 0,02$ com a utilização do ácido acético 0,5 mol/L.
0,25	0,25	6,3	5,2	10,5	10,0	
0,75	0,75	5,6	5,1	15,7	14,5	
1,75	1,75	5,9	5,1	25,8	19,5	
4,25	2,42	6,4	5,1	64,2	20,5	
18,62	4,30	5,6	5,1	113,5	22,2	
20,13	5,75	5,3	5,4	150,0	31,0	
22,42	21,42	5,2	5,1	181,0	35,2	
23,50	22,75	5,2	5,0	220,0	-	
24,00	24,00	5,0	5,0	-	-	

OBS.: Os tijolos feitos com 40 % de cinzas do LD1 apresentaram o valor de pH inicial de 8,6 e os tijolos feitos com 40 % de cinzas do LD2 pH = 5,4. Para se conseguir manter o pH final (após 24 horas de agitação), foram gastos respectivamente 220 ml de HAc para a MC-40-CZ-LD1 e 35,2 ml de HAc para a MC-40-CZ-LD2.

Tabela 5.25 - Comparação: limites da NBR-10004 e resultados dos ensaios de solubilização e lixiviação (valores médios das concentrações, medidas em mg/L)

Elementos potencialmente tóxicos (EPTs)		Teste de solubilização		Teste de lixiviação		Limites da NBR-10004	
		(NBR-10006 - ABNT, 1987c)		(NBR-10005 - ABNT, 1987b)		(ABNT, 1987a)	
		40-CZ-LD1	40-CZ-LD2	40-CZ-LD1	40-CZ-LD2	solubilização	lixiviação
arsênio	As	0,042	0,036	< 0,004	< 0,004	0,05	5,0
cádmio	Cd	0,0013	<u>0,0052</u>	< 0,0004	< 0,0004	0,005	0,5
chumbo	Pb	< 0,037	< 0,037	< 0,037	< 0,037	0,05	5,0
cobre	Cu	0,242	0,252	0,267	0,376	1,0	VLNF
cromo	Cr	<u>0,433</u>	<u>0,535</u>	0,178	0,249	0,05	5,0
níquel	Ni	0,723	0,745	1,070	0,920	VLNF	VLNF
selênio	Se	<u>0,239</u>	<u>0,210</u>	0,264	0,243	0,01	1,0
zinco	Zn	< 0,0004	0,0017	< 0,0004	< 0,0004	5,0	VLNF
Outros metais							
alumínio	Al	<u>2,25</u>	<u>0,209</u>	2,14	0,440	0,2	VLNF
bário	Ba	0,028	0,036	0,039	0,062	1,0	VLNF
cálcio	Ca	573	279	529	245	VLNF	VLNF
ferro	Fe	<u>0,76</u>	<u>2,05</u>	0,161	0,156	0,3	VLNF
magnésio	Mg	0,204	0,852	0,538	1,20	VLNF	VLNF
manganês	Mn	0,004	<u>0,109</u>	0,064	0,370	0,1	VLNF
potássio	K	340	299	100	100	VLNF	VLNF
sódio	Na	10,7	23,3	6,76	11,2	200	VLNF
titânio	Ti	< 0,003	< 0,003	< 0,003	< 0,003	VLNF	VLNF

OBS.: VLNF = valores limites não fixados pela NBR-10004 (ABNT, 1987a).

Os valores em destaque (sublinhados) indicam que os limites da NBR-10004 foram ultrapassados.

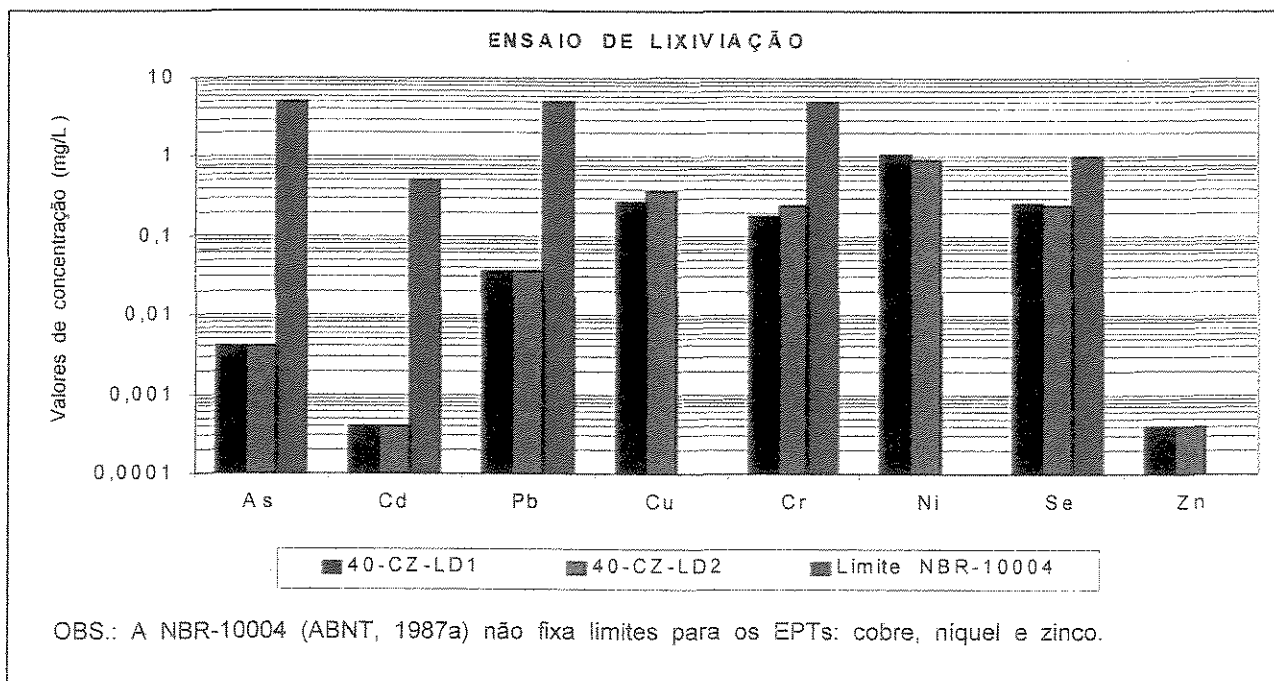


Figura 5.15 - Comparação: limites da NBR-10004 (ABNT, 1987a) e resultados dos ensaios de lixiviação

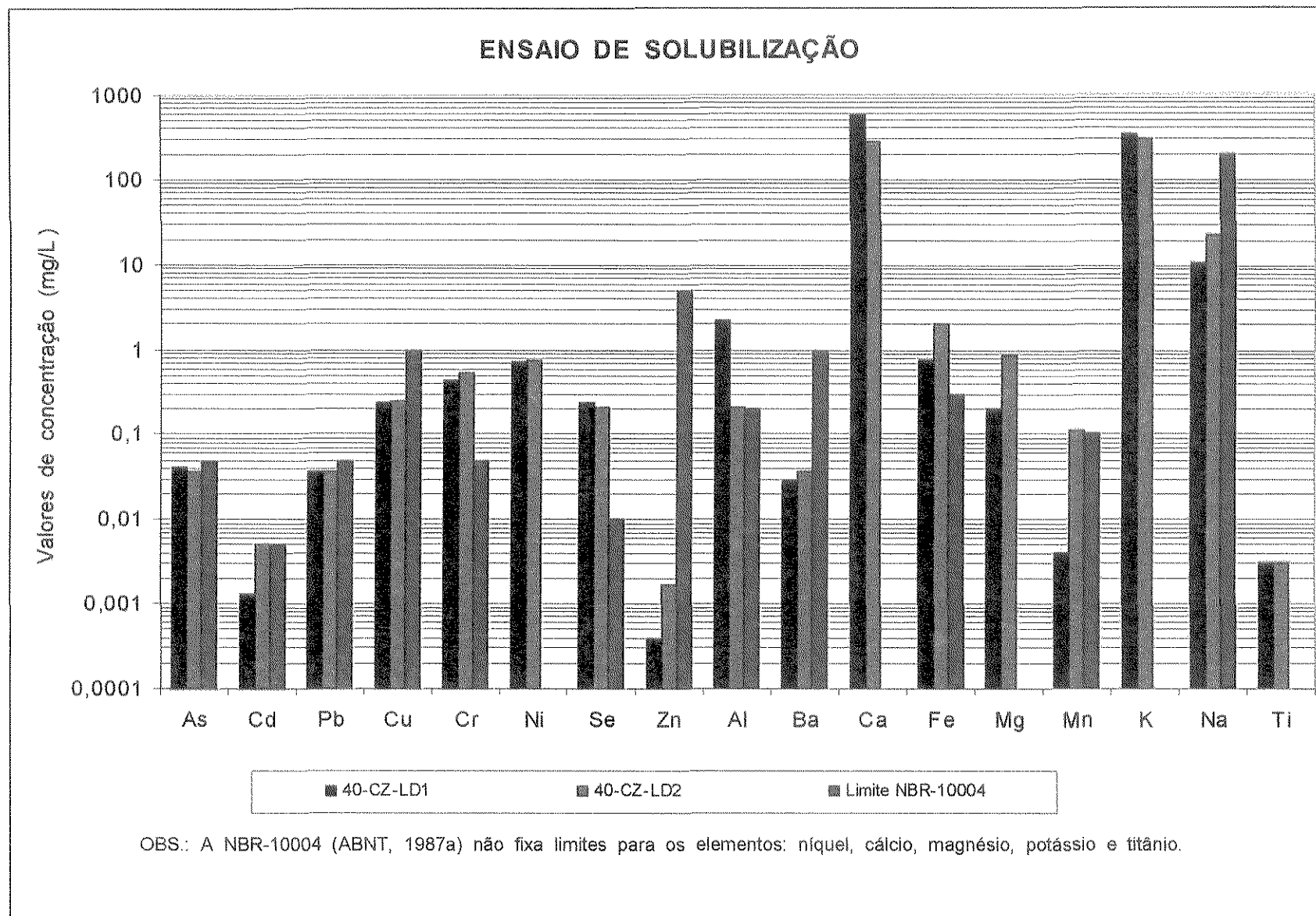


Figura 5.16 - Comparação: limites da NBR-10004 e resultados dos ensaios de solubilização

Deve-se salientar que, se um resíduo é classificado como **inerte** (ou classe 3) pode vir a ser disposto em um aterro de inertes, que é geralmente um aterro para entulhos de construção. Se classificado como **não inerte** (ou classe 2) deve ser disposto no aterro correspondente, onde normalmente são dispostos os resíduos orgânicos e outros resíduos não perigosos. Se o resíduo for classificado como **perigoso** deve ser disposto em aterro para resíduos classe 1 ou perigosos. As técnicas e as medidas de proteção para a construção dos aterros são mais rigorosas para os perigosos, vindo em seguida os não inertes e, finalmente, menos rigorosas para os inertes.

Nesta pesquisa, os ensaios de solubilização e de lixiviação foram feitos com as massas cerâmicas que apresentavam potencialmente a maior concentração de metais, ou sejam, aquelas que foram preparadas utilizando-se 40 % de cinzas do LD1 e do LD2, na mistura com o solo argiloso, num total de 4 análises (2 ensaios de solubilização e 2 de lixiviação). Os tijolos correspondentes a estas massas cerâmicas seriam, com maior probabilidade, os mais concentrados em elementos potencialmente tóxicos, uma vez que os lodos apresentaram maior concentração de EPTs que o solo e, nas cinzas, houve maior concentração de EPTs do que nos lodos secos a 105 °C (ver Tabela 5.5). Seria desejável que tivessem sido feitos os testes de solubilização e de lixiviação para as demais percentagens de cinzas ou mesmo com os tijolos feitos com os lodos secos a 105 °C. Porém, isso acarretaria um aumento significativo no tempo de pesquisa e no custo dos ensaios pois, a cada percentagem estudada, seriam necessárias mais 4 análises ao custo de R\$ 100,00 cada (essas medidas foram feitas no Instituto de Química da USP). O raciocínio foi o seguinte: caso a MC analisada não apresentasse excesso em relação aos limites da NBR-10004 (ABNT, 1987a), dificilmente ocorreriam problemas com as demais MCs. Por medida de precaução, os materiais correspondentes às demais massas cerâmicas (tijolos rompidos à compressão ou à flexão) foram armazenados e poderão ser alvo de futuras pesquisas neste sentido, ficando aqui a sugestão para que isto ocorra.

No ensaio de solubilização, como já era esperado, os valores de pH, ao final do ensaio, mostraram que os CPs apresentavam caráter básico para a MC-40-CZ-LD1 (pH = 8,8) e levemente ácido para a MC-40-CZ-LD2 (pH = 6,9). No ensaio de lixiviação, os

valores de pH inicial tiveram a mesma tendência, com os seguintes valores; para a MC-40-CZ-LD1 (pH = 8,6) e para a MC-40-CZ-LD2 (pH = 5,4). Uma vez que a medida do pH, neste último caso, foi imediata à colocação de água, os resultados indicaram que ao contato mais prolongado com a água, os elementos presentes nos lodos tendem a elevar um pouco o pH dessa água (teoricamente propiciando menor solubilização de metais).

Na Tabela 5.25 foram apresentados os resultados da medida de concentração (em mg/L) de 8 elementos potencialmente tóxicos (EPTs) e também de outros 9 metais detectados, a partir das amostras preparadas nos ensaios de solubilização e de lixiviação. Na mesma tabela são apresentados os limites estabelecidos na norma brasileira NBR-10004 (ABNT, 1987a), tanto para os líquidos provenientes do ensaio de solubilização quanto para os da lixiviação. Na Figura 5.15 apresentou-se um gráfico comparativo dos resultados obtidos para os EPTs no ensaio de lixiviação, comparados aos limites da NBR-10004, mostrando que nenhum deles ultrapassou os limites fixados. Deve-se ressaltar que alguns EPTs (cobre, zinco e níquel), não têm limites fixados na NBR-10004 e que os valores obtidos para o níquel, nos ensaios de caracterização do LD2 e de suas cinzas (ver Tabela 5.6), estavam acima dos limites fixados na norma P-4230 (CETESB, 1999), para aplicação no solo. Para o níquel obteve-se as seguintes concentrações:

- nos ensaios de solubilização realizados nas MCs feitas com 40 % de cinzas do LD1 (**0,72 mg/L**) e para as MCs feitas com 40 % de cinzas do LD2 (**0,75 mg/L**). Nos ensaios de lixiviação realizados nas MCs feitas com 40 % de cinzas do LD1 (**1,07 mg/L**) e para as MCs feitas com 40 % de cinzas do LD2 (**0,92 mg/L**), mostrando ter havido, para este elemento, uma maior concentração no líquido lixiviado.

Na hipótese de se pretender utilizar estes lodos, sugere-se que a SABESP procure investigar e atuar junto às fontes emissoras de EPTs, existentes na bacia contribuinte. Apesar da ressalva feita para o elemento níquel e, levando-se em conta os EPTs normatizados, pode-se afirmar que os resíduos decorrentes das massas cerâmicas analisadas (MC-40-CZ-LD1 e MC-40-CZ-LD2), não apresentaram valores de concentração

de EPTs acima dos limites fixados na NBR-10004 (ABNT, 1987a) e, sob este aspecto, portanto, poderiam ser classificados como resíduos não perigosos.

Na Figura 5.16 foi apresentado um gráfico comparativo dos resultados obtidos para os EPTs e demais metais no ensaio de lixiviação, comparados aos limites da NBR-10004 (ABNT, 1987a), mostrando que alguns elementos ultrapassaram os limites fixados na citada norma. Na amostra MC-40-CZ-LD1, ultrapassaram os limites os seguintes EPTs: cromo e selênio, além de outros metais como o alumínio e o ferro. Na amostra MC-40-CZ-LD2, ultrapassaram os limites os seguintes EPTs: cádmio, cromo e selênio e outros metais como o alumínio, o ferro e o manganês.

Face aos resultados obtidos, pode-se concluir que estas duas massas cerâmicas poderiam ser classificadas como resíduos não inertes, ou seja, para estas duas massas cerâmicas não ocorreu a inertização das cinzas, não se podendo afirmar a partir de que percentagem de cinzas ou de lodos haveria a inertização, pois estes ensaios não foram realizados. Assim, sugere-se prosseguimento de pesquisas neste sentido.

5.5.6.10 Medida de radioatividade nas misturas solo + cinzas

Na Tabela 5.26 são apresentadas as concentrações de radioatividade (em Bq/kg) para os elementos: rádio (^{226}Ra), tório (^{232}Th) e potássio (^{40}K), obtidas numa 2ª fase desta pesquisa, na qual as medidas foram realizadas no IPEN, a partir de misturas preparadas com o solo e as cinzas do LD1 e do LD2, nas proporções de 10 a 40 % de cinzas na mistura.

Na mesma tabela 5.26, são apresentados, ainda, os valores resultantes da aplicação das equações 3.1 a 3.5 (ver item 3.3.2.6 do capítulo 3), aos valores de concentração obtidos e comparados aos limites fixados em alguns países (Austrália, Áustria e Suécia). Para a Eq. 3.1, o limite máximo fixado para os materiais de construção civil na

Austrália, é uma concentração de atividade de **370 Bq/kg**. Para as demais (Eq 3.2 a 3.5), o limite máximo fixado é a dose efetiva de **1 mSv/ano**. Da análise dos resultados pode-se perceber que:

Tabela 5.26 - Radioatividade na mistura das cinzas do LD1 e LD2 com o solo

AMOSTRAS	Concentração de atividade (Bq.kg ⁻¹)			Comparação entre as equações 3.1 a 3.5 (ver definições no item 3.3.2.6 do capítulo 2)				
	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K	Eq. 3.1	Eq. 3.2	Eq. 3.3	Eq. 3.4	Eq. 3.5
10-CZ-LD1	69,0 ± 10,8	106,1 ± 8,3	584,6 ± 45,1	265,8 ± 64,2	0,72 ± 0,07	0,92 ± 0,04	0,28 ± 0,03	0,96 ± 0,09
20-CZ-LD1	78,3 ± 12,1	137,3 ± 10,0	588,3 ± 44,0	319,9 ± 66,1	0,86 ± 0,08	<u>1,07 ± 0,04</u>	0,33 ± 0,03	<u>1,14 ± 0,11</u>
30-CZ-LD1	81,0 ± 13,4	157,0 ± 12,6	551,2 ± 67,3	347,9 ± 93,3	0,94 ± 0,10	<u>1,13 ± 0,05</u>	0,36 ± 0,04	<u>1,24 ± 0,13</u>
40-CZ-LD1	87,9 ± 13,5	170,1 ± 12,5	570,3 ± 48,0	<u>375,1 ± 74,0</u>	<u>1,01 ± 0,09</u>	<u>1,22 ± 0,05</u>	0,39 ± 0,04	<u>1,33 ± 0,12</u>
10-CZ-LD2	98,4 ± 11,4	186,6 ± 10,0	603,4 ± 44,1	<u>411,7 ± 65,5</u>	<u>1,11 ± 0,08</u>	<u>1,35 ± 0,04</u>	0,43 ± 0,03	<u>1,46 ± 0,10</u>
20-CZ-LD2	109,8 ± 16,6	226,8 ± 16,2	528,9 ± 50,8	<u>474,9 ± 83,6</u>	<u>1,28 ± 0,12</u>	<u>1,53 ± 0,06</u>	0,49 ± 0,04	<u>1,68 ± 0,15</u>
30-CZ-LD2	150,6 ± 22,4	286,8 ± 20,2	618,8 ± 44,2	<u>608,3 ± 86,8</u>	<u>1,64 ± 0,15</u>	<u>2,04 ± 0,07</u>	0,62 ± 0,06	<u>2,14 ± 0,19</u>
40-CZ-LD2	177,2 ± 26,3	392,4 ± 27,2	626,5 ± 44,9	<u>786,6 ± 98,4</u>	<u>2,12 ± 0,19</u>	<u>2,50 ± 0,09</u>	0,80 ± 0,07	<u>2,76 ± 0,24</u>

OBS.: Identificação da amostras: 10-CZ-LD1 = mistura do solo argiloso com 10 % de cinzas do lodo 1.

Os valores apresentados nesta tabela referem-se à média ± o desvio-padrão

Os números sublinhados indicam que os valores médios ultrapassaram os limites fixados.

- na 1ª fase desta pesquisa mediu-se as concentrações de atividade do urânio (²³⁸U e ²³⁵U), do tório (²³²Th) e do potássio (⁴⁰K), no solo e nos lodos. Tais resultados foram apresentados na Tabela 5.7. Nesta 2ª fase mediu-se as concentrações de atividade do rádio (²²⁶Ra), do tório (²³²Th) e do potássio (⁴⁰K), tendo-se confirmado o que já havia sido observado na 1ª fase, ou seja, apesar dos dois lodos terem sido coletados na mesma estação de tratamento de esgoto, há uma flagrante diferença de resultados entre o LD1 e o LD2, com o LD2 apresentando maiores concentrações de radioatividade que o LD1, quando comparadas as mesmas percentagens de mistura das suas cinzas com o solo argiloso;

Deve-se esclarecer que o esgoto, ao chegar à ETE Jesus Neto, passa pelas seguintes unidades preliminares: grade, caixa de areia e é bombeado para uma caixa de distribuição. Da caixa de distribuição, parte da vazão é encaminhada para um decantador

primário e seguindo, posteriormente, para um reator de lodos ativados. Outra parte da vazão vai direto para um reator anaeróbico de fluxo ascendente. O LD1 é a mistura dos lodos primário e secundário, oriundo do processo de lodos ativados. Ao serem removidos dos decantadores primário e secundário, esses lodos são misturados e passam ainda pelas seguintes etapas de tratamento: espessamento gravimétrico, digestão anaeróbia, condicionamento químico com cal e cloreto férrico e desaguamento em filtro-prensa de placas. Já o LD2 é o lodo oriundo do reator anaeróbico de fluxo ascendente, diretamente desaguado em leito de secagem, sem utilização de produtos químicos.

Tentou-se descobrir as razões para que o LD2 apresentasse maior concentração de elementos radioativos do que o LD1. As principais hipóteses levantadas foram:

- a adição de produtos químicos teria, de certa forma, diluído o LD1 em termos de concentração de elementos radioativos. Deve-se esclarecer que a adição de cal é feita na proporção aproximada de 20 % em volume e a adição de cloreto férrico é em percentual menor, não sendo representativa. Essa diluição realmente pode ter ocorrido mas, é difícil dizer que tenha sido responsável por tamanha diferença de resultados; e,
- outra possível explicação prende-se ao fato de que no processo anaeróbico, quando há presença de sulfetos, há uma maior precipitação de metais e isso pode também ter ocorrido com os elementos radioativos. Mas o LD1 também passou por um digestor anaeróbico e aí fica difícil dizer que esta tenha sido a razão principal.

As hipóteses apontadas são apenas especulações pois com os dados disponíveis não se pode afirmar nada. A presente pesquisa, não tinha por objetivo investigar a razão de tais resultados. Assim, acredita-se que somente através de um balanço de massa, medindo-se a radioatividade no esgoto que chega na estação, no esgoto tratado e nos lodos é que se pode chegar a algum tipo de explicação, ficando a sugestão para futuras pesquisas neste sentido. Quanto aos resultados apresentados na Tabela 5.26 pode-se ainda observar que:

- com exceção do potássio (^{40}K), houve uma tendência de crescimento das concentrações de atividade dos radionuclídeos à medida que aumentaram as percentagens de cinzas na mistura, o que confirma as afirmações de que as cinzas dos lodos são mais concentradas em radioatividade do que o solo;

Quanto aos resultados da aplicação das Eq. 3.1 a 3.5, apresentados na Tabela 5.16, pode-se ainda afirmar que:

- adotando-se o critério menos rígido, ou seja, o da Eq. 3.4 (utilizada para edifícios existentes na Suécia), todas as misturas poderiam ser utilizadas; e,
- adotando-se os critérios intermediários, ou sejam, as Eq. 3.1 (Beretka e Mathew, 1985, para a Austrália) e Eq. 3.2 (Swedjemark, 1977, para a Áustria), as cinzas do LD1 poderiam ser utilizadas nas proporções de 10 até 30 % e as cinzas do LD2 não poderiam ser utilizadas e,
- adotando-se os critérios mais rígidos, ou sejam, as Eqs. 2.3 (Steger et. al., 1992, para a Austria) e a Eq. 3.5 (edifícios novos na Suécia), apenas as cinzas do LD1, na proporção de 10 % poderiam ser utilizadas.

Deve-se destacar que, no Brasil, não existem normas específicas para estes casos. Aplicando-se, no entanto, os critérios citados, pode-se concluir que o LD1, que apresentaram valores de concentração de radioatividade bem próximos aos valores obtidos para o solo, poderiam ser utilizados como material de construção civil. Já o LD2 deveria ser melhor investigado e, a princípio, não deveria ser utilizado para este propósito. Assim, face aos resultados obtidos nesta pesquisa, recomenda-se ainda que: os técnicos especializados e as autoridades competentes comecem a se preocupar com a elaboração de norma referente à radioatividade presente em resíduos, os quais se pretenda inertizar em materiais de construção civil e também que este tipo de análise seja incluída em futuras pesquisas semelhantes, pois, este assunto vem ganhando força, uma vez que a inertização de resíduos é uma prática com tendência de crescimento no Brasil.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Tratando-se de tijolos cerâmicos maciços, levando-se em conta os materiais, os métodos utilizados, os resultados obtidos nesta pesquisa e, apenas no que diz respeito aos ensaios de resistência à compressão pós-queima, ou seja, o parâmetro cerâmico mais importante, para o qual foram fixados limites mínimos na NBR-7170 (ABNT, 1983b), pode-se concluir que:

- as massas cerâmicas preparadas com os **lodos secos a 105 °C**, tanto no caso do LD1 quanto do LD2 só podem ser utilizadas num percentual de até 10 % de lodo na massa cerâmica, uma vez que as demais percentagens estudadas tiveram, pelo menos um corpo de prova, com valor mínimo de resistência à compressão abaixo do mínimo fixado em norma (1,5 MPa para os tijolos da classe “A”).

Ressalte-se que a utilização de argilas mais resistentes e/ou a alteração do processo de moldagem (prensagem ou extrusão, por exemplo), podem alterar significativamente os resultados e naturalmente as conclusões aqui expostas. Recomenda-se sejam feitas outras pesquisas neste sentido.

- para as massas cerâmicas feitas com as **cinzas de lodo**, conclui-se que até 40 % poderiam ser utilizadas nas massas cerâmicas, tanto no caso das cinzas do LD1 quanto do LD2, uma vez que nenhum corpo de prova apresentou valor mínimo de resistência à compressão pós-queima, abaixo do valor mínimo fixado em norma;

Ressalte-se que, se o aspecto visual for um fator preponderante no uso dos tijolos, deve-se decidir ou não pela utilização dos tijolos feitos com 40 % de cinzas do LD1, que apresentaram superfície totalmente esbranquiçada (provavelmente por causa da exsudação da cal).

Apesar de não ser objeto desta pesquisa, os resultados das medidas de concentração de elementos potencialmente tóxicos (EPTs) e demais metais, realizados com amostras dos lodos e suas cinzas, permitem concluir que o LD2 não poderia, por exemplo, ser utilizado para melhoria de solos agrícolas, uma vez que a concentração medida para o elemento níquel excede os limites máximos fixados na norma P-4230 (CETESB, 1999).

Os resultados das medidas de concentração de elementos potencialmente tóxicos (EPTs), obtidos nos ensaios de lixiviação e de solubilização, realizados nas massas cerâmicas que receberam 40 % de cinzas do LD1 e do LD2, permitem concluir que:

- as massas cerâmicas feitas com 40 % de cinzas do LD1 e 40 % de cinzas do LD2, submetidas ao ensaio de lixiviação, não apresentaram concentrações de EPTs acima dos níveis estabelecidos na norma brasileira NBR-10004 (1987a). Assim, considerando-se apenas os elementos medidos, o entulho desse material pode ser classificado como resíduo não perigoso. Assim, poderia se afirmar que não haveria riscos de tal entulho vir a se constituir num futuro grave problema ambiental;
- as massas cerâmicas feitas com 40 % de cinzas do LD1 e do LD2, submetidas ao ensaio de solubilização, apresentaram concentrações de EPTs e demais metais acima dos níveis estabelecidos na norma brasileira NBR-10004 (1987a). Sob este aspecto, o resíduo pode ser classificado como não inerte e o entulho de tais tijolos não poderia ser destinado a um aterro de inertes, juntamente com o entulho normal de construções.

Ressalte-se que, em razão de não terem sido feitos ensaios de solubilização e lixiviação para as demais massas cerâmicas, não se pode concluir a partir de que

percentual de lodo ou de cinzas de lodo ocorreria a inertização, ou seja, a não ultrapassagem dos limites máximos fixados na NBR-10004 (ABNT, 1987a). Recomenda-se o prosseguimento de pesquisas no sentido de investigar isso, utilizando-se o material estocado para esta finalidade (tijolos rompidos nesta pesquisa).

Na questão da radioatividade, por falta de padronização específica no Brasil, fica difícil adotar uma posição definitiva. Porém, comparados os resultados obtidos com os limites adotados na Austrália, Áustria e Suécia, pode-se concluir que:

- para as massas cerâmicas feitas com o LD1 e suas cinzas, cujas concentrações de radioatividade mostraram-se muito próximas aos do solo utilizado, conclui-se que, sob este aspecto, não se deve fazer restrição ao uso destes resíduos para as finalidades propostas;
- no caso do LD2 conclui-se pela não utilização desse resíduo para os fins propostos, até que sejam feitas pesquisas mais aprofundadas.

Recomenda-se pesquisas adicionais não só para confirmar a maior concentração de radioatividade do LD2 ao longo do tempo, talvez incluindo também o estudo para radionuclídeos de origem não natural e buscando descobrir as origens dessa maior concentração de radioatividade no LD2.

Baseando-se em todos os aspectos anteriormente mencionados e considerada a utilização proposta para tais resíduos, as conclusões finais são:

- O LD1 e o LD2, quando utilizados pós-secagem a 105 °C, só podem ser misturados ao solo aqui considerado, num percentual de até 10 % de lodo na massa cerâmica, baseando-se nos resultados de resistência mínima à compressão que se mostraram desfavoráveis para os demais percentuais estudados;

- as cinzas do LD1 podem ser utilizadas num percentual de até 40 % na mistura com o solo argiloso aqui considerado. Ressalte-se apenas que o entulho desse material foi considerado não inerte, a partir dos resultados do teste de solubilização. Não se recomenda a utilização das cinzas do LD2 pois os aspectos referentes à radioatividade mostraram-se desfavoráveis.

Quanto à metodologia utilizada nesta pesquisa, que pode ser considerada inédita, sob certos aspectos, é de se prever que outros pesquisadores possam vir a utilizá-la no todo ou em parte, em suas futuras pesquisas. Prevendo-se essa possível utilização, recomenda-se:

- não incluir o acompanhamento das perdas de massa durante a secagem dos corpos de prova ao ar, como aqui foi feito pois trata-se de um estudo bastante específico, talvez válido apenas para aqueles materiais utilizados e que, no entanto, demandam um tempo razoável para se fazer as medidas (diárias) e a tabulação e o tratamento desses dados;
- não incluir a determinação da resistência à flexão pois os tijolos, no seu uso normal, não são solicitados à flexão. Além disso, qualquer pequena trinca existente no corpo de prova induz à ruptura e provoca grande diferença nos resultados;
- modificar a metodologia de medida da retração (foi aqui medida a retração volumétrica). Medir retração linear nas 3 faces de cada corpo de prova, de acordo com a metodologia prevista na NBR-7170 (ABNT, 1983b), fazendo-se as adaptações necessárias, com relação ao número de corpos de prova;
- incluir sempre, na caracterização do solo e dos resíduos, a determinação das concentrações de elementos potencialmente tóxicos e de radioatividade. Além disso deve-se fazer os ensaios de solubilização, de lixiviação e a análise da radioatividade no produto final, considerando as diversas percentagens de misturas pretendidas, a exemplo do que foi feito nesta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas - **NBR-6113** - Material refratário – Determinação da resistência à flexão à temperatura ambiente. Rio de Janeiro : ABNT, nov-1980. 2p;
- ____ **NBR-6460** - Tijolo maciço cerâmico para alvenaria – Verificação da resistência à compressão - Método de ensaio. Rio de Janeiro : ABNT, jun-1983a. 3p.
- ____ **NBR-7170** - Tijolo maciço cerâmico para alvenaria – Especificação. Rio de Janeiro : ABNT, jun-1983b. 6p.
- ____ **NBR-6459** - Solo – Determinação do limite de liquidez – Método de ensaio. Rio de Janeiro : ABNT, out-1984a. 6p.;
- ____ **NBR-7180** - Solo – Determinação do limite de plasticidade – Método de ensaio. Rio de Janeiro : ABNT, out-1984b. 3p.
- ____ **NBR-7181** - Solo – Análise granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro : ABNT, 1984c. 13p.
- ____ **NBR-9648** - Estudo de Concepção de sistemas de esgoto sanitário - Procedimento. Rio de Janeiro : ABNT, 1986;
- ____ **NBR-10.004** - Resíduos Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro : ABNT, 1987a. 63p.;
- ____ **NBR-10.005** - Lixiviação de resíduos. Rio de Janeiro : ABNT, set-1987b. 17p.;
- ____ **NBR-10.006** - Solubilização de resíduos. Rio de Janeiro : ABNT, set-1987c. 2p.;
- ____ **NBR-10.007** - Amostragem de resíduos. Rio de Janeiro : ABNT, set-1987d. 25p.;
- AKRIVOS, J.; MAMAI, D.; KATSARA, K. e ANDREADAKIS, A. Agricultural utilisation of lime treated sewage sludge. Water Science and Technology, v.42, n.9, p.203-210, 2000;
- ALLEMAN, James E. e BERMAN, Neil A. Constructive sludge management: Biobrick. Journal of Environmental Engineering, v.110, n. 2, p.301-311, April 1984;

- ALLEMAN, J. E., BRIAN, E. H., STUMM, T. A., MARLOW, W. W. e HOCEVAR, R. C.** Sludge-amended brick production – applicability for metal-laden residues. Water Science and Technology, v.22. n.12, p.309-317, 1990;
- ANDERSON, M., SKERRATT, R.G., TOMAS, J. P. e CLAY, S. D.** Case study involving fluidised bed incinerator sludge ash as a partial clay substitute in brick manufacture. Water Science and Technology; v.34. p.3-4, 1996;
- ANDREOLI, Cleverson Vitorio; PEGORINI, Eduardo Sabino; FREGADOLLI, Paulo e CASTRO, Luiz Antonio Ramos de.** Diagnóstico do potencial dos solos da região de Maringá para disposição final de lodo gerado nos sistemas de tratamento de esgoto do município. SANARE, v.13 n.13, p.40-50, jan-jun.2000;
- ANGLIAN WATER.** Manual of Good Practice for Utilization of Sewage Sludge in Agriculture 2nd Rev. United Kingdom oct. 1991, 53p.;
- APHA** (American Public Health Association), **AWWA** (American Water Works Association) e **WEF** (Water Environmental Federation). Standard Methods for examination of water and wastewater. 20ª ed. : APHA, AWWA e WEF, 1998;
- AULT, M. R.** Gamma emitting isotopes of medical origin detected in sanitary waste samples. Radiation Protect Management, v.6, p.48-52, 1989;
- AZEVEDO NETTO, José Martiniano.** Cronologia do Abastecimento de Água (até 1970). Revista DAE v.44, n.137, p.106-111, jun. 1984;
- AZEVEDO NETTO, José Martiniano de., FERNANDEZ, Miguel Fernandez y., ARAUJO, Roberto (coord.) e ITO, Acácio.** Manual de Hidráulica. 8ª ed. São Paulo : Edgar Blücher. 1998, 670p.
- AZIZ, M. A. e KOE, L.C.C.** Potential utilization of sewage sludge. Water Science and Technology, v.22, n.12, p.277-285. 1990;
- BEIR.** Bureau of Environmental Ionizing Radiation. Health effects of exposure to low levels of ionizing radiation. Committee on the biological effects of ionizing radiation . National Academy Press, Washington, 1990;
- BERTOLDI, M., VALLINI, G. e PERA, A.** Technological Aspects of Composting Including Modelling and Microbiology. GASSER, J.K.R. (ed). In: Composting of agricultural and other wastes. United Kingdon: Galliards. p.27-41, mar 1984;
- BETTIOL, Wagner e CAMARGO, Otávio. A.** (edit) In: Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto. Jaguariuna – SP : EMBRAPA, 2000. 312p.
- BRENNAN, Michael J.** The presence of radionuclides in sewage sludge and their effect on human health. Washington ERP (Environmental Radiation Program). WDOH/320-013. Dec. 1997;
- BRIAN, E. H.** Biobricks and innovation. Biocycle, v.25, n4, p.48-48. 1984a;

- BRIAN, E. H.** Biobricks become a construction reality. Water Engineering and Management. v.131, n.3, p.38, 1984b;
- BRIDLE, T. R. e CAMPBELL, H. W.** Conversion of sewage sludge to liquid fuel. In: Proceedings of 7th Annual AQTE Conference : Montreal – Quebec, 1984;
- BRIDLE, T. e MANTELE, S.S.** Assessment of sludge reuse options: a life-cycle approach. Water Science and Technology, v.41, n.8, p.131-135, 2000;
- BROSCH, C.D., ALVARINHO, S.B. e SOUZA, H.R.** Produção de Agregado Leve a partir de Lodo de Esgoto. Revista DAE n.104, p.53-58, 1976;
- BRUCE, A.M. e FISHER, W.J.** Sludge Stabilisation - Methods and Measurement. Bruce A. (ed). In: Sewage Sludge Stabilisation and Desinfection. Ellis Horwood Series in Water and Wastewater Technology. 1984;
- BURROWS, R.** A sewage disposal strategy for the isle of man. Water Science and Technology, v.34, n.12, p.119-126, 1996;
- CAMPBELL, H. W.** Sludge management - future issues and trends. Water Science and Technology, v.41, n.8, p.1-8, 2000;
- CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – Norma: P-4.230.** Aplicação de biosólidos em áreas agrícolas - Critérios para projeto e operação (Manual Técnico). São Paulo : CETESB. 1999. ;
- DAMASCENO, E. C. e LIMA, J. R. H.** Aproveitamento de resíduos da indústria de mineração: o fosfogesso gerado pela solubilização de concentrados fosfáticos, In: Congresso Italo-Brasileiro de Engenharia Mineraria, v. 3. p.26-27, 1994;
- DA SILVA, Neli Iloni Warpechowski e BELO, Pedro.** Avaliação de misturas de resíduo sólido com argila plástica para aplicação em cerâmica vermelha. Revista Cerâmica, v.42, n.276, p.335-338, jul- ago 1996;
- ENDO, Hisashi; NAGAYOSHI, Yoshikazu e SUZUKI, Kenji.** Production of glass ceramics from sewage sludge. Water Science and Technology, v.36, n.11, p.235-241, 1997;
- FURNARI, Dra. Laura.** (física, especialista em radiação na área da saúde e profª do Departamento de Ensino Geral da FATEC-SP). Comunicação pessoal. 2001;
- GROVE, G.W.** Use Land Farming for Oily Waste Disposal. Hydroc. Process. p.138-140, may. 1978;
- HALL, Jeremy E. e ZMYSLOWSKA, Anna.** Development of sludge treatment and disposal strategies for large conurbations: case study - Warsaw. Water Science and Technology, v.36, n.11, p.291-298, 1997;
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J.** Física nuclear. In: Fundamentos de física: ótica e física moderna. 4ª ed. Rio de Janeiro : LTC, 1995. v.4, cap.47. p.253-276;

- HAMER, G. e ZWIEFELHOFER, H.P.** Aerobic Thermophilic Hygienization - A Supplement to Anaerobic Mesophilic Waste Sludge Digestion EFCE-HPC, In: Effluent Treatment and Disposal. Rugby-U.K.: Pergamon Press, 1986. p.163-180;
- HE, P., GU, G. SHAO, L. e ZHANG, Y.** Research on low temperature thermo-chemical conversion to oil process for sewage sludge. Water Science and Technology. v.42, n.3-4, p301-308, 2000;
- HEMPHILL, B.** Rules and Options for Sludge Disposal Water Engineering and Management, v.139, n.2, p.24-26, feb. 1992;
- HUNT, K.; BROWN, D.; GADDIS, L. e RATZKI, T.** When your back is against the Ceiling: Springfield Ohio Works towards compliance with the 40 CFR 503 Regulations. The Management of Water and Wastewater Solids for the 21st Century: A Global Perspective, jun. 1994 Washington, D.C. USA: Water Environment Federation, 1994, p.14-29 a 14-39;
- IRD-CNEN** - Instituto de Radioproteção e Dosimetria da Comissão Nacional de Energia Nuclear. Radioatividade natural – Tecnologia humana aumenta risco de exposição. Revista Ciência Hoje, v.28, n.166, p.36-42, nov.2000;
- JAROSZ, Julian.** Incinerimento dei fanghi in forni a letto fluido “Pyrofluid”. In: Trattamenti termici dei fanghi di depurazione: CIPA Edit. p.131-141, 1992;
- Lodo de esgoto já pode ser fertilizante. **O ESTADO DE SÃO PAULO**, São Paulo, 27 out. 1999 Suplemento Agrícola, p.G10;
- KATHREN, Ronald L.** NORM sources and their origins. Appl. Radiat. Isot., v.49, n.3, p.149-168, 1998;
- KHRAMENKOV, S.V.**, Practice of Wastewater Sludge - Utilization in the City of Moscow. In: Efluent Treatment and Waste Disposal. ICE, 1990. p.331-338;
- KLEMENT Jr., A. W.** Natural Sources of environmental radiation. In.: Handbook of environmental radiation. Ed. A. W. Klement Jr. p.15-21. CRC Press. Boca Raton, F. L. 1982;
- KIEHL, Edmar José.** Fertilizantes orgânicos. São Paulo : Agronômica Ceres, 1985. 492p.
- LOWE, P.** The Development of a Sludge Disposal Strategy for the Hong Kong Territories. J. IWEM, n.7, p.351-353, aug. 1993;
- MALANCA, Alberto; PESSINA, Valerio; DALLARA, Giuseppe; LUCE, Cynthia Newby e GAIDOLFI, Laura.** Natural radioactivity in building materials from the Brazilian State of Espírito Santo. In.: Appl. Radiat. Isot. v.46, n.12 p. 1387-1392, 1995;
- MAMAI, D.; KOUZELI, A. CHRISTOULAS, D.G.; ANDREAKIS, A. e AFTIAS, E.** Evaluation of agricultural utilisation of the sludge produced at POTW-WWTP. Water Science and Technology, v.42, n.9, p.21-28, 2000;
- MARTIN, J. E. e FENNER, F. D.** Radioactivity in municipal sewage and sludge. Public Health Reports, v.112, n.4, p.308-316, Jul-aug. 1997;

MATTHEWS, P. J. Sewage Sludge Disposal in the UK: A New Challenge for the Next Twenty Years J. IWEM n.6, p.551-559, oct. **1992**;

_____. Land Application of Sewage Sludge - The Latest U.K. Perspective. In: International Symposium on Land Application of Organics (ISOLAO), Tokyo, Japan Jul. **1995**;

_____. Sustainability in biosolids management. Water Science and Technology, v.38, n.2, p.97-102, **1998**;

MAZZILLI, B. e SAUEIA, C. H. R. Radiological Implications of using phosphogypsum as a building material in Brazil. Radiation Protection Dosimetry, v.86, n.1, p.63-67, **1999**;

MAZZILLI, B.; PALMIRO, V.; SAUEIA, C. H. R.; e NISTI, M. B. Radiochemical characterization of brazilian phosphogypsum. Journal of Environmental Radioactivity, v.49, p.113-122, Apr. **1999**;

METCALF, L. e EDDY, H.P. Tratamiento y Depuración de las Águas Residuales. Tradução de Wastewater Engineering: Collection, Treatment and Disposal, Barcelona-Espanha: Labor, **1977**. 837p.;

_____. Wastewater Engineering - Treatment, Disposal and Reuse, 3ª ed. Tchobanoglous, G (ed.), Singapore, Mc. Graw Hill, **1991**. 1334p.;

NASCIMENTO, Luiz Carlos de, ALMEIDA FILHO, Nefitaly Batista e ZAKON, Abraham. Cinzas da incineração de lixo: matéria prima para cerâmicas. Revista Ciência Hoje, v.27, n.160, p.63-67, mai. **2000**;

NOGUCHI, H. e ITO, H. Long-term Experiment of Applying Sludge Fertilizer to Agricultural Land. J. of Inst. of Wat. and Env. Manag., v.6, n.5, p.576-582, oct **1992**;

NUVOLARI, Ariovaldo. Aplicação de lodo de esgotos municipais no solo: Ensaio de respirometria para avaliar a estabilidade do lodo. Campinas, 1996. 158f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, **1996**;

O' DETTE, Robert G. Biosolids and residuals treatment and management options: a comparative cost evaluation. In.: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 20., 1999, Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro: ABES, **1999**. p.4106-4114;

ONAKA, T. Sewage can make Portland cement: a new technology for ultimate reuse of sewage sludge. Water Science and Technology., v.41, n.8, p.93-98, **2000**;

OKUNO, N. e TAKAHASHI, S. Full scale application of manufacturing bricks from sewage. Water Science and Technology, v.36, n.11, p.243-250, **1997**;

OKUNO, Emico. Instrução aos trabalhadores do Instituto de Física da USP. São Paulo : CIPA-IFUSP, mai. **1992**, Apostila.;

- PALAZZO, A.J. e REYNOLDS, C.M.** Long Term Changes in Soil and Plant Metal Concentrations in an Acidic Dredge Disposal Site Receiving Sewage Sludge Wat. Air and Soil Poll. v.57-58, p.839-848, aug. 1991;
- PAULSRUD, Bjarne e NEDLAND, Kjell Terje.** Strategy for land application of sewage sludge in Norway. Water Science and Technology, v.36, n.11, p.283-290, 1997;
- PETRUCCI, Eládio Gerardo Requião.** Materiais de Construção. 2.ed. Porto Alegre : Globo, 1976, 435p.;
- PIKE, E.B. e DAVIS, R.D.** Chap. 3 - Stabilisation and Disinfection - Their Relevance to Agricultural Utilisation of Sludge. Bruce A., Sewage Sludge Stabilisation and Disinfection. Chichester U.K.: 1984. p.61-91;
- PRACIDELLI, Sebastião.** Cerâmica vermelha/estrutural. Revista Cerâmica, v.27, n. 135, p.34A-35A, Mar. 1981;
- _____. Estudos sobre a utilização de bagaço de cana de açúcar e serragem de madeira numa massa para cerâmica estrutural ou vermelha. Revista Cerâmica, v.29, n.162, p.147-149, jun.1983;
- PREEZ, L. A. Du; MERWE, W. Van der e TERBLANCHE, J. S.** Biosolids management at 18 waste water treatment plants in South Africa – optimization strategies. Water Science and Technology, v.42, n.9, p.7-12, 2000;
- RADNET (2000).** Information about source points of anthropogenic radioactivity (Human Ecology as a ritual of aversion). Disponível em: <<http://home.acadia.net/cbm/rad2.html>>. Acesso em 09/05/2001 (16h34);
- RAIJ, B. van, QUAGGIO, J. A. CANTARELLA, H.; FERREIRA, M. E.; LOPES, A. S. e BATAGLIA, O. C.** Análise química do solo para fins de fertilidade. Fundação Cargill, Campinas, 1987. 170p.
- RANTALA, P. R.; VAAJASAARI, K.; JUVONEN, R.; SCHULTZ, E.; JOUTTI, A.; e KURTTO, R.M.** Compost of forest industry wastewater sludge for agricultural use. Water Science and Technology, v.40, n.11-12, p.187-194, 1999;
- _____. Compost of forest industry wastewater sludge. Water Science and Technology, v.42, n.9, p.227-234, 2000;
- SABESP - Cia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo.** Concorrência pública GE/SABESP nº 14.002/93 cap. IV Especificações Técnicas de Serviços para elaboração dos planos de ação intermediário e de longo prazo para a disposição final e/ou aproveitamento dos lodos das estações de tratamento de esgotos (ETE's) de Barueri, Suzano, ABC, Parque Novo Mundo e São Miguel - Rev. 1, 1993;
- SANTOS, Hilton Felício dos.** Unidade Produtora de Fertilizante de Vila Leopoldina. Revista DAE, v.49, n.157, p.222-229, out/dez. 1989;

- Uso agrícola do lodo das estações de tratamento de esgotos sanitários (ETEs): Subsídios para elaboração de uma norma brasileira. São Paulo, 1996. 74 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 1996;
- SANTOS, Hilton Felício e TSUTIYA, Milton Tomoyuki. Aproveitamento e disposição final do lodo de estações de tratamento do Estado de São Paulo. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, v.2, n.2, p.70-80, abr/jun. 1997;
- SAUEIA, C. H. R. Caracterização radioquímica do fosfogesso e implicações radiológicas de sua utilização como material de construção. São Paulo, 1998. Dissertação (mestrado). IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade São Paulo, São Paulo, 1998;
- SAUNDERS, Peter e TASKER, Alison. Radiation. Technographic, 1991. 32p.
- SLIM, J. A. e WAKEFIELD, R. W. The utilization of sewage sludge in the manufacture of clay bricks. Water AS, v.17, n.3, p.197-202, jul. 1991;
- SNYMAN, H. G.; JONG, J. M. e AVELING, T. A. S. The stabilization of sewage sludge applied to agricultural land and effects on maize seedlings. Water Science and Technology, v.38, n.2, p.87-95, 1998;
- SNYMAN, H. G.; TERBLANCHE, J. S. e WESTHUIZEN, J. L. van der. Management and land disposal and agricultural reuse of sewage within the framework of the current South African guidelines. Water Science and Technology, v.42, n.9, p.13-20, 2000;
- SODD, V. J. VELTEN, R. J. e SAENGER, E. L. Concentrations of medically useful radionuclides technetium-99 and iodine-131 at a large metropolitan wastewater treatment plant. Health Physics, v.28, p.355, 1975;
- STEINLE, E. Sludge Treatment and Disposal Systems for Rural Areas in Germany. Wat. Sci.Tech., v.27, n.9, p.159-171, 1993;
- STENTIFORD, E.I., MARA, D.D. e TAYLOR, P.L. Forced Air Co-composting of Domestic Refuse and Sewage Sludge in Static Piles GASSER, J.K.R. (ed). In: Composting of agricultural and other wastes U.K.: Galliards, mar 1984. p.42-55;
- STOLL, U. e PARAMESWARAN, K. Treatment and disposal of domestic sewage sludge and night-soil sludge for Bangkok. Water Science and Technology, v.34, n.11, p.209-217, 1996;
- TAY, Joo-Hwa. Bricks manufactured from sludge. Journal of Environmental Engineering, v. 113, n. 2, p.278-283, april. 1987;
- TAY, Joo-Hwa e SHOW, kuan-Yeow. Properties of cement made from sludge. Journal of Environmental Engineering, v.117, n.2, p.236-247, march/april, 1991;
- TAY, Joo-Hwa, YIP, Woon-Kwong e SHOW, Kuan-Yeow. Clay blended sludge as lightweight aggregate concrete materials. Journal of environmental engineering, v.117, n.6, p.834-844, nov-dec. 1991;

- TAY, Joo-Hwa e SHOW, kuan-Yeow. Innovative civil-engineering material from sewage sludge biocement and its use as blended cement material. Journal of Materials and civil engineering, v.6, n.1, p. 23-33, feb. 1994;
- _____. Resource recovery of sludge as a building and construction material - a future trend in sludge management. Water Science and Technology, v.36, n.11, p.259-266, 1997;
- TRAUNER, E. J. Sludge ash bricks fired to above and below ash-vitrifying temperature. Journal of Environmental Engineering-ASCE, v.119, n.3, p.506-519, may-jun. 1993;
- UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the effects of atomic radiation. Ionizing radiation: Sources and biological effects. Publications E.82.IX.8. New York : United Nations, 1982;
- _____. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly. Annex B. Exposures from natural radiation sources. 2000. Disponível em <<http://www.unscear.org/2000vo1.htm>>. Acesso em 11/09/2002 (11h30);
- USEPA – United States Environmental Protection Agency. Process Design Manual - Land Application of Municipal Sludge. Cincinnati OH-45268 - EPA - 625/1-83.016. Oct. 1983;
- _____. Review of EPA Sewage Sludge Technical Regulations Journal WPCF v.61, n.7, p.1206-1213, july. 1989;
- _____. CFR - 40 - PART 503 - Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge - Federal Register v.58, 1993;
- _____. Test Methods for Evaluating Solid Waste 3ª ed. vol. I - Sec. A. Rev. 0 - SW-846, Sept. 1986;
- _____. Joint NRC/EPA. Sewage Sludge Radiological Survey: Survey design and test site results. Report.-832-R-99-900, 1999. 24p. Disponível em: (<<http://www.epa.gov/radiation/tenorm/docs/sludgereport.htm>>). Acesso em 17/03/2001;
- USNRC - United States Nuclear Regulatory Commission. Reconciliation of radioactive material released to sanitary sewers in accordance with 10-CFR-part 20. Washington : In.: The Commission - NUREG/CR-6289, PNL-10193. Available from the National Technical Information Service, Springfield VA 22161-0002. 1994;
- VARGAS, Milton. Introdução à mecânica dos solos. São Paulo : Mc Graw Hill do Brasil. 1977. 509p.
- VERÇOSA, Enio José. Materiais de construção. Cap. 15 – Materiais cerâmicos. Coord. L. A. Falcão Bauer. Rio de Janeiro : LTD, 1979;
- VESILIND, P. A. Sludge disposal: ethics and expediency. Water Science and Technology, v.42, n.9, p.1-5, 2000;
- VISSMAN Jr., W. e HAMMER, M.J. Chap. 13 - Processing of Sludges In: Water Supply and Pollution Control. 4ª ed. N.Y.: Harper & Row, 1985. p.609-661;

VINCENT, A.J. e CRITCHLEY, R.F. A Review of Sewage Sludge Treatment and Disposal in Europe. **BRUCE, A. (ed.)** In: Sewage Sludge Stabilisation and Disinfection. Chichester U.K.: 1984. p.550-580;

WSDOH – Washington State Department of Health. The presence of radionuclides in sewage sludge and their effect on human health. Report n. WSDOH/320-013, Dec. 1997. Disponível em: <http://www.doh.wa.gov/ehp/rp/sludge.pdf>. Acesso em 20/05/2001.

WIEBUSCH, B. e SEYFRIED, C. F. Utilization of sewage sludge ashes in the brick and tile industry. Water Science and Technology. v.36, n.11, p.251-258, 1997;

WIEBUSCH, B., OZAKI, M., WATANABE, H. e SEYFRIED, C. F. Assessment of leaching tests on construction material made of incinerator ash (sewage sludge): Investigations in Japan and Germany. Water Science and Technology, v.38, n.7, p.195-205, 1998;

YÜKSELEN, Mehmet Ali. Applicability of UASB sludge to agricultural lands. Water Science and Technology, v.37, n.8, p.153-159, 1998.

ANEXOS

Neste capítulo foram apresentados, nas Tabelas A1 a A53 e Figuras A1 a A42, os resultados detalhados obtidos na presente pesquisa, além de fotos ilustrativas dos equipamentos, dispositivos e aspectos sobre os corpos de prova, nas Figuras A43 a A57.

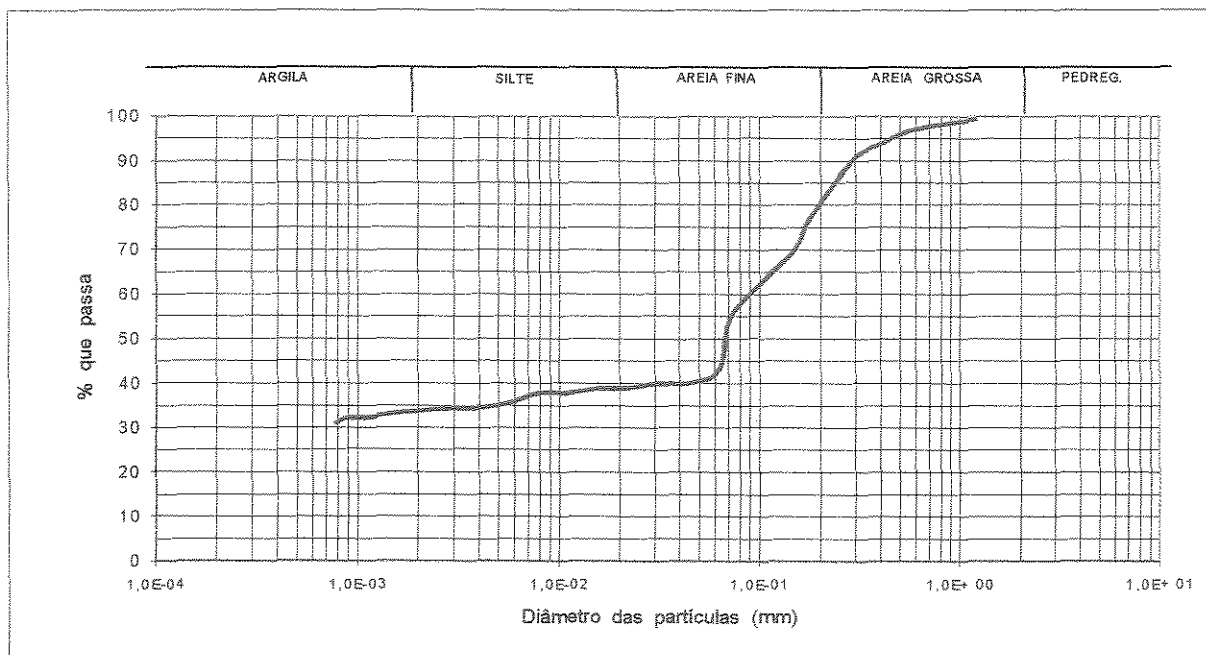


Figura A1 - Curva granulométrica do solo argiloso 1 (escolhido para continuidade da pesquisa)

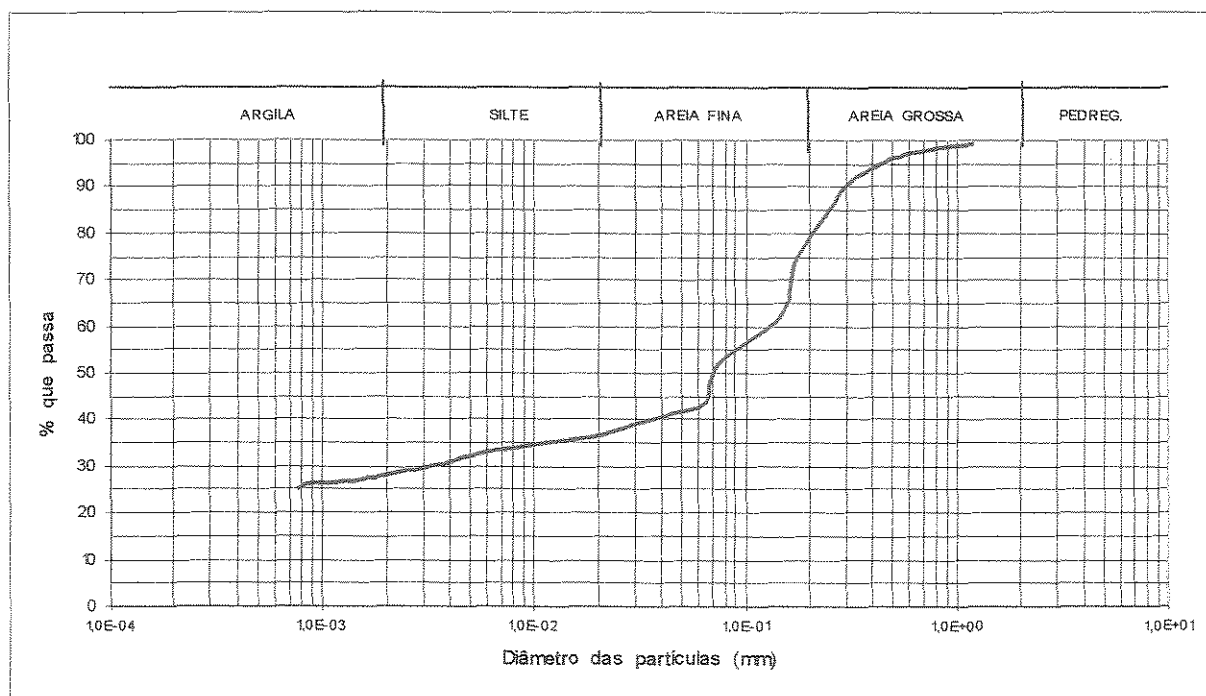


Figura A2 - Curva granulométrica do solo argiloso 2 (não escolhido para continuidade da pesquisa)

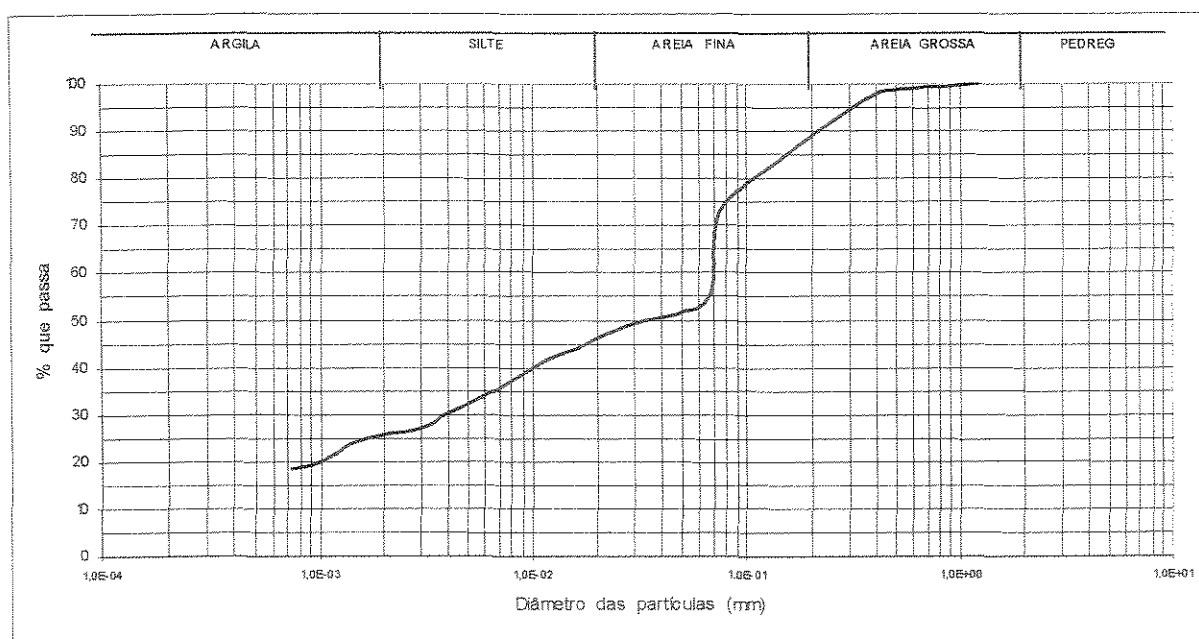


Figura A3 - Curva granulométrica do solo argiloso 3 (não escolhido para continuidade da pesquisa)

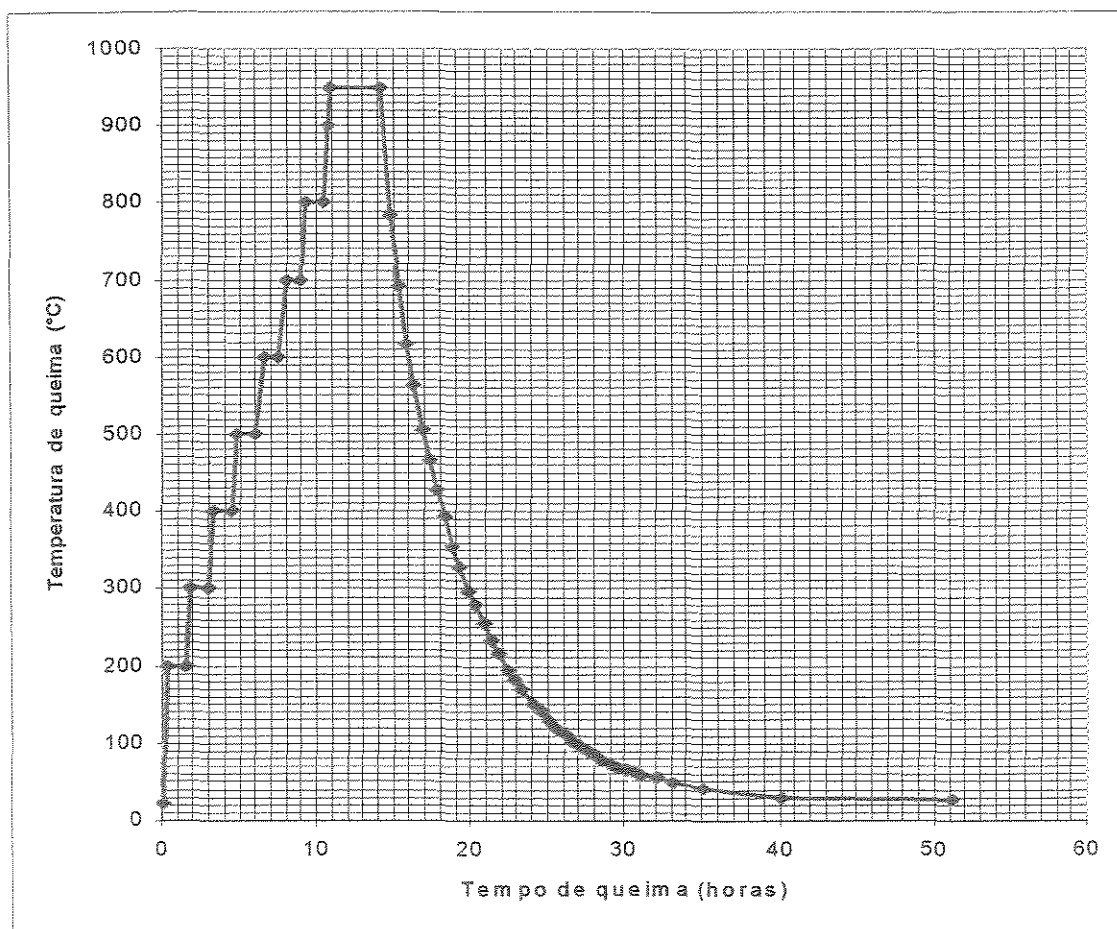


Figura A4 - Diagrama tempo x temperatura de queima utilizado nesta pesquisa

Tabela A1 - MC-0 - Perda de massa x temperatura

Amostra 1 - massa úmida = 33,833g	massa seca = 26,238g	teor de umidade h = 28,9%						
Amostra 2 - massa úmida = 45,039g	massa seca = 35,329g	teor de umidade h = 27,5%						
Amostra 3 - massa úmida = 40,066g	massa seca = 30,879g	teor de umidade h = 29,8%						
Amostra 4 - massa úmida = 42,827g	massa seca = 33,406g	teor de umidade h = 28,2%						
Amostra 5 - massa úmida = 34,445g	massa seca = 26,779g	teor de umidade h = 28,6%						
Amostra 6 - massa úmida = 43,086g	massa seca = 34,284g	teor de umidade h = 25,7%						
Teor de umidade médio das 6 amostras h = 28,1 %								
Perdas de massa x temperatura (% da massa seca)						Temperatura	Média	Média
Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	(°C)	(%)	acumulada
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	100	0,0	0,0
0,8	1,7	2,4	1,2	1,0	3,1	150	1,7	1,7
1,7	2,4	2,7	2,1	1,6	3,4	200	0,6	2,3
6,6	6,0	3,4	6,5	4,6	3,9	250	2,9	5,2
6,6	7,7	8,6	6,5	6,7	9,3	300	2,4	7,6
7,2	9,0	9,8	7,3	8,1	10,5	400	1,1	8,6
8,3	10,8	12,2	8,5	9,4	12,7	500	1,7	10,3
11,3	12,3	12,9	10,7	10,1	13,5	600	1,5	11,8
11,4	12,3	12,9	11,9	11,4	13,5	700	0,4	12,2
11,8	12,7	13,1	12,2	11,9	13,8	800	0,4	12,6
12,0	12,8	13,3	12,5	12,2	14,2	900	0,2	12,8
12,1	13,0	13,6	12,5	12,3	14,3	1172	0,2	13,0

OBSERVAÇÃO: Para cada temperatura considerada, a massa cerâmica permaneceu na mufra por 1 hora

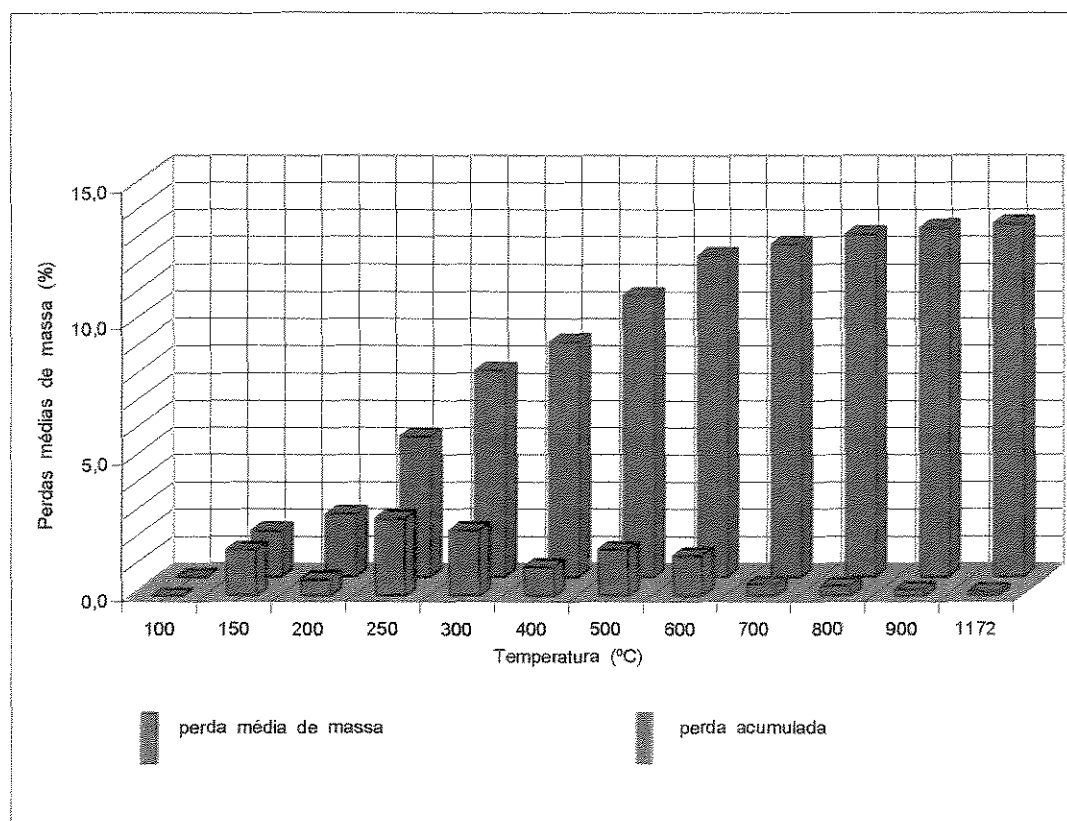


Figura A5 - MC-0 - Perdas de massa x temperatura

Tabela A2 - PERDAS DE MASSA durante a secagem medidas nos CPs da MC-0-A

Corpos de prova		CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	Média
P _{umid.}	(g)	233,66	236,47	241,31	234,12	235,87	236,87	237,37	238,16	236,73
PS	(g)	181,60	183,99	188,08	182,31	184,39	183,80	183,63	184,16	184,00
h _{med}	(%)	28,67	28,52	28,30	28,42	27,92	28,87	29,27	29,32	28,66
Tempo "T _E "		Perda acumulada de massa durante a secagem ao ar (em % do peso seco)								
(horas)	(dias)	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	Média
0,00	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,25	0,1	0,57	0,51	0,61	0,10	0,65	0,64	0,68	0,73	0,56
5,75	0,2	1,31	1,24	1,31	1,35	1,32	1,37	1,39	1,50	1,35
19,00	0,8	3,41	3,28	3,35	3,46	3,39	3,54	3,58	3,78	3,47
21,00	0,9	3,77	3,64	3,68	3,81	3,91	3,88	3,94	4,14	3,85
24,00	1,0	4,24	4,07	4,13	4,26	4,15	4,31	4,38	4,58	4,26
42,25	1,8	7,59	7,32	7,31	7,54	7,44	7,62	7,83	8,11	7,59
45,50	1,9	8,11	7,79	7,78	8,00	7,89	8,08	8,29	8,60	8,07
48,00	2,0	8,65	8,33	8,29	8,50	8,37	8,63	8,84	9,17	8,60
49,25	2,1	9,74	9,47	9,21	9,50	9,30	9,61	9,90	10,33	9,63
72,00	3,0	15,06	14,21	14,25	14,60	14,43	15,02	15,18	16,80	14,94
90,50	3,8	18,11	16,80	16,87	17,36	17,07	18,09	18,40	20,46	17,89
96,00	4,0	19,32	17,97	18,01	18,63	18,28	19,38	19,83	21,83	19,16
118,50	4,9	22,50	21,27	20,79	21,23	20,98	22,30	23,12	25,01	22,15
168,00	7,0	25,31	24,68	24,33	24,63	24,21	25,35	25,91	26,35	25,10
192,00	8,0	25,64	25,21	24,93	25,15	24,65	25,70	26,23	26,56	25,51
216,00	9,0	25,68	25,37	25,11	25,32	24,80	25,85	26,30	26,54	25,62
240,00	10,0	25,77	25,50	25,26	25,46	24,93	25,96	26,40	26,56	25,73

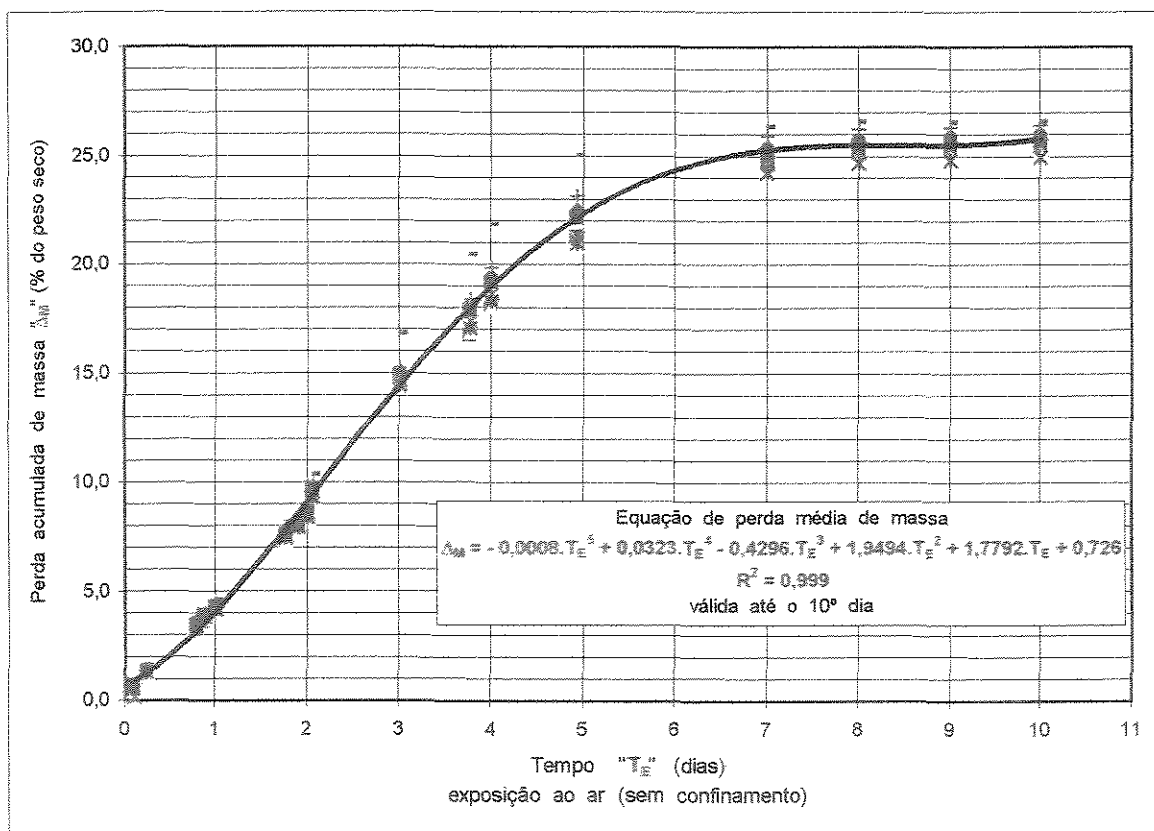
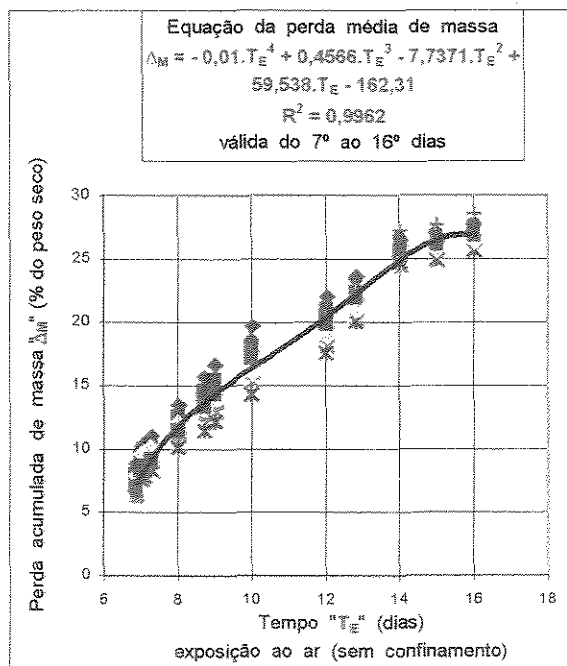
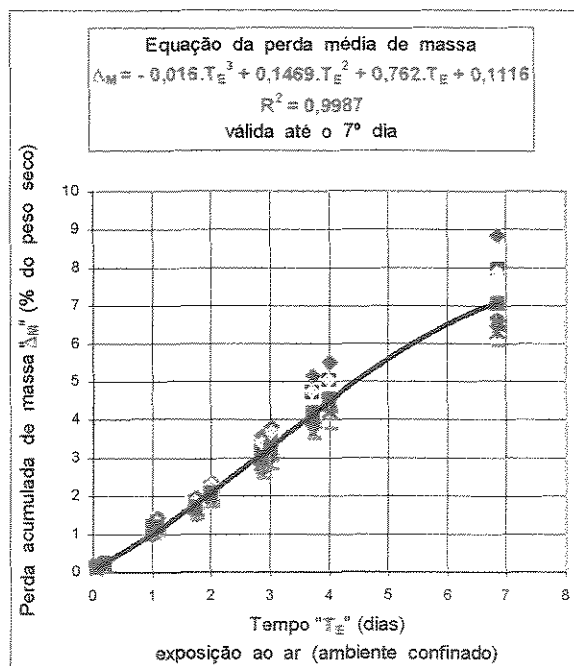


Figura A6 - MC-0-A - Gráfico de perda de massa na secagem ao ar

Tabela A3 - PERDAS DE MASSA durante a secagem, medidas nos CPs da MC-0-B

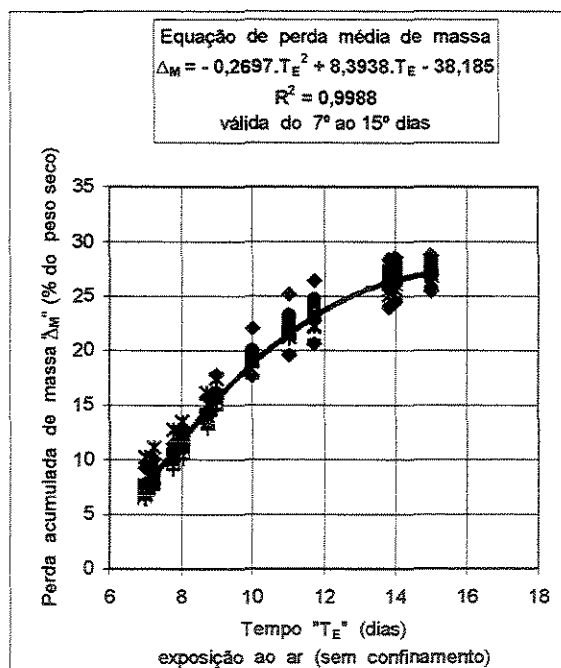
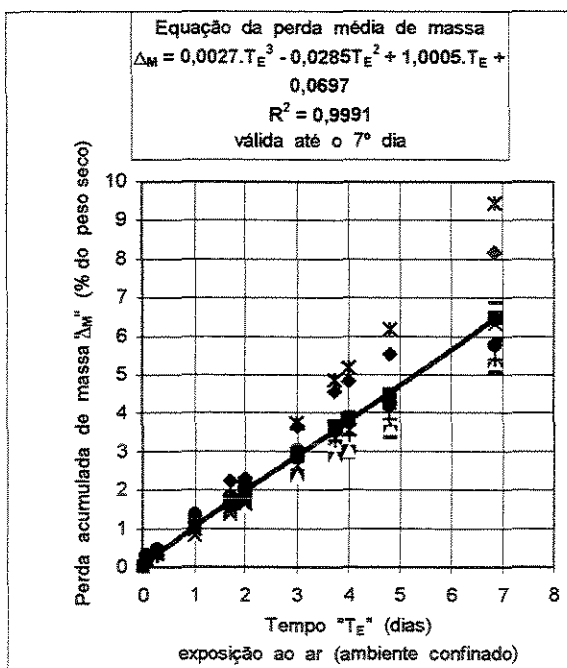
PERDA ACUMULADA DE MASSA durante a secagem ao ar (em % do peso seco)												
Tempo "T _E "		CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
(horas)	(dias)											
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,00	0,04	0,12	0,15	0,12	0,12	0,07	0,09	0,07	0,08	0,04	0,02	0,10
4,75	0,20	0,22	0,25	0,23	0,24	0,22	0,21	0,21	0,26	0,18	0,19	0,23
24,00	1,00	1,33	1,23	1,12	1,02	1,15	0,97	1,00	1,05	0,89	1,19	1,11
26,00	1,08	1,44	1,32	1,22	1,12	1,25	1,07	1,09	1,14	0,98	1,31	1,21
41,50	1,73	1,95	1,85	1,75	1,67	1,86	1,46	1,48	1,63	1,39	1,85	1,71
48,00	2,00	2,34	2,19	2,06	1,96	2,20	1,92	1,88	2,03	1,70	2,31	2,07
68,33	2,85	3,57	3,27	3,02	2,85	3,03	2,70	2,62	2,80	2,46	3,41	2,98
72,00	3,00	3,82	3,54	3,34	3,06	3,24	3,02	2,97	3,12	2,71	3,68	3,26
89,25	3,72	5,14	4,72	4,42	3,95	3,66	3,90	3,80	3,91	3,52	4,74	4,19
96,00	4,00	5,51	5,04	4,69	4,22	4,23	4,34	4,22	4,23	3,77	5,04	4,56
164,50	6,85	8,86	7,97	7,29	6,48	6,32	6,62	6,59	6,39	5,97	7,89	7,06
168,00	7,00	10,22	9,42	8,52	7,58	7,60	7,87	7,90	7,82	8,34	9,62	8,37
169,75	7,07	10,51	9,71	8,78	7,84	7,86	8,17	8,17	8,11	8,59	9,88	8,64
174,75	7,28	11,05	10,21	9,28	8,30	8,36	8,75	8,70	8,62	8,94	10,26	9,16
192,00	8,00	13,50	12,60	11,39	10,21	10,11	11,45	11,26	11,23	10,93	12,15	11,47
209,00	8,71	15,68	14,56	13,32	12,11	11,45	13,64	13,21	13,09	12,37	13,19	13,38
216,00	9,00	16,63	15,46	14,24	12,98	12,14	14,78	14,23	14,18	13,22	13,85	14,33
240,00	10,00	19,75	18,11	16,89	15,34	14,29	18,48	17,63	16,89	15,55	15,86	17,17
288,00	12,00	22,00	20,55	19,46	18,10	17,55	21,31	20,28	19,55	18,48	18,78	19,85
307,33	12,81	23,62	22,31	21,47	20,26	20,00	23,40	22,52	21,70	20,55	20,83	21,91
336,00	14,00	25,98	25,08	25,31	24,38	24,68	26,59	27,23	26,35	25,56	25,41	25,70
360,00	15,00	26,29	25,78	25,71	24,81	24,94	26,97	27,68	26,82	26,08	25,57	26,13
384,00	16,00	26,83	26,40	26,42	25,58	25,66	27,66	28,53	27,69	26,99	26,20	26,85



Figuras A7-a e b - MC-0-B - Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar

Tabela A3 - PERDAS DE MASSA na secagem, medidas nos CPs da MC-0-C

Corpos de prova	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média	
P _{umid} (g)	232,69	237,28	238,84	236,00	234,33	239,83	237,08	237,45	232,75	234,47	236,07	
PS (g)	176,45	180,56	181,96	179,91	178,44	183,44	181,14	180,86	178,38	179,38	180,05	
h _{PM+N52} (%)	31,87	31,41	31,26	31,18	31,32	30,74	30,88	31,29	30,48	30,71	31,11	
Tempo "T _E "	PERDA ACUMULADA DE MASSA durante a secagem ao ar (em % do peso seco)											
(horas)	(dias)	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,75	0,07	0,18	0,20	0,20	0,20	0,19	0,31	0,18	0,20	0,18	0,28	0,21
6,75	0,28	0,32	0,31	0,32	0,36	0,36	0,46	0,33	0,39	0,34	0,46	0,37
24,00	1,00	1,16	0,96	0,85	0,83	0,98	1,37	1,12	1,17	0,96	1,32	1,07
41,00	1,71	2,24	1,42	1,36	1,38	1,74	1,84	1,59	1,69	1,46	1,86	1,66
48,00	2,00	1,98	1,64	1,57	1,64	2,16	2,19	1,90	1,99	1,81	2,29	1,92
72,00	3,00	2,89	2,37	2,33	2,64	3,75	3,04	2,74	2,95	3,00	3,65	2,94
89,50	3,73	3,53	2,83	2,86	3,35	4,86	3,60	3,28	3,57	3,80	4,57	3,63
96,00	4,00	3,71	2,99	3,01	3,55	5,18	3,77	3,44	3,74	4,01	4,83	3,82
115,33	4,81	4,27	3,50	3,61	4,26	6,18	4,20	3,84	4,25	4,62	5,52	4,43
164,50	6,85	6,47	5,16	5,31	6,33	9,45	5,78	5,41	5,91	6,88	8,16	6,49
168,00	7,00	7,82	6,36	6,38	7,30	10,28	6,81	6,38	7,64	7,94	9,27	7,62
173,50	7,23	9,16	7,50	7,41	8,34	11,12	7,95	7,31	8,63	8,69	10,06	8,62
186,42	7,77	11,41	9,64	9,50	10,38	12,77	9,98	9,09	10,42	10,16	11,47	10,48
193,00	8,04	12,66	10,82	10,61	11,29	13,51	11,11	10,12	11,37	10,88	12,19	11,46
209,33	8,72	15,74	13,47	13,31	14,05	16,11	14,22	12,83	14,08	13,24	14,37	14,14
216,00	9,00	17,76	15,35	15,07	15,68	17,43	16,14	14,57	15,68	14,59	15,64	15,79
240,00	10,00	22,03	19,25	18,71	19,03	19,56	20,02	17,72	18,52	17,45	17,68	19,00
264,00	11,00	25,16	22,68	21,81	21,27	21,30	23,26	21,06	21,32	19,73	19,61	21,72
281,25	11,72	26,46	24,33	23,29	22,39	22,20	24,74	22,84	22,83	20,98	20,64	23,07
331,50	13,81	28,38	27,36	26,58	25,61	25,10	27,10	26,59	26,27	24,30	23,98	26,13
336,25	14,01	28,57	27,69	26,96	26,10	25,60	27,32	26,95	26,74	24,83	24,51	26,53
360,00	15,00	28,75	27,99	27,46	26,81	26,39	27,56	27,27	27,20	25,70	25,44	27,06



Figuras A8_a e b - MC-0-C - Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar

Tabela A5 - PERDAS DE MASSA durante a secagem, medidas nos CPs da MC-10-LD1-A										
Corpos de prova		CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	Média
P _{úmido}	(g)	227,21	231,93	231,59	226,75	228,28	226,89	229,52	230,34	229,06
PS	(g)	171,52	175,70	175,25	171,43	172,75	171,25	173,14	173,48	173,07
h _{PM}	(%)	32,47	32,00	32,15	32,27	32,14	32,49	32,56	32,78	32,36
PERDA ACUMULADA DE MASSA durante a secagem ao ar (em % do peso seco)										
Tempo "TE"		CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	Média
(horas)	(dias)									
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,50	0,10	0,70	0,65	0,65	0,64	0,64	0,71	0,72	0,75	0,68
5,00	0,21	1,22	1,16	1,15	1,20	1,20	1,28	1,33	1,41	1,24
8,00	0,33	1,70	1,59	1,61	1,64	1,64	1,77	1,81	1,94	1,71
18,50	0,77	3,82	3,57	3,60	3,69	3,71	3,88	4,02	4,21	3,81
21,50	0,90	4,47	4,18	4,21	4,35	4,37	4,57	4,19	5,03	4,42
24,00	1,00	5,08	4,71	4,74	4,88	4,93	5,14	5,39	5,72	5,07
26,50	1,10	5,47	5,11	5,14	5,31	5,37	5,59	5,90	6,24	5,52
42,75	1,78	8,30	7,73	7,75	7,97	8,01	8,24	8,66	9,13	8,22
48,00	2,00	9,05	8,42	8,42	8,61	8,65	8,89	9,33	9,90	8,91
72,00	3,00	15,44	14,45	14,26	14,44	14,92	15,33	15,48	16,91	15,16
96,00	4,00	19,82	18,21	18,07	18,74	19,10	19,85	20,19	21,76	19,47
119,00	4,96	23,33	20,71	21,73	21,97	22,63	23,64	23,77	24,94	22,84
168,00	7,00	26,84	25,98	25,83	26,03	26,34	26,91	27,01	27,63	26,57
192,00	8,00	27,68	26,85	26,84	27,07	27,25	27,73	27,78	28,33	27,44
216,75	9,03	28,07	27,13	27,37	27,54	27,61	28,09	28,12	28,57	27,81
240,00	10,00	28,15	27,45	27,53	27,70	27,72	28,18	28,21	28,61	27,95

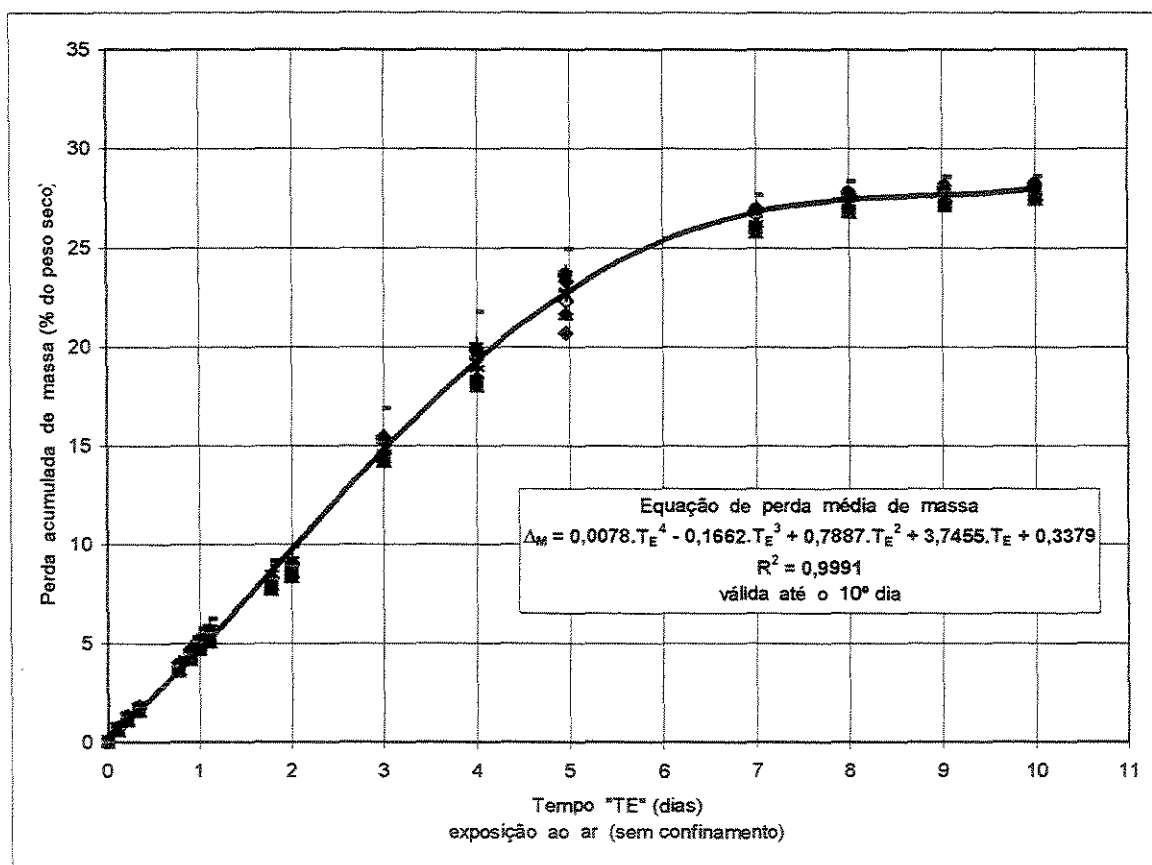
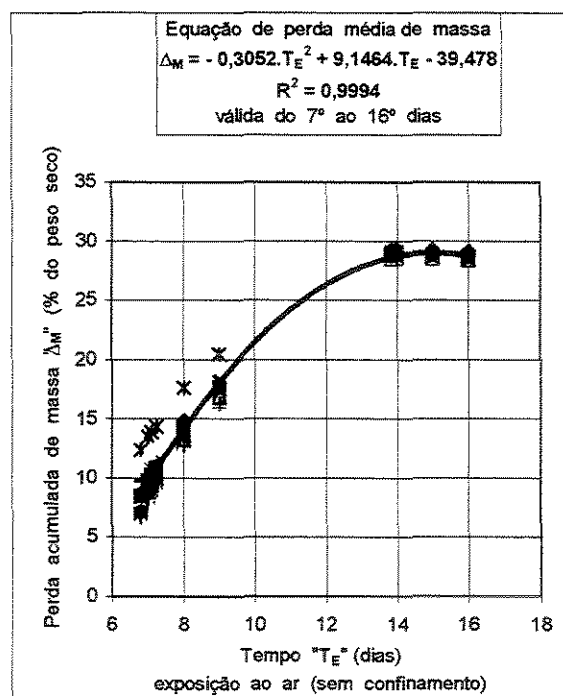
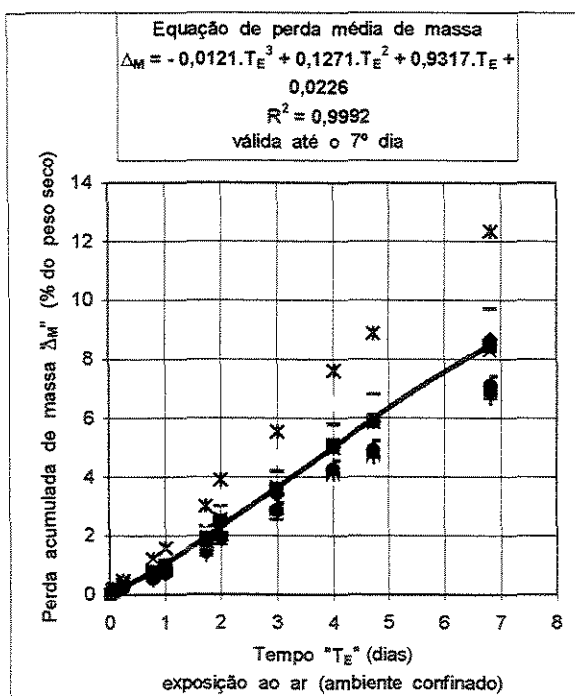


Figura A9 - MC-10-LD1-A - Gráfico de perda de massa na secagem ao ar

Tabela A6 - PERDAS DE MASSA durante a secagem, medidas nos CPs da MC-10-LD1-B

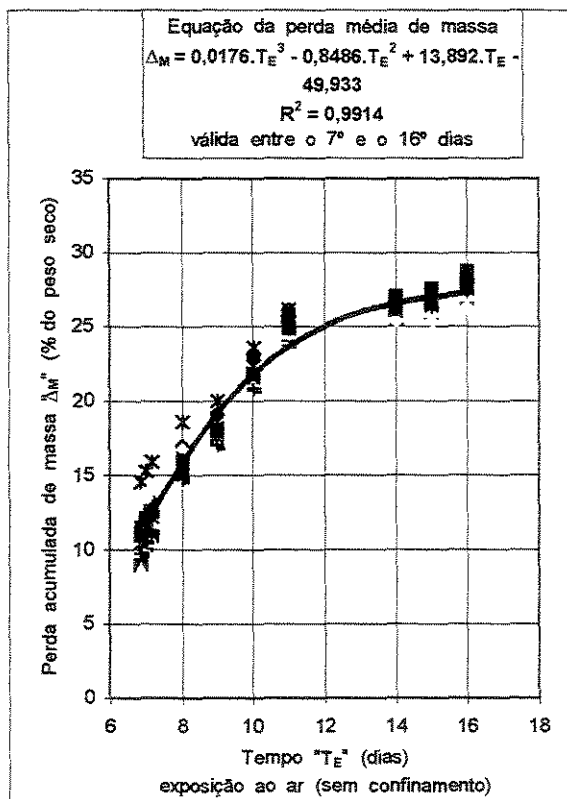
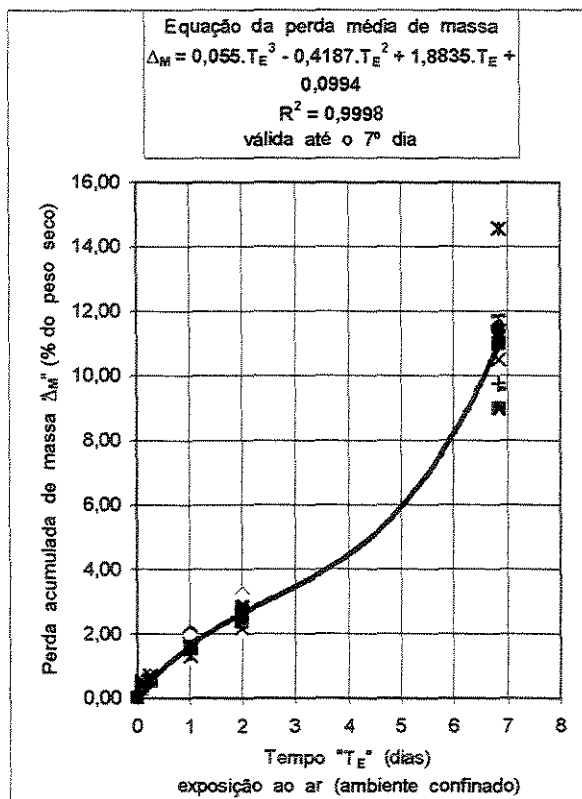
Corpos de prova		CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
P _{umid}		222,85	228,35	229,75	226,19	221,03	229,04	228,67	221,61	222,01	222,84	225,23
PS		167,30	172,26	173,12	170,45	166,52	172,33	171,93	166,80	166,99	167,65	169,54
h _{PMHNS2}		33,20	32,56	32,71	32,70	32,73	32,91	33,00	32,86	32,95	32,92	32,86
Tempo "T _E "		PERDA ACUMULADA DE MASSA durante a secagem ao ar (em % do peso seco)										
(horas)	(dias)	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,25	0,05	0,08	0,09	0,11	0,15	0,18	0,08	0,10	0,08	0,13	0,11	0,11
5,58	0,23	0,23	0,21	0,27	0,36	0,46	0,22	0,23	0,24	0,39	0,32	0,29
18,50	0,77	0,75	0,69	0,73	0,86	1,20	0,53	0,49	0,56	0,86	0,92	0,76
24,00	1,00	0,93	0,81	0,89	1,07	1,57	0,71	0,67	0,76	1,17	1,24	0,98
41,50	1,73	1,86	1,49	1,58	1,94	3,00	1,43	1,32	1,52	2,29	2,52	1,89
48,00	2,00	2,41	1,90	1,98	2,55	3,89	1,92	1,84	2,01	2,99	3,29	2,48
72,00	3,00	3,38	2,73	2,84	3,65	5,54	2,84	2,73	3,09	4,19	4,67	3,57
96,00	4,00	5,00	4,05	3,97	4,98	7,61	4,27	4,10	4,55	5,79	6,51	5,08
113,25	4,72	5,87	4,67	4,63	5,86	8,89	4,92	4,67	5,22	6,80	7,63	5,92
163,50	6,81	8,67	6,94	6,61	8,31	12,36	7,11	6,67	7,41	9,72	10,77	8,46
168,25	7,01	9,99	8,30	8,12	9,43	13,49	8,64	8,25	8,69	10,70	11,70	9,73
170,25	7,09	10,66	8,89	8,66	9,96	13,90	9,30	8,83	9,19	11,13	12,12	10,26
173,67	7,24	11,29	9,47	9,22	10,46	14,33	10,02	9,44	9,79	11,61	12,59	10,82
192,00	8,00	14,90	12,79	12,78	13,97	17,61	13,71	12,70	13,06	14,68	16,18	14,24
216,00	9,00	18,61	16,45	16,57	17,55	20,47	17,83	16,26	16,41	17,71	19,09	17,70
332,25	13,84	29,33	28,45	28,64	28,68	29,08	29,07	29,01	28,88	28,84	28,92	28,89
335,67	13,99	29,40	28,50	28,70	28,74	29,11	29,13	29,05	28,94	28,92	28,97	28,95
360,00	15,00	29,32	28,49	28,64	28,62	28,69	29,08	29,02	28,82	28,85	28,68	28,82
384,00	16,00	29,16	28,38	28,52	28,47	28,44	28,93	28,89	28,71	28,73	28,51	28,67



Figuras A10_a e b - MC-10-LD1-B - Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar

Tabela A7 - PERDAS DE MASSA durante a secagem, medidas nos CPs da MC-10-LD1-C

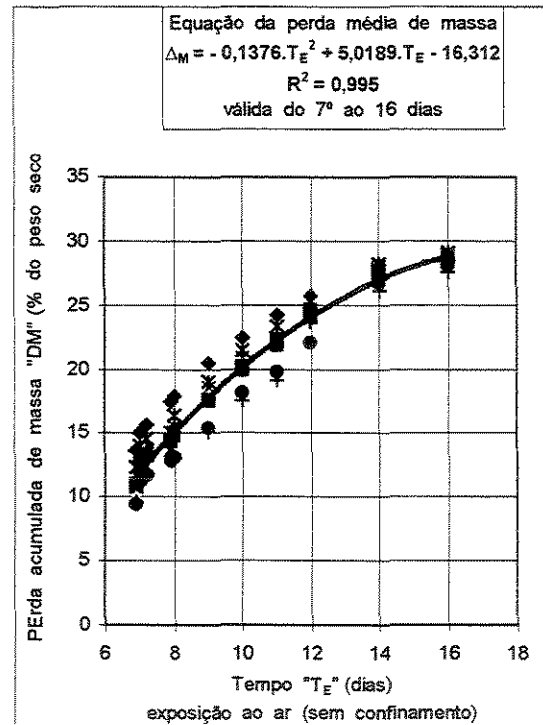
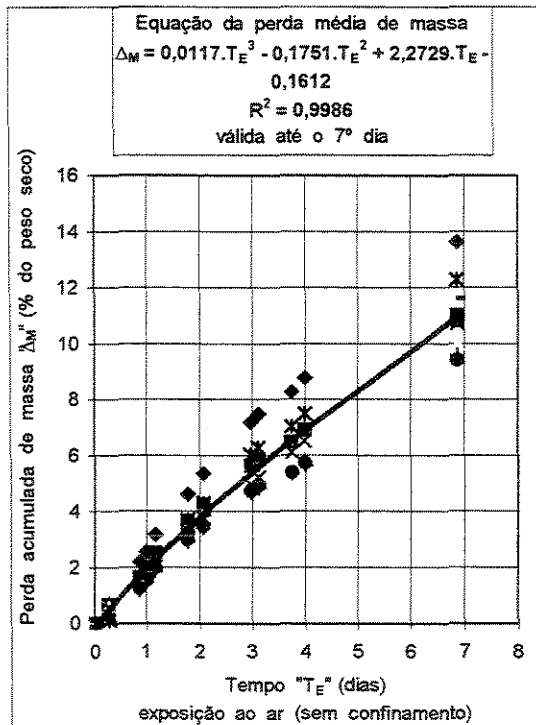
Corpos de prova	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Media	
P _{umid}	227,58	223,48	230,11	230,10	227,79	227,24	230,74	226,51	230,85	227,97	228,24	
PS	171,12	166,62	171,69	172,63	171,19	170,41	173,58	170,19	174,32	172,26	171,40	
h _{PM}	32,99	34,13	34,03	33,29	33,06	33,35	32,93	33,09	32,43	32,34	33,16	
Tempo "T _E "	PERDA ACUMULADA DE MASSA durante a secagem ao ar (em % do peso seco)											
(horas)	(dias)	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,33	0,10	0,37	0,29	0,33	0,45	0,50	0,30	0,29	0,31	0,40	0,43	0,37
5,67	0,24	0,68	0,52	0,50	0,57	0,69	0,53	0,50	0,45	0,53	0,63	0,56
24,17	1,01	2,07	1,52	1,25	1,31	1,71	1,76	1,40	1,42	1,51	1,95	1,59
48,00	2,00	3,22	2,38	2,09	2,18	2,83	2,91	2,52	2,46	2,62	3,20	2,64
164,25	6,84	11,54	8,98	8,72	10,48	14,57	11,40	9,74	9,58	11,85	13,10	10,99
167,67	6,99	12,66	10,26	9,90	11,52	15,29	12,31	10,58	10,44	12,64	13,49	11,91
171,25	7,14	13,29	10,94	10,59	12,22	15,89	12,97	11,18	11,11	13,17	14,03	12,54
192,00	8,00	16,98	15,05	14,55	15,87	18,62	16,70	14,79	14,58	15,93	16,74	15,98
216,00	9,00	19,06	17,56	17,12	18,22	20,00	19,08	17,05	16,80	17,49	18,10	18,05
240,50	10,02	22,77	21,59	21,06	21,87	23,61	23,10	20,85	20,62	20,80	21,68	21,80
264,08	11,00	25,68	25,33	24,70	24,94	26,13	26,05	24,04	23,63	23,61	24,53	24,86
336,00	14,00	26,69	27,01	26,46	26,10	26,67	26,99	25,76	25,65	25,14	25,42	26,19
360,00	15,00	27,10	27,54	26,96	26,43	26,72	27,50	26,32	26,16	25,44	25,38	26,56
384,00	16,00	28,22	28,71	28,25	27,71	27,54	28,55	27,46	27,32	26,51	26,27	27,65



Figuras A11_a e b - MC-10-LD1-C - Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar

Tabela A8 - PERDAS DE MASSA durante a secagem, medidas nos CPs da MC-20-LD1-A

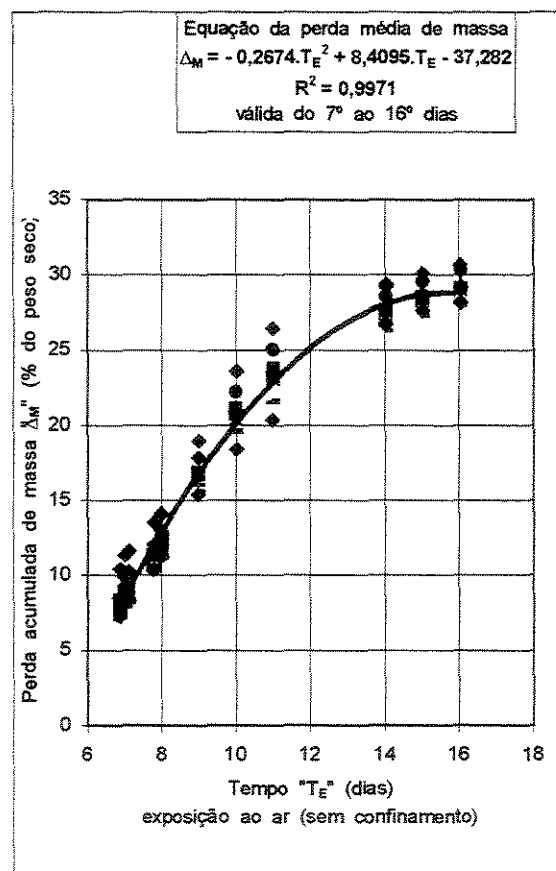
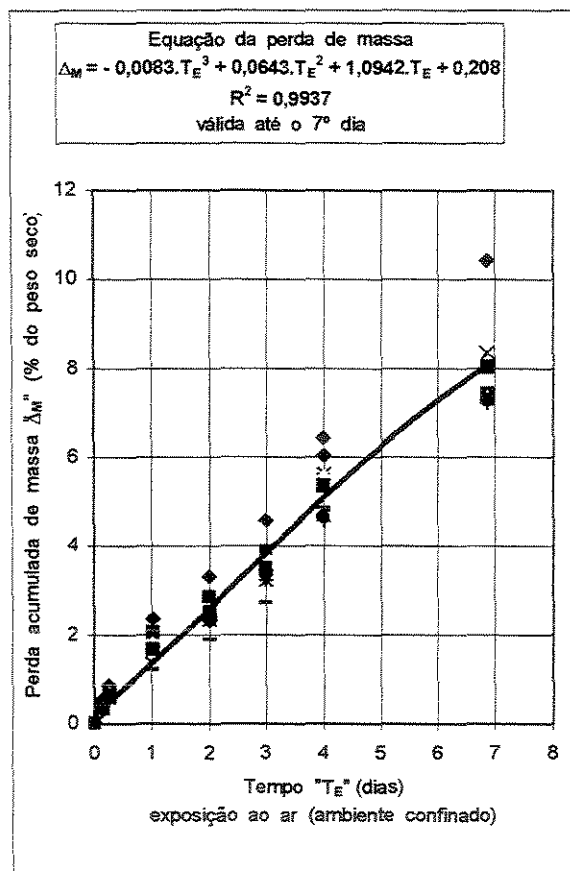
Corpos de prova		CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	Média
P _{úmido}	(g)	220,54	220,35	222,99	221,71	222,33	221,13	222,85	223,22	221,89
PS	(g)	164,96	163,97	166,6	165,42	165,81	165,3	166,89	166,55	165,69
h _{PM}	(%)	33,69	34,38	33,85	34,03	34,09	33,77	33,53	34,03	33,92
Tempo "T _E "		PERDA ACUMULADA DE MASSA durante a secagem ao ar (em % do peso seco)								
(horas)	(dias)	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	Média
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6,67	0,28	0,72	0,66	0,60	0,57	0,11	0,28	0,29	0,10	0,41
21,00	0,88	2,18	1,65	1,51	1,49	1,56	1,23	1,17	1,16	1,49
24,00	1,00	2,55	1,99	1,82	1,82	1,88	1,51	1,46	1,49	1,81
28,00	1,17	3,16	2,49	2,30	2,22	2,41	1,96	1,87	1,89	2,29
42,50	1,77	4,63	3,63	3,25	3,16	3,70	2,99	2,90	3,22	3,44
49,58	2,07	5,35	4,23	3,84	3,75	4,30	3,47	3,40	3,88	4,03
71,50	2,98	7,19	5,62	5,05	4,94	6,04	4,74	4,67	5,48	5,47
75,00	3,13	7,48	5,87	5,29	5,21	6,29	4,92	4,84	5,73	5,70
90,17	3,76	8,28	6,47	5,95	6,11	7,04	5,40	5,34	6,53	6,39
96,00	4,00	8,79	6,90	6,34	6,52	7,49	5,74	5,65	6,93	6,80
165,00	6,88	13,62	10,83	10,00	10,72	12,29	9,41	9,58	11,61	11,01
168,00	7,00	15,00	12,33	11,49	12,35	13,99	11,19	11,26	13,36	12,62
172,50	7,19	15,63	13,19	12,28	13,37	14,56	11,71	11,78	14,02	13,32
189,50	7,90	17,46	14,36	13,44	15,09	13,65	12,80	12,80	15,33	14,37
192,00	8,00	17,88	14,77	13,82	15,54	16,39	13,08	13,06	15,65	15,02
216,00	9,00	20,49	17,61	16,62	18,57	19,02	15,40	15,08	17,71	17,56
240,00	10,00	22,47	20,21	19,20	20,89	21,49	18,15	17,54	19,90	19,98
264,00	11,00	24,22	22,30	21,33	23,34	23,34	19,77	19,16	21,89	21,92
287,00	11,96	25,72	24,67	23,85	25,28	25,25	22,10	23,66	23,68	24,28
336,00	14,00	28,11	27,95	27,27	28,03	28,27	26,72	26,09	27,31	27,47
384,00	16,00	28,70	28,93	28,29	28,73	29,09	28,06	27,59	28,43	28,48



Figuras A12_a e b - MC-20-LD1-A - Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar

Tabela A9 - PERDAS DE MASSA durante a secagem, medidas nos CPs da MC-20-LD1-B

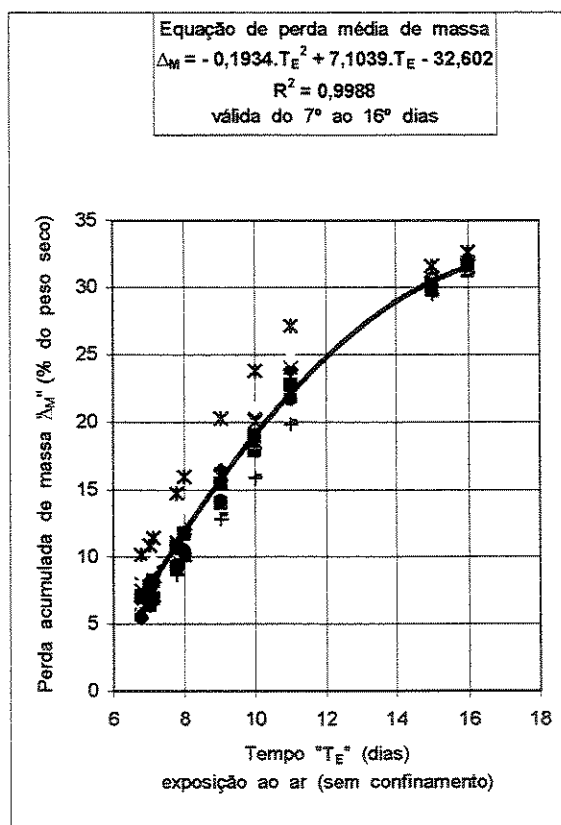
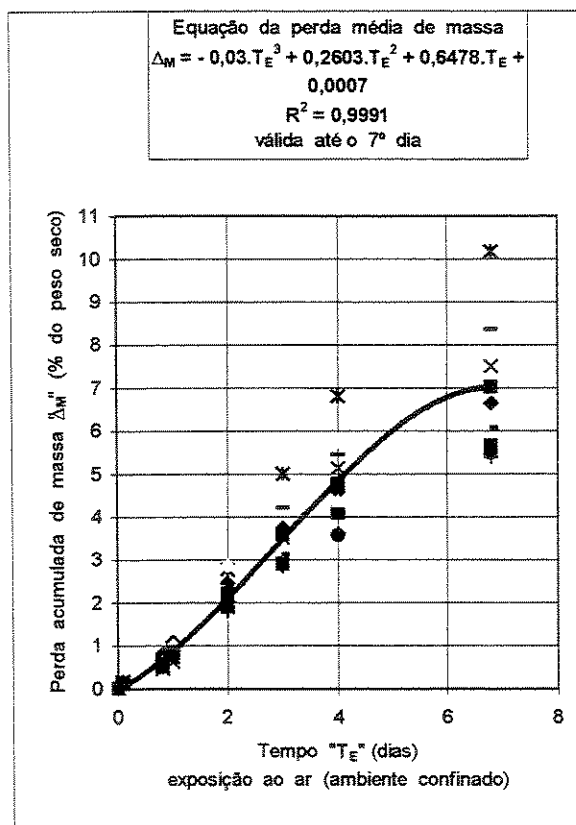
Corpos de prova	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média	
P _{umid}	221,20	225,50	227,06	223,62	220,75	220,99	224,70	219,56	220,92	218,81	222,31	
PS	160,17	164,54	165,80	163,88	160,78	159,98	162,79	160,68	159,70	158,84	161,72	
h _{PM}	38,10	37,05	36,95	36,45	37,30	38,14	38,03	36,64	38,33	37,75	37,48	
PERDA ACUMULADA DE MASSA durante a secagem ao ar (em % do peso seco)												
(horas)	(dias)	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3,25	0,14	0,54	0,43	0,37	0,34	0,32	0,38	0,29	0,27	0,27	0,37	0,36
6,25	0,26	0,86	0,76	0,69	0,64	0,57	0,60	0,51	0,50	0,46	0,56	0,62
24,33	1,01	2,35	2,05	1,82	1,60	1,49	1,61	1,47	1,47	1,22	1,56	1,67
48,17	2,01	3,30	2,86	2,57	2,34	2,31	2,46	2,34	2,38	1,90	2,54	2,50
72,00	3,00	4,57	3,87	3,43	3,23	3,44	3,37	3,22	3,40	2,72	3,71	3,50
96,00	4,00	6,04	5,49	5,42	5,63	6,44	4,66	4,58	4,82	4,86	5,55	5,35
164,83	6,87	8,50	7,44	7,36	8,35	10,43	7,30	7,22	7,20	7,97	8,57	8,03
168,00	7,00	9,34	8,15	8,13	8,95	11,28	8,14	8,13	7,89	9,15	9,92	8,91
170,83	7,12	9,73	8,45	8,43	9,26	11,60	8,51	8,45	8,20	9,46	10,22	9,23
187,25	7,80	12,01	10,64	10,83	11,75	13,53	10,36	10,46	10,40	11,63	12,02	11,36
192,00	8,00	12,92	11,47	11,63	12,42	14,14	11,27	11,31	11,20	12,39	12,72	12,15
216,00	9,00	18,97	16,82	16,66	16,93	17,86	16,75	16,13	15,61	16,05	15,40	16,72
240,42	10,02	23,57	21,11	20,69	20,42	20,89	22,23	20,93	19,63	19,54	18,41	20,74
264,00	11,00	26,44	23,79	23,35	23,07	23,60	25,05	23,21	21,65	21,53	20,34	23,20
336,33	14,01	29,24	27,37	27,21	27,23	29,37	28,55	27,40	26,28	27,29	26,67	27,66
360,00	15,00	30,12	28,28	28,09	28,04	28,75	29,58	28,60	27,32	28,29	27,60	28,47
385,00	16,04	30,68	28,95	28,75	28,58	29,16	30,30	29,44	27,99	28,88	28,13	29,09



Figuras A13_a e b - MC-20-LD1-B - Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar

Tabela A10 - PERDAS DE MASSA durante a secagem, medidas nos CPs da MC-20-LD1-C

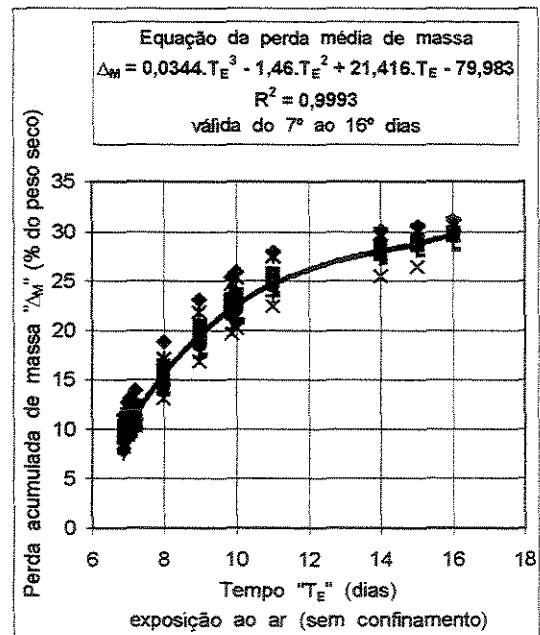
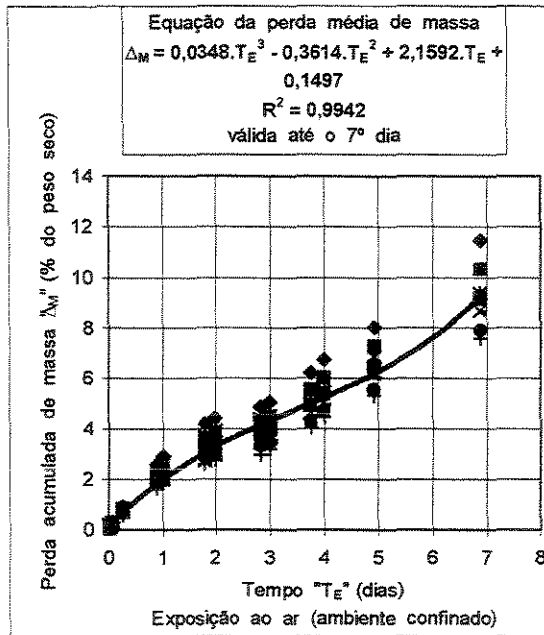
Tabela A10 - PERDA DE MASSA durante a secagem, medidas nos CPs de 10 a 25%												
Corpos de prova		CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
P _{umid}	(g)	220,52	223,34	226,94	223,65	219,31	220,92	225,54	220,48	221,88	223,82	222,64
PS	(g)	159,70	162,12	164,51	162,19	159,10	160,14	163,10	159,88	160,84	162,89	161,45
h _{PM}	(%)	38,08	37,76	37,95	37,89	37,84	37,95	38,28	37,90	37,95	37,41	37,90
Tempo "T _E "		PERDA ACUMULADA DE MASSA durante a secagem ao ar (em % do peso seco)										
(horas)	(dias)	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,00	0,08	0,11	0,12	0,14	0,15	0,17	0,12	0,10	0,12	0,12	0,14	0,13
19,50	0,81	0,81	0,64	0,53	0,46	0,53	0,60	0,50	0,52	0,50	0,61	0,57
24,00	1,00	1,09	0,89	0,72	0,62	0,75	0,94	0,82	0,84	0,75	1,00	0,84
48,00	2,00	2,46	1,91	1,76	1,90	2,77	1,90	1,80	1,87	2,38	2,87	2,16
72,42	3,02	3,74	2,92	2,99	3,52	5,02	2,88	2,84	3,13	4,22	4,69	3,60
96,00	4,00	4,59	4,10	4,38	5,14	6,81	3,57	3,61	4,11	5,46	5,78	4,75
162,75	6,78	6,65	5,66	6,22	7,50	10,17	5,48	5,41	6,07	8,36	8,74	7,03
168,25	7,01	7,60	6,38	7,01	8,06	10,84	6,52	6,36	6,87	8,93	9,15	7,77
171,00	7,13	8,12	6,89	7,42	8,53	11,40	6,98	6,71	7,22	9,28	9,64	8,22
186,83	7,78	10,95	9,17	9,70	11,10	14,70	9,37	8,65	9,17	11,22	12,46	10,65
192,00	8,00	12,04	10,12	10,65	12,14	15,97	10,47	9,66	10,21	12,25	13,71	11,72
217,00	9,04	16,46	14,00	14,53	16,16	20,30	14,13	12,80	13,14	15,15	17,51	15,42
240,00	10,00	20,63	17,91	18,53	20,05	23,81	18,02	15,89	15,99	18,07	21,01	18,99
264,00	11,00	23,91	21,88	22,64	24,09	27,15	21,69	19,85	20,03	22,00	24,75	22,80
360,00	15,00	30,75	29,85	30,17	30,68	31,62	30,10	29,53	29,43	29,79	30,35	30,23
384,00	16,00	32,04	31,27	31,55	31,89	32,62	31,58	31,35	31,08	31,34	31,53	31,62



Figuras A14_a e b - MC-20-LD1-C - Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar

Tabela A11 - PERDAS DE MASSA durante a secagem, medidas nos CPs da MC-30-LD1-A

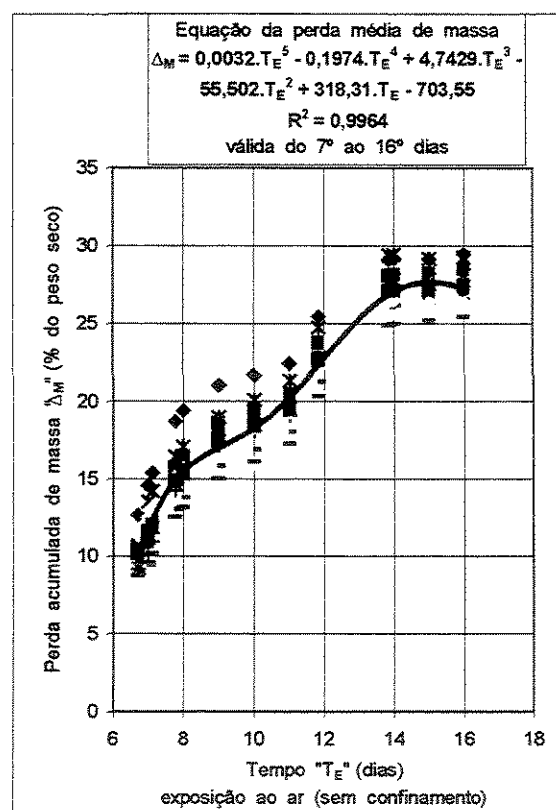
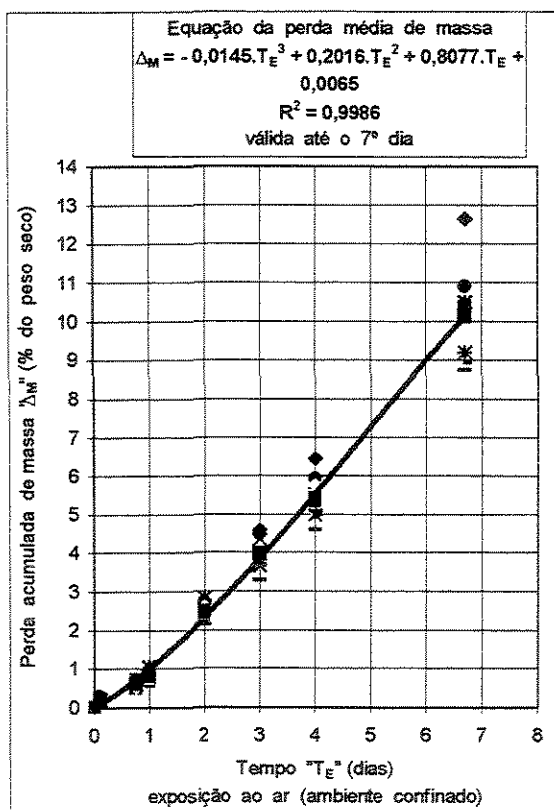
Corpos de prova		CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	Média
P _{umid}	(g)	211,15	213,64	215,83	210,93	211,19	213,84	214,23	213,86	213,08
PS	(g)	151,62	153,84	155,24	152,69	152,06	154,04	154,32	154,62	153,55
h _{PM}	(%)	39,26	38,87	39,03	38,14	38,89	38,82	38,82	38,31	38,77
Tempo "T _E "		PERDA ACUMULADA DE MASSA durante a secagem ao ar (em % do peso seco)								
(horas)	(dias)	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	Média
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,50	0,02	0,20	0,19	0,13	0,15	0,14	0,09	0,09	0,09	0,14
1,50	0,06	0,28	0,26	0,20	0,24	0,23	0,17	0,16	0,20	0,22
6,33	0,26	0,92	0,84	0,70	0,70	0,80	0,66	0,57	0,65	0,73
21,50	0,90	2,61	2,32	1,98	1,81	2,30	1,84	1,67	1,64	2,02
24,00	1,00	2,91	2,55	2,21	2,01	2,59	2,02	1,82	1,80	2,24
43,25	1,80	4,17	3,60	3,09	2,74	3,73	2,86	2,59	2,66	3,18
48,00	2,00	4,41	3,84	3,29	2,96	3,92	3,04	2,75	2,85	3,38
68,00	2,83	4,86	4,30	3,72	3,45	4,37	3,31	2,97	3,31	3,79
72,00	3,00	5,06	4,48	3,91	3,63	4,51	3,47	3,21	3,51	3,97
90,17	3,76	6,21	5,55	4,87	4,64	5,46	4,25	4,04	4,46	4,94
96,00	4,00	6,75	6,03	5,28	5,06	5,93	4,67	4,47	4,94	5,39
118,17	4,92	8,03	7,27	6,47	6,18	6,85	5,54	5,32	6,03	6,46
165,17	6,88	11,46	10,33	9,24	8,68	9,38	7,91	7,59	8,65	9,16
168,00	7,00	12,79	11,48	10,44	9,40	10,74	9,21	9,03	10,30	10,42
169,50	7,06	13,23	11,82	10,77	9,73	11,21	9,59	9,39	10,67	10,80
173,25	7,22	13,90	12,38	11,31	10,35	12,04	10,25	10,02	11,29	11,44
192,00	8,00	18,86	16,44	14,89	13,12	17,16	14,28	13,53	14,49	15,35
216,00	9,00	23,13	20,53	18,88	16,90	21,87	18,53	17,30	17,57	19,34
236,75	9,86	25,46	23,16	21,71	19,68	24,78	21,47	20,15	20,59	22,12
240,00	10,00	25,95	23,60	22,17	20,20	25,29	22,06	20,71	21,12	22,64
264,00	11,00	27,89	25,76	24,42	22,46	27,46	24,60	23,51	23,77	24,98
336,00	14,00	30,06	28,56	27,38	25,50	29,71	28,00	27,11	26,86	27,89
360,00	15,00	30,50	29,17	28,41	26,45	30,17	28,80	28,11	27,59	28,65
384,00	16,00	31,11	29,90	29,32	30,62	30,76	29,59	28,99	28,19	29,81



Figuras A15_a e b - MC-30-LD1-A - Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar

Tabela A12 - PERDAS DE MASSA durante a secagem, medidas nos CPs da MC-30-LD1-B

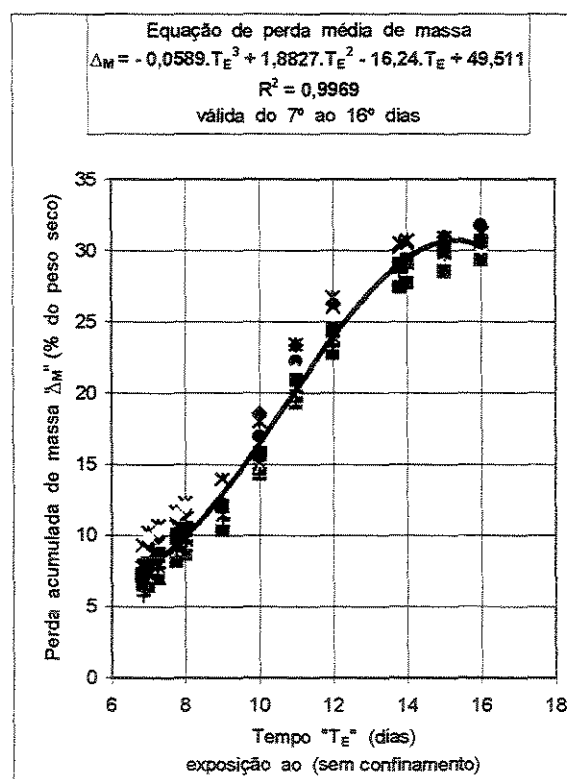
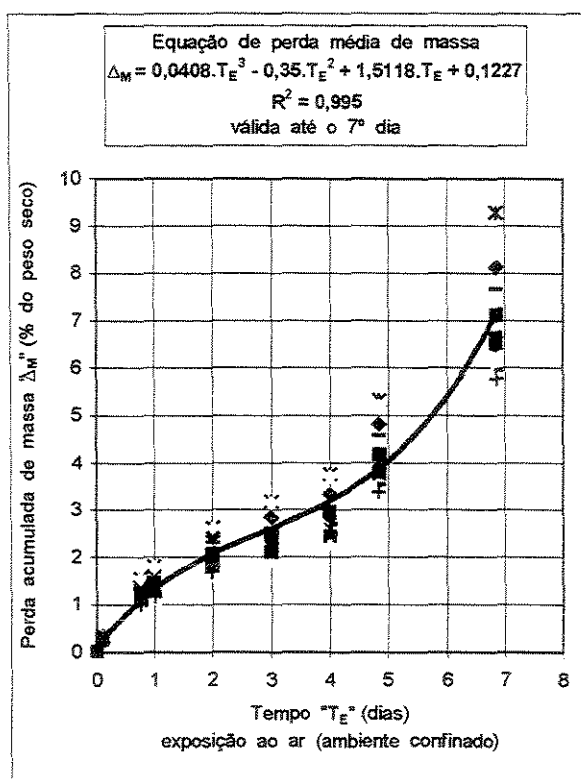
Corpos de prova		CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
P _{úmido}	(g)	210,78	211,02	214,43	210,12	208,34	213,35	212,32	213,08	213,42	212,56	211,94
PS	(g)	151,06	151,19	153,46	150,56	149,11	153,28	152,29	152,74	153,22	152,12	151,90
h _{PM}	(%)	39,53	39,57	39,73	39,56	39,72	39,19	39,42	39,51	39,29	39,73	39,53
Tempo "T _E "		PERDA ACUMULADA DE MASSA durante a secagem ao ar (em % do peso seco)										
(horas)	(dias)	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,50	0,10	0,18	0,17	0,21	0,23	0,19	0,29	0,26	0,27	0,24	0,26	0,23
18,25	0,76	0,62	0,52	0,61	0,61	0,72	0,72	0,60	0,64	0,53	0,54	0,61
23,75	0,99	0,83	0,70	0,78	0,81	1,05	0,93	0,75	0,81	0,73	0,78	0,82
48,00	2,00	2,75	2,35	2,28	2,30	2,82	2,72	2,38	2,37	2,15	2,61	2,47
72,00	3,00	4,59	3,96	3,74	3,66	4,34	4,50	3,87	3,67	3,29	4,11	3,97
96,00	4,00	6,45	5,35	5,08	4,98	5,83	5,92	5,08	5,00	4,60	5,77	5,41
161,00	6,71	12,65	10,38	9,55	9,19	10,50	10,91	9,18	8,94	8,75	11,28	10,13
168,00	7,00	14,58	11,59	8,78	11,13	13,51	10,88	10,11	9,45	9,59	12,50	11,21
170,50	7,10	15,38	12,42	9,58	11,87	14,20	11,73	10,92	10,15	10,21	13,10	11,96
186,33	7,76	18,71	15,74	12,69	14,65	16,46	15,22	14,20	13,04	12,52	15,13	14,84
192,00	8,00	19,41	16,49	13,44	15,34	17,07	15,96	14,98	13,79	13,15	15,68	15,53
216,00	9,00	21,02	18,63	15,65	17,43	18,97	17,99	17,09	15,84	15,01	17,24	17,49
240,00	10,00	21,65	19,49	15,94	18,48	20,07	18,78	18,11	16,90	16,11	18,32	18,38
264,00	11,00	22,44	20,46	17,56	19,51	21,33	19,72	19,08	18,02	17,26	19,30	19,47
284,50	11,85	25,46	23,75	20,88	22,84	24,73	22,81	22,26	21,26	20,28	22,19	22,65
332,33	13,85	29,10	28,08	25,68	27,74	29,39	26,73	27,02	26,10	24,89	26,40	27,11
336,00	14,00	29,18	28,14	25,75	27,80	29,43	26,77	27,10	26,18	24,96	26,48	27,18
360,00	15,00	29,15	28,20	25,79	27,86	29,17	26,83	27,21	26,33	25,20	26,41	27,21
384,00	16,00	29,44	28,47	26,05	28,13	29,24	27,15	27,40	26,56	25,43	26,38	27,42



Figuras A16_a e b - MC-30-LD1-B - Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar

Tabela A13 - PERDAS DE MASSA durante a secagem, medidas nos CPs da MC-30-LD1-C

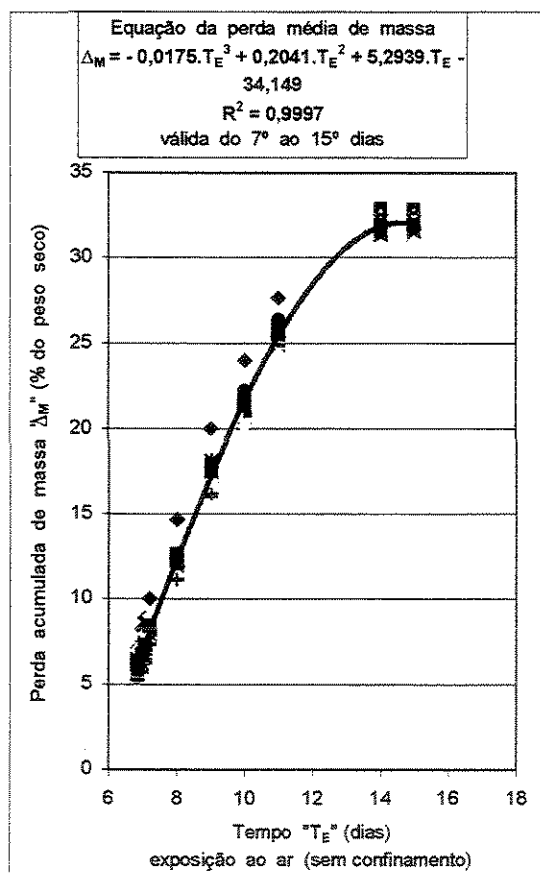
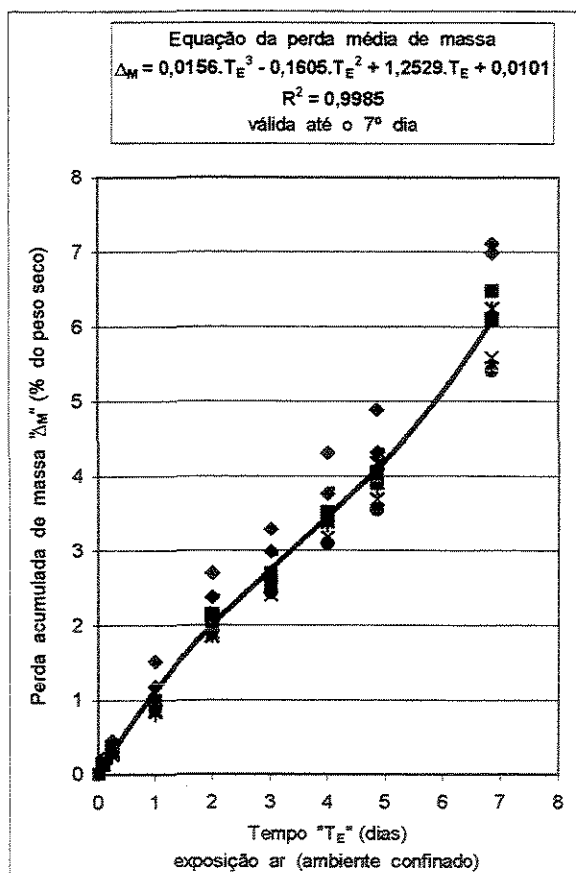
Tabela A15 - PERDA DE MASSA durante a secagem, medidas nos dias 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08, 09, 10 e 11												
Corpos de prova	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média	
P _{umid} (g)	207,37	213,52	217,27	211,53	212,98	210,56	214,56	213,73	211,60	209,29	212,24	
PS (g)	148,39	154,38	155,38	151,60	152,05	150,40	152,82	153,25	151,24	149,65	151,92	
h _{PM} (%)	39,75	38,31	39,83	39,53	40,07	40,00	40,40	39,46	39,91	39,85	39,71	
PERDA ACUMULADA DE MASSA durante a secagem ao ar (em % do peso seco)												
Tempo "T _E "												
(horas)	(dias)	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,50	0,10	0,33	0,26	0,25	0,30	0,33	0,23	0,20	0,23	0,26	0,33	0,27
18,33	0,76	1,50	1,08	0,95	1,09	1,55	1,15	1,00	1,04	1,36	1,55	1,23
24,00	1,00	1,73	1,27	1,13	1,30	1,81	1,32	1,17	1,21	1,58	1,79	1,43
48,00	2,00	2,43	1,80	1,62	1,84	2,62	1,91	1,68	1,81	2,30	2,61	2,06
72,00	3,00	2,84	2,11	1,92	2,20	3,17	2,39	2,12	2,27	2,82	3,15	2,50
96,00	4,00	3,33	2,44	2,28	2,59	3,76	2,87	2,51	2,70	3,35	3,71	2,95
116,50	4,85	4,81	3,80	3,44	3,75	5,33	3,86	3,38	3,54	4,58	5,20	4,17
164,33	6,85	8,13	6,63	6,08	6,53	9,27	6,48	5,76	5,95	7,66	8,71	7,12
168,00	7,00	9,32	6,46	7,15	7,32	10,21	7,73	6,65	7,11	8,50	9,80	8,02
174,25	7,26	9,85	6,96	7,67	7,85	10,70	8,34	7,22	7,71	9,04	10,33	8,57
186,37	7,77	11,07	8,19	8,91	9,10	11,70	9,67	8,46	9,04	10,39	11,45	9,80
192,00	8,00	11,62	8,68	9,43	9,65	12,27	10,23	8,93	9,50	10,86	12,01	10,32
216,00	9,00	13,60	10,37	11,10	11,44	13,93	12,21	10,59	11,09	12,37	13,32	12,00
240,00	10,00	18,59	14,27	14,58	15,15	17,98	16,90	14,28	14,41	15,11	15,96	15,72
264,00	11,00	23,35	19,32	19,68	20,34	23,44	22,23	19,40	19,52	20,16	21,65	20,91
288,00	12,00	26,19	22,78	23,56	23,99	26,71	25,57	23,28	23,32	23,95	25,37	24,47
331,00	13,79	29,93	27,39	28,75	28,85	30,49	29,78	28,45	28,50	28,63	29,58	29,03
336,00	14,00	30,24	27,75	29,10	29,14	30,71	30,14	28,85	28,86	28,99	29,85	29,36
360,00	15,00	30,96	28,57	29,93	29,84	30,91	30,96	29,74	29,57	29,69	29,97	30,01
384,00	16,00	31,63	29,36	30,73	30,50	31,31	31,76	30,49	30,11	30,24	30,22	30,64



Figuras A17_a e b - MC-30-LD1-C - Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar

Tabela A14 - PERDAS DE MASSA durante a secagem, medidas nos CPs da MC-10-CZ-LD1-A

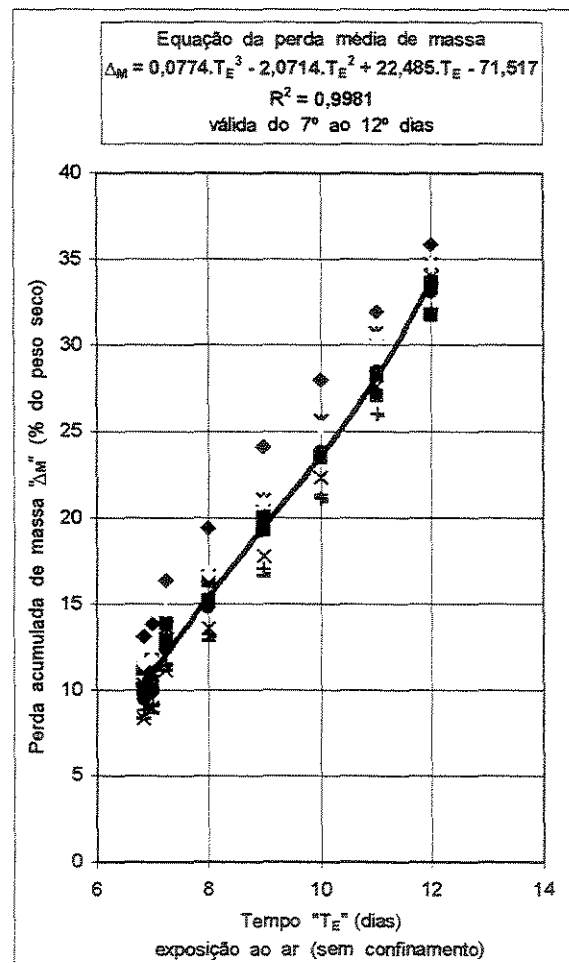
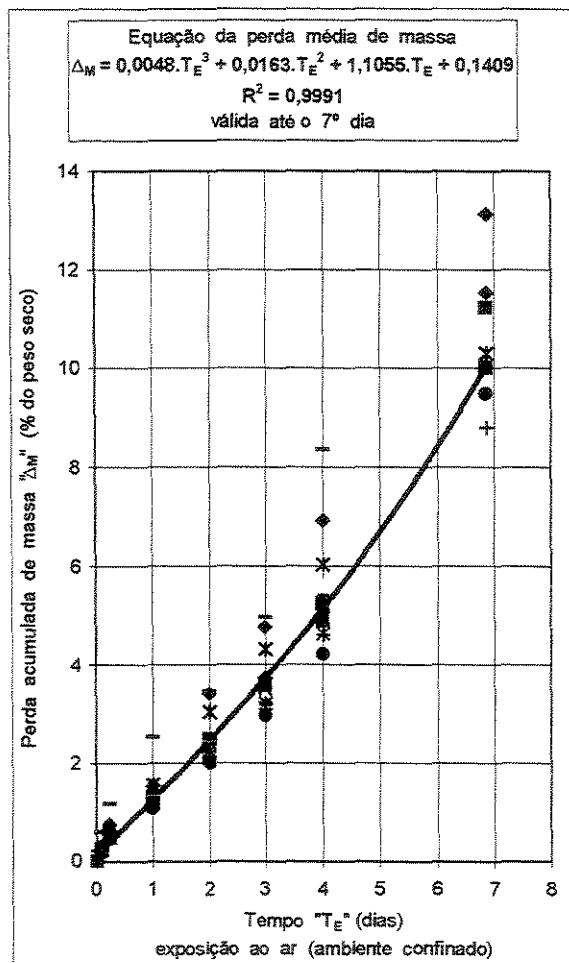
Corpos de prova	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
P _{úmido} (g)	227,46	230,40	236,68	230,22	230,52	230,65	233,91	230,12	229,15	229,76	230,89
PS (g)	168,28	169,89	174,81	170,53	171,76	172,04	174,63	170,85	169,09	171,63	171,35
h _{PM} (%)	35,17	35,62	35,39	35,00	34,21	34,07	33,95	34,69	35,52	33,87	34,75
PERDA ACUMULADA DE MASSA durante a secagem ao ar (em % do peso seco)											
Tempo "T _E "											
(horas) (dias)	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
0,00 0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,00 0,08	0,21	0,14	0,18	0,15	0,13	0,15	0,11	0,14	0,15	0,14	0,15
5,67 0,24	0,45	0,38	0,34	0,29	0,27	0,31	0,24	0,30	0,35	0,35	0,33
24,00 1,00	1,51	0,99	0,88	0,83	0,85	0,86	0,80	0,92	0,92	1,17	0,97
48,00 2,00	2,37	2,05	2,00	1,90	1,85	1,91	2,07	2,39	2,13	2,69	2,13
72,00 3,00	2,98	2,59	2,51	2,40	2,51	2,43	2,57	2,95	2,64	3,29	2,69
96,00 4,00	3,76	3,38	3,29	3,18	3,47	3,09	3,34	3,82	3,44	4,31	3,51
116,33 4,85	4,32	3,92	3,81	3,69	4,17	3,55	3,83	4,35	3,94	4,89	4,05
164,50 6,85	7,11	6,48	6,12	5,58	6,24	5,41	5,52	6,12	5,41	6,99	6,10
168,00 7,00	8,21	7,15	6,66	6,20	6,80	6,34	6,18	6,44	5,72	7,39	6,71
170,00 7,08	8,88	7,66	7,14	6,79	7,39	7,06	6,74	6,99	6,23	7,92	7,28
173,50 7,23	10,02	8,66	8,34	7,90	8,54	8,26	7,83	8,05	7,33	9,00	8,39
192,00 8,00	14,67	12,64	12,29	11,94	12,62	12,04	11,11	11,82	11,12	12,30	12,25
216,00 9,00	19,99	17,92	17,61	17,35	18,12	17,78	16,18	16,94	16,04	16,93	17,49
240,00 10,00	23,97	21,70	21,37	21,29	21,61	22,22	20,28	20,74	19,99	20,18	21,34
264,00 11,00	27,67	25,90	25,43	25,67	25,74	26,38	24,50	24,84	24,53	24,33	25,50
336,00 14,00	32,51	32,87	32,51	32,20	31,36	31,40	31,21	31,88	32,53	30,75	31,92
360,00 15,00	32,46	32,86	32,54	32,15	31,34	31,32	31,19	31,86	32,61	30,93	31,93



Figuras A18_a e b - MC-10-CZ-LD1-A - Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar

Tabela A15 - PERDAS DE MASSA durante a secagem, medidas nos CPs da MC-10-CZ-LD1-B

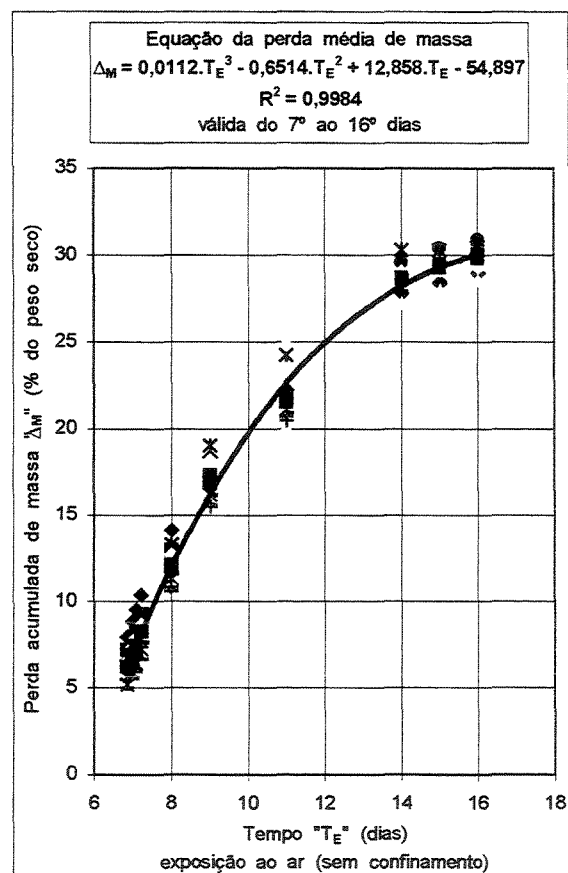
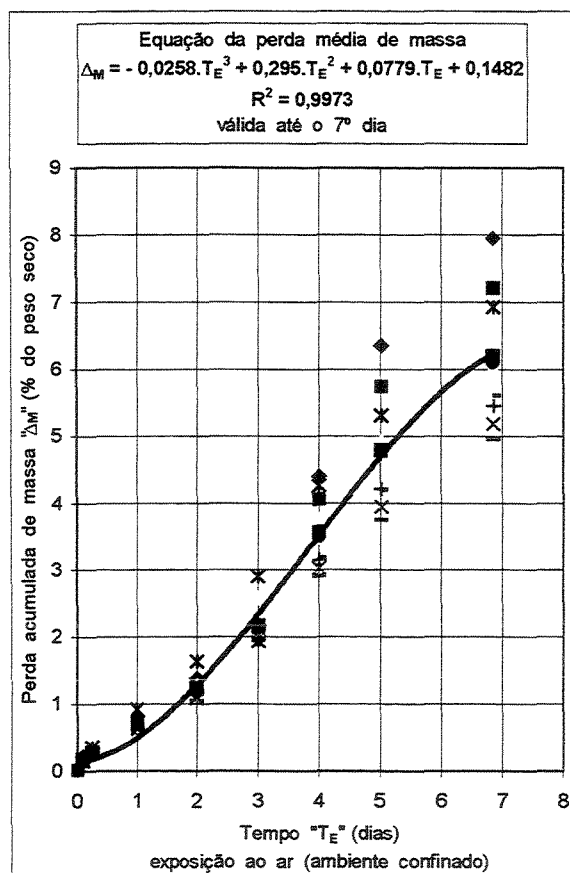
Corpos de prova		CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
P _{umid}	(g)	228,02	231,05	230,59	229,15	227,03	228,47	229,41	228,76	225,84	228,50	228,68
PS	(g)	162,35	168,85	164,42	164,73	163,53	165,96	167,20	166,68	162,85	164,45	165,10
h _{PM}	(%)	40,4496	36,84	40,24	39,11	38,83	37,67	37,21	37,25	38,68	38,95	38,52
Tempo "T _E "		PERDA ACUMULADA DE MASSA durante a secagem ao ar (em % do peso seco)										
(horas)	(dias)	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,00	0,08	0,31	0,25	0,25	0,24	0,25	0,18	0,22	0,23	0,20	0,24	0,24
5,50	0,23	0,54	0,46	0,47	0,49	0,62	0,47	0,50	0,53	0,60	0,76	0,54
24,00	1,00	1,41	1,23	1,23	1,18	1,56	1,08	1,18	1,26	1,17	1,55	1,29
48,00	2,00	2,41	2,19	2,29	2,26	3,04	2,01	2,24	2,47	2,52	3,41	2,48
72,00	3,00	3,71	3,35	3,39	3,21	4,31	2,96	3,19	3,50	3,47	4,77	3,59
96,00	4,00	5,37	4,90	5,58	4,63	6,03	4,21	4,61	5,09	4,97	6,93	5,23
164,33	6,85	13,12	11,22	10,14	8,33	10,31	9,49	8,81	8,91	8,36	11,52	10,02
168,00	7,00	13,83	11,75	10,58	8,95	10,89	9,92	9,18	9,11	8,66	11,81	10,47
173,83	7,24	16,37	13,92	12,73	11,15	13,66	12,41	11,48	11,48	11,15	14,65	12,90
192,00	8,00	19,41	16,33	15,25	13,61	16,62	14,85	13,27	13,14	12,88	16,76	15,21
216,00	9,00	24,15	20,07	19,26	17,82	21,07	19,49	17,05	16,74	16,67	20,89	19,32
240,00	10,00	27,98	23,32	23,35	22,35	25,62	23,84	21,12	20,97	21,28	25,25	23,51
264,00	11,00	31,93	27,09	28,26	27,60	30,70	28,45	26,00	25,91	26,78	30,42	28,31
288,00	12,00	35,83	31,75	34,66	33,94	34,70	33,10	32,07	32,02	33,42	34,67	33,62



Figuras A19_a e b - MC-10-CZ-LD1-B - Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar

Tabela A16 - PERDAS DE MASSA durante a secagem, medidas nos CPs da MC-20-CZ-LD1-A

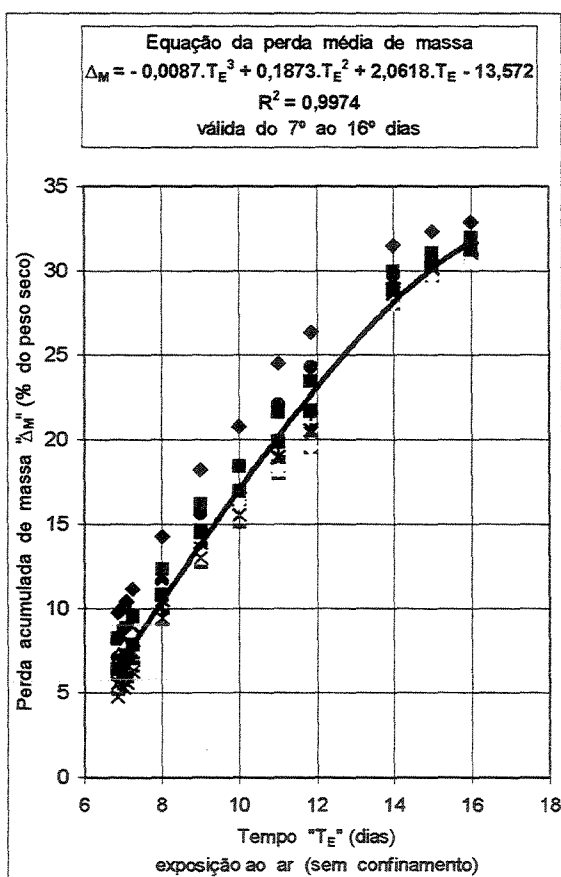
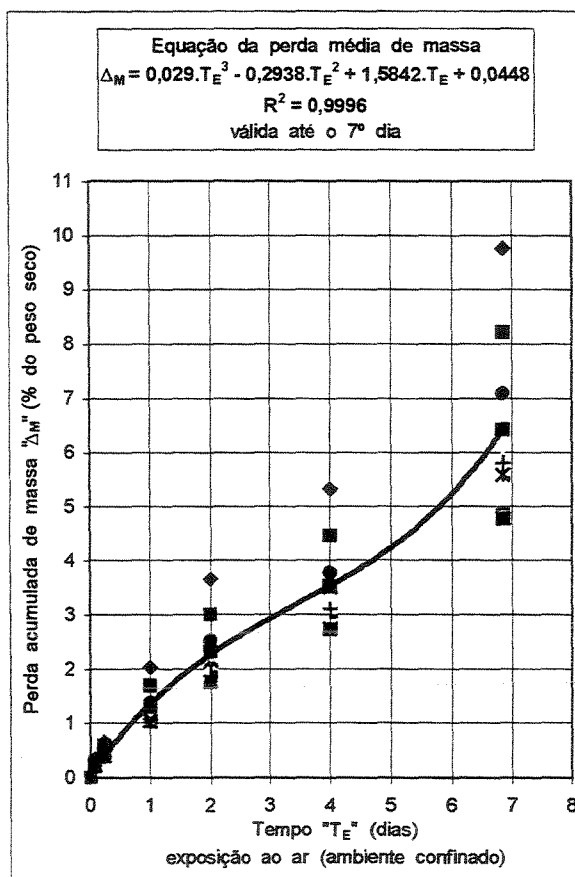
Corpos de prova		CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
P _{umid}	(g)	231,15	231,18	235,22	228,80	223,96	230,69	231,98	231,60	231,11	227,22	230,29
PS	(g)	171,55	169,30	174,18	168,90	164,16	168,86	169,71	169,85	169,60	167,75	169,39
h _{PM}	(%)	34,74	36,55	35,04	35,46	36,43	36,62	36,69	36,36	36,27	35,45	35,96
PERDA ACUMULADA DE MASSA durante a secagem ao ar (em % do peso seco)												
Tempo "T _E "		CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
(horas)	(dias)											
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,00	0,08	0,22	0,17	0,19	0,15	0,18	0,17	0,15	0,09	0,10	0,10	0,15
5,83	0,24	0,32	0,27	0,28	0,25	0,35	0,30	0,25	0,25	0,24	0,24	0,27
24,00	1,00	0,80	0,66	0,65	0,62	0,91	0,69	0,64	0,64	0,58	0,68	0,69
48,00	2,00	1,38	1,21	1,14	1,08	1,63	1,18	1,13	1,18	1,04	1,28	1,23
72,00	3,00	2,17	2,01	1,95	1,93	2,90	1,99	1,96	2,12	2,01	2,58	2,16
96,00	4,00	4,40	4,06	3,48	3,04	4,26	3,51	3,15	3,19	2,91	3,74	3,57
120,50	5,02	6,35	5,74	4,71	3,95	5,31	4,79	4,21	4,20	3,75	4,92	4,79
164,50	6,85	7,95	7,21	6,05	5,19	6,93	6,11	5,46	5,61	4,96	6,55	6,20
168,00	7,00	8,83	7,93	6,68	5,87	7,55	6,78	6,06	6,29	5,57	7,36	6,89
170,00	7,08	9,51	8,51	7,21	6,40	8,19	7,38	6,62	6,81	5,96	7,89	7,45
173,50	7,23	10,38	9,29	7,97	7,22	9,10	8,24	7,37	7,61	6,65	8,67	8,25
192,00	8,00	14,12	13,01	11,75	11,33	13,30	11,77	10,86	11,61	10,62	12,71	12,11
216,00	9,00	18,36	17,33	15,89	16,19	19,05	16,83	15,50	16,17	15,58	18,19	16,91
264,00	11,00	22,25	21,53	20,14	21,12	24,26	21,91	20,46	20,90	20,70	24,84	21,81
336,00	14,00	27,79	28,58	27,22	28,29	30,31	29,57	28,87	28,64	28,60	29,08	28,69
360,00	15,00	28,37	29,40	27,97	28,83	30,28	30,38	29,86	29,59	29,34	29,16	29,32
384,00	16,00	28,95	30,08	28,60	29,35	30,45	30,90	30,59	30,29	30,02	29,29	29,85



Figuras A20_a e b - MC-20-CZ-LD1-A - Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar

Tabela A17 - PERDAS DE MASSA durante a secagem, medidas nos CPs da MC-20-CZ-LD1-B

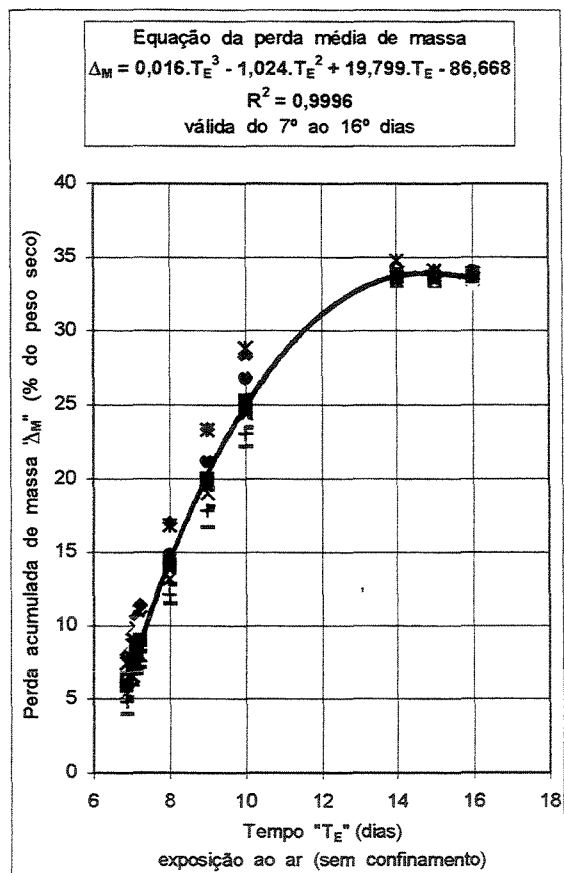
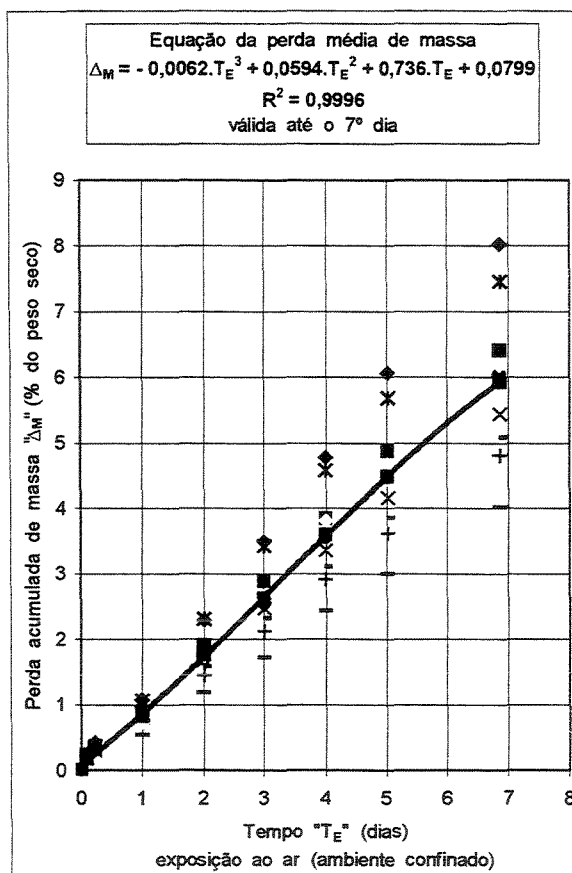
Tabela 17 - Perda de massa durante a secagem, medidas nos dias CP-01 a CP-10												
Corpos de prova		CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
P _{umid}	(g)	229,56	227,12	234,96	229,12	228,65	225,19	225,87	229,83	229,31	228,24	228,79
PS	(g)	167,27	165,72	172,00	167,05	166,84	165,49	165,67	168,35	167,32	166,74	167,25
h _{PM}	(%)	37,24	37,05	36,60	37,16	37,05	36,07	36,34	36,52	37,05	36,88	0,00
Tempo "T _E "		PERDA ACUMULADA DE MASSA durante a secagem ao ar (em % do peso seco)										
(horas)	(dias)	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,00	0,08	0,33	0,28	0,25	0,24	0,22	0,24	0,20	0,14	0,11	0,19	0,22
5,83	0,24	0,66	0,59	0,45	0,40	0,40	0,47	0,40	0,34	0,33	0,43	0,45
24,00	1,00	2,03	1,70	1,19	1,04	1,18	1,38	1,14	1,07	0,98	1,25	1,29
48,00	2,00	3,65	3,01	2,12	1,77	2,15	2,53	2,08	1,92	1,72	2,27	2,32
96,00	4,00	5,32	4,46	3,27	2,74	3,50	3,78	3,11	2,97	2,65	3,45	3,52
164,33	6,85	9,76	8,21	5,92	4,78	5,59	7,08	5,81	5,51	4,94	6,60	6,41
168,00	7,00	10,13	8,64	6,34	5,34	6,34	7,46	6,08	5,87	5,45	7,36	6,90
170,00	7,08	10,42	8,85	6,53	5,60	6,64	7,76	6,37	6,14	5,69	7,70	7,17
173,58	7,23	11,14	9,53	7,20	6,29	7,44	8,51	7,07	6,81	6,32	8,38	7,87
192,00	8,00	14,27	12,33	10,09	9,42	10,49	11,55	9,94	9,74	9,05	11,10	10,79
216,00	9,00	18,22	16,20	13,95	13,01	13,92	15,62	13,88	13,79	12,44	14,09	14,51
240,00	10,00	20,76	18,42	16,29	15,52	16,52	18,43	16,41	16,29	14,83	16,30	16,97
264,00	11,00	24,51	21,63	19,03	18,45	18,98	22,08	19,51	18,92	17,68	18,23	19,90
284,33	11,85	26,39	23,47	20,90	20,40	20,57	24,31	21,55	20,78	19,29	19,54	21,71
336,00	14,00	31,49	29,95	28,60	28,67	28,90	29,71	28,38	28,04	27,71	28,04	28,95
360,00	15,00	32,34	31,09	29,87	30,09	30,17	30,94	30,16	29,69	29,42	29,61	30,34
384,00	16,00	32,89	31,96	30,96	31,28	31,34	31,60	31,09	30,80	30,56	30,54	31,30



Figuras A21_a e b - MC-20-CZ-LD1-B - Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar

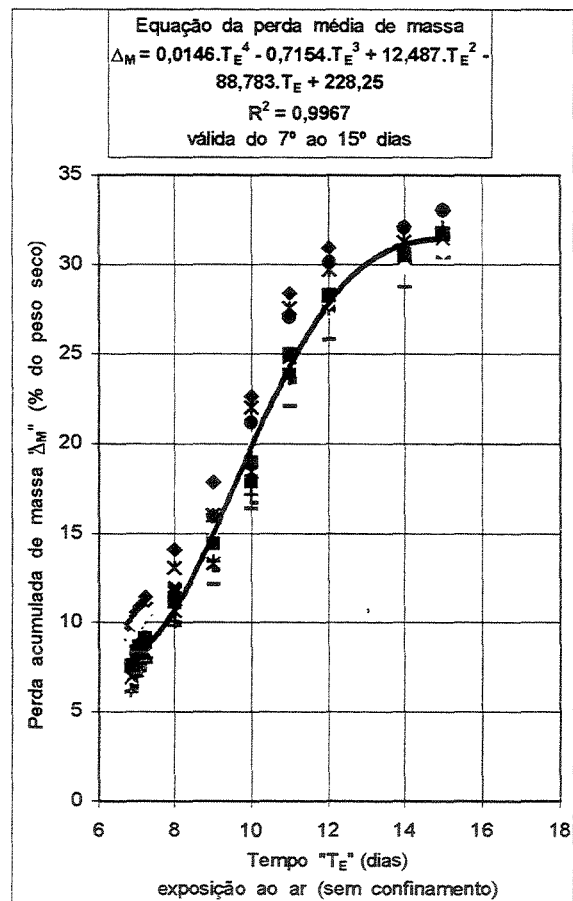
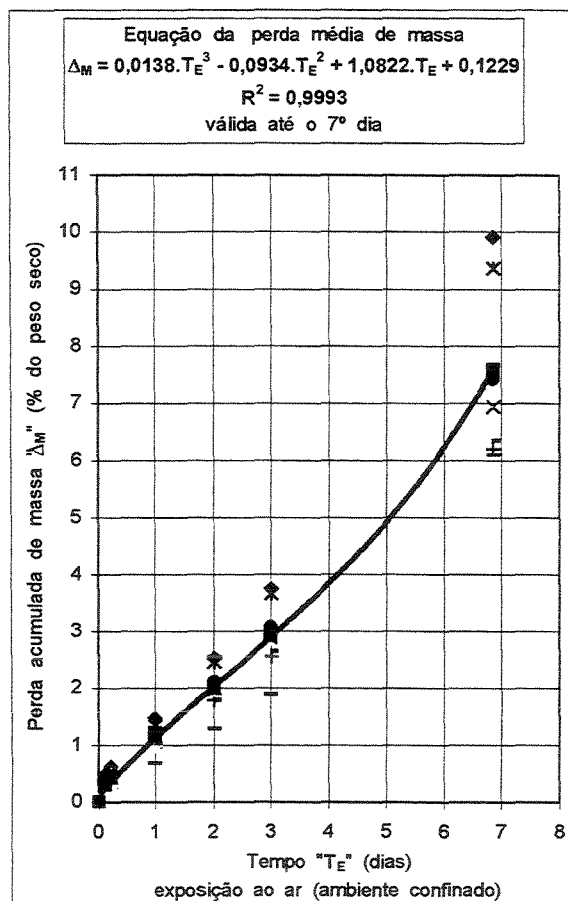
Tabela A18 - PERDAS DE MASSA durante a secagem, medidas nos CPs da MC-30-CZ-LD1-A

Corpos de prova		CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
P _{umid}	(g)	224,12	227,10	228,61	226,08	224,18	228,52	225,89	226,99	226,69	224,54	226,27
PS	(g)	161,66	163,84	164,18	162,97	161,00	164,58	162,95	163,37	163,65	161,89	163,01
h _{PM}	(%)	38,64	38,61	39,24	38,72	39,24	38,85	38,63	38,94	38,52	38,70	38,81
Tempo "T _E "		PERDA ACUMULADA DE MASSA durante a secagem ao ar (em % do peso seco)										
(horas)	(dias)	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,00	0,08	0,24	0,23	0,21	0,17	0,20	0,19	0,14	0,15	0,12	0,14	0,18
5,42	0,23	0,42	0,35	0,35	0,33	0,37	0,35	0,26	0,29	0,21	0,25	0,32
24,00	1,00	1,07	0,88	0,86	0,83	1,06	0,87	0,72	0,75	0,54	0,73	0,83
48,00	2,00	2,29	1,91	1,78	1,69	2,30	1,71	1,45	1,59	1,19	1,74	1,77
72,00	3,00	3,49	2,89	2,64	2,47	3,43	2,55	2,13	2,31	1,72	2,63	2,63
96,00	4,00	4,78	3,85	3,56	3,36	4,58	3,56	2,91	3,11	2,44	3,81	3,60
120,50	5,02	6,06	4,87	4,45	4,17	5,68	4,48	3,61	3,86	3,01	4,68	4,49
164,67	6,86	8,02	6,41	5,81	5,44	7,46	6,03	4,81	5,09	4,02	6,17	5,93
168,50	7,02	9,43	7,78	7,07	6,55	8,68	7,46	6,20	6,87	5,98	8,39	7,44
170,83	7,12	10,61	8,65	7,93	7,41	9,81	8,60	7,07	7,75	6,72	9,50	8,41
173,00	7,21	11,35	9,19	8,48	7,97	10,54	9,23	7,58	8,23	7,19	10,17	8,99
192,00	8,00	16,98	13,90	13,25	13,17	16,83	14,81	12,07	12,82	11,48	15,86	14,12
216,17	9,01	23,36	19,56	18,74	19,00	23,32	21,18	17,82	18,09	16,68	21,95	19,97
240,00	10,00	28,23	24,44	23,78	24,39	28,85	26,78	23,04	23,43	22,21	27,63	25,28
336,00	14,00	33,97	33,38	33,80	33,66	34,73	34,26	33,46	33,78	33,02	34,04	33,81
360,00	15,00	33,84	33,37	33,80	33,47	34,10	33,96	33,45	33,71	33,04	33,52	33,63
384,00	16,00	33,90	33,51	33,93	33,50	33,92	34,02	33,53	33,79	33,13	33,26	33,65



Figuras A22_a e b - MC-30-CZ-LD1-A - Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar

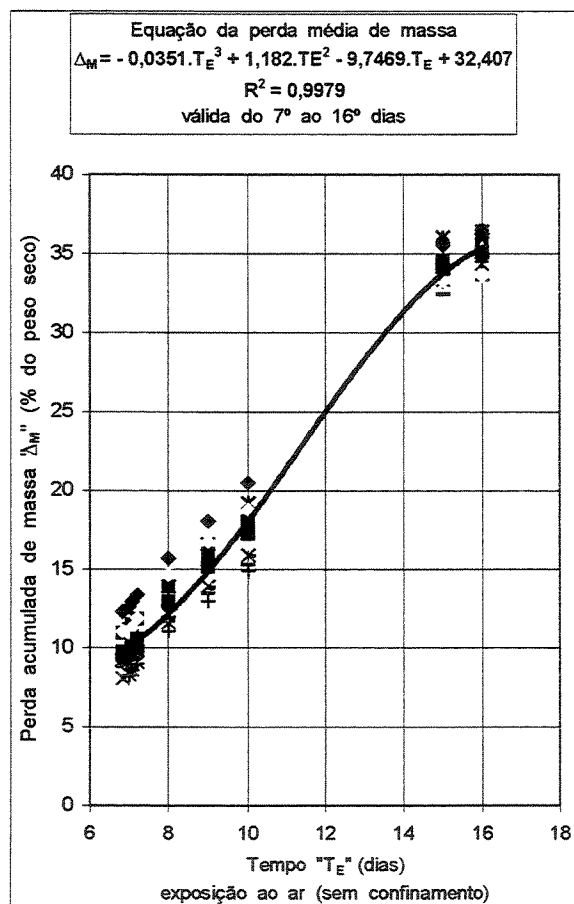
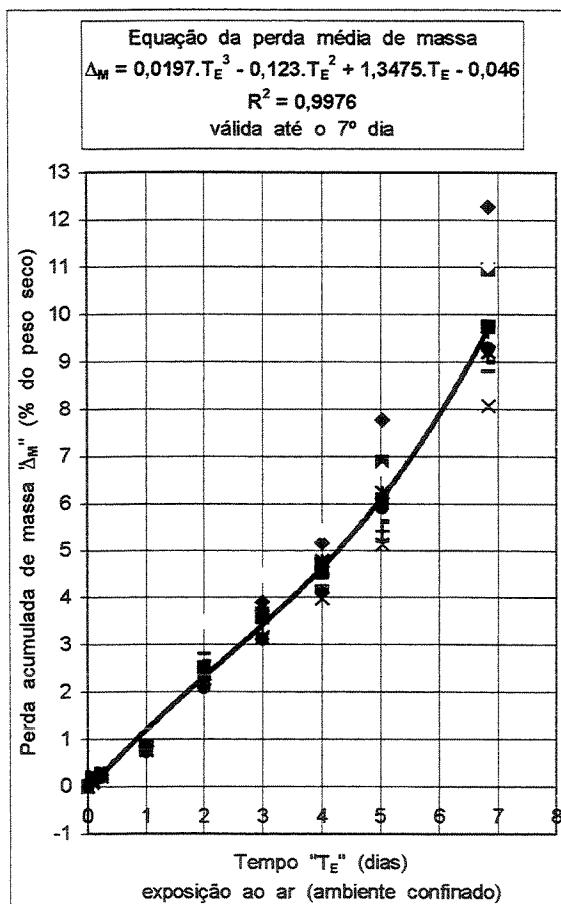
Tabela A19 - PERDAS DE MASSA durante a secagem, medidas nos CPs da MC-30-CZ-LD1-B												
Corpos de prova		CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
P _{umid}	(g)	225,93	228,80	235,52	226,19	222,91	230,18	228,97	226,75	229,26	223,01	227,75
PS	(g)	162,93	165,22	170,07	163,24	160,93	166,07	165,22	163,92	166,10	160,95	164,47
h _{PM}	(%)	38,67	38,48	38,48	38,56	38,51	38,60	38,58	38,33	38,03	38,56	38,48
PERDA ACUMULADA DE MASSA durante a secagem ao ar (em % do peso seco)												
Tempo "T _E "		CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
(horas)	(dias)											
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,75	0,11	0,48	0,40	0,36	0,39	0,30	0,31	0,31	0,21	0,15	0,15	0,31
5,08	0,21	0,63	0,52	0,49	0,53	0,45	0,45	0,43	0,32	0,27	0,29	0,44
24,00	1,00	1,47	1,21	1,13	1,16	1,33	1,17	1,03	0,97	0,68	0,99	1,12
48,17	2,01	2,52	2,02	1,96	1,99	2,45	2,10	1,79	1,80	1,29	1,98	1,99
72,00	3,00	3,75	2,98	2,85	2,89	3,67	3,07	2,55	2,64	1,88	2,94	2,92
164,50	6,85	9,91	7,56	6,84	6,94	9,36	7,43	6,20	6,35	6,10	9,20	7,59
168,00	7,00	10,55	8,20	7,50	7,58	10,01	8,16	6,99	7,22	7,19	9,81	8,32
170,00	7,08	10,86	8,44	7,74	7,85	10,33	8,51	7,24	7,45	7,44	10,11	8,60
173,75	7,24	11,42	8,89	8,19	8,29	10,75	9,13	7,75	7,94	7,84	10,49	9,07
192,00	8,00	14,10	11,15	10,38	10,64	13,06	12,07	10,07	9,99	9,81	12,51	11,38
216,00	9,00	17,87	14,56	13,36	13,31	16,00	15,96	13,42	12,95	12,16	14,80	14,44
240,00	10,00	22,66	17,92	17,17	18,45	22,02	21,21	17,19	16,70	16,41	20,23	19,00
264,00	11,00	28,38	23,85	23,47	24,85	27,55	27,05	23,67	23,44	22,11	25,30	24,97
288,50	12,02	30,92	27,65	27,39	28,31	29,71	30,13	27,57	27,51	25,82	27,88	28,29
336,00	14,00	32,12	30,31	29,89	30,41	31,25	32,06	30,63	30,14	28,74	29,87	30,54
360,00	15,00	33,03	31,77	31,29	31,48	31,73	33,05	32,10	31,59	30,39	30,74	31,72



Figuras A23_a e b - MC-30-CZ-LD1-B - Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar

Tabela A20 - PERDAS DE MASSA durante a secagem, medidas nos CPs da MC-40-CZ-LD1-A

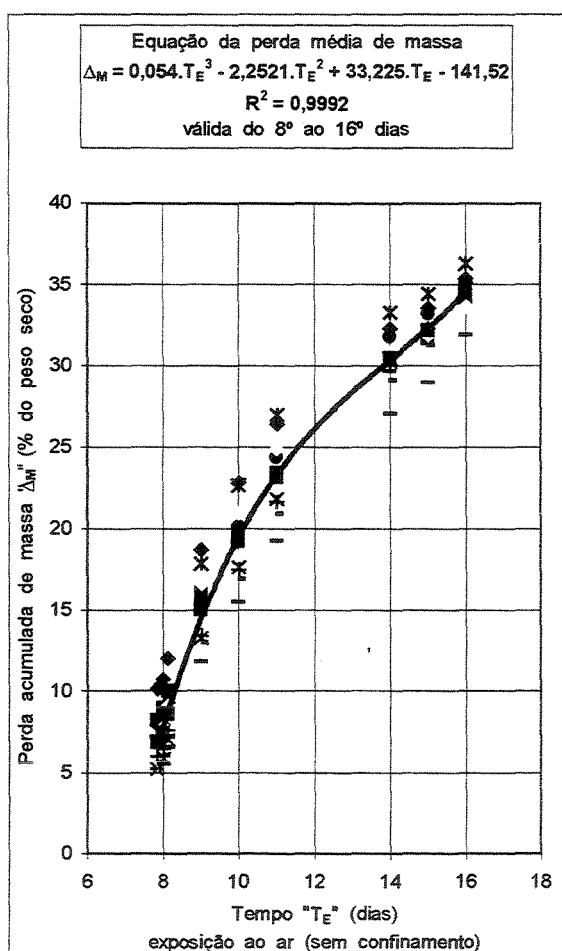
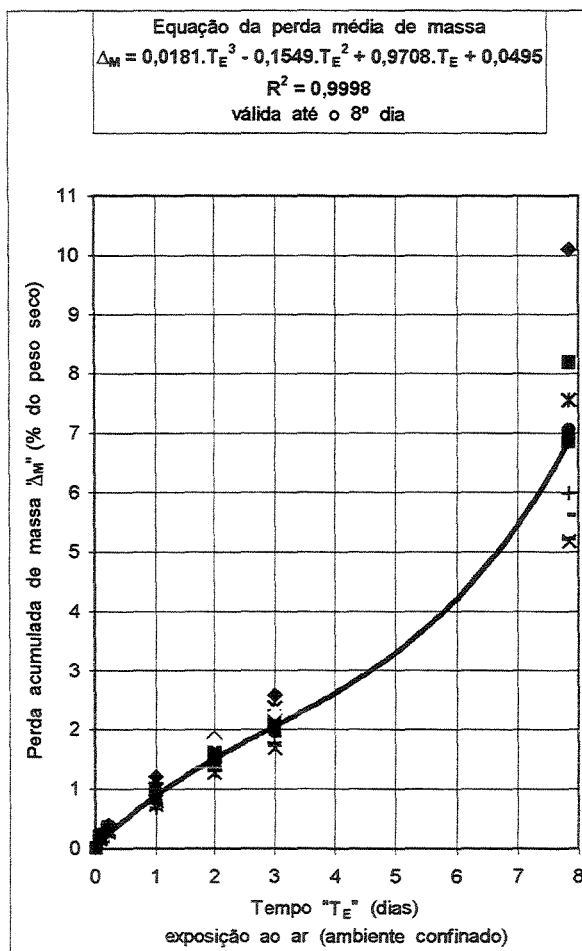
Corpos de prova		CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
P _{umid}	(g)	220,87	221,75	227,51	225,52	222,93	222,72	226,10	226,15	223,60	226,03	224,32
PS	(g)	156,13	156,87	161,06	161,02	157,39	156,87	160,46	160,43	160,70	162,84	159,38
h _{PM}	(%)	41,47	41,36	41,26	40,06	41,64	41,98	40,91	40,96	39,14	38,80	40,76
Tempo "T _E "		PERDA ACUMULADA DE MASSA durante a secagem ao ar (em % do peso seco)										
(horas)	(dias)	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,00	0,08	0,18	0,19	0,19	0,19	0,08	0,11	0,16	0,15	0,13	0,17	0,15
5,50	0,23	0,26	0,28	0,28	0,27	0,21	0,20	0,26	0,27	0,25	0,28	0,26
24,00	1,00	0,85	0,84	0,82	0,77	0,78	0,74	0,86	0,94	0,82	1,06	0,85
48,00	2,00	2,49	2,35	2,30	2,27	2,36	2,08	2,29	2,64	2,80	3,49	2,51
72,00	3,00	3,90	3,67	3,42	3,16	3,61	3,11	3,23	3,60	3,52	4,48	3,57
96,00	4,00	5,16	4,72	4,34	3,98	4,78	4,13	4,11	4,48	4,23	5,40	4,53
120,83	5,03	7,78	6,88	5,93	5,13	6,23	5,92	5,42	5,62	5,20	6,71	6,08
164,17	6,84	12,28	10,95	9,16	8,07	9,21	9,29	9,64	9,00	8,79	11,04	9,74
168,00	7,00	12,59	11,17	9,34	8,30	9,43	9,48	8,26	9,04	8,71	10,85	9,72
170,00	7,08	12,92	11,44	9,66	8,62	9,89	9,79	8,53	9,34	9,03	11,28	10,05
173,08	7,21	13,38	11,82	10,14	9,06	10,50	10,28	8,94	9,77	9,50	11,86	10,52
192,00	8,00	15,70	13,91	12,39	11,58	13,88	12,65	11,03	11,84	11,69	14,63	12,93
216,00	9,00	18,05	15,94	14,66	13,89	16,58	15,19	12,96	13,79	13,50	16,73	15,13
240,00	10,00	20,50	18,03	16,63	15,87	19,22	17,66	14,85	15,85	15,26	18,79	17,27
360,00	15,00	35,49	34,49	34,07	33,34	36,03	35,69	33,21	33,71	32,43	33,28	34,17
384,00	16,00	36,26	35,62	35,34	34,36	36,39	36,43	34,48	34,77	33,33	33,59	35,06



Figuras A24_a e b - MC-40-CZ-LD1-A - Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar

Tabela A21 - PERDAS DE MASSA durante a secagem, medidas nos CPs da MC-40-CZ-LD1-B

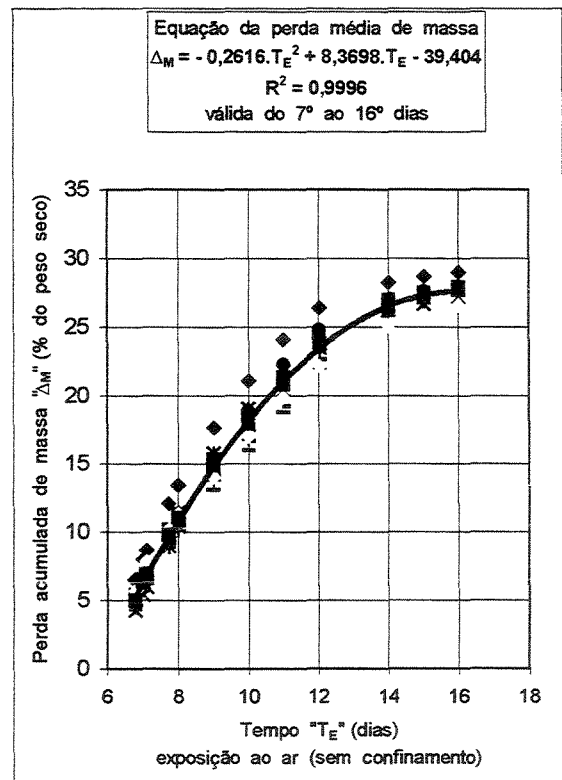
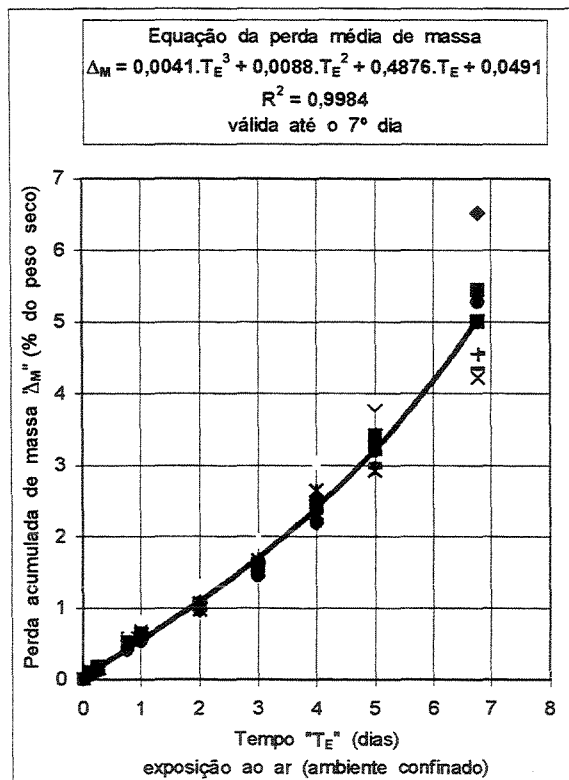
Corpos de prova	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média	
P _{umid} (g)	218,77	224,01	225,92	223,92	220,82	222,33	226,56	223,69	223,35	223,54	223,29	
PS (g)	154,81	158,41	157,97	157,17	155,51	157,43	159,13	157,46	159,68	160,13	157,77	
h _{PM} (%)	41,32	41,41	43,01	42,47	42,00	41,22	42,37	42,06	39,87	39,60	41,53	
Tempo "T _E "		PERDA ACUMULADA DE MASSA durante a secagem ao ar (em % do peso seco)										
(horas)	(dias)	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,00	0,08	0,21	0,20	0,18	0,17	0,17	0,22	0,11	0,10	0,10	0,14	0,16
5,17	0,22	0,39	0,35	0,31	0,27	0,31	0,29	0,21	0,25	0,22	0,28	0,29
24,00	1,00	1,20	1,00	0,85	0,73	0,99	0,83	0,69	0,74	0,67	0,84	0,85
48,00	2,00	1,85	1,61	1,44	1,27	1,73	1,47	1,30	1,45	1,37	1,82	1,53
72,00	3,00	2,58	2,23	1,98	1,69	2,37	1,99	1,77	1,90	1,74	2,28	2,05
188,25	7,84	10,10	8,20	6,46	5,19	7,56	7,05	6,00	5,61	5,22	7,28	6,87
192,00	8,00	10,70	8,96	7,03	5,88	8,27	7,48	6,45	6,04	5,52	7,77	7,41
195,33	8,14	11,98	10,01	8,10	7,01	9,66	8,82	7,55	7,20	6,58	9,08	8,60
216,00	9,00	18,67	16,03	14,21	13,26	17,84	15,55	13,41	12,99	11,82	16,57	15,04
240,00	10,00	22,82	19,82	18,21	17,63	22,66	20,10	17,51	16,94	15,49	20,91	19,21
264,00	11,00	26,44	23,39	22,14	21,82	26,96	24,40	21,62	20,92	19,28	24,88	23,18
336,00	14,00	32,29	29,99	30,27	30,25	33,28	31,82	30,05	29,11	27,04	30,74	30,48
360,00	15,00	33,52	31,68	32,33	32,19	34,44	33,23	32,29	31,24	28,97	31,89	32,18
384,00	16,00	35,34	34,18	35,09	35,06	36,29	35,09	35,10	34,35	31,92	33,66	34,61



Figuras A25_a e b - MC-40-CZ-LD1-B - Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar

Tabela A22 - PERDAS DE MASSA durante a secagem, medidas nos CPs da MC-10-LD2-A

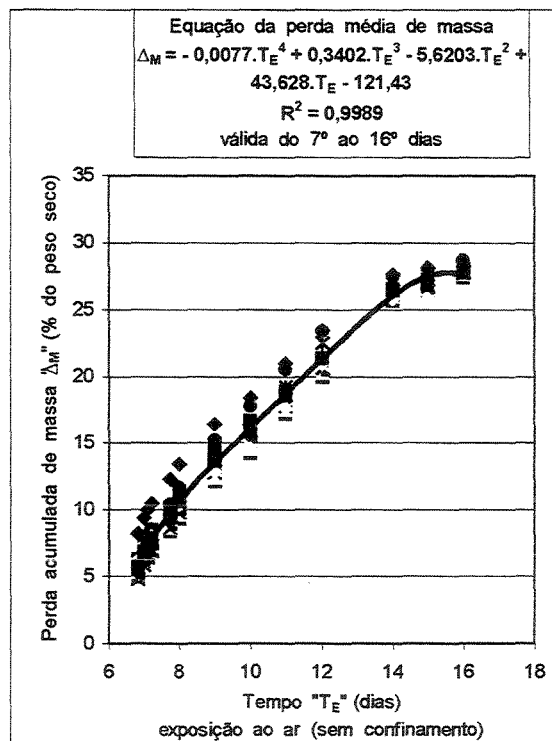
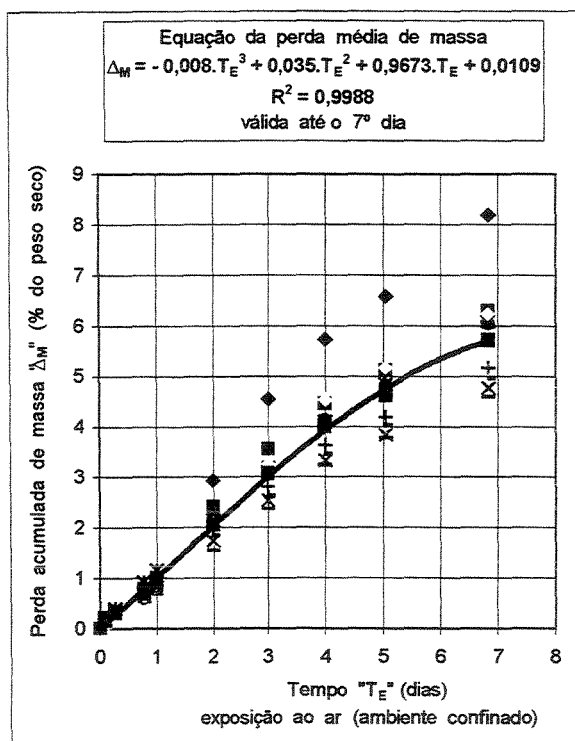
Corpos de prova		CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
P _{úmido}	(g)	219,97	222,50	226,38	220,59	219,96	224,22	224,61	223,47	222,75	221,87	222,63
PS	(g)	166,04	168,93	172,08	167,09	167,07	170,45	170,78	170,06	165,15	168,57	168,62
h _{PM}	(%)	32,48	31,71	31,56	32,02	31,66	31,55	31,52	31,41	34,88	31,62	32,04
Tempo "T _E "		PERDA ACUMULADA DE MASSA durante a secagem ao ar (em % do peso seco)										
(horas)	(dias)	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3,00	0,13	0,08	0,09	0,07	0,11	0,10	0,06	0,09	0,14	0,07	0,10	0,09
6,08	0,25	0,17	0,17	0,12	0,16	0,17	0,12	0,13	0,20	0,13	0,15	0,15
18,17	0,76	0,55	0,57	0,50	0,53	0,51	0,42	0,42	0,53	0,49	0,61	0,51
24,00	1,00	0,66	0,67	0,60	0,63	0,63	0,54	0,55	0,68	0,65	0,80	0,64
48,00	2,00	1,07	1,05	0,94	0,98	1,06	0,97	0,95	1,11	1,04	1,30	1,05
72,00	3,00	1,64	1,61	1,45	1,51	1,67	1,45	1,46	1,63	1,51	1,93	1,59
96,00	4,00	2,52	2,40	2,22	2,32	2,65	2,19	2,18	2,45	2,36	3,04	2,43
120,00	5,00	3,85	3,42	2,95	2,92	3,42	3,20	2,96	3,16	3,02	3,88	3,28
162,58	6,77	6,52	5,45	4,43	4,23	5,00	5,28	4,56	4,57	4,35	5,69	5,01
168,00	7,00	7,98	6,41	5,82	5,40	6,61	6,54	5,77	5,88	5,69	7,37	6,35
170,50	7,10	8,65	7,02	6,37	5,95	7,17	7,12	6,28	6,41	6,22	7,85	6,91
185,50	7,73	12,08	10,17	9,43	8,99	10,06	10,00	8,88	9,19	8,91	10,22	9,79
192,00	8,00	13,41	11,37	10,71	10,40	11,44	11,25	10,17	10,47	10,10	11,33	11,06
216,00	9,00	17,64	15,38	14,85	14,80	15,81	15,22	13,79	14,10	13,12	14,04	14,87
240,00	10,00	21,07	18,46	17,72	17,88	19,04	18,85	16,80	16,67	15,96	17,02	17,95
264,00	11,00	24,08	21,35	20,23	20,38	21,80	22,28	19,97	19,22	18,76	19,87	20,80
289,00	12,04	26,35	24,41	23,51	23,42	23,80	24,79	23,32	22,60	21,99	22,13	23,63
336,00	14,00	28,22	26,98	26,51	26,64	26,18	27,03	26,57	26,08	25,83	25,09	26,51
360,00	15,00	28,65	27,49	27,10	27,30	26,68	27,57	27,19	26,78	26,87	25,81	27,14
384,00	16,00	28,94	27,89	27,58	27,86	27,16	27,91	27,66	27,32	27,68	26,59	27,66



Figuras A26_a e b - MC-10-LD2-A - Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar

Tabela A23 - PERDAS DE MASSA durante a secagem, medidas nos CPs da MC-10-LD2-B

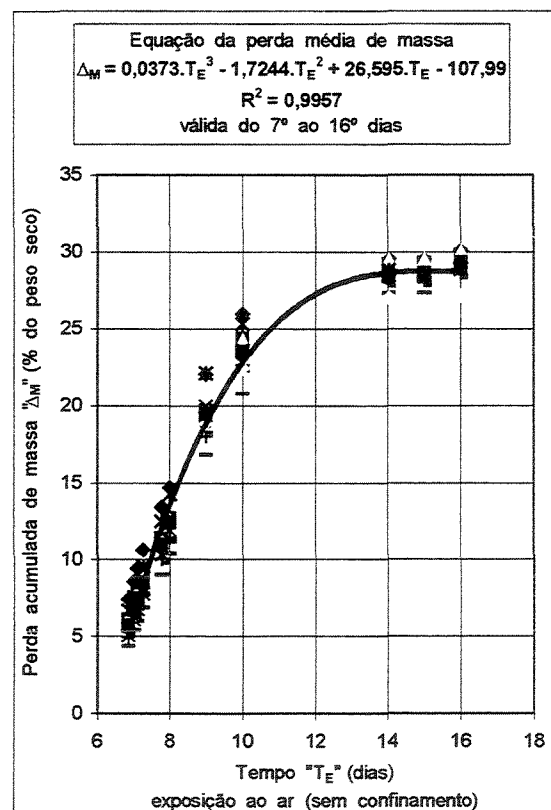
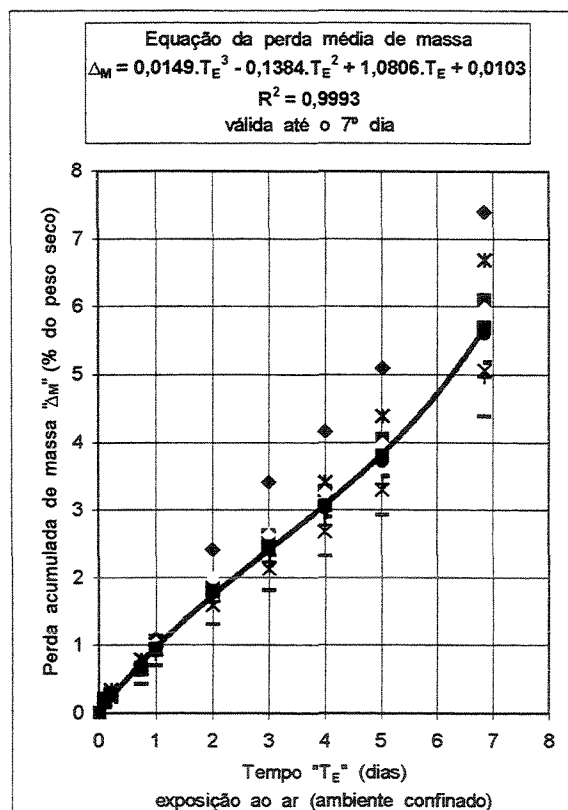
Corpos de prova		CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
P _{umid}	(g)	226,07	223,11	228,27	225,77	225,62	227,97	227,03	224,34	222,53	224,33	225,50
PS	(g)	171,06	169,11	173,30	171,41	170,96	172,37	171,34	170,28	169,15	171,34	171,03
h _{PM}	(%)	32,16	31,93	31,72	31,71	31,97	32,26	32,50	31,75	31,56	30,93	31,85
Tempo "T _E "		PERDA ACUMULADA DE MASSA durante a secagem ao ar (em % do peso seco)										
(horas)	(dias)	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,00	0,08	0,19	0,22	0,14	0,19	0,17	0,16	0,15	0,13	0,10	0,12	0,16
6,33	0,26	0,33	0,34	0,31	0,36	0,40	0,29	0,30	0,31	0,22	0,25	0,31
18,50	0,77	0,70	0,79	0,69	0,72	0,92	0,60	0,64	0,70	0,54	0,66	0,70
24,00	1,00	0,94	1,00	0,88	0,92	1,15	0,79	0,85	0,90	0,69	0,90	0,90
48,00	2,00	2,93	2,41	1,78	1,73	2,14	2,13	1,94	1,84	1,55	2,10	2,06
72,00	3,00	4,55	3,56	2,64	2,53	3,18	3,22	2,82	2,62	2,37	3,26	3,07
96,00	4,00	5,73	4,47	3,38	3,33	4,11	4,13	3,63	3,46	3,25	4,53	4,00
121,00	5,04	6,58	5,13	3,92	3,84	4,85	4,81	4,19	4,03	3,78	5,17	4,63
164,00	6,83	8,19	6,29	4,85	4,77	6,09	6,05	5,17	4,96	4,59	6,23	5,72
168,00	7,00	9,39	7,33	5,97	5,83	7,28	7,39	6,22	6,10	5,75	7,42	6,87
170,33	7,10	9,96	7,93	6,53	6,38	7,82	7,99	6,82	6,66	6,21	7,83	7,41
173,00	7,21	10,51	8,46	7,02	6,88	8,15	8,53	7,33	7,11	6,57	8,05	7,86
185,75	7,74	12,32	10,23	8,72	8,62	10,05	10,43	9,03	8,60	7,98	9,58	9,55
192,00	8,00	13,44	11,37	9,92	9,77	11,06	11,67	10,21	9,75	8,95	10,42	10,66
216,00	9,00	16,43	14,46	13,17	12,80	13,80	15,22	13,66	12,87	11,72	12,85	13,70
240,00	10,00	18,41	16,69	15,45	15,05	15,92	17,78	16,12	15,16	13,88	14,57	15,90
264,00	11,00	20,99	18,93	17,82	17,79	19,26	20,54	18,75	17,71	16,80	17,66	18,62
288,50	12,02	23,45	21,21	20,29	20,62	22,54	23,43	21,52	20,17	19,60	21,00	21,38
336,00	14,00	27,60	26,51	25,97	26,19	27,29	27,51	26,77	25,93	25,29	25,81	26,49
360,00	15,00	28,14	27,13	26,55	26,74	27,27	27,97	27,29	26,32	25,84	25,84	26,91
384,00	16,00	28,30	28,22	27,73	27,74	27,83	28,69	28,42	27,51	26,99	26,22	27,76



Figuras A27_a e b - MC-10-LD2-B - Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar

Tabela A24 - PERDAS DE MASSA durante a secagem, medidas nos CPs da MC-10-LD2-C

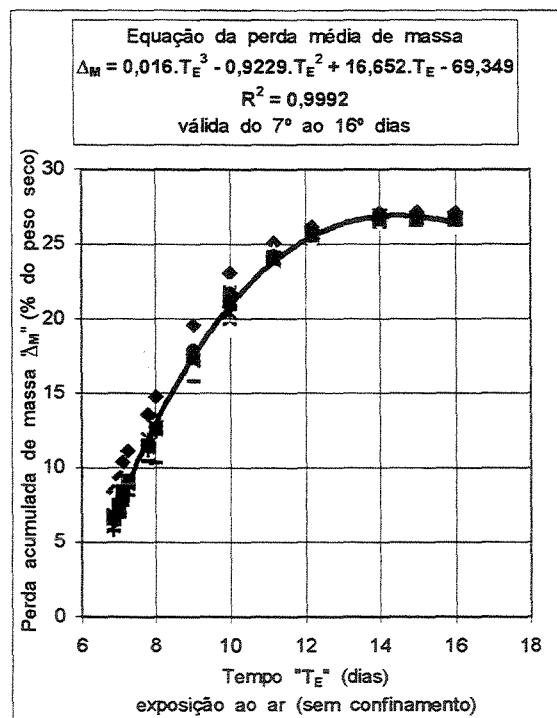
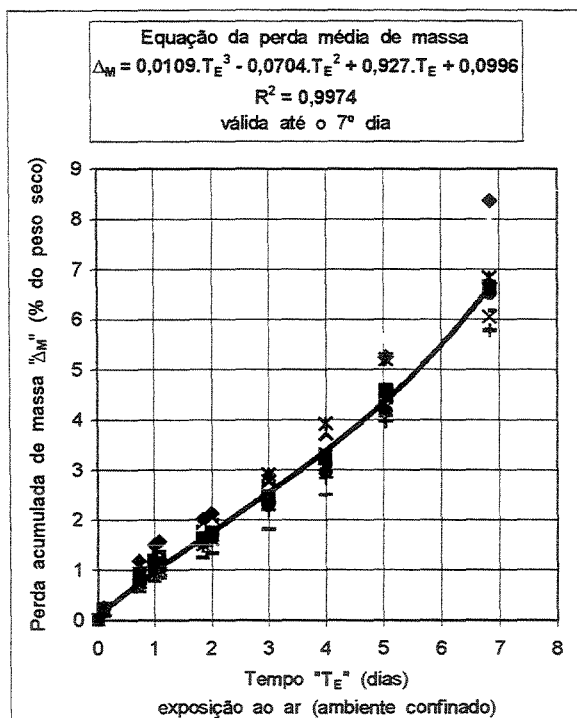
Corpos de prova		CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
P _{umid}	(g)	220,04	225,91	225,66	224,99	224,13	224,14	227,22	224,11	226,54	224,39	224,71
PS	(g)	165,22	169,63	169,00	169,84	168,80	169,59	171,54	169,71	172,08	171,13	169,65
h _{PM}	(%)	33,18	33,18	33,53	32,47	32,78	32,17	32,46	32,05	31,65	31,12	32,46
PERDA ACUMULADA DE MASSA durante a secagem ao ar (em % do peso seco)												
Tempo "T _E "		CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
(horas)	(dias)											
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,33	0,10	0,21	0,20	0,20	0,22	0,21	0,21	0,11	0,12	0,09	0,11	0,17
5,08	0,21	0,30	0,28	0,29	0,32	0,34	0,29	0,20	0,24	0,16	0,22	0,26
17,83	0,74	0,73	0,66	0,67	0,65	0,78	0,61	0,59	0,62	0,43	0,60	0,63
24,00	1,00	1,10	0,92	0,92	0,93	1,06	0,91	0,87	0,95	0,70	1,02	0,94
48,00	2,00	2,41	1,85	1,63	1,59	1,88	1,84	1,64	1,74	1,31	1,97	1,79
72,00	3,00	3,41	2,62	2,25	2,13	2,59	2,48	2,23	2,33	1,82	2,63	2,45
96,00	4,00	4,16	3,28	2,86	2,68	3,41	3,03	2,77	2,89	2,32	3,25	3,07
120,50	5,02	5,10	4,04	3,59	3,30	4,38	3,73	3,39	3,50	2,93	3,97	3,79
164,25	6,84	7,40	6,11	5,63	5,06	6,69	5,61	4,97	5,18	4,39	5,98	5,70
168,00	7,00	8,57	7,21	6,70	6,06	7,52	6,63	6,02	6,14	5,40	6,96	6,72
170,17	7,09	9,42	7,93	7,43	6,77	8,31	7,45	6,77	6,76	5,99	7,70	7,45
174,25	7,26	10,59	9,01	8,50	7,78	9,55	8,53	7,66	7,76	6,89	8,72	8,50
186,50	7,77	13,42	11,39	10,78	10,33	12,50	11,26	10,03	9,78	9,01	11,13	10,96
192,00	8,00	14,67	12,68	12,24	11,91	14,25	12,67	11,40	11,15	10,36	12,55	12,39
216,00	9,00	22,06	19,71	19,98	20,00	22,14	18,91	18,03	18,26	16,85	18,87	19,48
240,00	10,00	25,98	24,39	24,31	23,62	25,31	23,32	22,64	22,31	20,80	22,44	23,51
336,50	14,02	29,53	29,25	29,53	28,46	28,83	28,33	28,35	27,82	27,35	27,03	28,45
360,00	15,00	29,52	29,26	29,54	28,40	28,50	28,34	28,34	27,84	27,36	26,76	28,39
384,00	16,00	30,08	29,82	30,08	28,93	28,90	28,88	28,96	28,35	29,61	27,18	29,08



Figuras A28_a e b - MC-10-LD2-C - Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar

Tabela A25 - PERDAS DE MASSA durante a secagem, medidas nos CPs da MC-20-LD2-A

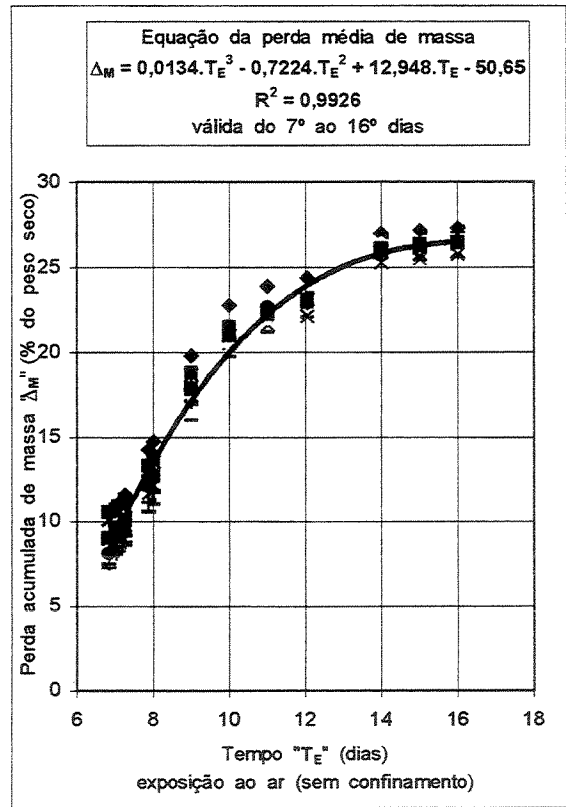
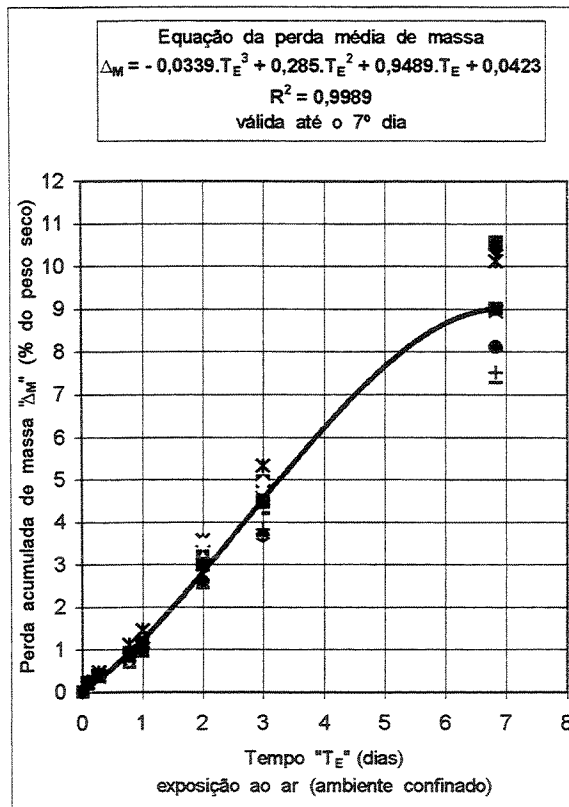
Corpos de prova		CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
P _{umid}	(g)	214,96	219,06	212,88	219,43	215,96	214,82	215,28	208,91	211,08	206,03	213,84
PS	(g)	164,00	167,67	162,68	167,25	164,78	164,26	164,21	159,93	160,89	157,52	163,32
h _{PM}	(%)	31,07	30,65	30,86	31,20	31,06	30,78	31,10	30,63	31,20	30,80	30,93
PERDA ACUMULADA DE MASSA durante a secagem ao ar (em % do peso seco)												
Tempo "T _E "		CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
(horas)	(dias)											
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,50	0,10	0,24	0,23	0,21	0,19	0,22	0,21	0,19	0,19	0,09	0,15	0,19
17,67	0,74	1,18	0,93	0,75	0,71	0,77	0,85	0,72	0,74	0,58	0,79	0,80
24,00	1,00	1,50	1,19	0,97	0,95	1,02	1,10	0,94	0,97	0,78	1,09	1,05
26,33	1,10	1,57	1,26	1,04	1,03	1,11	1,17	1,02	1,06	0,85	1,18	1,13
44,17	1,84	2,01	1,74	1,52	1,51	1,75	1,60	1,49	1,57	1,24	1,76	1,62
48,00	2,00	2,13	1,84	1,64	1,62	1,89	1,72	1,59	1,68	1,34	1,87	1,73
72,00	3,00	2,88	2,62	2,50	2,48	2,91	2,29	2,19	2,33	1,82	2,58	2,46
96,00	4,00	3,61	3,31	3,25	3,27	3,92	2,95	2,84	3,07	2,50	3,51	3,22
121,00	5,04	5,25	4,43	4,28	4,53	5,20	4,16	3,96	4,38	4,07	5,62	4,59
164,17	6,84	8,36	6,64	5,86	6,06	6,83	6,52	5,79	6,17	5,78	7,89	6,59
168,00	7,00	9,32	7,42	6,74	7,15	8,00	7,34	6,76	6,93	6,69	8,44	7,48
170,58	7,11	10,34	8,40	7,79	8,05	8,72	8,33	7,78	7,92	7,50	9,06	8,39
173,92	7,25	11,13	9,15	8,61	8,88	9,29	9,11	8,60	8,67	8,12	9,48	9,11
186,83	7,78	13,56	11,35	11,03	11,47	11,91	11,46	11,13	11,09	10,42	11,80	11,52
192,00	8,00	14,77	12,49	12,28	12,75	13,14	12,75	12,40	12,27	10,31	12,91	12,61
216,00	9,00	19,55	17,53	17,64	17,51	17,22	17,85	17,46	17,01	15,81	16,46	17,41
240,00	10,00	23,05	21,79	22,22	21,33	20,44	21,66	21,28	20,66	19,65	19,24	21,13
268,00	11,17	25,10	24,01	24,55	24,12	24,02	24,17	24,16	23,62	23,37	23,24	24,03
292,50	12,19	26,16	25,36	25,84	25,74	25,77	25,51	25,67	25,18	25,36	25,18	25,58
336,00	14,00	27,12	26,47	26,78	26,89	26,91	26,51	26,67	26,19	26,61	26,41	26,66
360,00	15,00	27,16	26,51	26,72	26,79	26,60	26,60	26,77	26,23	26,60	26,14	26,61
384,00	16,00	27,12	26,51	26,67	26,79	26,60	26,60	26,82	26,29	26,69	26,16	26,63



Figuras A29_a e b - MC-20-LD2-A - Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar

Tabela A26 - PERDAS DE MASSA durante a secagem, medidas nos CPs da MC-20-LD2-B

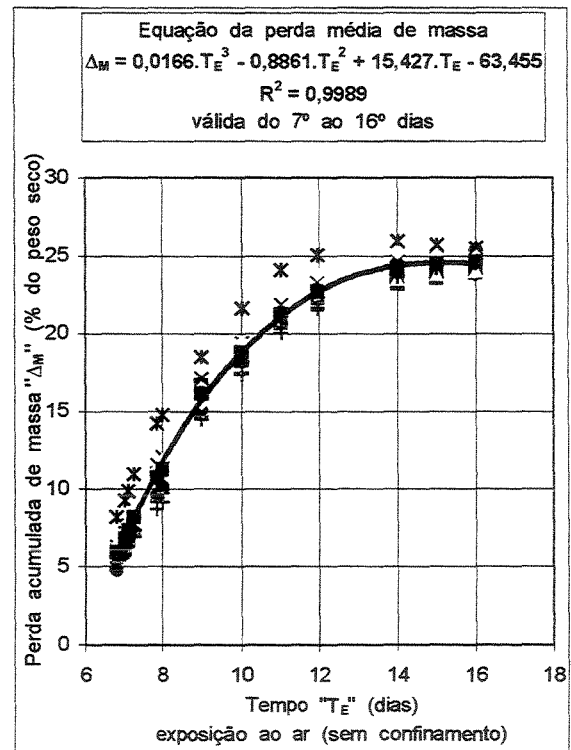
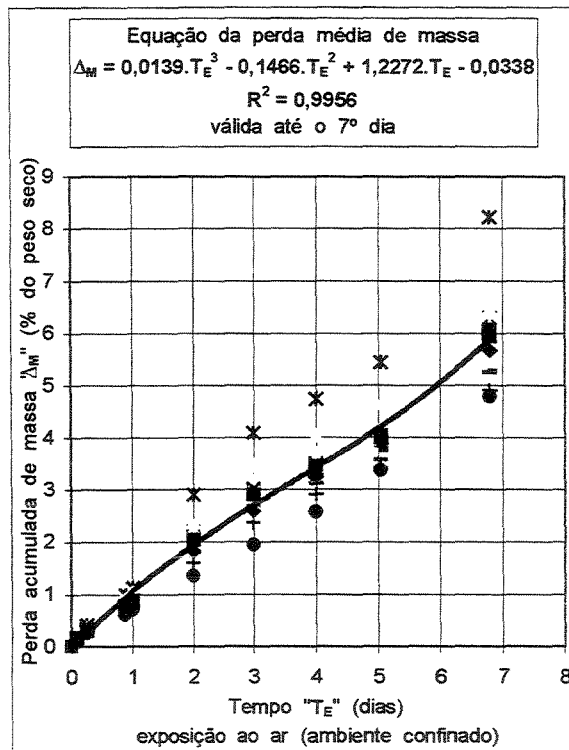
Corpos de prova		CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
P _{umid}	(g)	215,07	217,28	224,10	215,64	218,28	217,46	221,59	215,26	216,91	211,60	217,32
PS	(g)	163,33	166,09	170,89	164,98	166,73	166,19	168,02	162,46	164,37	160,39	165,35
h _{PM}	(%)	31,68	30,82	31,14	30,71	30,92	30,85	31,88	32,50	31,96	31,93	31,44
Tempo "T _E "		PERDA ACUMULADA DE MASSA durante a secagem ao ar (em % do peso seco)										
(horas)	(dias)	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,17	0,09	0,26	0,23	0,25	0,23	0,24	0,18	0,20	0,18	0,09	0,12	0,20
6,25	0,26	0,42	0,39	0,44	0,41	0,47	0,32	0,35	0,39	0,23	0,29	0,37
18,50	0,77	0,91	0,91	0,92	0,88	1,10	0,72	0,77	0,86	0,58	0,77	0,84
24,00	1,00	1,17	1,16	1,17	1,16	1,46	0,97	1,04	1,14	0,84	1,18	1,13
48,00	2,00	2,98	3,17	3,13	3,00	3,57	2,59	2,64	2,94	2,45	3,49	3,00
72,00	3,00	4,71	4,95	4,83	4,53	5,33	3,68	3,81	4,21	3,62	4,93	4,46
163,92	6,83	10,39	10,55	9,92	8,95	10,13	8,11	7,52	8,06	7,28	9,17	9,01
168,50	7,02	10,82	10,74	10,24	9,22	10,48	8,55	8,08	8,50	8,09	9,80	9,45
170,00	7,08	11,05	10,90	10,39	9,36	10,63	8,80	8,29	8,70	8,25	9,94	9,63
174,00	7,25	11,61	11,33	10,83	9,78	10,90	9,42	8,83	9,15	8,61	10,19	10,07
189,17	7,88	14,25	13,30	12,70	11,69	13,08	12,11	11,16	11,27	10,59	12,28	12,24
192,00	8,00	14,75	13,73	13,14	12,15	13,54	12,67	11,70	11,79	11,05	12,73	12,72
216,00	9,00	19,78	18,82	18,17	17,52	18,67	17,89	17,08	16,96	15,99	17,48	17,84
240,00	10,00	22,76	21,46	21,07	20,49	20,96	21,50	20,74	20,83	19,77	20,44	21,00
264,00	11,00	23,85	22,40	22,10	21,60	22,38	22,65	22,13	22,22	21,19	22,00	22,25
289,00	12,04	24,34	22,96	22,67	22,12	23,09	23,14	22,90	23,46	22,05	23,00	22,97
336,00	14,00	26,98	25,86	25,75	25,28	25,90	25,93	26,37	26,71	25,78	26,41	26,10
360,00	15,00	27,15	26,05	26,02	25,52	25,75	26,16	26,69	27,02	26,08	26,18	26,26
384,00	16,00	27,29	26,23	26,27	25,75	25,87	26,38	27,03	27,34	26,15	26,30	26,46



Figuras A30_a e b - MC-20-LD2-B - Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar

Tabela A27 - PERDAS DE MASSA durante a secagem, medidas nos CPs da MC-20-LD2-C

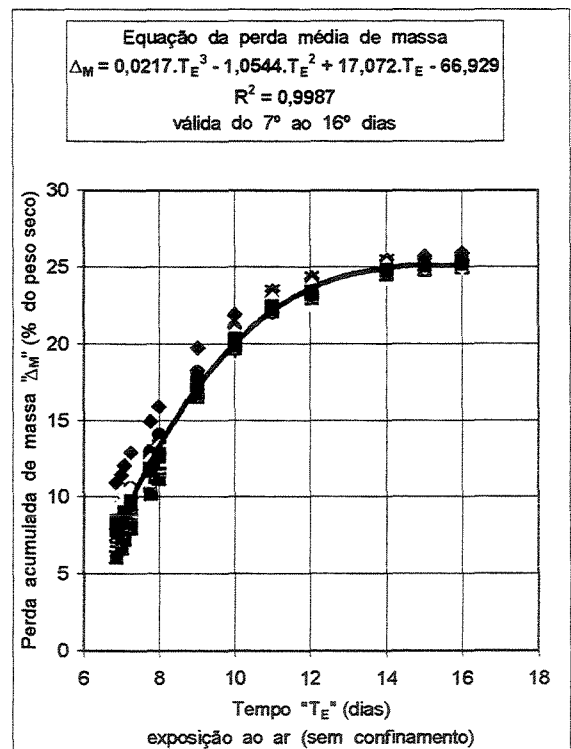
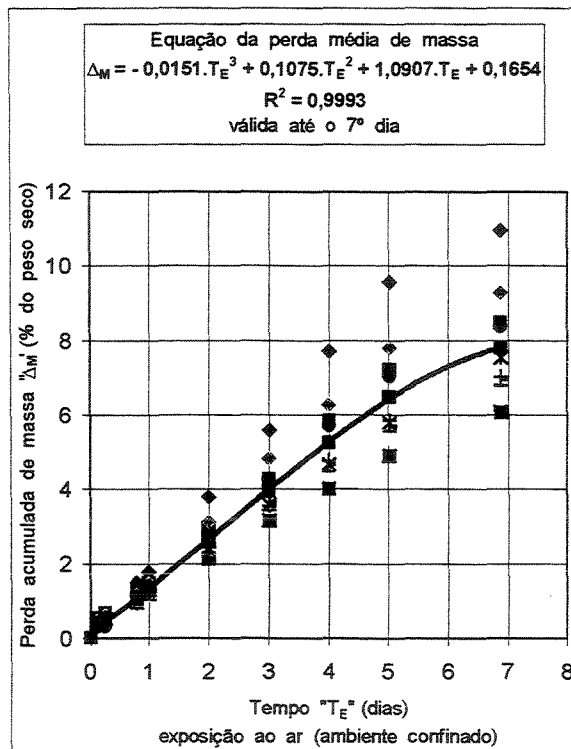
Corpos de prova		CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
P _{umid}	(g)	212,63	216,72	219,75	213,65	216,42	214,83	219,15	215,24	216,79	214,83	216,00
PS	(g)	162,62	164,57	166,85	161,40	163,40	162,34	165,53	162,40	163,82	162,66	163,56
h _{PM}	(%)	30,75	31,69	31,71	32,37	32,45	32,33	32,39	32,54	32,33	32,07	32,06
Tempo "T _E "		PERDA ACUMULADA DE MASSA durante a secagem ao ar (em % do peso seco)										
(horas)	(dias)	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,00	0,08	0,15	0,17	0,16	0,15	0,18	0,14	0,13	0,12	0,15	0,17	0,15
6,08	0,25	0,30	0,33	0,36	0,31	0,40	0,26	0,28	0,26	0,34	0,36	0,32
21,17	0,88	0,69	0,77	1,09	0,71	0,99	0,61	0,68	0,69	0,74	0,90	0,79
24,00	1,00	0,79	0,88	0,91	0,83	1,13	0,70	0,77	0,79	0,83	1,03	0,87
48,00	2,00	1,82	2,10	2,25	2,20	2,89	1,34	1,59	1,80	1,94	2,29	2,02
72,00	3,00	2,60	2,98	3,15	3,02	4,09	1,95	2,36	2,74	2,68	3,46	2,90
96,00	4,00	3,24	3,51	3,66	3,48	4,74	2,58	2,91	3,28	3,12	4,04	3,45
121,00	5,04	3,88	4,05	4,18	3,94	5,44	3,37	3,43	3,76	3,58	4,62	4,03
163,00	6,79	5,68	6,06	6,54	6,29	8,22	4,79	4,92	5,28	5,25	6,38	5,94
168,00	7,00	6,59	6,90	7,06	7,18	9,26	5,86	5,76	6,10	6,00	7,29	6,80
170,17	7,09	7,19	7,44	7,57	7,66	9,87	6,48	6,29	6,66	6,48	7,82	7,35
174,08	7,25	8,14	8,33	8,39	8,65	10,99	7,24	6,94	7,34	7,15	8,74	8,19
188,50	7,85	11,15	11,00	11,11	11,56	14,20	9,60	8,71	9,35	9,19	11,24	10,71
192,00	8,00	11,73	11,51	11,55	12,06	14,77	10,14	9,17	9,86	9,74	11,83	11,24
216,00	9,00	16,44	16,70	16,83	17,14	18,49	15,08	14,47	15,90	14,61	15,55	16,12
240,00	10,00	19,27	18,25	18,72	19,44	21,65	18,48	17,40	18,16	17,45	19,44	18,83
264,00	11,00	21,14	20,46	20,61	21,91	24,10	21,13	20,06	20,73	20,39	22,50	21,31
287,00	11,96	22,32	21,86	22,13	23,32	25,07	22,77	21,65	21,98	21,96	23,88	22,69
336,00	14,00	23,27	23,19	23,52	24,74	25,94	24,51	23,65	23,86	23,98	25,23	24,19
360,00	15,00	23,61	23,58	23,82	24,91	25,71	25,11	24,24	24,38	24,67	25,07	24,51
384,00	16,00	23,80	23,87	24,02	24,96	25,48	25,36	24,56	24,68	24,57	24,94	24,62



Figuras A31_a e b - MC-20-LD2-C - Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar

Tabela A28 - PERDAS DE MASSA durante a secagem, medidas nos CPs da MC-30-LD2-A

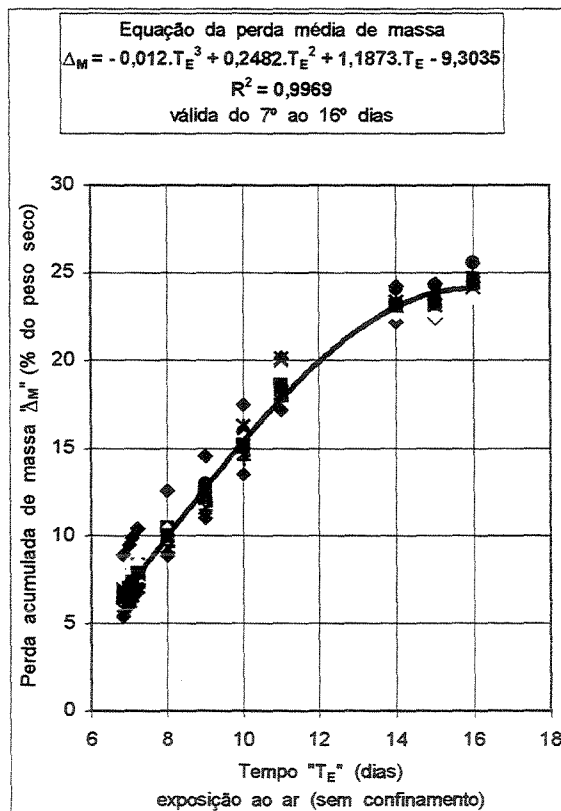
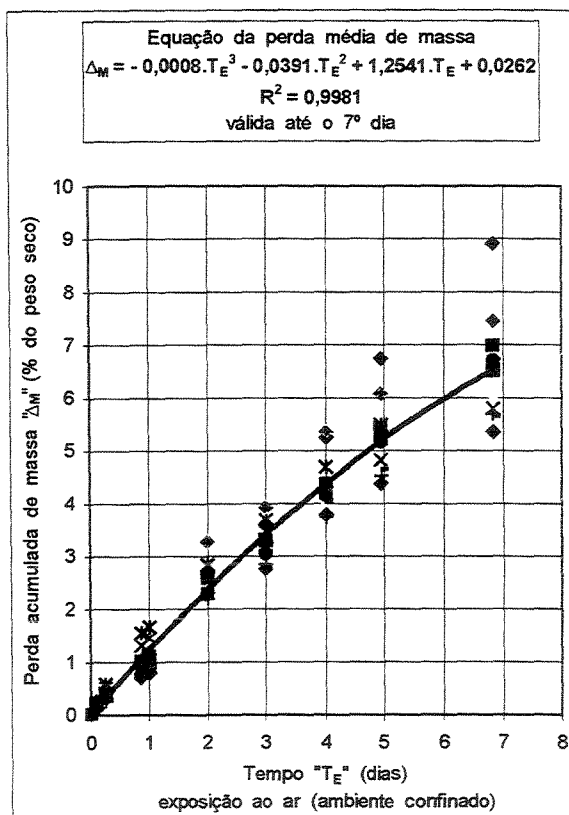
Corpos de prova		CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
P _{umid}	(g)	206,21	208,38	211,12	208,47	208,90	208,41	209,91	205,40	203,33	204,99	207,51
PS	(g)	156,33	157,85	160,12	158,18	158,61	158,33	159,30	156,21	154,68	155,81	157,54
h _{PM}	(%)	31,91	32,01	31,85	31,79	31,71	31,63	31,77	31,49	31,45	31,56	31,72
PERDA ACUMULADA DE MASSA durante a secagem ao ar (em % do peso seco)												
Tempo "T _E "		CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
(horas)	(dias)											
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,58	0,11	0,31	0,54	0,37	0,38	0,38	0,30	0,33	0,44	0,38	0,48	0,39
6,00	0,25	0,54	0,66	0,51	0,51	0,53	0,32	0,46	0,58	0,48	0,64	0,52
18,92	0,79	1,50	1,24	0,95	0,96	1,07	1,04	0,93	1,01	0,87	1,18	1,07
24,00	1,00	1,78	1,48	1,17	1,19	1,30	1,29	1,54	1,27	1,05	1,50	1,36
48,00	2,00	3,79	2,97	2,26	2,14	2,41	2,84	2,44	2,48	2,22	3,11	2,67
72,00	3,00	5,58	4,27	3,24	3,15	3,59	4,23	3,56	3,63	3,45	4,82	3,95
96,00	4,00	7,72	5,86	4,37	4,01	4,67	5,71	4,76	4,67	4,50	6,28	5,25
120,50	5,02	9,57	7,22	5,36	4,90	5,80	7,05	5,85	5,70	5,57	7,82	6,48
164,83	6,87	10,95	8,47	6,58	6,08	7,54	8,39	7,03	6,95	6,79	9,28	7,81
168,00	7,00	11,46	9,29	7,32	6,67	8,39	9,01	7,78	7,66	7,34	9,61	8,45
170,00	7,08	12,05	9,79	7,83	7,26	8,97	9,64	8,31	8,16	7,86	10,11	9,00
174,25	7,26	12,89	10,47	8,55	7,97	9,58	10,59	9,11	8,87	8,50	10,57	9,71
186,50	7,77	14,94	12,37	10,59	10,20	12,08	12,98	11,31	10,98	10,49	12,41	11,83
192,00	8,00	15,92	13,30	11,44	11,15	13,21	14,05	12,23	11,82	11,35	13,34	12,78
216,00	9,00	19,77	17,52	16,36	16,68	17,92	18,17	16,72	16,56	16,22	17,29	17,32
240,00	10,00	21,90	20,10	19,38	19,97	21,49	21,06	19,51	19,55	19,33	20,73	20,30
264,00	11,00	23,45	22,12	21,59	22,17	23,43	22,98	22,02	21,83	21,77	22,94	22,43
289,00	12,04	24,28	23,15	22,51	23,01	24,25	24,10	23,38	22,76	22,69	23,82	23,39
336,00	14,00	25,45	24,68	24,20	24,55	25,38	25,30	24,83	24,29	24,35	25,15	24,82
360,00	15,00	25,73	25,09	24,68	24,84	25,19	25,57	25,18	24,69	24,63	24,97	25,06
384,00	16,00	25,93	25,36	24,94	24,98	25,08	25,69	25,42	24,93	24,77	24,95	25,21



Figuras A32_a e b - MC-30-LD2-A - Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar

Tabela A29 - PERDAS DE MASSA durante a secagem, medidas nos CPs da MC-30-LD2-B

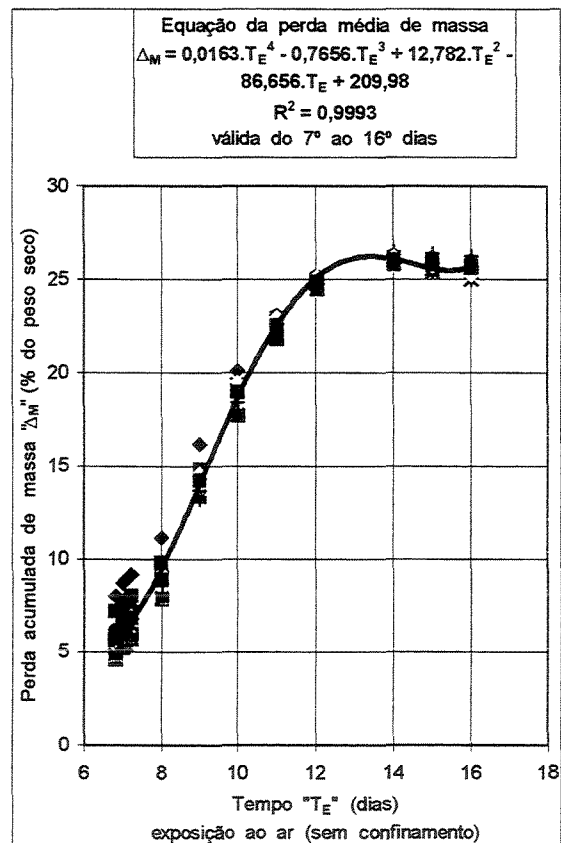
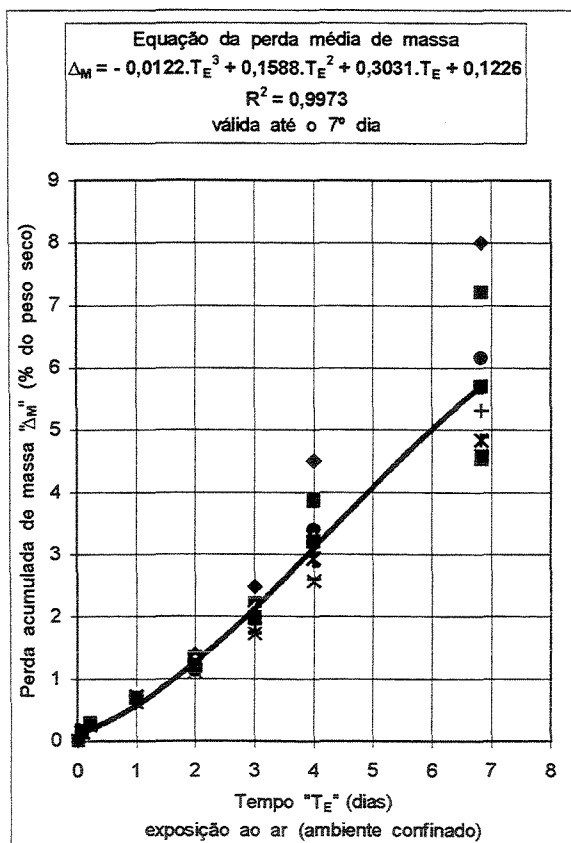
Tabela A23 - PERDA DE MASSA durante a secagem, médias dos CS da M3-03-ED2-B												
Corpos de prova		CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
P _{umid}	(g)	208,23	212,38	215,66	210,12	206,95	210,02	215,58	214,12	216,49	211,83	212,14
PS	(g)	157,01	160,35	163,04	158,96	156,77	158,36	163,45	162,43	164,28	160,89	160,55
h _{PM}	(%)	32,62	32,45	32,27	32,18	32,01	32,62	31,89	31,82	31,78	31,66	32,13
PERDA ACUMULADA DE MASSA durante a secagem ao ar (em % do peso seco)												
Tempo "T _E "												
(horas)	(dias)	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,17	0,09	0,24	0,22	0,22	0,24	0,24	0,20	0,12	0,13	0,12	0,17	0,19
6,17	0,26	0,40	0,40	0,47	0,50	0,59	0,35	0,26	0,28	0,31	0,40	0,40
20,50	0,85	0,90	1,02	1,26	1,31	1,54	0,75	0,70	0,79	0,71	1,03	1,00
24,00	1,00	0,99	1,14	1,38	1,45	1,65	0,81	0,80	0,91	0,79	1,16	1,11
48,00	2,00	2,68	2,41	2,57	2,82	2,84	2,27	2,20	2,63	2,31	3,27	2,60
72,00	3,00	3,60	3,19	3,28	3,47	3,69	3,05	2,84	3,28	2,77	3,92	3,31
96,00	4,00	5,25	4,28	4,05	4,20	4,69	4,16	3,74	4,02	3,78	5,36	4,35
119,00	4,96	6,74	5,43	4,85	4,83	5,49	5,16	4,52	4,65	4,38	6,08	5,21
164,00	6,83	8,91	6,99	6,02	5,80	6,61	6,71	5,70	5,66	5,37	7,46	6,52
168,00	7,00	9,49	7,50	6,49	6,27	7,20	7,19	6,07	6,26	6,02	7,81	7,03
169,83	7,08	9,85	7,75	6,78	6,59	7,55	7,60	6,43	6,59	6,32	8,16	7,36
173,33	7,22	10,39	8,34	7,33	7,08	7,92	8,17	7,02	7,13	6,79	8,48	7,87
192,00	8,00	12,56	10,46	9,57	9,31	9,99	10,36	9,04	9,38	8,86	10,32	9,98
216,00	9,00	14,55	12,50	11,60	11,59	12,16	12,96	11,43	11,72	10,99	12,16	12,17
240,00	10,00	17,50	15,04	14,06	14,66	16,27	15,93	14,35	14,57	13,50	15,59	15,15
264,00	11,00	20,15	18,04	17,57	18,25	20,11	19,60	17,71	17,82	17,18	19,49	18,59
336,00	14,00	24,23	23,15	22,74	23,06	23,35	24,10	22,90	22,88	22,18	22,61	23,12
360,00	15,00	24,38	23,39	22,60	23,16	23,16	24,28	23,15	23,07	22,41	22,50	23,21
384,00	16,00	25,55	24,65	24,27	24,43	24,15	25,57	24,33	24,16	23,73	23,63	24,45



Gráficos A33_a e b - MC-30-LD2-B - Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar

Tabela A30 - PERDAS DE MASSA durante a secagem, medidas nos CPs da MC-30-LD2-C

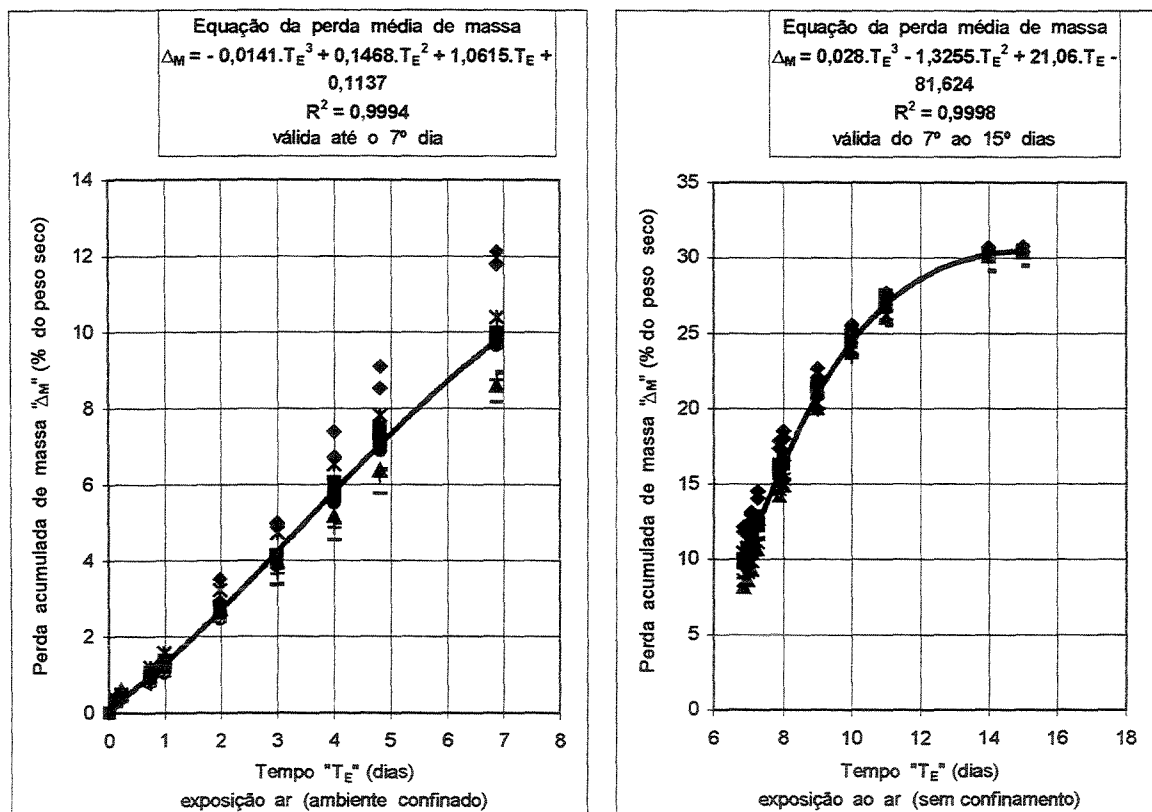
Corpos de prova		CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
P _{umid}	(g)	206,19	211,09	215,80	207,51	213,76	214,43	213,91	211,50	211,20	208,76	211,42
PS	(g)	156,95	160,30	164,09	157,64	162,48	162,51	161,66	160,42	159,82	158,18	160,41
h _{PM}	(%)	31,37	31,68	31,51	31,64	31,56	31,95	32,32	31,84	32,15	31,98	31,80
Tempo "T _E "		PERDA ACUMULADA DE MASSA durante a secagem ao ar (em % do peso seco)										
(horas)	(dias)	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,83	0,08	0,15	0,17	0,13	0,13	0,15	0,18	0,17	0,16	0,13	0,18	0,15
5,42	0,23	0,27	0,26	0,23	0,25	0,26	0,28	0,30	0,32	0,29	0,35	0,28
24,00	1,00	0,74	0,69	0,63	0,63	0,72	0,66	0,69	0,74	0,66	0,76	0,69
48,00	2,00	1,38	1,32	1,16	1,10	1,34	1,13	1,16	1,22	1,11	1,26	1,22
72,00	3,00	2,48	2,21	1,84	1,73	2,07	1,96	1,87	1,88	1,73	2,11	1,99
96,00	4,00	4,51	3,87	3,10	2,58	2,94	3,40	3,03	2,82	2,60	3,24	3,21
163,83	6,83	8,00	7,21	5,75	4,61	4,86	6,16	5,31	4,91	4,47	5,65	5,69
168,00	7,00	8,69	7,63	6,41	5,22	5,83	6,83	5,85	5,40	5,02	6,43	6,33
170,00	7,08	8,89	7,78	6,56	5,40	6,07	7,05	6,01	5,59	5,20	6,64	6,52
173,33	7,22	9,17	8,02	6,83	5,70	6,46	7,36	6,28	5,86	5,48	6,99	6,82
192,00	8,00	11,13	9,84	8,68	7,91	9,01	9,42	8,17	7,82	7,53	9,23	8,87
216,00	9,00	16,16	14,84	14,04	13,38	14,66	14,46	13,18	13,38	13,53	14,64	14,23
240,00	10,00	20,12	19,17	18,35	17,72	19,37	19,39	18,43	18,66	18,90	19,49	18,96
264,00	11,00	23,06	22,46	21,96	21,80	22,93	23,01	22,41	22,22	22,41	22,98	22,52
288,83	12,03	24,91	24,73	24,40	24,49	25,02	25,14	25,12	24,70	24,92	25,19	24,86
336,00	14,00	25,85	25,95	25,69	25,80	25,96	26,25	26,48	26,01	26,19	26,22	26,04
360,00	15,00	25,65	25,80	25,51	25,53	25,36	26,12	26,37	25,82	26,01	25,67	25,78
384,00	16,00	25,52	25,68	25,36	25,38	24,99	25,99	26,25	25,66	25,83	25,22	25,59



Figuras A34_a e b - MC-30-LD2-C - Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar

Tabela A31 - PERDAS DE MASSA durante a secagem, medidas nos CPs da MC-10-CZ-LD2-A

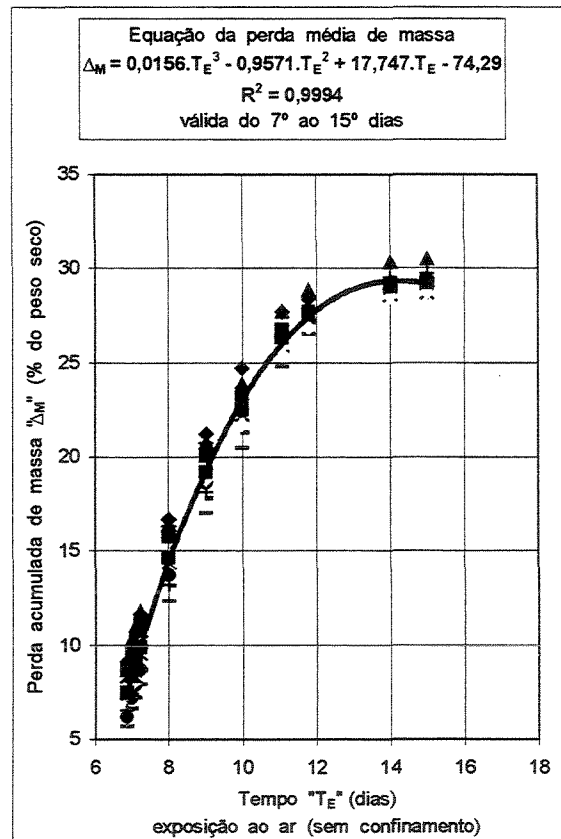
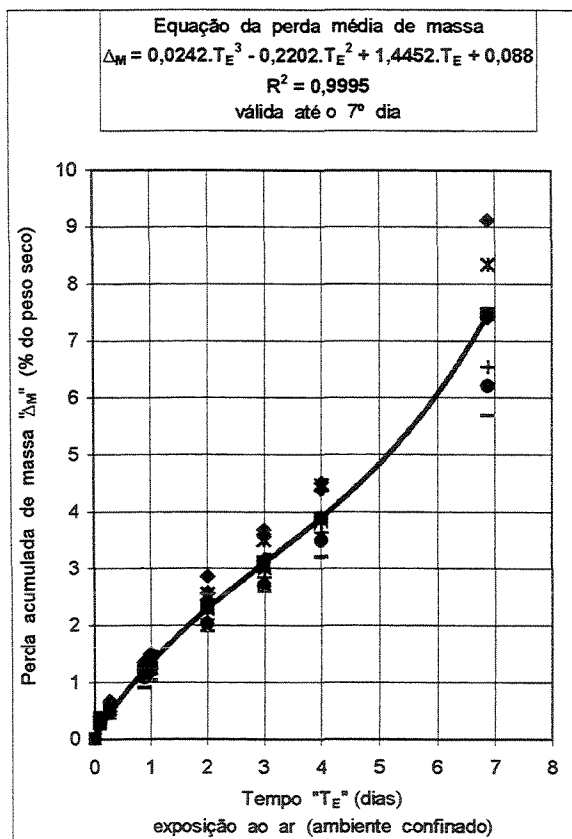
Tabela A01 - PERDA DE MASSA durante a secagem, médias nos CRS da MC-10-C2-LD2-A												
Corpos de prova		CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
P _{úmido}	(g)	227,14	229,12	233,31	229,93	229,65	230,00	230,66	229,28	230,06	225,93	229,51
PS	(g)	169,76	169,49	173,17	171,57	171,52	172,00	172,76	172,38	171,75	168,12	171,25
h _{PM}	(%)	33,80	35,18	34,73	34,02	33,89	33,72	33,51	33,01	33,95	34,39	34,02
PERDA ACUMULADA DE MASSA durante a secagem ao ar (em % do peso seco)												
Tempo "T _E "												
(horas)	(dias)	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3,17	0,13	0,34	0,35	0,38	0,46	0,34	0,27	0,23	0,21	0,20	0,36	0,31
5,42	0,23	0,48	0,48	0,53	0,61	0,50	0,38	0,35	0,34	0,31	0,46	0,45
17,67	0,74	1,07	1,08	1,10	1,17	1,20	0,80	0,78	0,76	0,72	0,90	0,96
23,92	1,00	1,36	1,37	1,38	1,46	1,56	1,06	1,05	1,05	0,98	1,27	1,25
47,50	1,98	2,92	2,74	2,70	2,74	3,21	2,47	2,57	2,65	2,41	3,51	2,79
71,75	2,99	4,99	4,14	3,90	3,98	4,73	3,87	3,65	3,79	3,37	4,94	4,14
96,00	4,00	7,39	6,06	5,54	5,18	6,52	5,51	4,86	4,97	4,53	6,72	5,73
115,33	4,81	9,11	7,50	6,80	6,39	7,84	6,90	6,21	6,40	5,76	8,52	7,14
164,75	6,86	11,79	9,99	9,07	8,61	10,40	9,66	8,75	8,94	8,17	12,12	9,75
167,83	6,99	12,24	10,67	9,63	9,12	10,76	10,17	9,25	9,33	8,60	12,33	10,21
170,25	7,09	13,10	11,44	10,38	9,85	11,47	11,07	10,07	10,05	9,29	12,93	10,97
174,50	7,27	14,53	12,83	11,68	11,10	12,64	12,49	11,30	11,34	10,63	14,04	12,26
189,25	7,89	17,86	16,12	14,97	14,64	16,24	16,28	14,55	14,60	14,21	17,36	15,68
192,00	8,00	18,53	16,79	15,64	15,33	16,95	17,01	15,22	15,27	14,92	18,00	16,37
216,00	9,00	22,68	21,43	20,62	20,35	21,52	21,63	19,92	19,97	20,07	22,09	21,03
240,00	10,00	25,58	24,84	24,10	24,01	25,10	25,15	23,41	23,39	23,76	25,28	24,46
264,00	11,00	27,69	27,55	26,87	26,21	27,36	27,39	25,92	25,53	26,11	27,62	26,82
336,00	14,00	30,20	31,39	30,84	30,20	30,29	30,05	29,65	29,17	30,12	30,72	30,26
360,00	15,00	30,41	31,66	31,15	30,42	30,31	30,34	30,00	29,48	30,36	30,78	30,49



Figuras A35_a e b - MC-10-CZ-LD2-A - Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar

Tabela A32 - PERDAS DE MASSA durante a secagem, medidas nos CPs da MC-10-CZ-LD2-B

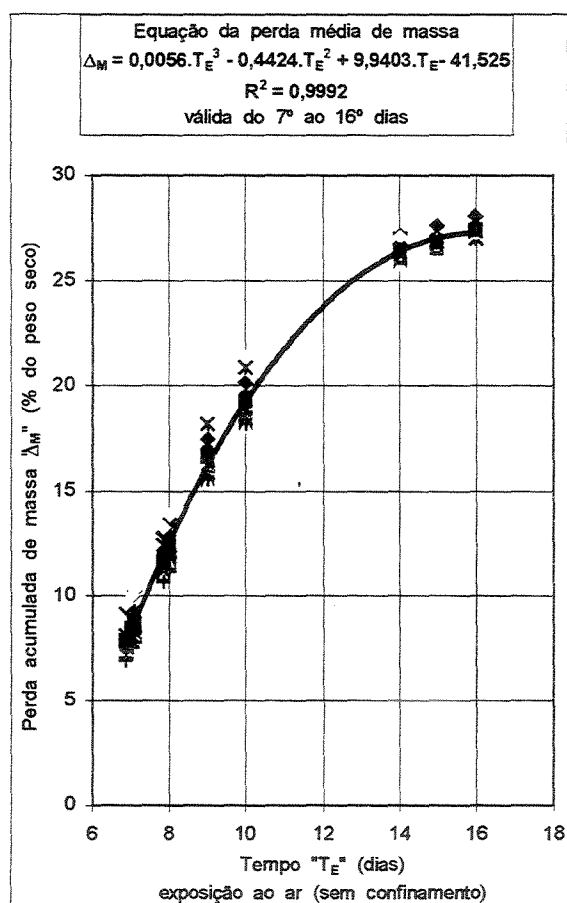
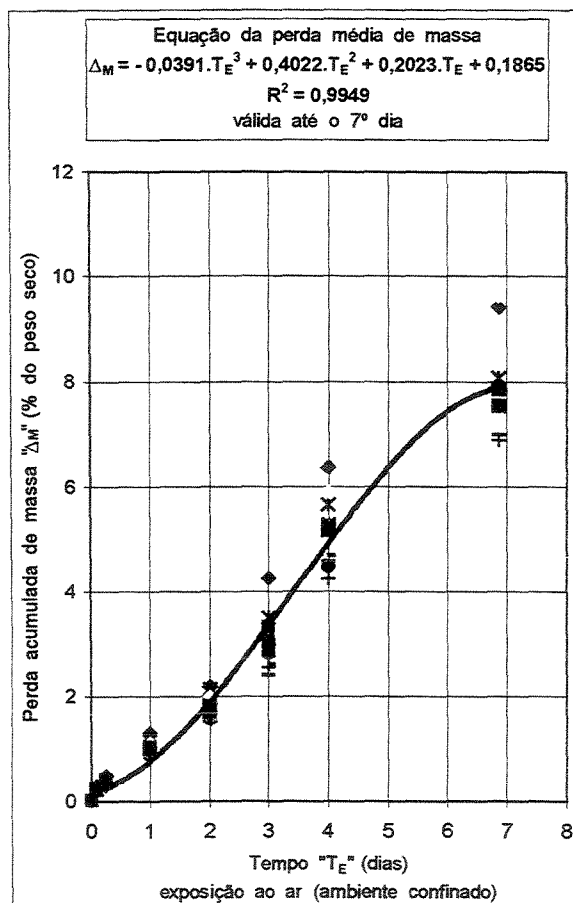
Corpos de prova		CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
P _{úmido}	(g)	236,96	235,30	240,80	234,75	235,15	236,68	239,08	235,42	238,66	236,74	236,95
PS	(g)	178,73	177,86	180,15	177,71	178,41	179,31	179,98	177,74	180,49	179,60	179,00
h _{PM}	(%)	32,5799	32,30	33,67	32,10	31,80	31,99	32,84	32,45	32,23	31,82	32,38
Tempo "T _E "		PERDA ACUMULADA DE MASSA durante a secagem ao ar (em % do peso seco)										
(horas)	(dias)	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,25	0,09	0,34	0,37	0,31	0,29	0,30	0,26	0,28	0,34	0,22	0,24	0,29
6,50	0,27	0,68	0,56	0,51	0,52	0,54	0,52	0,49	0,57	0,37	0,49	0,52
21,25	0,89	1,35	1,14	1,09	1,13	1,19	1,08	1,18	1,40	0,90	1,25	1,17
24,00	1,00	1,50	1,26	1,23	1,25	1,34	1,20	1,29	1,52	1,04	1,41	1,30
48,00	2,00	2,85	2,25	2,24	2,28	2,54	2,02	2,10	2,42	1,90	2,57	2,32
72,00	3,00	3,68	2,96	2,98	3,00	3,50	2,70	2,83	3,23	2,61	3,56	3,10
96,00	4,00	4,50	3,74	3,76	3,70	4,47	3,49	3,62	3,96	3,20	4,39	3,88
165,00	6,88	9,11	8,79	8,69	7,41	8,33	6,21	6,54	6,58	5,69	7,41	7,48
168,00	7,00	9,97	9,60	10,34	8,08	9,20	7,19	7,29	7,35	6,64	7,93	8,36
170,50	7,10	10,72	10,24	11,02	8,74	9,95	7,87	7,88	7,97	7,24	9,34	9,10
173,50	7,23	11,61	11,07	11,80	9,55	10,78	8,70	8,65	8,68	7,93	10,04	9,88
192,00	8,00	16,67	15,78	16,41	14,38	16,01	13,72	13,23	13,16	12,36	14,66	14,64
216,00	9,00	21,23	20,06	20,79	19,04	20,43	18,62	18,14	17,81	17,00	18,80	19,19
239,50	9,98	24,71	23,21	23,87	22,29	23,36	22,50	21,93	21,29	20,46	21,73	22,53
265,50	11,06	27,68	26,75	27,72	26,22	26,68	26,28	26,25	25,55	24,80	25,48	26,34
282,83	11,78	28,38	27,73	28,85	27,37	27,58	27,38	27,75	27,17	26,54	26,88	27,56
336,00	14,00	29,33	29,02	30,35	28,79	28,61	28,75	29,51	29,10	28,76	28,49	29,07
360,00	15,00	29,49	29,17	30,52	28,95	28,73	28,92	29,74	29,32	29,03	28,72	29,26



Figuras A36_a e b - MC-10-CZ-LD2-B - Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar

Tabela A33 - PERDAS DE MASSA durante a secagem, medidas nos CPs da MC-20-CZ-LD2-A

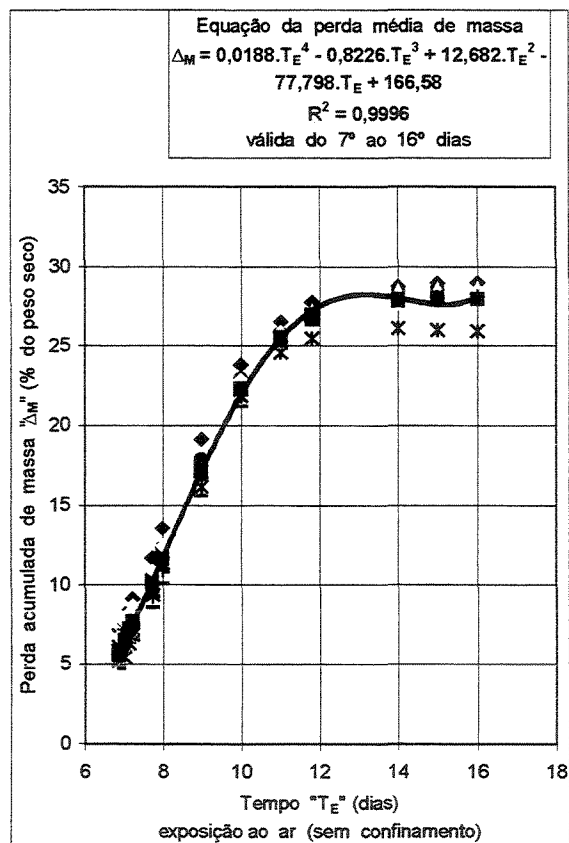
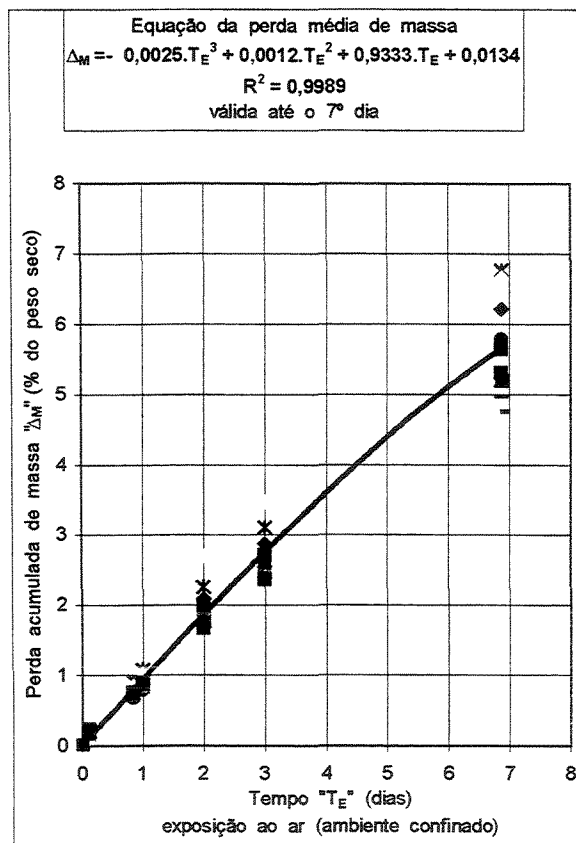
Corpos de prova	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média	
P _{umid} (g)	225,57	235,57	241,44	232,30	234,48	235,83	236,41	236,33	233,08	232,68	234,37	
PS (g)	170,68	178,08	183,26	176,44	178,50	179,38	179,15	179,34	177,08	176,63	177,85	
h _{PM} (%)	32,16	32,28	31,75	31,66	31,36	31,47	31,96	31,78	31,62	31,73	31,78	
Tempo "T _E "	PERDA ACUMULADA DE MASSA durante a secagem ao ar (em % do peso seco)											
(horas)	(dias)	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,25	0,09	0,29	0,24	0,23	0,23	0,23	0,20	0,16	0,18	0,16	0,19	0,21
6,00	0,25	0,47	0,41	0,37	0,36	0,39	0,32	0,29	0,33	0,30	0,37	0,36
24,00	1,00	1,30	1,04	1,00	1,00	1,14	0,88	0,87	0,95	0,84	1,10	1,01
48,00	2,00	2,18	1,88	1,85	1,75	2,13	1,57	1,56	1,68	1,52	1,98	1,81
72,00	3,00	4,25	3,32	2,99	2,88	3,50	2,82	2,55	2,60	2,41	3,06	3,04
96,00	4,00	6,37	5,24	5,24	5,29	5,66	4,48	4,25	4,69	4,57	5,90	5,17
164,75	6,86	9,42	7,54	7,50	7,54	8,08	7,53	6,89	7,51	7,00	9,62	7,86
168,50	7,02	10,00	8,20	7,89	8,05	8,95	8,31	7,53	8,14	7,54	10,02	8,46
170,17	7,09	10,26	8,42	8,13	8,26	9,25	8,59	7,77	8,35	7,78	10,27	8,71
188,17	7,84	12,98	11,06	10,91	11,22	12,41	11,92	10,66	11,29	10,67	13,25	11,64
192,00	8,00	13,65	11,66	11,49	11,86	13,15	12,64	11,26	11,82	11,18	13,85	12,26
216,00	9,00	17,48	15,44	15,41	16,29	18,20	16,90	15,58	16,19	15,91	18,70	16,61
240,00	10,00	20,13	18,21	18,08	18,78	20,87	19,47	18,19	18,71	18,51	21,36	19,23
336,58	14,02	27,17	25,79	25,79	26,40	26,98	26,54	26,40	26,43	25,84	27,07	26,44
359,75	14,99	27,61	26,53	26,34	26,86	26,83	26,98	26,97	26,80	26,29	26,90	26,81
383,67	15,99	28,07	27,44	27,03	27,31	26,97	27,53	27,73	27,48	27,10	27,25	27,39



Figuras A37_a e b - MC-20-CZ-LD2-A - Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar

Tabela A34 - PERDAS DE MASSA durante a secagem, medidas nos CPs da MC-20-CZ-LD2-B

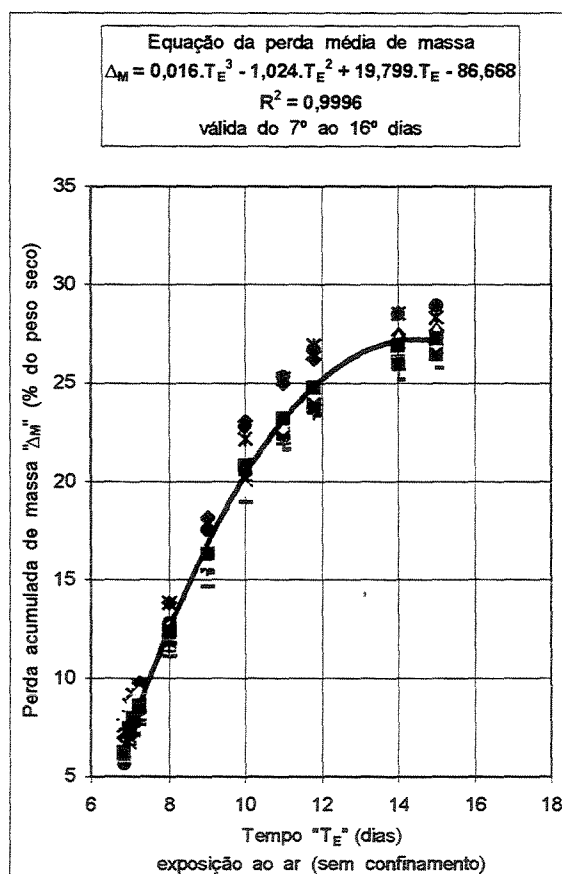
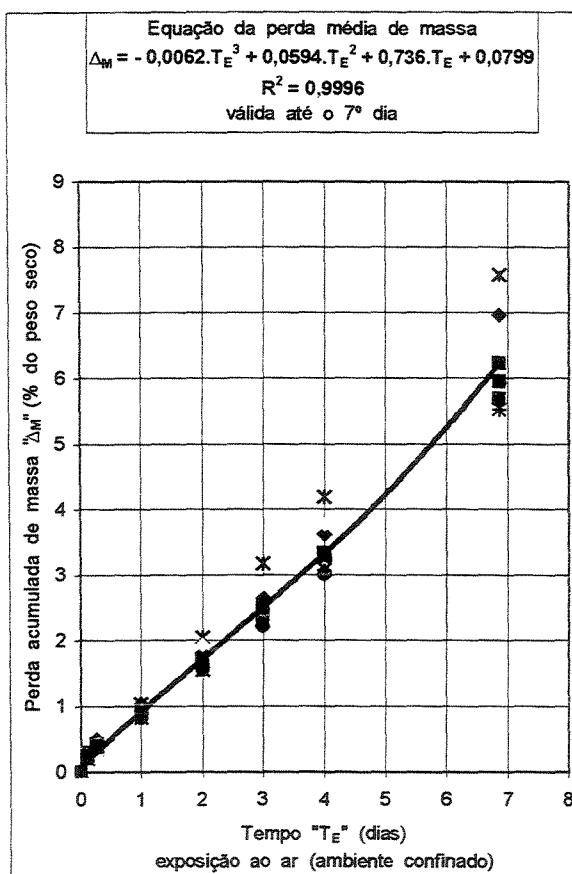
Corpos de prova	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média	
P _{umid} (g)	230,28	227,94	228,26	226,64	226,86	230,51	233,80	230,45	231,26	228,79	229,48	
PS (g)	173,40	172,19	172,01	171,48	174,45	174,89	177,23	174,74	175,66	173,80	173,99	
h _{PM} (%)	32,80	32,38	32,70	32,17	30,04	31,80	31,92	31,88	31,65	31,64	0,00	
PERDA ACUMULADA DE MASSA durante a secagem ao ar (em % do peso seco)												
Tempo "T _E "												
(horas)	(dias)	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,58	0,11	0,22	0,23	0,21	0,22	0,19	0,18	0,15	0,13	0,07	0,09	0,17
20,25	0,84	0,75	0,73	0,80	0,75	0,91	0,67	0,68	0,71	0,64	0,85	0,75
24,00	1,00	0,87	0,87	0,92	0,87	1,08	0,79	0,81	0,85	0,76	1,02	0,88
48,00	2,00	2,09	1,67	1,90	1,77	2,26	1,89	1,77	1,94	1,86	2,70	1,98
72,00	3,00	2,87	2,36	2,63	2,47	3,10	2,61	2,42	2,64	2,48	3,46	2,70
164,75	6,86	6,22	5,31	5,64	5,20	6,78	5,79	5,24	4,75	4,97	6,67	5,65
168,67	7,03	7,52	6,45	6,53	6,09	5,43	6,86	6,27	6,39	5,76	7,55	6,48
171,17	7,13	8,44	7,17	7,21	6,85	6,29	7,70	6,97	7,04	6,34	8,21	7,22
173,50	7,23	9,08	7,61	7,58	7,24	6,83	8,12	7,33	7,38	6,67	8,70	7,65
185,67	7,74	11,64	9,93	9,77	9,59	9,34	10,46	9,20	9,20	8,59	10,86	9,86
191,83	7,99	13,54	11,71	11,46	11,36	11,21	12,33	10,86	10,80	10,06	12,45	11,58
215,50	8,98	19,15	17,43	17,37	17,10	16,15	17,89	16,74	16,60	15,58	17,06	17,10
239,75	9,99	23,81	22,21	22,03	22,30	21,86	22,99	22,20	21,98	21,23	22,91	22,35
264,00	11,00	26,52	25,34	25,57	25,66	24,59	25,84	25,77	25,76	24,87	25,90	25,58
283,25	11,80	27,77	26,91	27,24	27,06	25,49	27,03	27,03	26,99	26,38	26,95	26,88
335,92	14,00	28,77	28,20	28,50	28,09	26,13	27,89	27,95	27,89	27,51	27,67	27,86
360,00	15,00	28,97	28,40	28,66	28,17	26,02	28,03	28,08	28,00	27,66	27,65	27,96
384,00	16,00	28,98	28,44	28,68	28,13	25,94	28,05	28,09	28,02	27,69	27,62	27,96



Figuras A38_a e b - MC-20-CZ-LD2-B - Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar

Tabela A35 - PERDAS DE MASSA durante a secagem, medidas nos CPs da MC-30-CZ-LD2-A

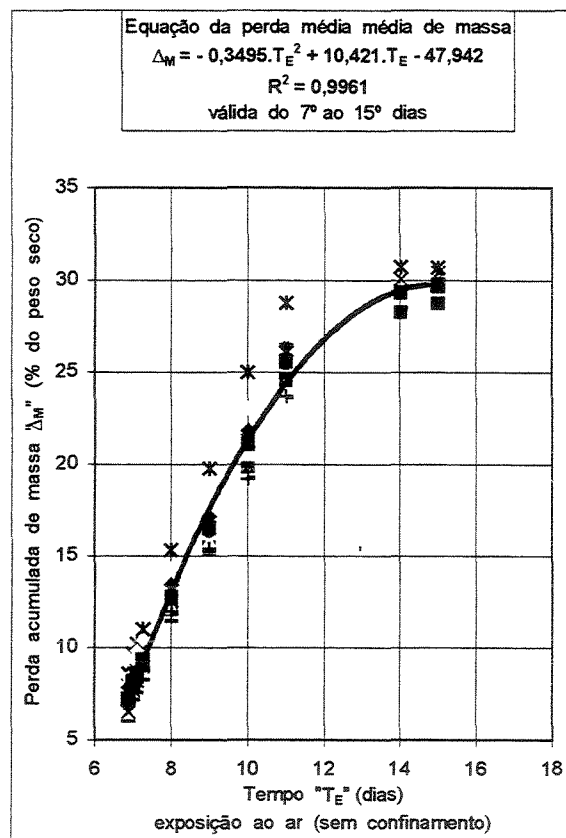
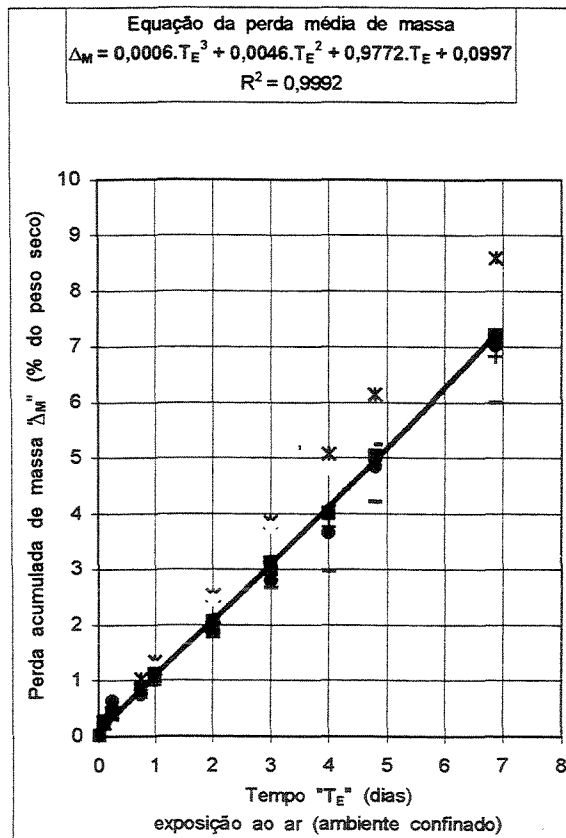
Corpos de prova		CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
P _{úmido}	(g)	225,56	227,99	232,99	225,93	222,09	229,23	228,14	229,24	230,38	226,13	227,77
PS	(g)	169,41	171,57	173,45	169,13	165,90	170,32	171,08	172,34	171,92	170,10	170,52
h _{PM}	(%)	33,14	32,88	34,33	33,58	33,87	34,59	33,35	33,02	34,00	32,94	33,57
PERDA ACUMULADA DE MASSA durante a secagem ao ar (em % do peso seco)												
Tempo "T _E "		CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
(horas)	(dias)											
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,50	0,10	0,27	0,24	0,20	0,21	0,20	0,19	0,16	0,19	0,37	0,12	0,22
6,33	0,26	0,50	0,43	0,36	0,35	0,39	0,35	0,32	0,35	0,51	0,28	0,38
24,00	1,00	1,03	0,89	0,82	0,83	1,04	0,83	0,83	0,89	0,95	0,94	0,91
48,00	2,00	1,80	1,63	1,55	1,56	2,04	1,55	1,58	1,68	1,68	1,93	1,70
72,00	3,00	2,64	2,42	2,32	2,29	3,17	2,22	2,30	2,45	2,38	2,86	2,51
96,00	4,00	3,62	3,26	3,14	3,08	4,19	3,01	3,06	3,23	3,00	3,77	3,34
164,50	6,85	6,97	5,95	5,70	5,53	7,58	5,67	5,52	5,92	5,76	7,74	6,23
168,00	7,00	8,45	7,28	7,21	6,73	8,64	7,11	6,61	7,10	6,72	8,48	7,43
170,25	7,09	9,03	7,87	7,78	7,36	9,16	7,76	7,21	7,67	7,15	8,81	7,98
173,75	7,24	9,79	8,55	8,46	7,99	9,64	8,51	7,87	8,28	7,63	9,22	8,59
192,00	8,00	13,85	12,15	12,29	11,85	13,83	12,79	11,40	11,73	11,14	12,57	12,36
216,00	9,00	18,21	16,20	16,41	15,69	17,79	17,57	15,54	15,40	14,69	15,94	16,35
240,00	10,00	23,06	20,65	20,82	20,10	22,17	22,82	20,05	19,72	18,97	19,66	20,80
264,00	11,00	24,98	22,45	22,78	22,25	25,23	25,33	21,98	21,66	21,93	23,53	23,21
283,00	11,79	26,23	23,83	24,25	23,98	26,90	26,70	23,50	23,37	23,94	25,21	24,79
336,00	14,00	27,46	26,04	27,25	27,07	28,52	28,51	25,70	25,17	26,36	27,00	26,91
360,00	15,00	27,68	26,43	27,64	27,29	28,34	28,93	26,52	25,77	26,87	27,00	27,25



Figuras A39_a e b - MC-30-CZ-LD2-A - Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar

Tabela A36 - PERDAS DE MASSA durante a secagem, medidas nos CPs da MC-30-CZ-LD2-B

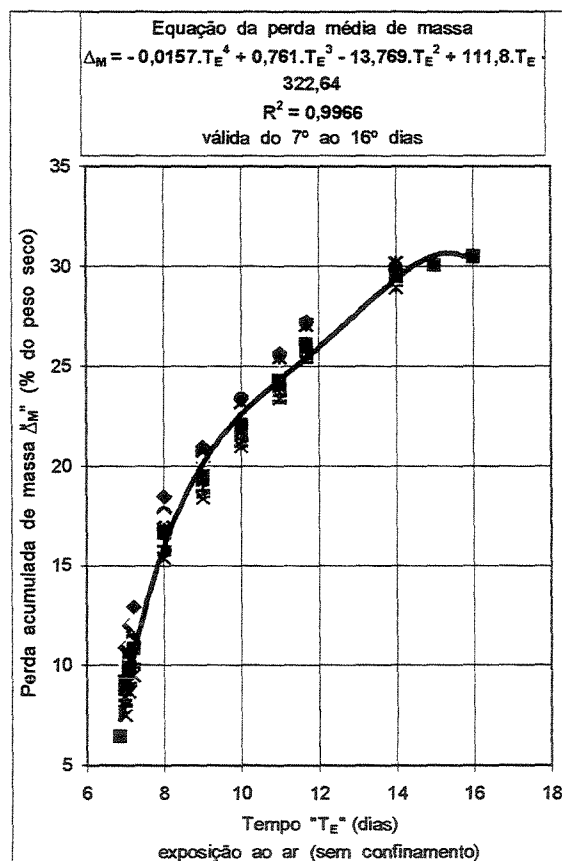
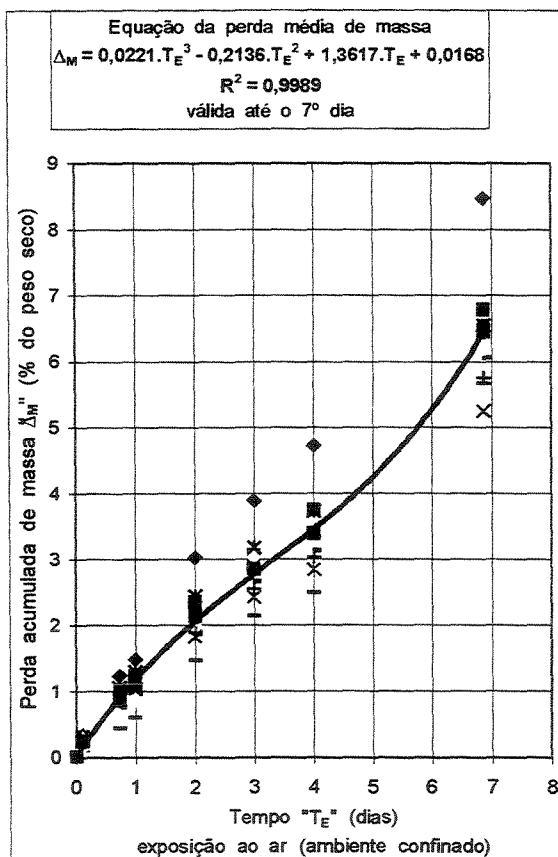
Corpos de prova		CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
P _{umid}	(g)	226,49	231,62	235,65	227,94	227,02	232,43	234,10	225,02	232,14	229,21	230,16
PS	(g)	167,65	171,53	172,83	166,31	166,70	171,80	172,97	166,57	170,40	169,77	169,65
h _{PM}	(%)	35,10	35,03	36,35	37,06	36,18	35,29	35,34	35,09	36,23	35,01	35,67
Tempo "T _E "		PERDA ACUMULADA DE MASSA durante a secagem ao ar (em % do peso seco)										
(horas)	(dias)	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,25	0,09	0,24	0,26	0,23	0,24	0,25	0,20	0,20	0,23	0,19	0,18	0,22
5,67	0,24	0,41	0,42	0,39	0,40	0,43	0,63	0,34	0,40	0,31	0,35	0,41
18,00	0,75	0,83	0,85	0,80	0,84	1,02	0,74	0,77	0,88	0,69	0,85	0,83
24,00	1,00	1,10	1,11	1,07	1,08	1,33	1,01	1,04	1,18	0,91	1,24	1,11
48,00	2,00	2,03	1,98	1,96	1,94	2,51	1,86	1,89	2,16	1,78	2,45	2,06
72,00	3,00	3,13	3,00	2,96	2,92	3,85	2,79	2,89	3,21	2,67	3,77	3,12
96,00	4,00	4,09	3,89	3,85	3,78	5,08	3,66	3,76	4,17	2,96	4,82	4,01
115,08	4,80	5,14	4,79	4,69	4,62	6,15	4,85	4,97	5,25	4,22	5,82	5,05
165,08	6,88	7,83	7,22	6,83	6,49	8,60	7,04	6,83	6,98	6,00	8,36	7,22
168,00	7,00	8,60	7,91	7,87	7,65	9,65	7,84	7,74	7,79	7,16	9,38	8,16
170,25	7,09	9,08	8,35	8,37	8,20	10,20	8,24	8,13	8,16	7,54	9,81	8,61
173,92	7,25	9,92	9,04	9,14	8,98	11,00	9,00	8,75	8,89	8,25	10,41	9,34
192,00	8,00	13,42	12,07	12,21	12,54	15,31	12,64	11,96	11,87	11,45	14,25	12,77
216,00	9,00	17,15	15,47	15,83	16,52	19,76	16,36	15,37	15,28	15,05	18,08	16,49
240,00	10,00	21,84	19,86	20,55	21,28	25,00	21,24	19,20	19,24	19,68	23,05	21,09
264,00	11,00	26,38	24,57	25,51	26,19	28,76	25,49	23,71	23,67	24,50	27,02	25,58
336,50	14,02	29,13	28,27	29,46	30,06	30,71	29,23	28,78	28,45	29,50	29,42	29,30
360,00	15,00	29,45	28,72	29,93	30,41	30,65	29,69	29,35	29,01	30,06	29,49	29,68



Figuras A40_a e b - MC-30-CZ-LD2-B - Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar

Tabela A37 - PERDAS DE MASSA durante a secagem, medidas nos CPs da MC-40-CZ-LD2-A

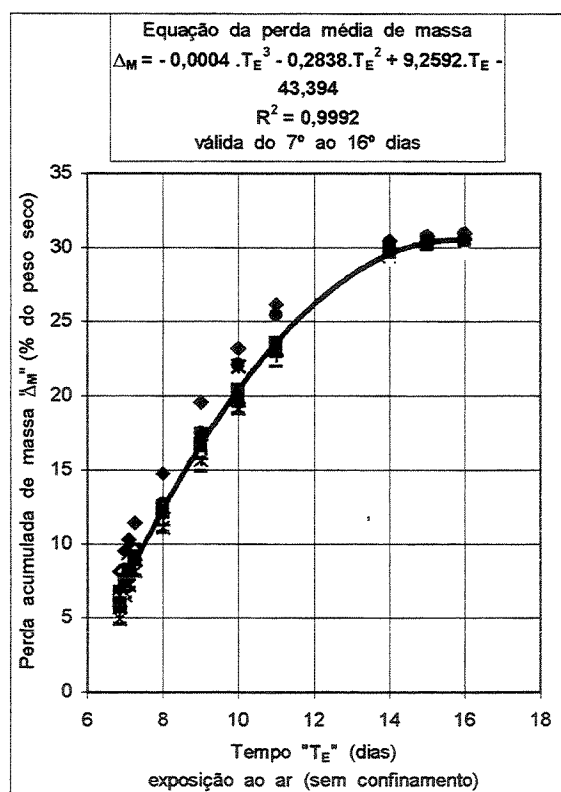
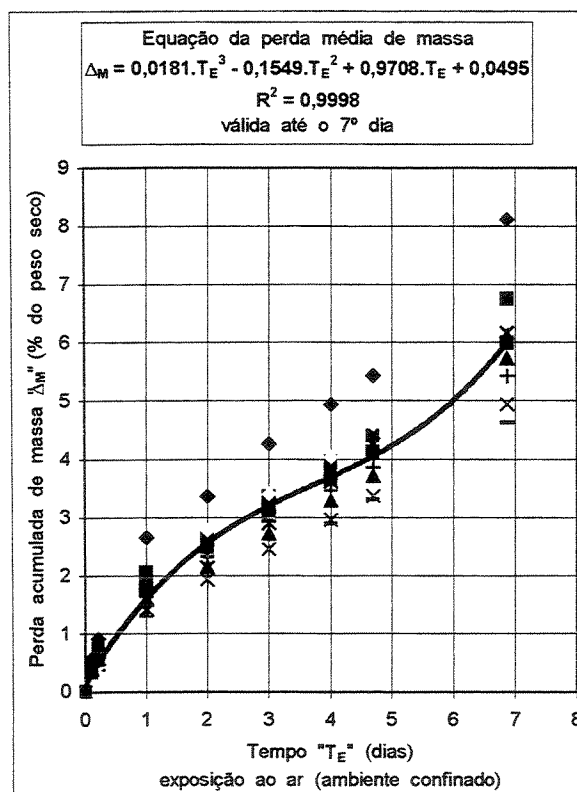
Corpos de prova		CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
P _{úmido}	(g)	219,56	227,86	225,54	224,95	221,97	224,06	225,59	223,19	218,28	221,60	223,26
PS	(g)	160,92	166,49	164,81	165,04	162,07	163,77	165,31	162,83	159,54	162,51	163,33
h _{PM}	(%)	36,44	36,86	36,85	36,30	36,96	36,81	36,46	37,07	36,82	36,36	36,69
Tempo "T _E "		PERDA ACUMULADA DE MASSA durante a secagem ao ar (em % do peso seco)										
(horas)	(dias)	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,50	0,10	0,34	0,31	0,30	0,24	0,24	0,25	0,23	0,20	0,11	0,14	0,24
17,50	0,73	1,23	1,02	0,99	0,86	1,06	0,94	0,78	0,75	0,44	0,65	0,87
24,00	1,00	1,48	1,23	1,18	1,04	1,30	1,19	0,97	0,96	0,60	0,87	1,08
48,00	2,00	3,03	2,35	2,05	1,83	2,44	2,23	1,89	1,85	1,47	2,15	2,13
72,00	3,00	3,89	3,06	2,66	2,43	3,18	2,89	2,54	2,67	2,14	3,03	2,85
96,00	4,00	4,73	3,75	3,19	2,84	3,73	3,48	3,04	3,13	2,49	3,53	3,39
164,75	6,86	8,46	6,79	5,75	5,25	6,54	6,55	5,75	6,06	5,67	7,68	6,45
168,00	7,00	10,89	9,18	8,24	7,51	9,00	8,79	7,94	8,01	8,22	10,00	8,78
170,50	7,10	11,98	10,20	9,45	8,67	10,34	9,90	8,95	9,06	9,08	11,06	9,87
173,00	7,21	12,94	11,22	10,41	9,49	11,40	11,03	9,90	9,97	10,01	12,16	10,85
192,00	8,00	18,46	16,73	16,12	15,38	17,41	17,66	15,98	15,73	15,55	17,51	16,65
216,00	9,00	20,97	19,30	18,89	18,40	20,52	20,60	18,78	18,69	18,47	20,32	19,50
240,00	10,00	23,39	21,76	21,38	21,01	23,21	23,39	21,40	21,29	20,99	22,63	22,04
264,00	11,00	25,65	24,03	23,64	23,41	25,45	25,58	23,55	23,53	23,23	24,67	24,27
280,50	11,69	27,22	25,83	25,55	25,88	27,09	27,18	25,45	25,44	25,19	26,21	26,11
336,00	14,00	29,88	29,44	29,41	28,94	30,17	29,99	29,05	29,44	29,17	29,40	29,49
360,00	15,00	30,36	30,10	30,05	29,53	30,44	30,60	29,77	30,16	29,87	29,70	30,06
384,00	16,00	30,80	30,63	30,52	29,88	30,67	31,02	30,32	30,72	30,36	29,92	30,48



Figuras A41_a e b - MC-40-CZ-LD2-A - Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar

Tabela A38 - PERDAS DE MASSA durante a secagem, medidas nos CPs da MC-40-CZ-LD2-B

Corpos de prova	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
P _{umid} (g)	223,02	224,38	226,57	229,74	229,43	230,53	231,98	230,79	227,07	222,44	227,60
PS (g)	163,74	164,26	165,72	168,37	168,36	169,09	170,12	168,80	165,55	163,60	166,76
h _{PM} (%)	36,20	36,60	36,72	36,45	36,27	36,34	36,36	36,72	37,16	35,97	36,48
PERDA ACUMULADA DE MASSA durante a secagem ao ar (em % do peso seco)											
Tempo "T _E "											
(horas) (dias)	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média
0,00 0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,50 0,10	0,56	0,49	0,39	0,33	0,33	0,33	0,29	0,28	0,22	0,23	0,34
5,08 0,21	0,90	0,74	0,57	0,46	0,49	0,56	0,46	0,44	0,39	0,45	0,55
24,00 1,00	2,65	2,05	1,58	1,40	1,41	1,89	1,64	1,73	1,30	1,76	1,74
48,00 2,00	3,36	2,65	2,14	1,93	2,13	2,61	2,33	2,52	2,32	2,77	2,48
72,00 3,00	4,26	3,35	2,72	2,45	2,90	3,29	2,93	3,09	2,97	3,40	3,14
96,00 4,00	4,95	3,96	3,28	2,95	3,62	3,86	3,46	3,67	2,89	4,03	3,67
112,50 4,69	5,44	4,41	3,72	3,37	4,25	4,27	3,86	4,10	3,30	4,60	4,13
164,67 6,86	8,12	6,76	5,73	4,95	6,17	6,16	5,43	5,62	4,62	6,37	5,99
168,00 7,00	9,48	7,92	7,14	6,52	7,79	7,63	6,90	7,35	6,39	8,12	7,52
170,50 7,10	10,28	8,63	7,81	7,20	8,48	8,46	7,59	7,97	7,03	8,77	8,22
174,25 7,26	11,38	9,58	8,94	8,14	9,28	9,49	8,55	8,92	7,83	9,38	9,15
192,00 8,00	14,76	12,52	11,88	11,09	12,50	12,69	11,25	11,81	10,78	12,28	12,16
216,00 9,00	19,55	16,78	16,33	15,66	17,42	17,51	15,72	16,22	14,92	16,44	16,65
240,00 10,00	23,18	19,78	19,18	19,12	21,99	22,11	19,27	19,46	18,80	21,00	20,39
264,00 11,00	26,15	22,98	22,34	22,34	24,89	25,48	22,72	22,74	22,01	23,70	23,53
336,00 14,00	30,45	29,42	29,33	29,30	29,82	30,36	29,66	29,69	29,64	29,23	29,69
360,00 15,00	30,77	30,57	30,11	29,90	29,91	30,71	30,24	30,35	30,37	29,41	30,23
384,00 16,00	30,96	30,65	30,57	30,27	30,06	30,90	30,55	30,69	30,77	29,66	30,51



Figuras A42_a e b - MC-40-CZ-LD2-B - Gráficos de perdas de massa na secagem ao ar

Tabela A39 - RESULTADOS DAS ANÁLISES FEITAS NA MASSA CERÂMICA COM 0% DE LODO (TESTEMUNHO)

		Data de preparação da massa cerâmica: 09/03/2001																															
		h _{SOLO, 8T} = 7,0 % h _{LODO} = nessa massa não se utilizou lodo Δ _{M,600} = 10,5 %																															
		MC-0-A (1ª moldagem)										MC-0-B (2ª moldagem)										MC-0-C (3ª moldagem)											
		Data de moldagem dos CPs: 12/03/2001										Data de moldagem dos CPs: 21/05/2001										Data de moldagem dos CPs: 28/05/2001											
Descr.	Unid.	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09*	CP-10*	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Média	
P _{untd}	g	233,66	236,47	241,31	234,12	235,87	236,87	237,37	238,16	-	-	237,52	239,07	240,92	237,81	236,37	237,11	235,10	235,88	236,82	232,78	232,69	237,28	238,84	236,00	234,33	239,83	237,08	237,45	232,75	234,47	236,57	
PS	g	181,60	183,99	188,08	182,31	184,39	183,80	183,63	184,16	-	-	183,15	184,80	185,83	184,54	182,86	181,63	178,58	180,06	181,34	178,74	176,45	180,56	181,96	179,91	178,44	183,44	181,14	180,86	178,38	179,38	181,92	
h _{PM}	%	28,67	28,52	28,30	28,42	27,92	28,87	29,27	29,32	-	-	29,69	29,51	29,65	28,87	29,26	30,55	31,65	31,00	30,59	30,24	31,87	31,41	31,26	31,18	31,32	30,74	30,88	31,29	30,48	30,71	30,05	
P _{pq}	g	161,57	164,03	168,22	-	166,31	166,49	163,64	165,56	-	-	-	-	-	-	-	161,66	159,06	161,74	161,52	159,90	156,87	160,72	163,52	160,39	160,15	-	-	-	-	-	162,43	
Δ _{M,pq}	%	11,03	10,85	10,56	-	9,81	9,42	10,89	10,10	-	-	-	-	-	-	-	10,99	10,93	10,17	10,93	10,54	11,10	10,99	10,13	10,85	10,25	-	-	-	-	-	10,56	
P _{pi}	g	199,78	202,20	207,13	-	204,04	200,58	-	203,13	-	-	-	-	-	-	-	198,72	195,60	198,87	199,06	197,16	192,85	197,74	200,96	197,31	197,30	-	-	-	-	-	199,53	
A	%	10,01	9,90	10,13	-	10,86	9,13	-	10,30	-	-	-	-	-	-	-	9,41	9,53	10,45	9,77	10,31	9,29	9,51	10,44	9,67	10,57	-	-	-	-	-	9,94	
V _{orig}	dm³	0,1257	0,1256	0,1275	0,1263	0,1256	0,1266	0,1267	0,1256	-	-	0,1257	0,1256	0,1275	0,1263	0,1256	0,1266	0,1267	0,1256	0,1267	0,1268	0,1257	0,1256	0,1275	0,1263	0,1256	0,1266	0,1267	0,1256	0,1267	0,1268	0,1263	
V _{pq}	dm³	0,1000	0,1010	0,1020	-	0,1020	0,1000	-	0,1000	-	-	-	-	-	-	-	0,0975	0,0987	0,0987	0,0987	0,0981	0,0946	0,0977	0,0983	0,0971	0,0954	-	-	-	-	-	0,0986	
RV	%	20,45	19,59	20,00	-	18,79	21,01	-	20,38	-	-	-	-	-	-	-	22,99	23,68	21,42	22,10	22,63	24,74	22,21	22,90	23,12	24,04	-	-	-	-	-	21,88	
γ _{PM}	kg/dm³	1,86	1,88	1,89	1,85	1,88	1,87	1,87	1,90	-	-	1,89	1,90	1,89	1,88	1,88	1,87	1,86	1,88	1,87	1,84	1,85	1,89	1,87	1,87	1,87	1,89	1,87	1,89	1,84	1,85	1,87	
γ _{pq}	kg/dm³	1,62	1,62	1,65	-	1,63	1,66	-	1,66	-	-	-	-	-	-	-	1,66	1,64	1,64	1,64	1,63	1,66	1,65	1,66	1,65	1,65	1,68	-	-	-	-	1,65	
γ _{pi}	kg/dm³	2,00	2,00	2,03	-	2,00	2,01	-	2,03	-	-	-	-	-	-	-	2,04	2,02	2,01	2,02	2,01	2,04	2,02	2,04	2,03	2,07	-	-	-	-	-	2,02	
σ _{C,105}	MPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,02	3,55	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,59	3,01	3,98	3,63	
σ _{C,950}	MPa	4,86	4,40	4,33	-	4,55	4,55	-	4,15	-	-	-	-	-	-	-	5,04	5,01	-	-	-	-	-	-	3,58	3,31	-	-	-	-	-	4,38	
σ _{T,105}	MPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,94	0,80	0,78	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,67	0,90	-	-	-	0,82	
σ _{T,950}	MPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,42	0,31	0,36	0,45	0,41	0,45	-	-	-	-	-	-	0,40		
LEGENDA												P _{pq} = peso dos CPs pós-queima (à temperatura de 950 °C) Δ _{M,pq} = perda de massa pós-queima = [(PS - P _{pq}) / PS] x 100 P _{pi} = peso dos CPs pós-imersão em água, 24 horas, temperat. ambiente A = percentual de absorção d'água = [(P _{pi} - PS) / PS] x 100 V _{orig} = volume original das formas de cada CP V _{pq} = volume do corpo de prova pós-queima RV = percentual de retração volumétrica = [(V _{orig} - V _{pq}) / V _{orig}] x 100 γ _{PM} = massa específica aparente do CP pós-moldagem = P _{untd} / V _{orig} γ _{pq} = massa específica aparente do CP pós-queima = P _{pq} / V _{pq}										γ _{pi} = massa específica aparente do CP pós-imersão = P _{pi} / V _{pq} σ _{T,105} = resistência à flexão dos corpos de prova pós-secagem a 105 °C σ _{T,950} = resistência à flexão dos corpos de prova pós-queima a 950 °C σ _{C,105} = resistência à compressão dos corpos de prova pós-secagem a 105 °C σ _{C,950} = resistência à compressão dos corpos de prova pós-queima a 950 °C OBSERVAÇÕES: - Os CPs identificados com (*) apresentavam trincas transversais que podem ter comprometido os resultados do ensaio de resistência à flexão.											
h _{SOLO, 8T} = umidade higroscópica do solo quando da preparação da massa cerâmica h _{LODO} = umidade higroscópica do lodo quando da preparação da massa cerâmica Δ _{M,600} = perda de massa da massa cerâmica sob temperatura de 600 °C. MC = massa cerâmica CP = corpo de prova (tijolo maciço com dimensões nominais de 10 x 5 x 2,5 cm) P _{untd} = peso da massa cerâmica úmida (logo após a moldagem dos CPs) PS = peso dos CPs efetivamente secos (após 24 horas em estufa a 105 °C) h _{PM} = teor de umidade dos CPs pós-moldagem = [(P _{untd} - PS) / PS] x 100																																	

Tabela A40 - RESULTADOS DAS ANÁLISES FEITAS NA MASSA CERÂMICA COM 10% DE LODO 1

Tabela A45 - RESULTADOS DAS ANÁLISES FEITAS NA MASSA CERÂMICA SOB 10% DE UEDS																																
Data de preparação da massa cerâmica: 16/03/2001																																
h _{sol,ar} : 6,0 % h _{lodo} : 5,5 % Δ _{M,600} : 13,0 %																																
		MC-10-LD1-A (1ª moldagem)										MC-10-LD1-B (2ª moldagem)										MC-10-LD1-C (3ª moldagem)										
		Data de moldagem dos CPs: 19/03/2001										Data de moldagem dos CPs: 04/06/2001										Data de moldagem dos CPs: 11/08/2001										
Descr.	Unid.	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	CP-01*	CP-02*	CP-03*	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04*	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08*	CP-09	CP-10	Médias
P _{unid}	g	227,21	231,93	231,59	226,75	228,28	228,89	229,52	230,34	-	-	222,85	228,35	228,75	226,10	221,03	229,04	228,67	221,61	222,01	222,84	227,58	223,48	230,11	230,1	227,79	227,24	230,74	228,51	230,85	227,87	227,40
PS	g	171,52	175,7	175,25	171,43	172,76	171,25	173,14	173,48	-	-	167,30	172,28	173,12	170,45	166,52	172,33	171,93	168,80	168,89	167,65	171,12	168,82	171,69	172,63	171,19	170,41	173,58	170,18	174,32	172,28	171,21
h _{FM}	%	32,47	32,00	32,15	32,27	32,14	32,40	32,56	32,78	-	-	33,20	32,56	32,71	32,70	32,73	32,61	33,00	32,86	32,95	32,82	32,99	34,13	34,03	33,29	33,06	33,35	32,93	33,08	32,43	32,34	32,82
P _{pa}	g	148,93	150,67	-	147,35	150,2	147,04	148,85	150,39	-	-	143,63	148,15	149,74	148,78	143,91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	146,16	149,08	147,27	149,88	147,88
Δ _{M,60}	%	14,34	14,25	-	14,05	13,05	14,14	14,03	13,31	-	-	14,15	14,00	13,51	13,89	13,58	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14,23	14,11	13,47	14,02	13,35
P _{pi}	g	180,76	186,02	-	185,95	181,83	-	187,79	182,24	-	-	178,86	188,05	180,88	185,38	183,76	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	179,78	188,27	188,07	189,05	185,80
A	%	5,39	5,87	-	8,47	10,93	-	8,48	5,05	-	-	6,91	8,01	10,28	8,76	10,35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,50	7,31	10,51	8,45	8,17
V _{orig}	dm ³	0,1257	0,1258	0,1275	0,1263	0,1258	0,1268	0,1267	0,1258	-	-	0,1257	0,1258	0,1275	0,1263	0,1258	0,1268	0,1267	0,1258	0,1267	0,1268	0,1257	0,1258	0,1275	0,1263	0,1258	0,1268	0,1267	0,1258	0,1267	0,1268	0,1263
V _{pa}	dm ³	0,0920	0,0980	-	0,0980	0,1000	-	0,0980	0,1000	-	-	0,0970	0,0961	0,0988	0,0950	0,0970	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0938	0,0973	0,0988	0,0973	0,0975
RV	%	28,81	21,97	-	22,41	20,38	-	21,86	20,38	-	-	22,83	23,48	22,51	24,07	22,77	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25,91	23,20	22,83	23,2	23,11
γ _{pm}	kg/dm ³	1,81	1,85	1,82	1,80	1,82	1,79	1,81	1,83	-	-	1,77	1,82	1,80	1,79	1,78	1,81	1,81	1,78	1,75	1,78	1,77	1,82	1,80	1,79	1,78	1,81	1,81	1,78	1,75	1,78	1,78
γ _{pa}	kg/dm ³	1,80	1,54	-	1,50	1,50	-	1,50	1,50	-	-	1,48	1,54	1,52	1,53	1,48	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,56	1,53	1,52	1,54	1,52
γ _{pi}	kg/dm ³	1,86	1,80	-	1,90	1,82	-	1,90	1,82	-	-	1,84	1,84	1,93	1,93	1,89	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,92	1,91	1,94	1,94	1,91
σ _{C,105}	MPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,35	3,48	1,92	2,49	3,05	-	-	-	-	-	-	-	2,85
σ _{C,360}	MPa	3,99	4,12	-	3,61	3,55	-	3,07	3,36	-	-	-	-	-	3,56	2,87	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,12	2,81
σ _{T,105}	MPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,13	1,04	0,91	-	-	-	-	-	-	0,23	0,75	-	-	-	-	0,81
σ _{T,950}	MPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,55	0,31	0,36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,00	0,71	0,45	-	0,50
LEGENDA												P _{pa} = peso dos CPs pós-queima (à temperatura de 950 °C)										γ _{pi} = massa específica aparente do CP pós-imersão = P _{pi} / V _{pa}										
h _{sol,ar} = umidade higroscópica do solo quando da preparação da massa cerâmica												Δ _{M,60} = perda de massa pós-queima = [(PS - P _{pa}) / PS] x 100										σ _{T,105} = resistência à flexão dos corpos de prova pós-secagem a 105 °C										
h _{lodo} = umidade higroscópica do lodo quando da preparação da massa cerâmica												P _{pa} = peso dos CPs pós-imersão em água, 24 horas, temperat. ambiente										σ _{T,950} = resistência à flexão dos corpos de prova pós-queima a 950 °C										
Δ _{M,600} = perda de massa da massa cerâmica sob temperatura de 600 °C.												A = percentual de absorção d'água = [(P _{pi} - PS) / PS] x 100										σ _{C,105} = resistência à compressão dos corpos de prova pós-secagem a 105 °C										
MC = massa cerâmica												V _{orig} = volume original das formas de cada CP										σ _{C,950} = resistência à compressão dos corpos de prova pós-queima a 950 °C										
CP = corpo de prova (tijolo maciço com dimensões nominais de 10 x 5 x 2,5 cm)												V _{pa} = volume do corpo de prova pós-queima										OBSERVAÇÕES:										
P _{unid} = peso da massa cerâmica úmida (logo após a moldagem dos CPs)												RV = percentual de retração volumétrica = [(V _{orig} - V _{pa}) / V _{orig}] x 100										- Os CPs identificados com (*) apresentavam trincas transversais que podem										
PS = peso dos CPs efetivamente secos (após 24 horas em estufa a 105 °C)												γ _{pm} = massa específica aparente do CP pós-moldagem = P _{unid} / V _{orig}										ter comprometido os resultados do ensaio de resistência à flexão.										
h _{FM} = teor de umidade dos CPs pós-moldagem = [(P _{unid} - PS) / PS] x 100												γ ₆₀ = massa específica aparente do CP pós-queima = P _{pi} / V _{pa}										- Os resultados em destaque (amarelo) foram estatisticamente descartados										

Tabela A41 - RESULTADOS DAS ANÁLISES FEITAS NA MASSA CERÂMICA COM 20% DE LODO 1

		Data de preparação da massa cerâmica: 11/04/2001																															
		MC-20-LD1-A (1ª moldagem)										MC-20-LD1-B (2ª moldagem)										MC-20-LD1-C (3ª moldagem)											
		Data de moldagem dos CPs: 16/04/2001										Data de moldagem dos CPs: 18/06/2001										Data de moldagem dos CPs: 25/06/2001											
Descr.	Unid.	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	CP-01*	CP-02*	CP-03	CP-04	CP-05*	CP-06	CP-07*	CP-08	CP-09	CP-10	CP-01	CP-02*	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07*	CP-08*	CP-09	CP-10	Médias	
P _{unmd}	g	220,54	220,35	222,99	221,71	222,33	221,13	222,85	223,22	-	-	221,20	225,50	227,06	223,62	220,75	220,99	224,70	219,56	220,92	219,81	220,52	223,34	228,94	223,65	219,31	220,92	225,54	220,48	221,88	223,82	222,31	
PS	g	164,96	163,97	166,60	165,42	165,81	165,30	166,89	166,55	-	-	160,17	164,54	165,80	163,88	160,78	159,98	162,79	160,68	159,70	158,84	159,70	162,12	164,51	162,19	159,10	160,14	163,10	159,88	160,84	162,89	162,75	
h _{PM}	%	33,69	34,38	33,85	34,03	34,09	33,77	33,53	34,03	-	-	38,10	37,05	36,95	38,45	37,30	38,14	38,03	36,64	38,33	37,75	38,08	37,76	37,95	37,89	37,84	37,95	38,28	37,90	37,95	37,41	36,81	
P _{pq}	g	136,29	135,35	138,30	139,47	137,19	138,02	138,18	-	-	-	132,83	136,96	139,54	135,91	134,71	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	132,89	135,78	135,02	133,78	136,71	136,29
Δ _{M,pq}	%	17,38	17,45	16,99	15,89	17,26	16,50	17,20	-	-	-	17,07	16,76	15,84	17,07	16,21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17,02	16,76	15,55	16,82	16,07	16,69
P _{pl}	g	177,95	175,67	182,45	185,85	178,44	180,82	-	-	-	-	173,61	180,06	185,67	178,79	179,94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	171,89	179,00	179,38	176,09	181,62	179,20
A	%	7,87	7,14	9,51	12,35	7,62	9,39	-	-	-	-	8,39	9,43	11,98	9,10	11,92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7,34	9,75	12,20	9,48	11,50	9,69
V _{orig}	dm³	0,1257	0,1256	0,1275	0,1263	0,1256	0,1266	0,1267	0,1256	-	-	0,1257	0,1256	0,1275	0,1263	0,1256	0,1266	0,1267	0,1256	0,1267	0,1268	0,1257	0,1256	0,1275	0,1263	0,1256	0,1266	0,1267	0,1256	0,1267	0,1268	0,1263	
V _{pq}	dm³	0,0959	0,0917	0,1035	0,0995	0,0921	0,1000	-	-	-	-	0,0934	0,0967	0,0988	0,0962	0,0982	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0930	0,0982	0,0983	0,0955	0,0994	0,0969
RV	%	23,71	26,99	18,82	21,22	26,67	21,01	-	-	-	-	25,70	23,01	22,51	23,83	21,82	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	26,54	22,49	21,74	24,63	21,61	23,27
γ _{pm}	kg/dm³	1,75	1,75	1,75	1,76	1,77	1,75	1,76	1,78	-	-	1,76	1,80	1,78	1,77	1,76	1,81	1,81	1,76	1,75	1,76	1,75	1,78	1,78	1,77	1,75	1,75	1,78	1,76	1,75	1,77	1,77	
γ _{pq}	kg/dm³	1,42	1,48	1,34	1,40	1,49	1,38	-	-	-	-	1,42	1,42	1,41	1,41	1,37	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,43	1,38	1,37	1,40	1,38	1,41	
γ _{pl}	kg/dm³	1,86	1,92	1,76	1,87	1,94	1,81	-	-	-	-	1,86	1,86	1,88	1,86	1,83	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,85	1,82	1,82	1,84	1,83	1,85	
σ _{C-105}	MPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,81	3,01	-	-	2,73	2,92	3,14	-	-	-	-	-	2,92	
σ _{C-950}	MPa	2,94	3,08	2,59	2,08	2,95	2,87	-	-	-	-	-	-	1,43	2,98	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,32	1,73	2,49	
σ _{L-105}	MPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,26	0,40	1,14	-	-	1,25	0,22	-	-	-	-	-	-	-	-	0,85	
σ _{L-950}	MPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,63	0,41	-	-	0,19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,83	0,26	0,33	-	0,44	
LEGENDA												P _{pq} = peso dos CPs pós-queima (à temperatura de 950 °C)										γ _{pl} = massa específica aparente do CP pós-imersão = P _{pl} / V _{pq}											
h _{sol,ar} = umidade higroscópica do solo quando da preparação da massa cerâmica												Δ _{M,pq} = perda de massa pós-queima = [(PS - P _{pq}) / PS] x 100										σ _{L-105} = resistência à flexão dos corpos de prova pós-secagem a 105 °C											
h _{Lodo} = umidade higroscópica do lodo quando da preparação da massa cerâmica												P _{pl} = peso dos CPs pós-imersão em água, 24 horas, temperat. ambiente										σ _{L-950} = resistência à flexão dos corpos de prova pós-queima a 950 °C											
Δ _{M,600} = perda de massa da massa cerâmica sob temperatura de 600 °C.												A = percentual de absorção d'água = [(P _{pl} - PS) / PS] x 100										σ _{C-105} = resistência à compressão dos corpos de prova pós-secagem a 105 °C											
MC = massa cerâmica												V _{orig} = volume original das formas de cada CP										σ _{C-950} = resistência à compressão dos corpos de prova pós-queima a 950 °C											
CP = corpo de prova (Ujolo maciço com dimensões nominais de 10 x 5 x 2,5 cm)												V _{pq} = volume do corpo de prova pós-queima										OBSERVAÇÕES:											
P _{unmd} = peso da massa cerâmica úmida (logo após a moldagem dos CPs)												RV = percentual de retração volumétrica = [(V _{orig} - V _{pq}) / V _{orig}] x 100										- Os CPs identificados com (*) apresentavam trincas transversais que podem											
PS = peso dos CPs efetivamente secos (após 24 horas em estufa a 105 °C)												γ _{pm} = massa específica aparente do CP pós-moldagem = P _{unmd} / V _{orig}										ter comprometido os resultados do ensaio de resistência à flexão.											
h _{PM} = teor de umidade dos CPs pós-moldagem = [(P _{unmd} - PS) / PS] x 100												γ _{pq} = massa específica aparente do CP pós-queima = P _{pq} / V _{pq}																					

Tabela A42 - RESULTADOS DAS ANÁLISES FEITAS NA MASSA CERÂMICA COM 30% DE LODO 1

		Data de preparação da massa cerâmica: 09/05/2001																															
		h _{solo, ar} : 1,4 % h _{LODO} : 1,5 % Δ _{M,600} : 15,6 %																															
		MC-30-LD1-A (1ª moldagem)										MC-30-LD1-B (2ª moldagem)										MC-30-LD1-C (3ª moldagem)											
		Data de moldagem dos CPs: 14/05/2001										Data de moldagem dos CPs: 16/07/2001										Data de moldagem+W143 dos CPs: 23/07/2001											
Descr.	Unid.	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	CP-01*	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05*	CP-06	CP-07*	CP-08*	CP-09	CP-10	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04*	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09*	CP-10	Médias	
P _{untd}	g	211,15	213,64	215,83	210,93	211,19	213,84	214,23	213,86	-	-	210,78	211,02	214,43	210,12	208,34	213,35	212,32	213,06	213,42	212,58	207,37	213,52	217,27	211,53	212,98	210,56	214,56	213,73	211,6	209,29	212,39	
PS	g	151,82	153,84	155,24	152,69	152,06	154,04	154,32	154,62	-	-	151,06	151,19	153,46	150,56	149,11	153,28	152,29	152,74	153,22	152,12	148,39	154,38	155,38	151,6	152,05	150,4	153,82	153,25	151,24	149,65	152,42	
h _{PM}	%	39,26	38,87	39,03	38,14	38,89	38,82	38,82	38,31	-	-	39,53	39,87	39,73	39,56	39,72	39,19	39,42	39,51	39,29	39,73	39,75	38,31	39,83	39,53	40,07	40,00	39,49	39,46	39,91	39,85	39,34	
P _{pq}	g	120,06	121,27	123,21	124,33	120,73	122,31	124,89	-	-	-	-	-	-	-	-	121,61	121,26	122,72	121,71	121,40	118,01	123,11	124,36	122,36	121,09	-	-	-	-	-	122,03	
Δ _{M,pq}	g	20,82	21,17	20,63	18,57	20,60	20,60	19,07	-	-	-	-	-	-	-	-	20,66	20,38	19,65	20,57	20,19	20,47	20,26	19,96	19,29	20,36	-	-	-	-	-	20,19	
P _{pi}	g	163,27	165,54	169,4	174,02	164,19	166,59	-	-	-	-	-	-	-	-	-	170,53	170,18	174,41	170,21	170,89	164,75	170,70	172,65	172,19	168,9	-	-	-	-	-	169,28	
A	%	7,68	7,61	9,12	13,97	7,98	8,15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,25	11,75	14,19	11,09	12,34	11,03	10,57	11,11	13,58	11,08	-	-	-	-	-	10,78	
V _{orig}	dm³	0,1257	0,1256	0,1275	0,1263	0,1256	0,1268	0,1267	0,1256	-	-	0,1257	0,1256	0,1275	0,1263	0,1256	0,1266	0,1267	0,1256	0,1267	0,1268	0,1257	0,1256	0,1275	0,1263	0,1256	0,1266	0,1267	0,1256	0,1267	0,1268	0,1263	
V _{pq}	dm³	0,0923	0,0945	0,0955	0,0999	0,092	0,0911	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1003	0,0985	0,1041	0,0991	0,098	0,0943	0,0973	0,0985	0,0997	0,0958	-	-	-	-	-	0,0969	
RV	%	28,57	24,78	25,10	20,90	28,75	28,04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20,77	22,26	17,12	21,78	22,71	24,98	22,53	22,75	21,06	23,73	-	-	-	-	-	23,24	
γ _{pm}	kg/dm³	1,68	1,70	1,69	1,67	1,68	1,69	1,69	1,70	-	-	1,68	1,68	1,68	1,66	1,66	1,81	1,81	1,76	1,75	1,76	1,65	1,70	1,70	1,67	1,70	1,66	1,69	1,70	1,67	1,65	1,70	
γ _{pq}	kg/dm³	1,30	1,28	1,29	1,24	1,31	1,34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,21	1,23	1,18	1,23	1,24	1,25	1,27	1,26	1,23	1,26	-	-	-	-	-	1,26	
γ _{pi}	kg/dm³	1,77	1,75	1,77	1,74	1,78	1,83	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,70	1,73	1,88	1,72	1,74	1,75	1,75	1,75	1,73	1,76	-	-	-	-	-	1,75	
σ _{C,105}	MPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,39	2,41	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,28	2,49	2,44	-	-	2,40	
σ _{C,950}	MPa	1,05	1,53	1,36	0,93	1,56	1,57	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,62	1,49	1,53	1,51	-	-	-	-	-	-	-	1,52	
α _{r,105}	MPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,40	0,51	-	-	0,30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,29	0,43	0,39	
α _{r,950}	MPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,39	0,22	0,19	-	-	-	-	-	0,34	0,24	0,36	-	-	-	-	0,29	
LEGENDA		P _{pq} = peso dos CPs pós-queima (à temperatura de 950 °C)										Δ _{M,pq} = perda de massa pós-queima = [(PS - P _{pq}) / PS] x 100										γ _{pi} = massa específica aparente do CP pós-imersão = P _{pi} / V _{pq}											
h _{solo, ar} = umidade higroscópica do solo quando da preparação da massa cerâmica		P _{pi} = peso dos CPs pós-imersão em água, 24 horas, temperatur. ambiente										RV = percentual de retração volumétrica = [(V _{orig} - V _{pq}) / V _{orig}] x 100										α _{r,105} = resistência à flexão dos corpos de prova pós-secagem a 105 °C											
h _{LODO} = umidade higroscópica do lodo quando da preparação da massa cerâmica		A = percentual de absorção d'água = [(P _a - PS) / PS] x 100										V _{pm} = massa específica aparente do CP pós-moldagem = P _{untd} / V _{orig}										σ _{r,950} = resistência à flexão dos corpos de prova pós-queima a 950 °C											
Δ _{M,600} = perda de massa da massa cerâmica sob temperatura de 600 °C.		V _{orig} = volume original das formas de cada CP										V _{pq} = volume do corpo de prova pós-queima										σ _{C,105} = resistência à compressão dos corpos de prova pós-secagem a 105 °C											
MC = massa cerâmica																						σ _{C,950} = resistência à compressão dos corpos de prova pós-queima a 950 °C											
CP = corpo de prova (tijolo maciço com dimensões nominais de 10 x 5 x 2,5 cm)																						OBSERVAÇÕES:											
P _{untd} = peso da massa cerâmica úmida (logo após a moldagem dos CPs)																						- Os CPs identificados com (*) apresentavam trincas transversais que podem ter comprometido os resultados do ensaio de resistência à flexão.											
PS = peso dos CPs efetivamente secos (após 24 horas em estufa a 105 °C)																						- Os resultados em destaque (amarelo) foram estatisticamente descartados											
P _{pq} = peso dos CPs pós-queima (a 950 °C)																																	

Tabela A43 - RESULTADOS DAS ANÁLISES FEITAS NA MASSA CERÂMICA COM 10% DE CINZAS DO LODO 1

		Data de preparação da massa cerâmica: 13/11/2001																															
		MC-10-CZ-LD1-A (1ª moldagem)										MC-10-CZ-LD1-B (2ª moldagem)																					
		Data de moldagem dos CPs: 19/11/2001										Data de moldagem dos CPs: 26/11/2001																					
Descr.	Unid.	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Médias	
P _{untd}	g	227,46	230,40	236,68	230,22	230,52	230,65	233,91	230,12	229,15	229,76	228,02	231,05	230,59	229,15	227,03	228,47	229,41	228,76	225,84	228,50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	229,42
PS	g	168,28	169,81	174,81	170,53	171,76	172,04	174,63	170,85	169,09	171,63	162,35	168,85	164,42	164,73	163,53	165,96	167,20	166,68	162,85	164,45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	168,22
h _{PM}	%	35,17	35,68	35,39	35,00	34,21	34,07	33,95	34,69	35,52	33,87	40,45	36,84	40,24	39,11	38,83	37,67	37,21	37,25	38,68	38,95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	38,64
P _{pq}	g	151,23	152,87	158,34	153,40	154,68	155,79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	148,92	150,30	150,69	146,42	148,71	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	151,94
Δ _{m,pq}	%	10,13	9,98	9,42	10,05	9,94	9,45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10,27	10,11	9,59	10,09	9,57	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9,87
P _{pl}	g	187,09	193,01	202,06	190,71	195,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	184,82	189,86	192,71	185,17	190,08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	189,06
A	%	11,18	13,68	15,59	11,63	13,68	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,36	13,43	15,62	13,71	15,59	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13,56
V _{orig}	dm³	0,1267	0,1266	0,1275	0,1263	0,1266	0,1266	0,1267	0,1266	0,1267	0,1268	0,1267	0,1266	0,1275	0,1263	0,1266	0,1266	0,1267	0,1266	0,1267	0,1268	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1263
V _{pq}	dm³	0,0977	0,0991	0,1029	0,0981	0,1013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0931	0,0943	0,0995	0,1037	0,1002	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0990
RV	%	22,28	21,10	19,29	22,33	19,35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	26,46	25,57	20,78	18,15	20,98	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21,63
γ _{pm}	kg/dm³	1,81	1,83	1,86	1,82	1,84	1,82	1,85	1,83	1,81	1,81	1,81	1,84	1,81	1,81	1,81	1,80	1,81	1,82	1,78	1,80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,82
γ _{pq}	kg/dm³	1,55	1,54	1,54	1,56	1,53	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,60	1,59	1,51	1,41	1,48	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,55
γ _{pi}	kg/dm³	1,91	1,95	1,96	1,94	1,93	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,99	2,01	1,94	1,79	1,90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,95
σ _{C,105}	MPa	-	-	-	-	-	-	3,20	3,32	2,86	-	2,86	3,09	3,34	2,96	2,77	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,05
σ _{C,950}	MPa	3,88	3,11	2,02	3,98	3,48	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,90	3,59	3,08	3,27	3,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,23
σ _{T,105}	MPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
σ _{T,950}	MPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
LEGENDA												P _{pq} = peso dos CPs pós-queima (à temperatura de 950 °C)										γ _{pi} = massa específica aparente do CP pós-imersão = P _{pi} / V _{pq}											
h _{solu,br} = umidade higroscópica do solo quando da preparação da massa cerâmica												Δ _{m,pq} = perda de massa pós-queima = [(P _{untd} - P _{pq}) / PS] x 100										σ _{T,105} = resistência à flexão dos corpos de prova pós-secagem a 105 °C											
h _{CZ,LOCO} = umidade higroscópica das cinzas do lodo quando da preparação da MC												P _{pl} = peso dos CPs pós-imersão em água, 24 horas, temperatur. ambiente										σ _{T,950} = resistência à flexão dos corpos de prova pós-queima a 950 °C											
Δ _{m,600} = perda de massa da massa cerâmica sob temperatura de 600 °C.												A = percentual de absorção d'água = [(P _{pl} - PS) / PS] x 100										σ _{C,105} = resistência à compressão dos corpos de prova pós-secagem a 105 °C											
MC = massa cerâmica												V _{orig} = volume original das formas de cada CP										σ _{C,950} = resistência à compressão dos corpos de prova pós-queima a 950 °C											
CP = corpo de prova (tijolo maciço com dimensões nominais de 10 x 5 x 2,5 cm)												V _{pq} = volume do corpo de prova pós-queima										OBSERVAÇÕES:											
P _{untd} = peso da massa cerâmica úmida (logo após a moldagem dos CPs)												RV = percentual de retração volumétrica = [(V _{orig} - V _{pq}) / V _{orig}] x 100										- Os resultados em destaque (amarelo) foram estatisticamente descartados											
PS = peso dos CPs efetivamente secos (após 24 horas em estufa a 105 °C)												γ _{pm} = massa específica aparente do CP pós-moldagem = P _{untd} / V _{orig}																					
h _{PM} = teor de umidade dos CPs pós-moldagem = [(P _{untd} - PS) / PS] x 100												γ _m = massa específica aparente do CP pós-queima = P _{pl} / V _m																					

Tabela A44 - RESULTADOS DAS ANÁLISES FEITAS NA MASSA CERÂMICA COM 20% DE CINZAS DO LODO 1

Tabela A4 - RESULTADOS DAS ANÁLISES FEITAS NA MASSA CERÂMICA COM 10% DE CINZAS DE LODO																																
Data de preparação da massa cerâmica: 30/10/2001																																
h _{solu,ar} : 5,2 % h _{CZ,LODO} : 1,1 % Δ _{M,600} : 8,0 %																																
MC-20-CZ-LD1-A (1ª moldagem)										MC-20-CZ-LD1-B (2ª moldagem)																						
Data de moldagem dos CPs: 05/11/2001										Data de moldagem dos CPs: 12/11/2001																						
Descr.	Unid.	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Médias
P _{unid}	g	231,15	231,18	235,22	228,80	223,96	230,99	231,98	231,60	231,11	227,22	229,56	227,12	234,96	229,12	228,65	225,19	225,87	229,83	229,31	228,24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	229,54
PS	g	171,55	169,30	174,18	168,90	164,16	168,86	169,71	169,85	169,60	167,75	167,27	165,72	172,00	167,05	166,84	165,49	165,87	168,35	167,32	166,74	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	168,32
h _{PM}	%	34,74	36,55	35,04	35,46	36,43	36,62	36,69	36,38	36,27	35,45	37,24	37,05	36,60	37,16	37,05	36,07	36,34	36,52	37,05	36,88	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	36,38
P _{pq}	g	155,06	153,31	159,13	152,88	148,82	154,04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	149,83	150,13	153,88	151,62	151,90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	152,76
Δ _{M,pq}	%	9,81	9,44	8,84	9,48	9,34	8,78	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9,58	9,38	8,60	9,38	8,90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9,20
P _{pl}	g	184,00	193,88	206,23	191,77	189,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	186,64	190,61	199,85	191,53	197,83	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	194,14
A	%	13,09	14,52	18,40	13,54	15,16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12,78	15,05	18,71	14,47	18,85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15,44
V _{orig}	dm³	0,1257	0,1256	0,1275	0,1263	0,1256	0,1268	0,1267	0,1256	0,1267	0,1268	0,1257	0,1256	0,1275	0,1263	0,1256	0,1266	0,1267	0,1256	0,1267	0,1268	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1263
V _{pq}	dm³	0,0980	0,1001	0,1072	0,0974	0,1028	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0960	0,0978	0,1088	0,0972	0,1020	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1008
RV	%	21,24	20,30	15,92	22,88	18,15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	24,17	22,81	13,38	23,28	19,56	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20,17
γ _{pm}	kg/dm³	1,84	1,84	1,84	1,81	1,78	1,82	1,83	1,84	1,82	1,79	1,83	1,81	1,84	1,81	1,82	1,78	1,78	1,83	1,81	1,80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,82
γ _{pq}	kg/dm³	1,57	1,53	1,48	1,57	1,45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,56	1,54	1,41	1,56	1,49	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,52
γ _{pl}	kg/dm³	1,86	1,84	1,92	1,97	1,84	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,84	1,85	1,84	1,87	1,94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,83
σ _{C,105}	MPa	-	-	-	-	-	-	2,43	2,98	2,51	-	2,75	2,41	3,05	2,54	2,60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,66
σ _{C,950}	MPa	4,08	4,86	2,80	4,42	3,94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,01	4,53	3,39	4,79	3,19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,10
σ _{T,105}	MPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
σ _{T,950}	MPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LEGENDA												P _{pq} = peso dos CPs pós-queima (à temperatura de 950 °C)										γ _{pl} = massa específica aparente do CP pós-imersão = P _{pl} / V _{pq}										
h _{CZ,ar} = umidade higroscópica do solo quando da preparação da massa cerâmica												Δ _{M,pq} = perda de massa pós-queima = [(PS - P _{pq}) / PS] x 100										σ _{T,105} = resistência à flexão dos corpos de prova pós-secagem a 105 °C										
h _{CZ,LODO} = umidade higroscópica das cinzas do lodo quando da preparação da MC												P _{pl} = peso dos CPs pós-imersão em água, 24 horas, temperat. ambiente										σ _{T,950} = resistência à flexão dos corpos de prova pós-queima a 950 °C										
Δ _{M,600} = perda de massa da massa cerâmica sob temperatura de 600 °C.												A = percentual de absorção d'água = [(P _{pl} - PS) / PS] x 100										σ _{C,105} = resistência à compressão dos corpos de prova pós-secagem a 105 °C										
MC = massa cerâmica												V _{orig} = volume original das formas de cada CP										σ _{C,950} = resistência à compressão dos corpos de prova pós-queima a 950 °C										
CP = corpo de prova (tijolo maciço com dimensões nominais de 10 x 5 x 2,5 cm)												V _{pq} = volume do corpo de prova pós-queima																				
P _{unid} = peso da massa cerâmica úmida (logo após a moldagem dos CPs)												RV = percentual de retração volumétrica = [(V _{orig} - V _{pq}) / V _{orig}] x 100																				
PS = peso dos CPs efetivamente secos (após 24 horas em estufa a 105 °C)												γ _{pm} = massa específica aparente do CP pós-moldagem = P _{unid} / V _{orig}																				
h _{PM} = teor de umidade dos CPs pós-moldagem = [(P _{unid} - PS) / PS] x 100												γ _{po} = massa específica aparente do CP pós-queima = P _{po} / V _{po}																				

Tabela A46 - RESULTADOS DAS ANÁLISES FEITAS NA MASSA CERÂMICA COM 30% DE CINZAS DO LODO 1

		Data de preparação da massa cerâmica: 19/10/2001																														
		h _{solto,gr} : 4,7 % h _{CZ,LODO} : 1,7 % Δ _{M,600} : 7,8 %																														
		MC-30-CZ-LD1-A (1ª moldagem)										MC-30-CZ-LD1-B (2ª moldagem)																				
		Data de moldagem dos CPs: 22/10/2001										Data de moldagem dos CPs: 29/10/2001																				
Descr.	Unid.	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Médias
P _{unld}	g	224,12	227,10	228,61	226,08	224,18	228,52	225,89	226,99	226,69	224,54	225,93	228,80	235,52	226,19	222,91	230,18	228,97	226,75	229,26	223,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	226,56
PS	g	161,66	163,84	164,18	162,97	161,00	164,58	162,95	163,37	163,65	161,89	162,93	165,22	170,07	163,24	160,93	166,07	165,22	163,92	166,10	160,95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	163,40
h _{PM}	%	38,64	38,61	39,24	38,72	39,24	38,85	38,63	38,94	38,52	38,70	38,67	38,48	38,48	38,56	38,51	38,60	38,58	38,33	38,03	38,56	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	38,65
P _{pq}	g	146,85	148,90	150,46	148,08	146,48	150,92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	150,52	149,99	149,80	150,65	146,66	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	149,01
Δ _{M,pq}	%	9,28	9,12	8,36	9,14	9,02	8,30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9,36	9,22	8,61	9,30	8,88	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8,96
P _{pl}	g	186,48	190,84	198,93	189,22	189,60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	192,61	192,93	197,38	191,73	192,66	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	192,24
A	%	15,35	16,48	21,17	16,11	17,76	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15,88	16,77	20,41	15,43	19,70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17,52
V _{orig}	dm³	0,1257	0,1256	0,1275	0,1263	0,1256	0,1266	0,1267	0,1256	0,1267	0,1268	0,1257	0,1256	0,1275	0,1263	0,1256	0,1266	0,1267	0,1256	0,1267	0,1268	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1263
V _{pq}	dm³	0,0964	0,1010	0,1050	0,1010	0,0999	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1018	0,0996	0,1046	0,0988	0,1014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1010
RV	%	23,31	19,59	17,65	20,03	20,46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	19,59	21,39	16,72	22,02	20,03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20,08
γ _{pm}	kg/dm³	1,78	1,81	1,79	1,79	1,78	1,81	1,78	1,81	1,79	1,77	1,80	1,82	1,85	1,79	1,77	1,82	1,81	1,81	1,81	1,76	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,80
γ _{pq}	kg/dm³	1,52	1,47	1,43	1,47	1,47	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,48	1,51	1,43	1,52	1,45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,47
γ _{pl}	kg/dm³	1,93	1,89	1,89	1,87	1,90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,89	1,94	1,89	1,94	1,90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,90
σ _{C,105}	MPa	-	-	-	-	-	-	-	3,32	2,86	3,44	2,97	3,29	2,44	1,57	2,47	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,80
σ _{C,950}	MPa	3,97	4,20	3,11	4,83	4,49	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,64	4,36	3,88	4,47	3,32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,03
σ _{L,105}	MPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
σ _{L,950}	MPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LEGENDA												P _{pq} = peso dos CPs pós-queima (à temperatura de 950 °C)										γ _{pl} = massa específica aparente do CP pós-imersão = P _{pl} / V _{pq}										
h _{solto,gr} = umidade higroscópica do solo quando da preparação da massa cerâmica												Δ _{M,pq} = perda de massa pós-queima = [(PS - P _{pq}) / PS] x 100										σ _{L,105} = resistência à flexão dos corpos de prova pós-secagem a 105 °C										
h _{CZ,LODO} = umidade higroscópica das cinzas do lodo quando da preparação da MC												P _{pl} = peso dos CPs pós-imersão em água, 24 horas, temperat. ambiente										σ _{L,950} = resistência à flexão dos corpos de prova pós-queima a 950 °C										
Δ _{M,600} = perda de massa da massa cerâmica sob temperatura de 600 °C.												A = percentual de absorção d'água = [(P _{pl} - PS) / PS] x 100										σ _{C,105} = resistência à compressão dos corpos de prova pós-secagem a 105 °C										
MC = massa cerâmica												V _{orig} = volume original das formas de cada CP										σ _{C,950} = resistência à compressão dos corpos de prova pós-queima a 950 °C										
CP = corpo de prova (tijolo maciço com dimensões nominais de 10 x 5 x 2,5 cm)												V _{pq} = volume do corpo de prova pós-queima										OBSERVAÇÕES:										
P _{unld} = peso da massa cerâmica úmida (logo após a moldagem dos CPs)												RV = percentual de retração volumétrica = [(V _{orig} - V _{pq}) / V _{orig}] x 100										- Os resultados em destaque (amarelo) foram estatisticamente descartados										
PS = peso dos CPs efetivamente secos (após 24 horas em estufa a 105 °C)												γ _{pm} = massa específica aparente do CP pós-moldagem = P _{unld} / V _{orig}																				
h _{PM} = teor de umidade dos CPs pós-moldagem = [(P _{unld} - PS) / PS] x 100												γ _{pq} = massa específica aparente do CP pós-queima = P _{pq} / V _{pq}																				

Tabela A46 - RESULTADOS DAS ANÁLISES FEITAS NA MASSA CERÂMICA COM 40% DE CINZAS DO LODO 1

		Data de preparação da massa cerâmica: 24/09/2001																																
		h _{solo_ar} : 6,0 % h _{CZ_LODO} : 0,8 % Δ _{M,600} : 7,2 %																																
		MC-40-CZ-LD1-A (1ª moldagem)										MC-40-CZ-LD1-B (2ª moldagem)																						
		Data de moldagem dos CPs: 01/10/2001										Data de moldagem dos CPs: 08/10/2001																						
Descr.	Unid.	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Médias		
P _{unid}	g	220,87	221,75	227,51	225,52	222,93	222,72	226,10	226,15	223,80	226,03	218,77	224,01	225,92	223,92	220,82	222,33	226,56	223,69	223,35	223,54	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	223,80	
PS	g	156,13	156,87	161,06	161,02	157,39	156,87	160,46	160,43	160,70	162,84	154,81	158,41	157,97	157,17	155,51	157,43	159,13	157,46	159,68	160,13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	158,57	
h _{PM}	%	41,47	41,36	41,26	40,06	41,64	41,98	40,91	40,96	39,14	38,80	41,32	41,41	43,01	42,47	42,00	41,22	42,37	42,06	39,87	39,60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	41,15	
P _{pq}	g	141,55	142,57	147,68	146,44	143,47	144,10	-	-	-	-	142,46	144,47	143,69	145,14	141,59	142,97	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	143,84	
Δ _{M,pq}	%	9,34	9,12	8,31	9,05	8,84	8,14	-	-	-	-	7,98	8,80	9,04	7,85	8,95	9,19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8,70	
P _{pi}	g	185,68	189,10	199,62	192,33	191,05	-	-	-	-	-	193,68	191,86	188,79	196,73	187,72	186,65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	191,20	
A	%	18,93	20,55	23,94	19,44	21,39	-	-	-	-	-	25,11	21,12	19,51	25,17	20,71	18,56	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21,31	
V _{orig}	dm³	0,1257	0,1256	0,1275	0,1263	0,1256	0,1266	0,1267	0,1256	0,1267	0,1268	0,1257	0,1256	0,1275	0,1263	0,1256	0,1266	0,1267	0,1256	0,1267	0,1268	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1263
V _{pq}	dm³	0,1012	0,1005	0,1073	0,1007	0,1023	-	-	-	-	-	0,1051	0,1024	0,1004	0,1054	0,1002	0,0981	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1021
RV	%	19,49	19,98	15,84	20,27	18,55	-	-	-	-	-	16,39	18,47	21,25	16,55	20,22	22,51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	19,05	
γ _{pm}	kg/dm³	1,76	1,77	1,78	1,79	1,77	1,76	1,78	1,80	1,76	1,78	1,74	1,78	1,77	1,77	1,76	1,76	1,79	1,78	1,76	1,76	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,77	
γ _{pq}	kg/dm³	1,40	1,42	1,38	1,45	1,40	-	-	-	-	-	1,36	1,41	1,43	1,38	1,41	1,46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,41	
γ _{pi}	kg/dm³	1,83	1,88	1,86	1,91	1,87	-	-	-	-	-	1,84	1,87	1,88	1,87	1,87	1,90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,87	
σ _{C_105}	MPa	-	-	-	-	-	2,80	2,44	2,34	-	-	-	-	-	-	-	2,83	2,76	3,15	2,90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,75	
σ _{C_950}	MPa	2,73	2,64	3,35	3,01	3,65	-	-	-	-	-	2,63	3,33	2,98	1,54	3,01	2,88	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,02	
σ _{L_105}	MPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
σ _{L_950}	MPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
LEGENDA												P _{pq} = peso dos CPs pós-queima (à temperatura de 950 °C)										γ _{pi} = massa específica aparente do CP pós-imersão = P _{pi} / V _{pi}												
h _{solo_ar} = umidade higroscópica do solo quando da preparação da massa cerâmica												Δ _{M,pq} = perda de massa pós-queima = [(PS - P _{pq}) / PS] x 100										σ _{L_105} = resistência à flexão dos corpos de prova pós-secagem a 105 °C												
h _{CZ_LODO} = umidade higroscópica das cinzas do lodo quando da preparação da MC												P _{pi} = peso dos CPs pós-Imersão em água, 24 horas, temperat. ambiente										σ _{C_950} = resistência à flexão dos corpos de prova pós-queima a 950 °C												
Δ _{M,600} = perda de massa da massa cerâmica sob temperatura de 600 °C.												A = percentual de absorção d'água = [(P _{pi} - PS) / PS] x 100										σ _{C_105} = resistência à compressão dos corpos de prova pós-secagem a 105 °C												
MC = massa cerâmica												V _{orig} = volume original das formas de cada CP										σ _{C_950} = resistência à compressão dos corpos de prova pós-queima a 950 °C												
CP = corpo de prova (tijolo maciço com dimensões nominais de 10 x 5 x 2,5 cm)												V _{pq} = volume do corpo de prova pós-queima										OBSERVAÇÕES:												
Pumid. = peso da massa cerâmica úmida (logo após a moldagem dos CPs)												RV = percentual de retração volumétrica = [(V _{orig} - V _{pq}) / V _{orig}] x 100										- O resultado em destaque (amarelo) foi estatisticamente descartado												
PS = peso dos CPs efetivamente secos (após 24 horas em estufa a 105 °C)												γ _{pm} = massa específica aparente do CP pós-moldagem = P _{unid} / V _{orig}																						
h _{PM} = teor de umidade dos CPs pós-moldagem = [(P _{unid} - PS) / PS] x 100												γ _{do} = massa específica aparente do CP pós-queima = P _{pi} / V _{pq}																						

Tabela A47 - RESULTADOS DAS ANÁLISES FEITAS NA MASSA CERÂMICA COM 10% DE LODO 2

Data de preparação da massa cerâmica: 24/07/2001																																					
h _{solo, ar} : 6,3 % h _{LODO} : 7,7 % Δ _{M,800} : 11,1 %																																					
MC-10-LD2-A (1ª moldagem)												MC-10-LD2-B (2ª moldagem)												MC-10-LD2-C (3ª moldagem)													
Data de moldagem dos CPs: 30/07/2001												Data de moldagem dos CPs: 20/08/2001												Data de moldagem dos CPs: 27/08/2001													
Descr.	Unid.	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	CP-01*	CP-02	CP-03*	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08*	CP-09	CP-10	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05*	CP-06	CP-07*	CP-08	CP-09	CP-10	Médias					
P _{unif}	g	218,97	222,50	226,38	220,59	219,96	224,22	224,61	223,47	222,75	221,87	226,07	223,11	228,27	225,77	225,62	227,97	227,03	224,34	222,53	224,34	220,04	225,91	225,66	224,99	224,13	224,14	227,22	224,11	226,54	224,39	224,28					
PS	g	166,04	168,93	172,08	167,09	167,07	170,45	170,78	170,06	165,15	168,57	171,06	169,11	173,30	171,41	170,96	172,37	171,34	170,28	169,15	171,34	165,22	169,63	169,00	169,84	168,80	169,59	171,54	169,71	172,08	171,13	169,77					
h _{PM}	%	32,48	31,71	31,56	32,02	31,66	31,55	31,52	31,41	34,88	31,62	32,16	31,93	31,72	31,71	31,97	32,26	32,50	31,75	31,56	30,93	32,99	34,13	34,03	33,29	33,06	33,35	32,93	33,09	32,43	32,34	32,35					
P _{pq}	g	142,05	144,95	147,97	144,86	143,47	146,33	147,30	-	-	-	146,77	145,32	150,38	147,36	148,29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	145,65	147,22	146,48	148,80	147,44	146,51				
Δ _{M,pq}	%	14,45	14,20	14,01	13,29	14,13	14,15	13,75	-	-	-	14,20	14,07	13,23	14,03	13,26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14,23	14,11	13,47	14,02	13,35	13,88				
P _{pl}	g	178,53	182,05	186,75	183,40	180,82	184,46	-	-	-	-	183,78	183,45	190,28	186,38	188,34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	182,48	185,48	185,54	188,06	185,47	184,70				
A	%	7,52	7,77	8,53	9,76	8,23	8,21	-	-	-	-	7,44	8,48	9,80	8,73	10,17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7,60	8,13	9,33	9,29	8,38	8,58				
V _{orig}	dm³	0,1257	0,1256	0,1275	0,1263	0,1256	0,1266	0,1267	0,1256	0,1267	0,1268	0,1257	0,1256	0,1275	0,1263	0,1256	0,1266	0,1267	0,1256	0,1267	0,1268	0,1257	0,1256	0,1275	0,1263	0,1256	0,1266	0,1267	0,1256	0,1267	0,1268	0,1263					
V _{pq}	dm³	0,0963	0,0981	0,1003	0,0987	0,097	0,0987	-	-	-	-	0,1003	0,1002	0,1030	0,1005	0,1035	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0982	0,0998	0,0997	0,1011	0,0987	0,0996				
RV	%	23,39	21,89	21,33	21,85	22,77	22,04	-	-	-	-	20,21	20,22	19,22	20,43	17,60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25,91	23,20	22,93	23,20	23,11	21,83				
γ _{PM}	kg/dm³	1,75	1,77	1,78	1,75	1,75	1,77	1,77	1,78	1,76	1,75	1,80	1,78	1,79	1,79	1,80	1,80	1,79	1,79	1,76	1,77	1,77	1,82	1,80	1,79	1,78	1,81	1,81	1,76	1,75	1,76	1,78					
γ _{pq}	kg/dm³	1,48	1,48	1,48	1,47	1,48	1,48	-	-	-	-	1,48	1,45	1,46	1,47	1,43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,48	1,48	1,47	1,47	1,49	1,47					
γ _{pl}	kg/dm³	1,85	1,86	1,86	1,86	1,86	1,87	-	-	-	-	1,83	1,83	1,85	1,85	1,82	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,88	1,86	1,86	1,86	1,88	1,85					
σ _{C,105}	MPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,49	2,04	2,24	2,75	2,32	-	-	-	-	-	-	2,37					
σ _{C,950}	MPa	3,16	3,21	2,81	2,33	2,95	2,90	-	-	-	-	-	-	-	2,55	2,02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,13	2,69	2,68					
σ _{T,105}	MPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,89	0,97	0,76	-	-	-	-	-	-	-	0,95	0,70	-	-	-	0,85					
σ _{T,950}	MPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,48	0,52	0,32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,66	0,50	0,60	-	0,51					
LEGENDA												P _{pl} = peso dos CPs pós-queima (à temperatura de 950 °C)												γ _{pl} = massa específica aparente do CP pós-imersão = P _{pl} / V _{pq}													
h _{solo, ar} = umidade higroscópica do solo quando da preparação da massa cerâmica												Δ _{M,pq} = perda de massa pós-queima = [(PS - P _{pq}) / PS] x 100												σ _{T,105} = resistência à flexão dos corpos de prova pós-secagem a 105 °C													
h _{LODO} = umidade higroscópica do lodo quando da preparação da massa cerâmica												P _{pl} = peso dos CPs pós-imersão em água, 24 horas, temperat. ambiente												σ _{T,950} = resistência à flexão dos corpos de prova pós-queima a 950 °C													
Δ _{M,800} = perda de massa da massa cerâmica sob temperatura de 800 °C.												A = percentual de absorção d'água = [(P _{pl} - PS) / PS] x 100												σ _{C,105} = resistência à compressão dos corpos de prova pós-secagem a 105 °C													
MC = massa cerâmica												V _{orig} = volume original das formas de cada CP												σ _{C,950} = resistência à compressão dos corpos de prova pós-queima a 950 °C													
CP = corpo de prova (tijolo maciço com dimensões nominais de 10 x 5 x 2,5 cm)												V _{pq} = volume do corpo de prova pós-queima												OBSERVAÇÕES:													
P _{unif} = peso da massa cerâmica úmida (logo após a moldagem dos CPs)												RV = percentual de retração volumétrica = [(V _{orig} - V _{pq}) / V _{orig}] x 100												- Os CPs identificados com (*) apresentavam trincas transversais que podem													
PS = peso dos CPs efetivamente secos (após 24 horas em estufa a 105 °C)												γ _{PM} = massa específica aparente do CP pós-moldagem = P _{unif} / V _{orig}												ter comprometido os resultados do ensaio de resistência à flexão.													
h _{PM} = teor da umidade dos CPs pós-moldagem = [(P _{unif} - PS) / PS] x 100												γ _{pq} = massa específica aparente do CP pós-queima = P _{pq} / V _{pq}												- O resultado em destaque (amarelo) foi estatisticamente descartado													

Tabela A48 - RESULTADOS DAS ANÁLISES FEITAS NA MASSA CERÂMICA COM 20% DE LODO 2

		Data de preparação da massa cerâmica: 31/07/2001																																	
		h _{solo_ar} : 6,7 % h _{LODO} : 7,4 % Δ _{M,600} : 16,6 %																																	
		MC-20-LD2-A (1ª moldagem)										MC-20-LD2-B (2ª moldagem)										MC-20-LD2-C (3ª moldagem)													
		Data de moldagem dos CPs: 06/08/2001										Data de moldagem dos CPs: 03/09/2001										Data de moldagem dos CPs: 10/09/2001													
Descr.	Unid.	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	CP-01	CP-02*	CP-03*	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07*	CP-08	CP-09	CP-10	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06*	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Médias			
P _{úmido}	g	214,96	219,08	212,88	219,43	215,96	214,82	215,28	208,91	211,08	206,03	215,07	217,28	224,10	215,64	218,28	217,46	221,59	215,26	218,91	211,60	212,63	218,72	219,75	213,65	216,42	214,83	219,15	215,24	216,79	214,83	215,72			
PS	g	164,00	167,67	162,68	167,25	164,78	164,26	164,21	159,93	160,89	157,52	163,33	166,09	170,89	164,98	166,73	166,19	168,02	162,46	164,37	160,39	162,62	164,57	166,85	161,40	163,40	162,34	165,53	162,40	163,82	162,66	164,07			
h _{PM}	%	31,07	30,65	30,86	31,20	31,06	30,78	31,10	30,63	31,20	30,80	31,68	30,82	31,14	30,71	30,92	30,85	31,88	32,50	31,96	31,93	30,75	31,69	31,71	32,37	32,45	32,33	32,39	32,54	32,33	32,07	31,48			
P _{pq}	g	133,46	136,52	139,98	137,11	134,39	133,74	135,02	-	-	-	133,46	136,75	141,00	135,35	136,68	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	134,05	135,42	132,26	134,24	132,61	135,41		
Δ _{M, pq}	%	18,82	18,58	13,95	18,02	18,44	18,58	17,78	-	-	-	18,29	17,67	17,49	17,96	18,02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17,43	18,19	18,56	18,06	18,47	18,13		
P _{pl}	g	172,51	176,25	173,50	181,86	173,05	173,97	-	-	-	-	175,65	179,83	185,39	177,00	178,22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	177,28	177,71	174,43	177,13	173,79	176,15		
A	%	5,19	5,12	6,65	6,74	5,02	5,91	-	-	-	-	7,54	8,27	8,48	7,29	6,89	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9,20	7,36	7,41	8,12	6,84	7,13		
V _{orig}	dm³	0,1257	0,1256	0,1275	0,1263	0,1256	0,1266	0,1267	0,1256	0,1267	0,1268	0,1257	0,1256	0,1275	0,1263	0,1256	0,1266	0,1267	0,1256	0,1267	0,1268	0,1257	0,1256	0,1275	0,1263	0,1256	0,1266	0,1267	0,1256	0,1267	0,1268	0,1263			
V _{pq}	dm³	0,0949	0,0975	0,0963	0,1027	0,0974	0,0967	-	-	-	-	0,1001	0,1028	0,1044	0,0998	0,1009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1021	0,1020	0,1001	0,1007	0,0984	0,0998		
RV	%	24,50	22,37	24,47	18,69	22,45	23,62	-	-	-	-	20,37	18,15	18,12	20,98	19,67	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	19,35	19,49	20,30	20,52	22,40	20,97		
γ _{pm}	kg/dm³	1,71	1,74	1,67	1,74	1,72	1,70	1,70	1,66	1,67	1,62	1,71	1,73	1,76	1,71	1,74	1,72	1,75	1,71	1,71	1,67	1,69	1,73	1,72	1,69	1,72	1,70	1,73	1,71	1,71	1,69	1,71			
γ _{pq}	kg/dm³	1,41	1,40	1,45	1,34	1,38	1,38	-	-	-	-	1,33	1,33	1,35	1,36	1,35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,31	1,33	1,32	1,33	1,35	1,35			
γ _{pl}	kg/dm³	1,82	1,81	1,80	1,77	1,78	1,80	-	-	-	-	1,75	1,75	1,78	1,77	1,77	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,74	1,74	1,74	1,76	1,77	1,77			
σ _{C,105}	MPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,22	2,26	2,63	2,45	2,23	-	-	-	-	-	-	2,36			
σ _{C,950}	MPa	1,71	2,32	2,13	1,06	2,56	1,93	-	-	-	-	-	-	-	2,07	2,50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,64	2,25	2,02			
σ _{f,105}	MPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,51	0,42	0,53	-	-	-	-	-	-	0,44	0,43	-	-	-	-	0,47			
σ _{f,950}	MPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,32	0,23	0,23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,25	0,42	0,41	-	0,31			
LEGENDA												P _{pq} = peso dos CPs pós-queima (à temperatura de 950 °C)										γ _{pl} = massa específica aparente do CP pós-imersão = P _{pl} / V _{pq}													
h _{sol,ar} = umidade higroscópica do solo quando da preparação da massa cerâmica												Δ _{M,pq} = perda de massa pós-queima = [(PS - P _{pq}) / PS] x 100										σ _{L,105} = resistência à flexão dos corpos de prova pós-secagem a 105 °C													
h _{LODO} = umidade higroscópica do lodo quando da preparação da massa cerâmica												P _{pl} = peso dos CPs pós-imersão em água, 24 horas, temperat. ambiente										σ _{L,950} = resistência à flexão dos corpos de prova pós-queima a 950 °C													
Δ _{M,600} = perda de massa da massa cerâmica sob temperatura de 600 °C.												A = percentual de absorção d'água = [(P _{pl} - PS) / PS] x 100										σ _{C,105} = resistência à compressão dos corpos de prova pós-secagem a 105 °C													
MC = massa cerâmica												V _{orig} = volume original das formas de cada CP										σ _{C,950} = resistência à compressão dos corpos de prova pós-queima a 950 °C										OBSERVAÇÕES: - Os CPs identificados com (*) apresentavam trincas transversais que podem ter comprometido os resultados do ensaio de resistência à flexão. - Os resultados em destaque (amarelo) foram estatisticamente descartados			
CP = corpo de prova (tijolo maciço com dimensões nominais de 10 x 5 x 2,5 cm)												V _{pq} = volume do corpo de prova pós-queima																							
P _{úmido} = peso da massa cerâmica úmida (logo após a moldagem dos CPs)												RV = percentual de retração volumétrica = [(V _{orig} - V _{pq}) / V _{orig}] x 100																							
PS = peso dos CPs efetivamente secos (após 24 horas em estufa a 105 °C)												γ _{pm} = massa específica aparente do CP pós-moldagem = P _{úmido} / V _{orig}																							
h _{PM} = teor de umidade dos CPs pós-moldagem = [(P _{úmido} - PS) / PS] x 100												γ _{pq} = massa específica aparente do CP pós-queima = P _{pq} / V _{pq}																							

Tabela A49 - RESULTADOS DAS ANÁLISES FEITAS NA MASSA CERÂMICA COM 30% DE LODO 2

		Data de preparação da massa cerâmica: 07/08/2001																															
		MC-30-LD2-A (1ª moldagem)										MC-30-LD2-B (2ª moldagem)										MC-30-LD2-C (3ª moldagem)											
		Data de moldagem dos CPs: 13/08/2001										Data de moldagem dos CPs: 17/09/2001										Data de moldagem dos CPs: 24/09/2001											
Descr.	Unid.	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	CP-01	CP-02	CP-03*	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08*	CP-09	CP-10	Médias	
P _{untd}	g	206,21	206,38	211,12	208,47	208,9	208,41	209,91	205,4	203,33	204,99	208,23	212,38	215,66	210,12	206,95	210,02	215,58	214,12	216,49	211,83	206,19	211,09	215,8	207,51	213,76	214,43	213,91	211,5	211,2	208,76	210,39	
PS	g	156,33	157,85	160,12	158,18	158,61	158,33	159,3	156,21	154,68	155,81	157,01	160,35	163,04	158,96	156,77	158,36	163,45	162,43	164,28	160,89	156,95	160,3	164,09	157,64	162,48	162,51	161,66	160,42	159,82	158,18	159,50	
h _{PM}	%	31,91	32,01	31,85	31,79	31,71	31,63	31,77	31,49	31,45	31,56	32,62	32,45	32,27	32,18	32,01	32,62	31,89	31,82	31,78	31,66	31,37	31,68	31,51	31,64	31,56	31,95	32,32	31,84	32,15	31,98	31,88	
P _{pq}	g	120,20	121,85	123,75	123,74	122,40	122,24	124,60	-	-	-	121,17	123,66	126,36	122,60	121,28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	125,25	124,41	124,54	122,79	122,75	123,15
Δm _{pq}	%	23,11	22,61	22,71	21,77	22,83	22,79	21,78	-	-	-	22,83	22,88	22,50	22,87	22,65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	22,93	23,04	22,37	23,17	22,40	22,67
P _{pl}	g	163,06	164,63	169,58	172,82	166,89	167,51	-	-	-	-	164,82	168,37	175,86	167,46	166,92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	170,00	170,90	173,76	168,24	170,78	168,84
A	%	4,30	4,30	5,91	9,26	5,22	5,80	-	-	-	-	4,85	5,00	7,86	5,35	6,47	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,61	5,72	8,32	5,27	7,97	6,01
V _{orig}	dm³	0,1257	0,1256	0,1275	0,1263	0,1256	0,1266	0,1267	0,1256	0,1267	0,1268	0,1257	0,1256	0,1275	0,1263	0,1256	0,1266	0,1267	0,1256	0,1267	0,1268	0,1257	0,1256	0,1275	0,1263	0,1256	0,1266	0,1267	0,1256	0,1267	0,1268	0,1263	
V _{pq}	dm³	0,0933	0,0941	0,0982	0,1048	0,0957	0,0975	-	-	-	-	0,1003	0,1003	0,1079	0,0987	0,0997	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1007	0,1004	0,1046	0,0986	0,1011	0,0987
RV	%	25,78	25,08	22,98	17,02	23,81	22,99	-	-	-	-	20,21	20,14	15,37	21,85	20,62	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20,46	20,76	16,72	22,18	20,27	21,01
γ _{pm}	kg/dm³	1,64	1,66	1,66	1,65	1,66	1,65	1,66	1,64	1,60	1,62	1,66	1,69	1,69	1,68	1,65	1,66	1,70	1,70	1,71	1,67	1,64	1,68	1,69	1,64	1,70	1,69	1,69	1,68	1,67	1,65	1,67	
γ _{pq}	kg/dm³	1,29	1,29	1,26	1,18	1,28	1,25	-	-	-	-	1,21	1,23	1,17	1,24	1,22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,24	1,24	1,19	1,25	1,21	1,24
γ _{pl}	kg/dm³	1,75	1,75	1,73	1,65	1,74	1,72	-	-	-	-	1,64	1,68	1,63	1,70	1,67	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,69	1,70	1,66	1,71	1,69	1,69
σ _{C-105}	MPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,32	1,91	2,23	1,73	2,24	-	-	-	-	-	-	2,09	
σ _{C-950}	MPa	0,97	1,17	1,14	0,93	1,35	1,17	-	-	-	-	-	-	-	1,48	1,47	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,15	0,87	1,17
σ _{f-105}	MPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,38	0,41	0,42	-	-	-	-	-	0,43	0,44	-	-	-	-	-	-	0,42
σ _{f-950}	MPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,28	0,31	0,23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,29	0,31	0,20	-	-	-	0,27
LEGENDA												P _{pq} = peso dos CPs pós-queima (à temperatura de 950 °C)										γ _{pl} = massa específica aparente do CP pós-imersão = P _{pl} / V _{pq}											
h _{solo,ar} = umidade higroscópica do solo quando da preparação da massa cerâmica												Δm _{pq} = perda de massa pós-queima = [(P _{PS} - P _{pq}) / PS] x 100										σ _{f-105} = resistência à flexão dos corpos de prova pós-secagem a 105 °C											
h _{LODO} = umidade higroscópica do lodo quando da preparação da massa cerâmica												P _{pl} = peso dos CPs pós-imersão em água, 24 horas, temperatur. ambiente										σ _{f-950} = resistência à flexão dos corpos de prova pós-queima a 950 °C											
Δm ₆₀₀ = perda de massa da massa cerâmica sob temperatura de 600 °C.												A = percentual de absorção d'água = [(P _{pl} - PS) / PS] x 100										σ _{C-105} = resistência à compressão dos corpos de prova pós-secagem a 105 °C											
MC = massa cerâmica												V _{orig} = volume original das formas de cada CP										σ _{C-950} = resistência à compressão dos corpos de prova pós-queima a 950 °C											
CP = corpo de prova (tijolo maciço com dimensões nominais de 10 x 5 x 2,5 cm)												V _{pq} = volume do corpo de prova pós-queima										OBSERVAÇÕES:											
P _{untd} = peso da massa cerâmica úmida (logo após a moldagem dos CPs)												RV = percentual de retração volumétrica = [(V _{orig} - V _{pq}) / V _{orig}] x 100										- Os CPs identificados com (*) apresentavam trincas transversais que podem											
PS = peso dos CPs efetivamente secos (após 24 horas em estufa a 105 °C)												γ _{pm} = massa específica aparente do CP pós-moldagem = P _{untd} / V _{orig}										ter comprometido os resultados do ensaio de resistência à flexão.											
h _{PM} = teor de umidade dos CPs pós-moldagem = [(P _{untd} - PS) / PS] x 100												γ _{pm} = massa específica aparente do CP pós-queima = P _{pq} / V _{pq}																					

Tabela A50 - RESULTADOS DAS ANÁLISES FEITAS NA MASSA CERÂMICA COM 10% DE CINZAS DO LODO 2

Data de preparação da massa cerâmica: 26/03/2002

$$h_{\text{solb ar}}: 5,0 \% \quad h_{\text{CZ Long}}: 4,2 \% \quad \Delta_{M600}: 10,4 \%$$

		MC-10-CZ-LD2-A (1ª moldagem)										MC-10-CZ-LD2-B (2ª moldagem)																				
		Data de moldagem dos CPs: 01/04/2002										Data de moldagem dos CPs: 08/04/2002																				
Descr.	Unid.	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Médias
P _{úmida}	g	227,14	229,12	233,31	229,93	229,65	229,00	230,66	229,28	230,06	223,93	238,96	235,30	240,80	234,75	235,15	236,68	239,08	235,42	238,66	236,74	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	233,08
PS	g	169,76	169,49	173,17	171,57	171,52	172,00	172,76	172,38	171,75	168,12	178,73	177,86	180,15	177,71	178,41	179,31	179,98	177,74	180,49	179,60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	175,13
h _{PM}	%	33,80	35,18	34,73	34,02	33,89	33,14	33,51	33,01	33,95	33,20	32,58	32,30	33,87	32,10	31,80	31,99	32,84	32,45	32,23	31,82	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	33,11
P _{pq}	g	150,42	150,13	153,83	153,98	152,43	153,40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	158,75	159,54	158,96	160,06	159,96	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	155,59
Δ _{M,pq}	%	11,39	11,42	11,17	10,25	11,13	10,81	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,47	11,36	10,57	11,32	10,94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,07
P _{pl}	g	191,24	191,35	195,87	195,46	194,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	201,52	203,19	202,46	203,69	203,74	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	198,26
A	%	12,85	12,90	13,11	13,92	13,14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12,39	12,90	13,91	12,85	13,44	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13,12
V _{orig}	dm³	0,1257	0,1256	0,1275	0,1263	0,1256	0,1266	0,1267	0,1256	0,1267	0,1268	0,1257	0,1256	0,1275	0,1263	0,1256	0,1266	0,1267	0,1256	0,1267	0,1268	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1263
V _{pq}	dm³	0,1001	0,1002	0,1019	0,1016	0,1013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1042	0,1044	0,1041	0,1059	0,1058	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1030
RV	%	20,37	20,22	20,08	19,56	19,35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17,69	17,60	17,12	16,42	16,56	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	18,50
γ _{pm}	kg/dm³	1,81	1,82	1,83	1,82	1,83	1,81	1,82	1,83	1,82	1,77	1,89	1,87	1,89	1,86	1,87	1,87	1,89	1,87	1,88	1,87	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,85
γ _{pq}	kg/dm³	1,50	1,50	1,51	1,52	1,50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,52	1,53	1,53	1,51	1,51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,51
γ _{pl}	kg/dm³	1,91	1,91	1,92	1,92	1,92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,93	1,95	1,94	1,92	1,93	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,93
σ _{C-105}	MPa	-	-	-	-	-	-	2,38	3,39	3,50	-	3,71	3,74	3,99	4,01	3,78	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,73
σ _{C-950}	MPa	2,61	3,41	3,38	2,74	3,33	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,77	3,82	3,15	3,54	2,93	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,21
σ _{T-105}	MPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
σ _{T-950}	MPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LEGENDA												P _{pq} = peso dos CPs pós-queima (à temperatura de 950 °C)										γ _{pl} = massa específica aparente do CP pós-imersão = P _{pl} / V _{pq}										
h _{sol,br} = umidade higroscópica do solo quando da preparação da massa cerâmica												Δ _{M,pq} = perda de massa pós-queima = [(PS - P _{pq}) / PS] x 100										σ _{T-105} = resistência à flexão dos corpos de prova pós-secagem a 105 °C										
h _{CZ,LOCO} = umidade higroscópica das cinzas do lodo quando da preparação da MC												P _{pl} = peso dos CPs pós-imersão em água, 24 horas, temperatur. ambiente										σ _{T-950} = resistência à flexão dos corpos de prova pós-queima a 950 °C										
Δ _{M,600} = perda de massa da massa cerâmica sob temperatura de 600 °C.												A = percentual de absorção d'água = [(P _p - PS) / PS] x 100										σ _{C-105} = resistência à compressão dos corpos de prova pós-secagem a 105 °C										
MC = massa cerâmica												V _{orig} = volume original das formas de cada CP										σ _{C-950} = resistência à compressão dos corpos de prova pós-queima a 950 °C										
CP = corpo de prova (tijolo maciço com dimensões nominais de 10 x 5 x 2,5 cm)												V _{pq} = volume do corpo de prova pós-queima										OBSERVAÇÕES:										
P _{úmida} = peso da massa cerâmica úmida (logo após a moldagem dos CPs)												RV = percentual de retração volumétrica = [(V _{orig} - V _{pq}) / V _{orig}] x 100										- Os resultados em destaque (amarelo) foram estatisticamente descartados										
PS = peso dos CPs efetivamente secos (após 24 horas em estufa a 105 °C)												γ _{pm} = massa específica aparente do CP pós-moldagem = P _{úmida} / V _{orig}																				
h _{PM} = teor de umidade dos CPs pós-moldagem = [(P _{úmida} - PS) / PS] x 100												γ _{pm} = massa específica aparente do CP pós-queima = P _{pq} / V _{pq}																				

Tabela A51 - RESULTADOS DAS ANÁLISES FEITAS NA MASSA CERÂMICA COM 20% DE CINZAS DO LODO 2

		Data de preparação da massa cerâmica: 12/03/2002																															
		$\eta_{\text{solo, ar}}: 4,5 \%$ $H_{\text{CZ_LODO}}: 2,7 \%$ $\Delta_{M,600}: 10,2 \%$																															
		MC-20-CZ-LD2-A (1ª moldagem)										MC-20-CZ-LD2-B (2ª moldagem)																					
		Data de moldagem dos CPs: 18/03/2002										Data de moldagem dos CPs: 25/03/2002																					
Descr.	Unid.	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	CP-05	CP-06	CP-07	CP-08	CP-09	CP-10	Médias	
P _{unid}	g	225,57	235,57	241,44	232,30	234,48	235,83	236,41	236,33	233,08	232,88	230,28	227,84	228,28	226,64	228,86	230,51	233,80	230,45	231,28	228,79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	231,92
PS	g	170,68	178,08	183,28	176,44	178,50	178,38	179,15	179,34	177,08	176,63	173,40	172,19	172,01	171,48	174,45	174,89	177,23	174,74	175,66	173,60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	175,92
h _{PM}	%	32,16	32,28	31,75	31,68	31,38	31,47	31,98	31,78	31,82	31,73	32,80	32,38	32,70	32,17	30,04	31,80	31,92	31,88	31,65	31,64	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	31,93
P _{pq}	g	149,21	155,84	161,34	157,88	158,48	159,09	-	-	-	-	-	-	-	-	-	152,97	155,28	154,81	155,58	152,82	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	155,51
Δ _{M,pq}	%	12,58	12,40	11,98	10,64	12,35	11,31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12,53	12,39	11,52	11,43	12,19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,84
P _{pi}	g	194,60	203,45	211,10	205,84	204,26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	189,40	203,32	202,32	203,48	200,37	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	202,82
A	%	14,01	14,25	15,19	16,86	14,43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14,01	14,72	15,78	15,84	15,29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15,02
V _{orig}	dm³	0,1257	0,1258	0,1275	0,1263	0,1258	0,1268	0,1287	0,1256	0,1287	0,1268	0,1257	0,1258	0,1275	0,1263	0,1258	0,1268	0,1287	0,1256	0,1267	0,1268	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1263
V _{pq}	dm³	0,1034	0,1088	0,1122	0,1094	0,1082	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1054	0,1091	0,108	0,1087	0,1088	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1080
RV	%	17,74	13,54	12,00	13,38	13,85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16,75	13,89	14,01	14,21	15,77	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14,51
γ _{pm}	kg/dm³	1,79	1,88	1,89	1,84	1,87	1,88	1,87	1,88	1,84	1,84	1,83	1,81	1,79	1,79	1,81	1,82	1,85	1,83	1,83	1,80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,84
γ _{pq}	kg/dm³	1,44	1,43	1,44	1,44	1,45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,45	1,42	1,43	1,43	1,43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,44
γ _{pl}	kg/dm³	1,88	1,87	1,88	1,88	1,89	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,89	1,88	1,87	1,87	1,88	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,88
σ _{C_105}	MPa	-	-	-	-	-	-	-	3,51	3,21	3,02	2,99	3,48	3,38	3,67	2,82	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,27
σ _{C_950}	MPa	1,62	2,69	2,84	1,59	2,77	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,83	3,58	3,27	2,45	2,77	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,74
σ _{L_105}	MPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
σ _{L_950}	MPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
LEGENDA		h _{solo, ar} = umidade higroscópica do solo quando da preparação da massa cerâmica										P _{pq} = peso dos CPs pós-queima (à temperatura de 950 °C)										γ _{pl} = massa específica aparente do CP pós-imersão = P _{pi} / V _{pq}											
		h _{CZ_LODO} = umidade higroscópica das cinzas do lodo quando da preparação da MC										Δ _{M,pq} = perda de massa pós-queima = [(PS - P _{pq}) / PS] x 100										σ _{L_105} = resistência à flexão dos corpos de prova pós-secagem a 105 °C											
		Δ _{M,600} = perda de massa da massa cerâmica sob temperatura de 600 °C.										P _{pi} = peso dos CPs pós-imersão em água, 24 horas, temperatur. ambiente										σ _{L_950} = resistência à flexão dos corpos de prova pós-queima a 950 °C											
		MC = massa cerâmica										A = percentual de absorção d'água = [(P _{pi} - PS) / PS] x 100										σ _{C_105} = resistência à compressão dos corpos de prova pós-secagem a 105 °C											
		CP = corpo de prova (tijolo maciço com dimensões nominais de 10 x 5 x 2,5 cm)										V _{orig} = volume original das formas de cada CP										σ _{C_950} = resistência à compressão dos corpos de prova pós-queima a 950 °C											
		P _{unid} = peso da massa cerâmica úmida (logo após a moldagem dos CPs)										V _{pq} = volume do corpo de prova pós-queima										OBSERVAÇÕES:											
		PS = peso dos CPs efetivamente secos (após 24 horas em estufa a 105 °C)										RV = percentual de retração volumétrica = [(V _{orig} - V _{pq}) / V _{orig}] x 100										- O resultado em destaque (amarelo) foi estatisticamente descartado											
		h _{PM} = teor de umidade dos CPs pós-moldagem = [(P _{unid} - PS) / PS] x 100										γ _{pm} = massa específica aparente do CP pós-moldagem = P _{unid} / V _{orig}																					
												γ _{pq} = massa específica aparente do CP pós-queima = P _{pq} / V _{pq}																					

Tabela A52 - RESULTADOS DAS ANÁLISES FEITAS NA MASSA CERÂMICA COM 30% DE CINZAS DO LODO 2

[illegible]

Tabela A53 - RESULTADOS DAS ANÁLISES FEITAS NA MASSA CERÂMICA COM 40% DE CINZAS DO LODO 2

[illegible]

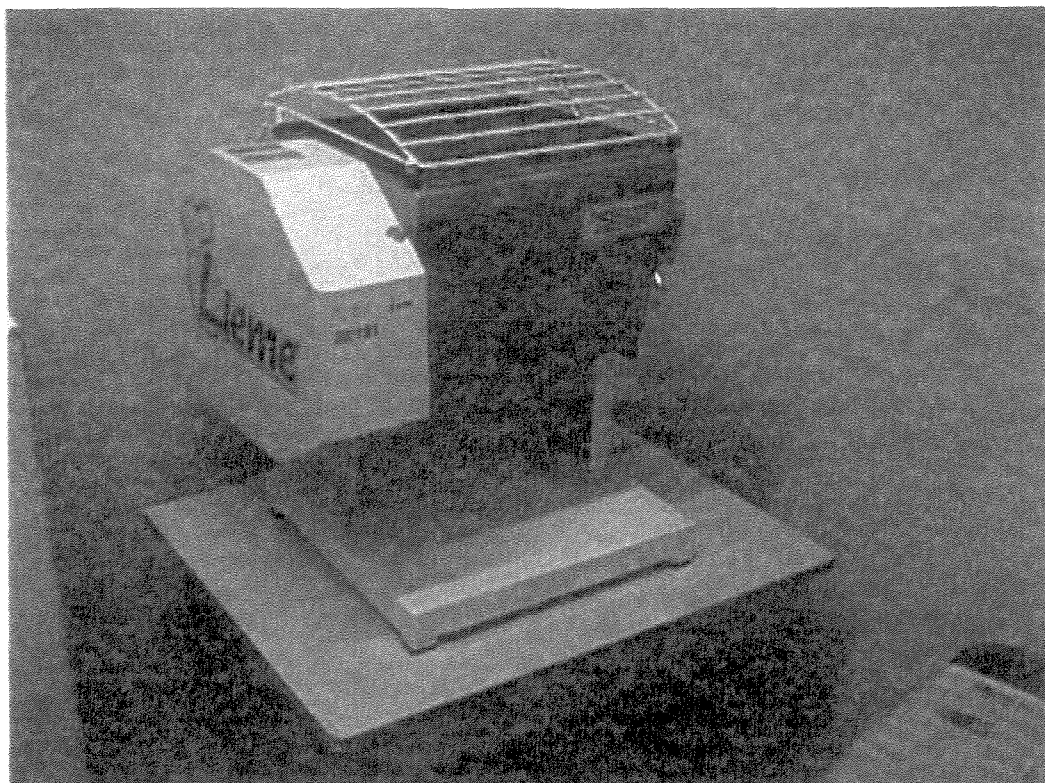


Figura A43 - Vista geral da masseira

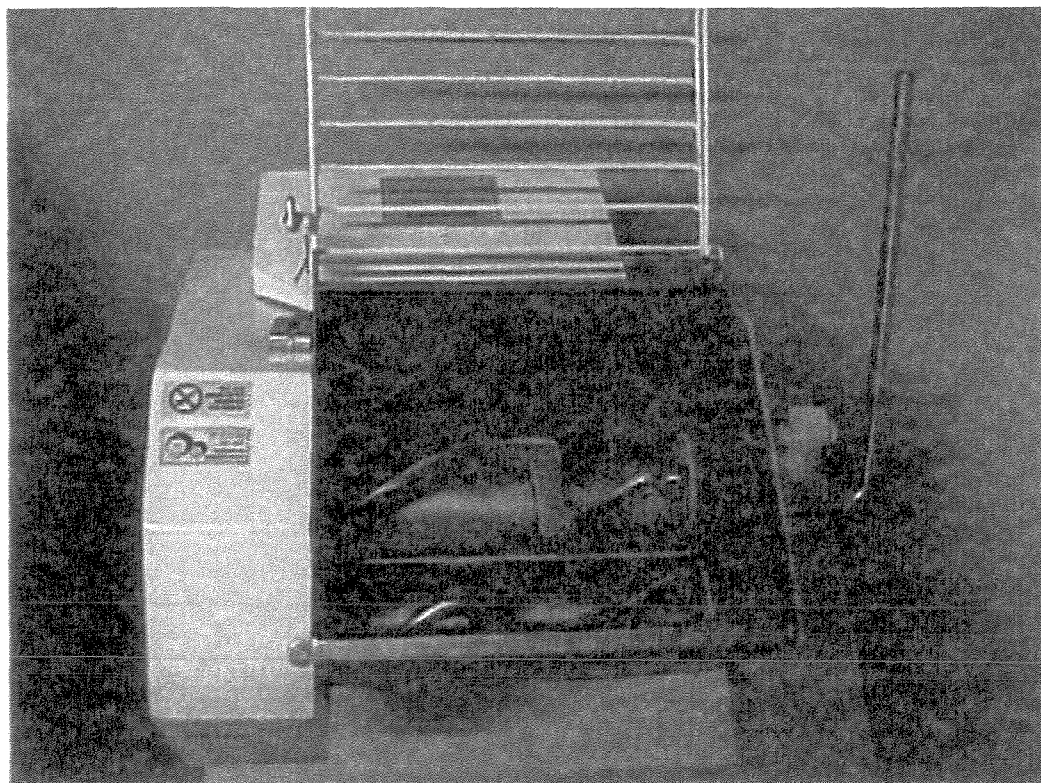


Figura A44 - Detalhe do interior da masseira

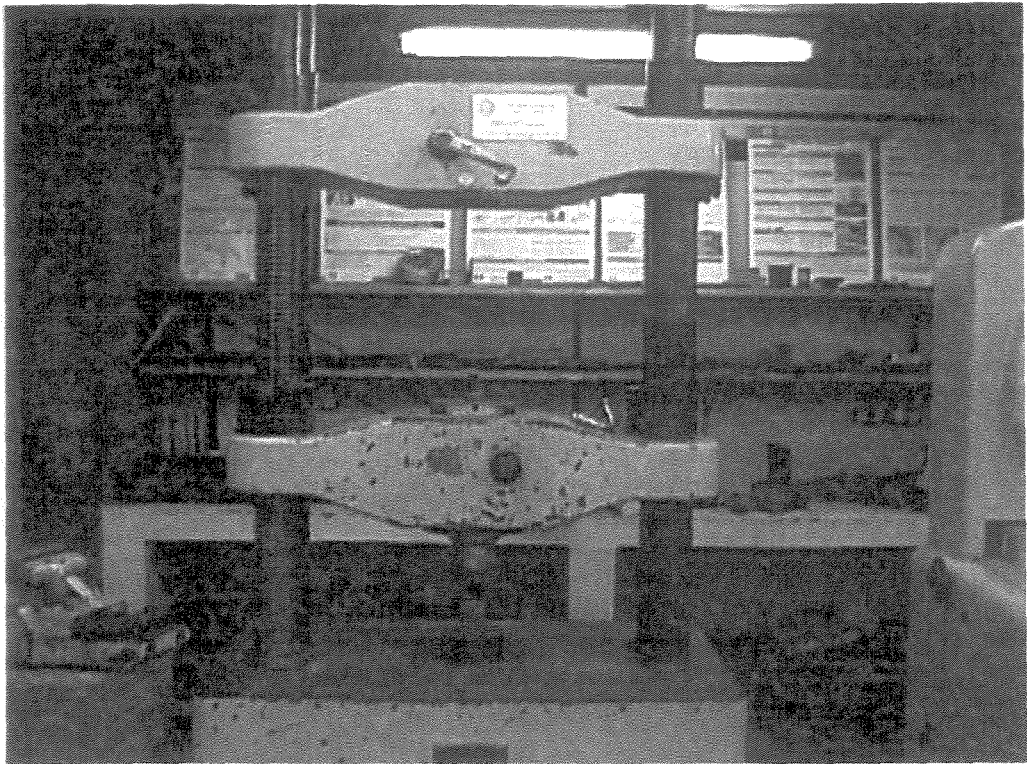


Figura A45 - Vista geral da prensa hidráulica utilizada no ensaio de resistência à compressão

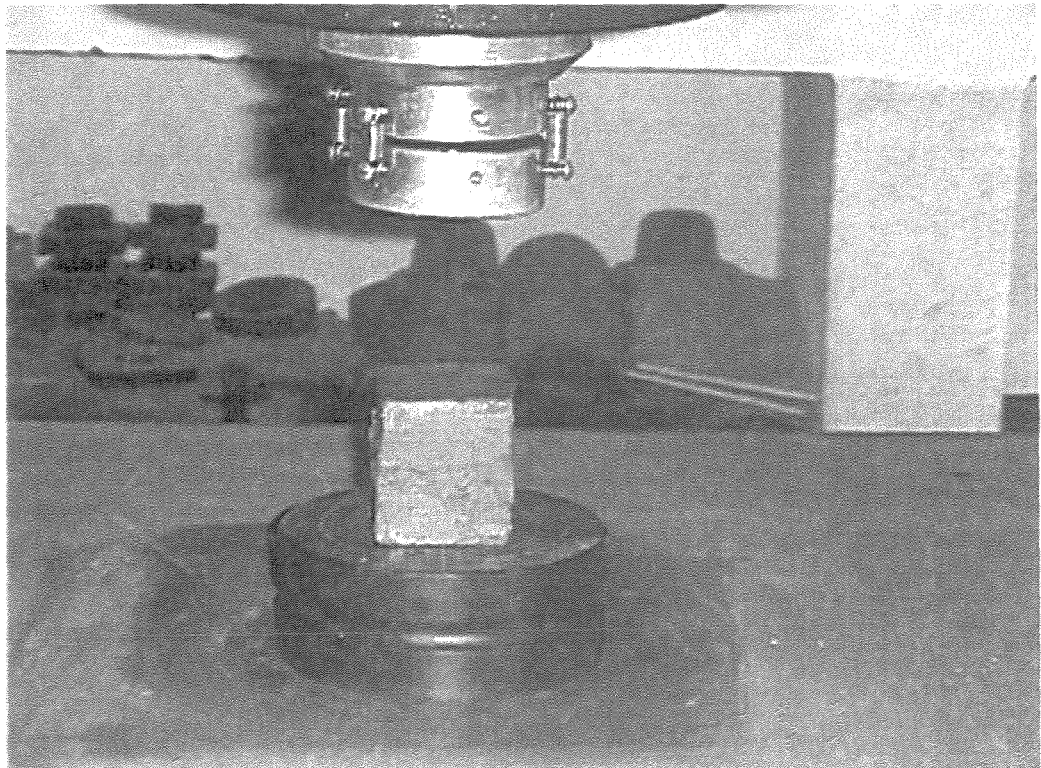


Figura A46 - Detalhe dos dispositivos utilizados no ensaio de resistência à compressão

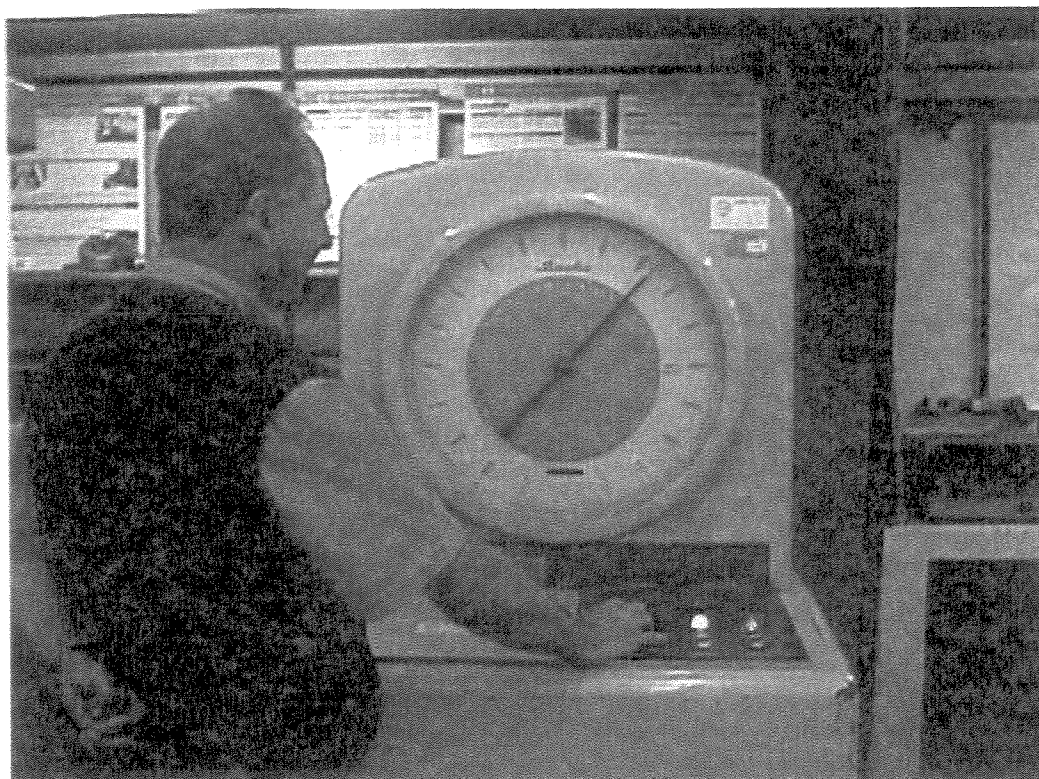


Figura A47 - Detalhe do painel de controle da prensa hidráulica

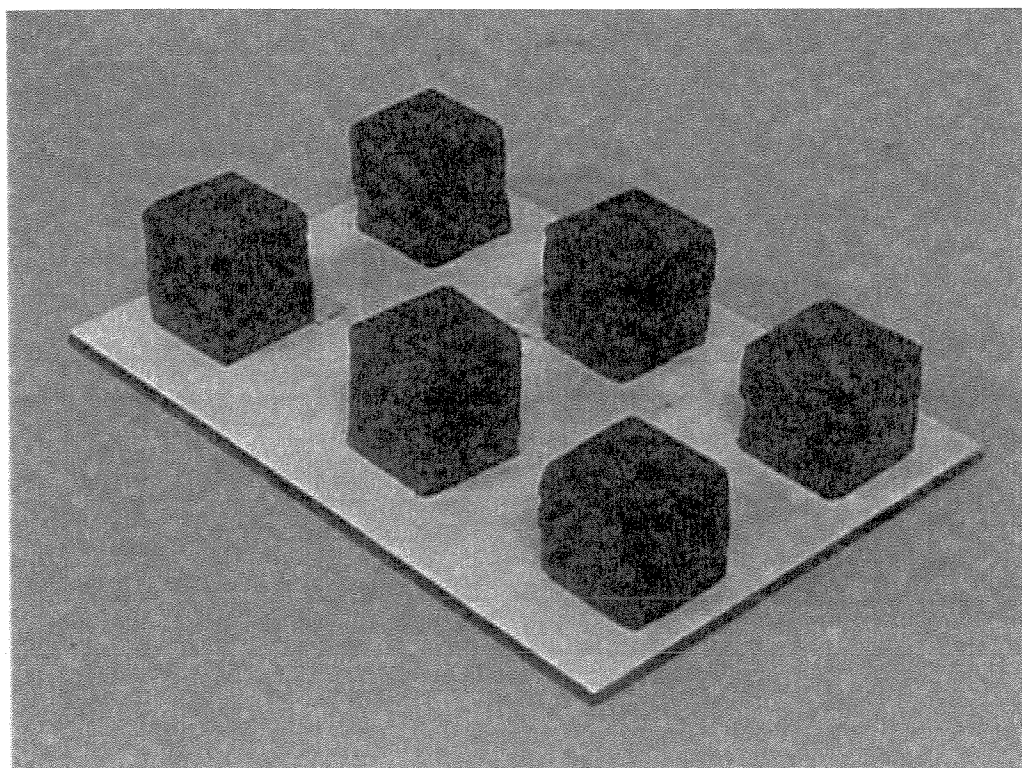


Figura A48 - Corpos de prova preparados para ruptura à compressão

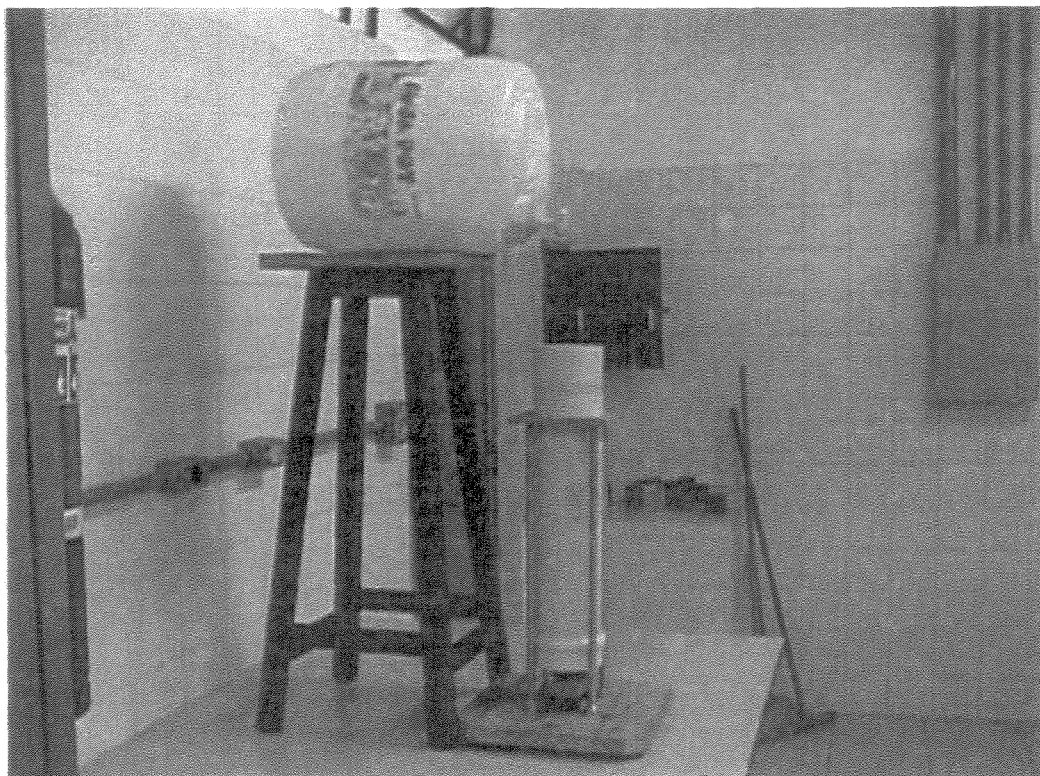


Figura A49 - Vista Geral do dispositivo utilizado no ensaio de resistência à flexão

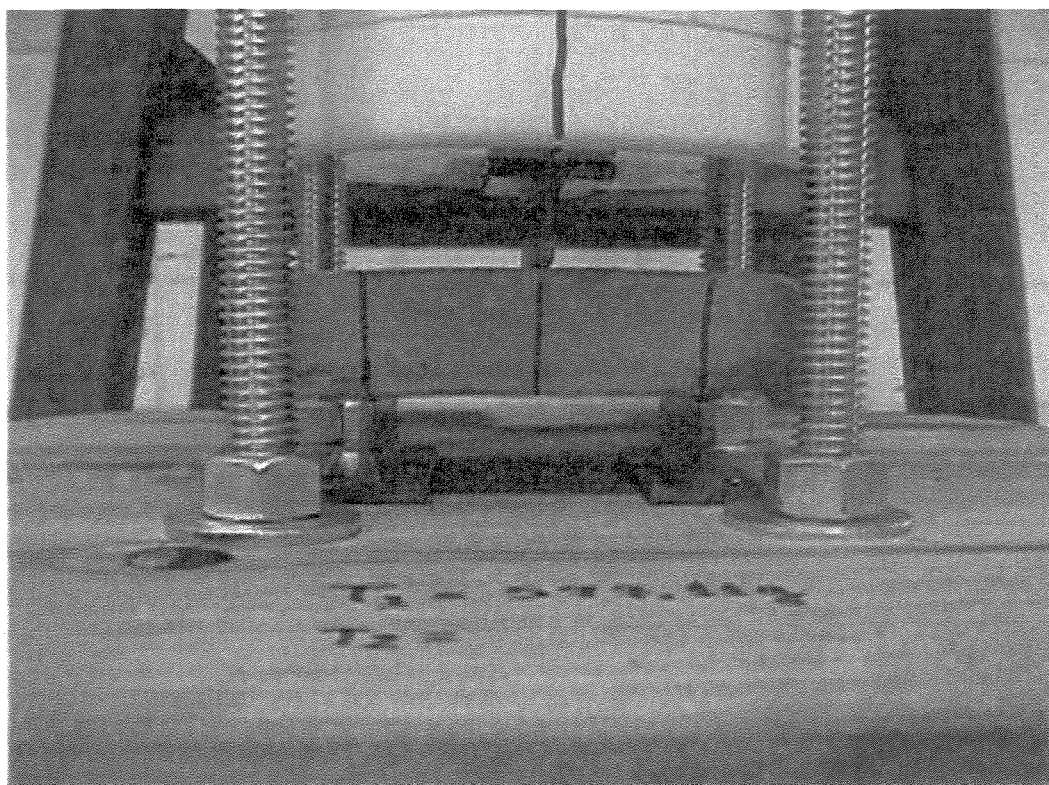


Figura A50 - Detalhe do dispositivo utilizado no ensaio de resistência à flexão

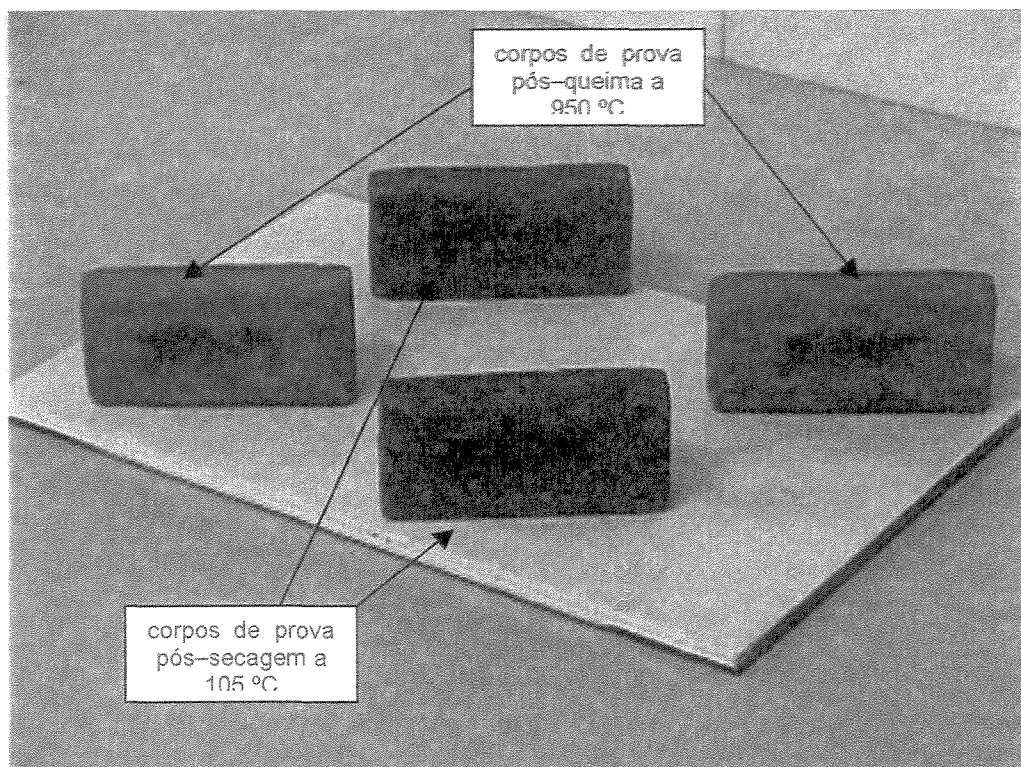


Figura A51 - Aspecto dos corpos de prova utilizados no ensaio de resistência à flexão

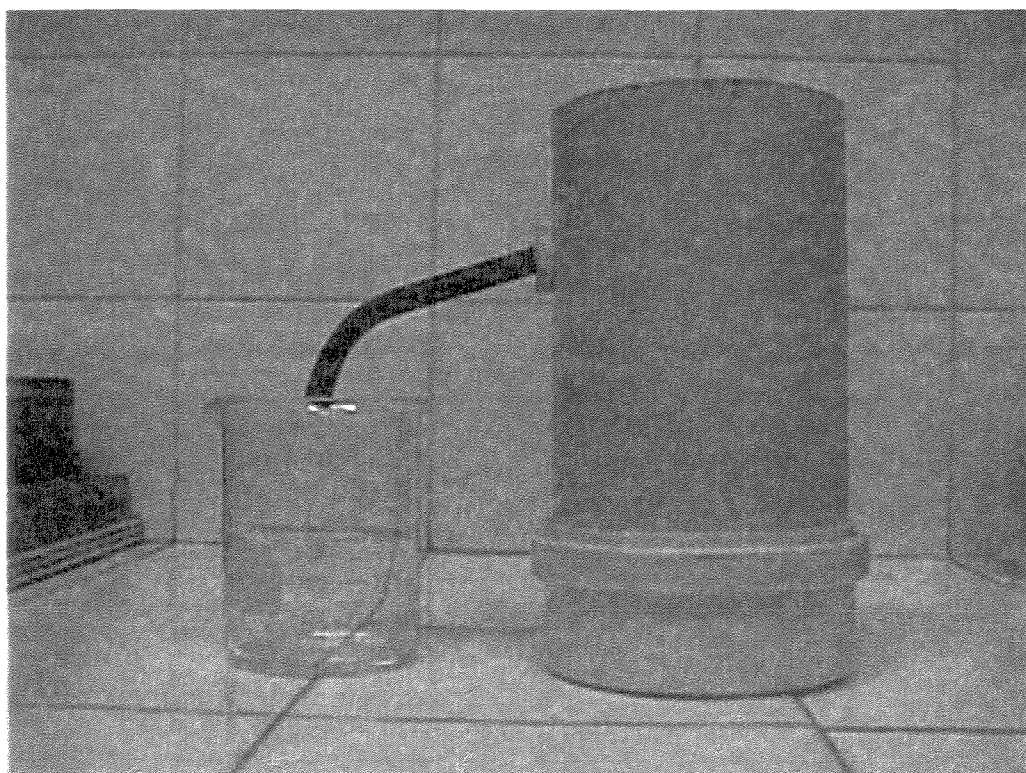


Figura A52 - Vista geral do dispositivo utilizado para medir volume final dos corpos de prova



Figura A53 - Corpos de prova secando ao ar, ainda nas formas de madeira

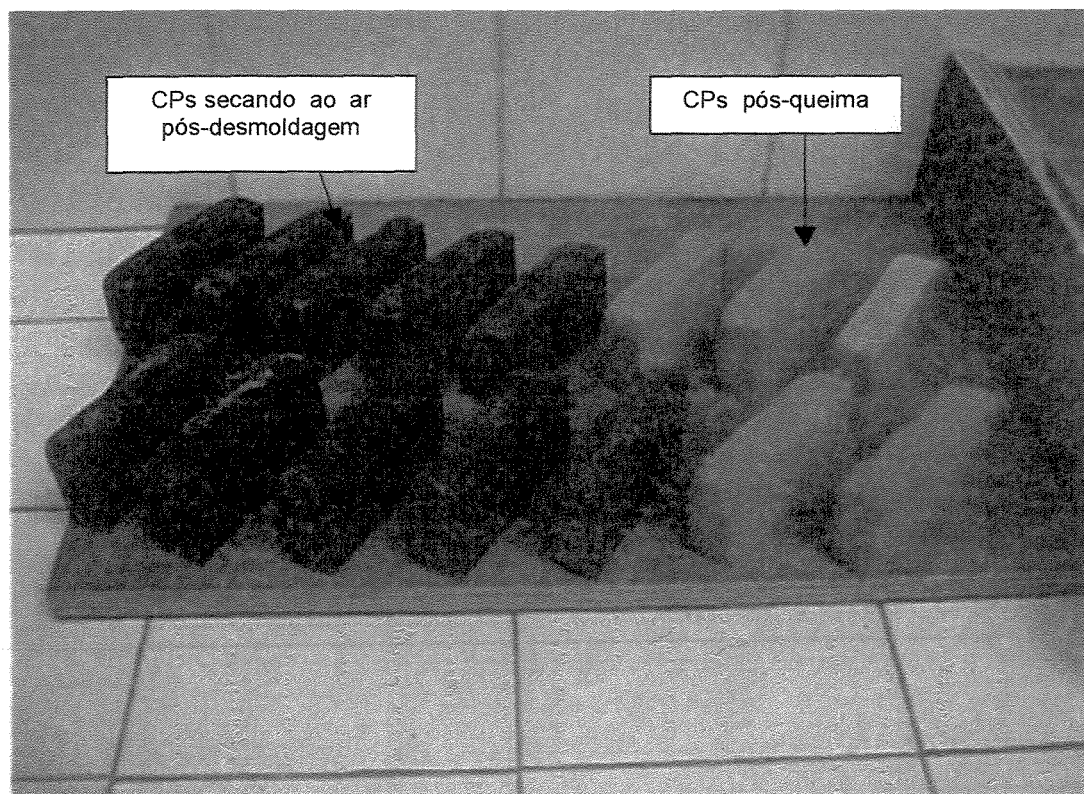


Figura A54 - Aspecto dos corpos de prova secando ao ar pós-desmoldagem e pós-queima

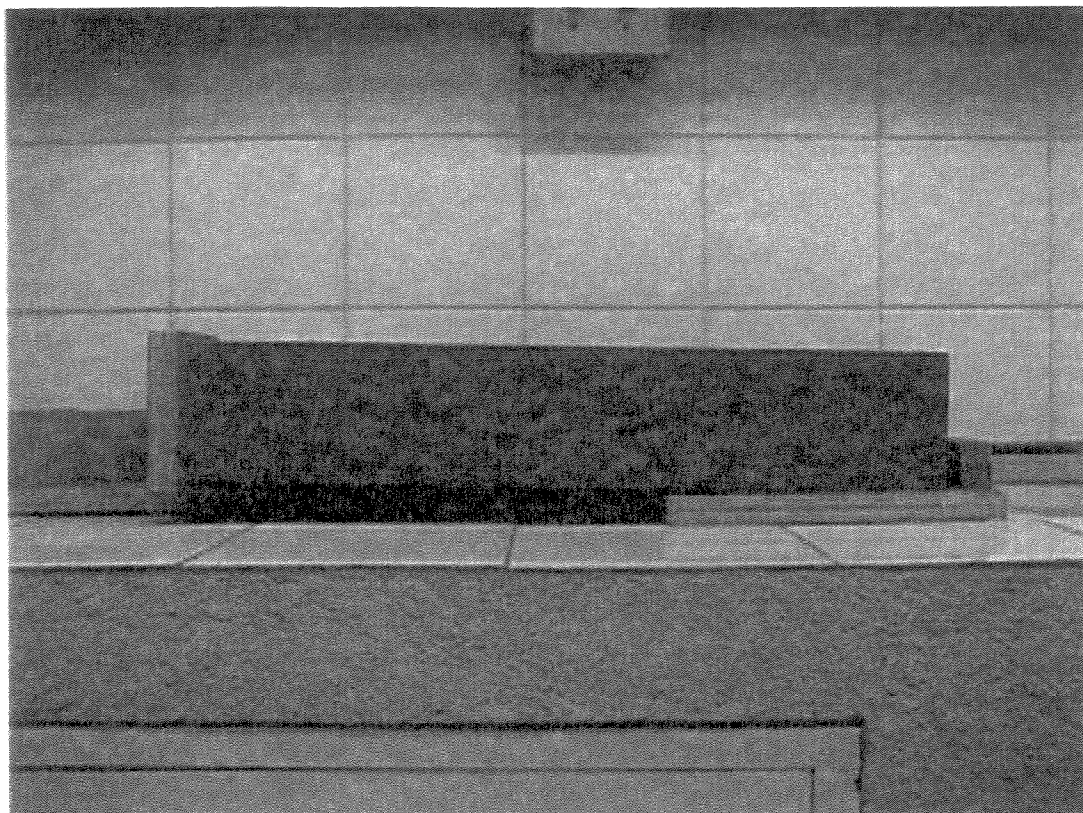


Figura A55 - Dispositivo de confinamento dos corpos de prova – Vista 1



Figura A56 - Dispositivo de confinamento dos corpos de prova – Vista 2

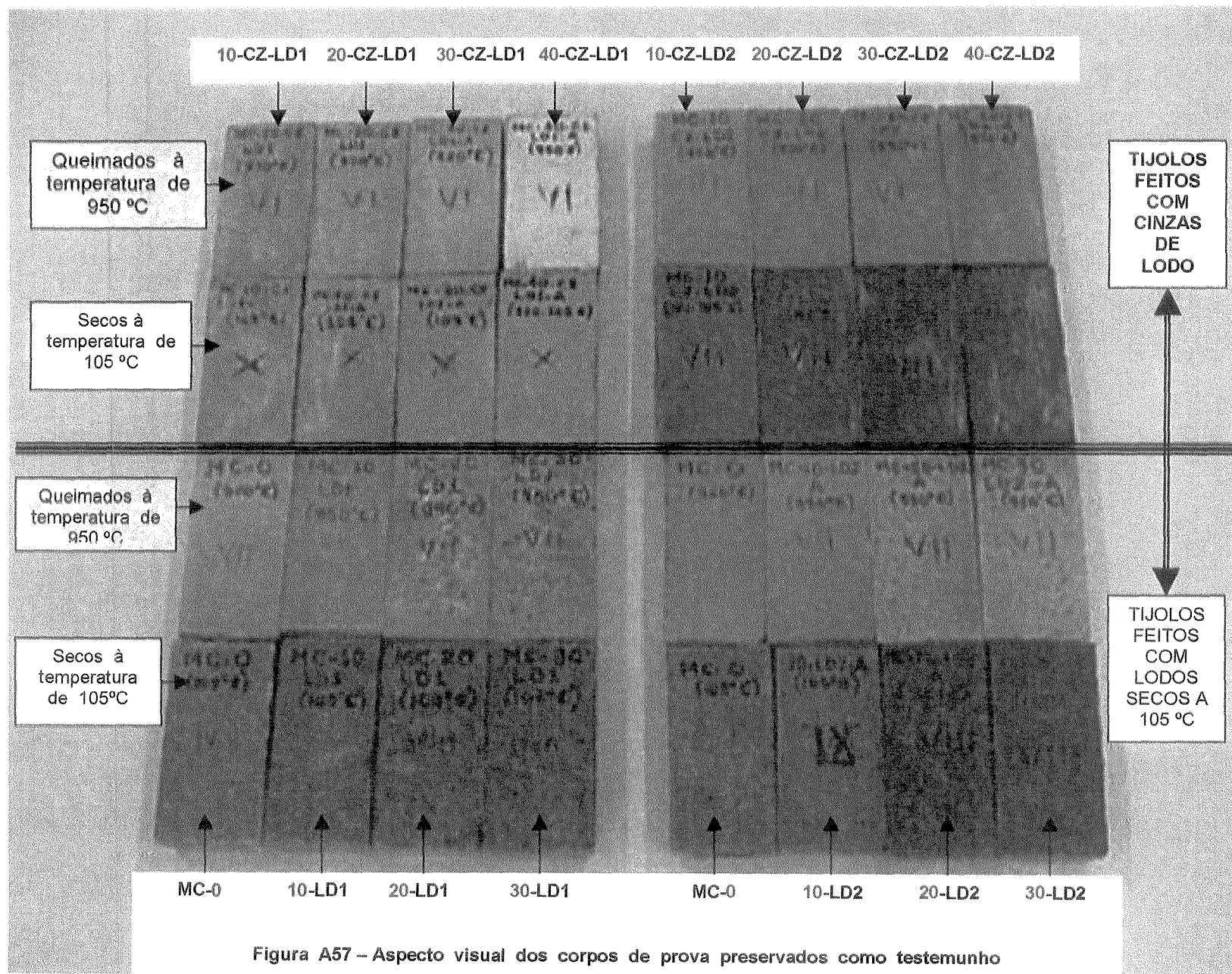


Figura A57 – Aspecto visual dos corpos de prova preservados como testemunho