



COPPE/UFRJ

UTILIZAÇÃO DAS CINZAS DE LODO DE ESGOTO E DE RESÍDUO SÓLIDO
URBANO EM CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO

Cintia Maria Ariani Fontes

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientadores: Romildo Dias Toledo Filho
Maria Claudia Barbosa

Rio de Janeiro
Dezembro de 2008

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

UTILIZAÇÃO DAS CINZAS DE LODO DE ESGOTO E DE RESÍDUO SÓLIDO
URBANO EM CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO

Cintia Maria Ariani Fontes

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:



Prof. Romildo Dias Toledo Filho, D.Sc.



Prof.ª Maria Claudia Barbosa, D.Sc.



Prof. Nilo César Consoli, D.Sc.



Prof.ª Janaíde Cavalcante Rocha, Dr.Ing.



Prof. Eduardo de Moraes Rego Fairbairn, Dr.Ing.



Prof.ª Laura Maria Goretti da Motta, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO DE 2008

Fontes, Cintia Maria Ariani

Utilização das Cinzas de Lodo de Esgoto e de Resíduo Sólido Urbano em Concretos de Alto Desempenho/ Cintia Maria Ariani Fontes. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2008.

XXI, p.: 273, il.; 29,7 cm.

Orientadores: Romildo Dias Toledo Filho e Maria Claudia Barbosa

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2008.

Referências Bibliográficas: p. 252-264.

1. Cinza de lodo de esgoto e de resíduo sólido urbano, 2. Concretos, 3. Metais pesados. I. Toledo Filho, Romildo Dias *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

*À minha mãe Clidelice e meu tio Clidelino
Meu eterno agradecimento e AMOR!*

AGRADECIMENTOS

Após esta longa jornada, a imensa satisfação que sinto ao terminar esta pesquisa é indescritível. Por isso, não posso deixar de agradecer às pessoas, que de algum modo, contribuíram para a realização deste trabalho.

A Deus, presente em todos os momentos da minha vida, agradeço por tudo, senhor!

À minha família, que me apoiou incondicionalmente na realização deste sonho. Sou muito grata a todos vocês. Dedéia, Clidelo, Cláudio, Kelmann, Gordinha, Severino, Cristiane, Leopoldo, minha pequena Duda e meu vovozinho (*in memoriam*) que acompanhou, praticamente, toda esta jornada.

Ao Prof. Romildo, obrigada pela orientação, pelo apoio incondicional, pela amizade e confiança durante esses anos de convivência.

A Prof. Maria Claudia, agradeço pelas contribuições prestadas durante esse período.

Ao amigo Guilherme (GCC), obrigada pela amizade, convivência e apoio. Poder compartilhar contigo as minhas dúvidas foi muito bom!

Às amigas Maria Rita, Reila e Vivian. A convivência com vocês durante todo este tempo me fez perceber como são especiais. Serei eternamente grata pelo carinho, apoio e amizade.

À minha querida amiga Monica, muito obrigada por todo carinho, amizade e apoio durante essa jornada. Foi muito bom ter te reencontrado.

Ao amigo Paulo, obrigada pelas conversas e incentivo, principalmente, na fase final deste trabalho.

À Élcio. A sua ajuda foi fundamental na realização dos meus ensaios. Muito obrigada!

Ao Clodoaldo, Flávio, Hostiano e Júlio. Obrigada por me ajudarem na realização deste trabalho. Sou muito grata a vocês!!!!

Aos colegas do Laboratório de Estruturas muito obrigada pela convivência! Adcleides, Ana Maria, Carlos Cortes, Carlos, Ederli, Eugênia, Flavio, Gadéa, Helena, Janine, João,

Luis, Margareth, Paulo, Rosana, Thais Fernandes, Thais Schoralich, Vanessa. A Lourdes pelo apoio nos ensaios.

Aos colegas do Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ: Alice, Álvaro, Ana Maria, Bororó, Edu, Hélcio, Maria da Glória, Mauro, Rodrigo, Salviano, Serginho. Em especial, aos amigos Carlinhos, Luiz Almeida e Toninho. Ter o apoio de vocês de modo incondicional, foi muito bom!

Aos técnicos do Laboratório de Estruturas do COPPE/UFRJ: Anísio, Arnaldo, Flávio, Manoel, Rosângela, Santiago e Zé Maria e às secretárias Sandra e Luzidelle, muito obrigada pela ajuda, carinho e paciência.

À CEDAE, na pessoa do Eng^o Miguel, por ter cedido à matéria-prima para a realização desta pesquisa.

À Usinaverde, na pessoa do Eng^o Jorge Nascimento, por ter disponibilizado a coleta do resíduo de forma irrestrita.

Ao Laboratório de Tecnologia dos Materiais do Programa de Metalurgia e Materiais do COPPE/UFRJ, na pessoa do Prof. Luiz Marcelo Tavares, pela realização da moagem.

Ao Laboratório de Engenharia do Meio Ambiente da Escola de Engenharia, na pessoa de Maria Cristina Treitler pelos ensaios físico-químicos realizados.

Ao CETEM, na pessoa do Reinner, pelas difrações de raios-x realizadas no setor de Caracterização Tecnológica e Ambiental.

Ao NUCAT pela realização das análises químicas.

Ao Centro de Energia Nuclear/Instituto de Energia Nuclear, na pessoa de Mantovan pelas análises químicas.

Ao órgão de fomento CAPES pelo apoio financeiro.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

UTILIZAÇÃO DAS CINZAS DE LODO DE ESGOTO E DE RESÍDUO SÓLIDO URBANO EM CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO

Cintia Maria Ariani Fontes

Dezembro/2008

Orientadores: Romildo Dias Toledo Filho

Maria Claudia Barbosa

Programa: Engenharia Civil

A reciclagem de resíduos constitui uma importante alternativa para a minimização do impacto ambiental causado pela disposição de grandes volumes de resíduos sólidos. Dentre estes resíduos encontram-se o lodo de esgoto e o resíduo sólido urbano (RSU). No presente estudo avaliou-se a potencialidade de aplicação destes dois resíduos como aditivos minerais em concretos de alto desempenho e argamassas. O lodo de esgoto foi utilizado após processo de queima controlada à temperatura de 550°C. A cinza volante do resíduo sólido urbano (CVRSU) foi obtida através da incineração do RSU como co-gerador de energia. Com o propósito de conferir à cinza de lodo de esgoto (CLE) maior reatividade pozolânica, juntou-se a esta a metacaulinita (MC) de reconhecida atividade pozolânica. Esta mistura binária, designada de blenda (BL), foi produzida através da queima conjunta de 50% de CLE e 50% de caulim. Foram realizadas caracterizações físicas, químicas, mineralógicas e ambientais dos aditivos minerais (MC, CLE, BL e CVRSU). Em seguida, foram produzidos concretos de alto desempenho utilizando teores de substituição de 5 e 10%, em massa, de cimento Portland por aditivo mineral. O desempenho dos concretos foi analisado através de ensaios físicos, mecânicos, de durabilidade e ambientais. Os resultados indicaram que a utilização destes materiais proporcionou melhorias em todas as propriedades dos concretos. Além disso, os metais pesados presentes nos resíduos ficaram retidos nas matrizes cimentícias.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

UTILIZATION OF THE SEWAGE SLUDGE AND URBAN SOLID WASTE ASHES
IN HIGH PERFORMANCE CONCRETE

Cintia Maria Ariani Fontes

December/2008

Advisors: Romildo Dias Toledo Filho

Maria Claudia Barbosa

Department: Civil Engineering

Recycling is an important alternative for the minimization of the environmental impact caused by the disposal of large volumes of solid residues. Amongst these residues one can find the sewage sludge and the municipal solid waste (MSW). In the present study, we evaluated the potential application of these two residues as mineral additives of high performance concretes and mortars. The sewage sludge was used after controlled burning at 550°C. The municipal solid waste fly ash (MSWFA) was obtained through the incineration of the MSW as energy co-generator. Aiming to improve the pozzolanic activity of the sewage sludge ash (SSA), we mixed to metakaolin (MK). This binary mixture, called “blend” (BL), was produced by burning together a mixture of equal parts of SSA and kaolin. The mineral additions (MK, SSA, BL, MSWFA) had its physical, chemical, mineralogical and environmental characteristics determined by experimental tests. Within the framework of this thesis, we produced high performance concretes for which 5 and 10% of Portland cement had been replaced mineral addition, in mass. The performance of these concretes was analyzed through physical, mechanical, durability and environmental tests. The results indicated that the use of the recycled materials improved all the properties of the concretes. Moreover, it was found that heavy metals present in the residues were encapsulated in the cementitious matrix.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVOS	3
1.2	ORGANIZAÇÃO DA TESE	4
2	RESÍDUOS SÓLIDOS	5
2.1	RESÍDUO SÓLIDO URBANO – PRODUÇÃO E COMPOSIÇÃO	7
2.1.1	Composição	8
2.2	LODO DE ESGOTO – PRODUÇÃO E COMPOSIÇÃO	10
2.2.1	Composição	12
2.3	DISPOSIÇÃO FINAL DOS RESÍDUOS SÓLIDOS	14
2.3.1	Processo de incineração	14
2.4	APROVEITAMENTO DAS CINZAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL	16
2.4.1	Cinza de lodo de esgoto	16
2.4.2	Cinza volante do resíduo sólido urbano	18
3	USO DE ADITIVOS MINERAIS EM CONCRETOS	21
3.1	CIMENTO PORTLAND E SUAS REAÇÕES DE HIDRATAÇÃO: UM BREVE HISTÓRICO	21
3.2	ADITIVOS MINERAIS	23
3.2.1	Pozolanas	23
3.2.2	Fíleres	25
3.2.3	Mecanismos de ação dos aditivos minerais	25
3.2.4	Comportamento dos aditivos minerais em matrizes cimentícias	27
4	PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS ADITIVOS MINERAIS	43
4.1	CINZA DE LODO DE ESGOTO	43
4.1.1	Coleta do lodo de esgoto	43
4.1.2	Caracterização físico-química	44
4.1.3	Produção das cinzas de lodo de esgoto	45
4.1.4	Metodologia dos ensaios de caracterização	48

4.1.5	Caracterização físico-química, mineralógica e ambiental	55
4.2	METACAULINITA	64
4.2.1	Coleta da argila caulínica.....	64
4.2.2	Caracterização físico-química e mineralógica.....	64
4.2.3	Características mineralógicas	66
4.2.4	Produção da metacaulinita	67
4.2.5	Caracterização físico-química, mineralógica e ambiental	69
4.3	BLENDA.....	76
4.3.1	Produção	76
4.3.2	Processo de queima	76
4.3.3	Caracterização físico-química, mineralógica e ambiental	77
4.4	CINZA VOLANTE DO RESÍDUO SÓLIDO URBANO.....	84
4.4.1	Produção	84
4.4.2	Caracterização físico-química e mineralógica.....	88
4.4.3	Caracterização físico-química, mineralógica e ambiental	97
5	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	103
5.1	COMPOSIÇÃO DOS MATERIAIS.....	104
5.1.1	Cimento Portland.....	104
5.1.2	Resumo das características físico-químicas dos materiais cimentícios	106
5.1.3	Agregados.....	109
5.1.4	Aditivo químico.....	111
5.1.5	Água	111
5.2	DOSAGEM.....	111
5.2.1	Concretos de alto desempenho.....	111
5.2.2	Argamassas.....	114
5.2.3	Validação dos resultados experimentais utilizando o programa BetonlabPro 2 [®] ..	115
5.3	PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO.....	122
5.3.1	Consistência	122
5.4	MOLDAGEM, ADENSAMENTO E CURA DOS CORPOS-DE-PROVA.....	124

5.5	PROPRIEDADE ENTRE O ESTADO FRESCO E O ENDURECIDO.....	125
5.6	PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO	131
5.6.1	Ensaio mecânicos.....	132
5.6.2	Ensaio de durabilidade.....	135
5.6.3	Ensaio físicos	144
5.6.4	Ensaio ambientais.....	148
6	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	152
6.1	CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO	152
6.1.1	Compatibilidade entre cimento x superplastificante.....	152
6.1.2	Concretos contendo CLE1 e CLE2.....	153
6.1.3	Ensaio adicionais realizados com a CLE1	173
6.1.4	Considerações finais sobre os concretos com CLE1 e CLE2.....	176
6.1.5	Concretos com MC, CLE2 e BL	180
6.1.6	Considerações finais sobre os concretos contendo MC, CLE2 e BL	225
6.2	ARGAMASSAS.....	230
6.2.1	Consistência.....	230
6.2.2	Gráfico tensão x deformação.....	230
6.2.3	Resistência à compressão.....	231
6.2.4	Resistência à tração por compressão diametral	235
6.2.5	Ensaio de absorção por imersão e por capilaridade.....	236
6.2.6	Permeabilidade a gás.....	239
6.2.7	Ensaio ambientais.....	241
6.2.8	Considerações finais sobre as argamassas com CVRSU	245
7	CONCLUSÕES E SUGESTÕES FUTURAS.....	248
7.1	CONCLUSÕES DA PESQUISA.....	248
7.2	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	251
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	252
	ANEXOS	265

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Função de cada etapa do tratamento do lodo de esgotos da E.T.E. Alegria (FONTES, 2003).	11
Figura 4.1: Lay-out da ETE Alegria – local de coleta do LE	43
Figura 4.2: Aspecto dos lodos de esgotos “in-natura” após coleta.	44
Figura 4.3: ATD e ATG do LE1.....	46
Figura 4.4: Fornos utilizados para a pré-queima do lodo de esgoto.	48
Figura 4.5: Fornos utilizados no processo de queima controlada dos materiais.	49
Figura 4.6: Moinho rotativo de porcelana utilizado na moagem da CLE1.....	50
Figura 4.7: Moinho vibratório de aço utilizado na moagem da CVRSU.....	50
Figura 4.8: Moinho vibratório de aço utilizado na moagem da CLE2, MC e BL.	51
Figura 4.9: Granulômetro a laser – MasterSizer 2000.....	51
Figura 4.10: Equipamento e amostra utilizados na análise química dos aditivos minerais.	52
Figura 4.11: Equipamento de análise térmica diferencial e termogravimétrica com DSC.....	53
Figura 4.12: Equipamento de Difração de raios-X – Bruker.....	54
Figura 4.13: Aspecto e curvas granulométricas da CLE1 e CLE2.	55
Figura 4.14: Difrações de raios-X: (a) CLE1 e (b) CLE2.....	60
Figura 4.16: Foto de satélite da AC Cerâmica Ltda.	64
Figura 4.17: Aspecto e granulometria da argila caulinítica.	65
Figura 4.18: Difração de raios-X da argila “in-natura”.	66
Figura 4.19: Processo de queima da argila caulinítica.....	68
Figura 4.20: Aspecto e granulometria da MC.	69
Figura 4.21: Curvas de análise térmica diferencial e termogravimétrica com DSC.....	72
Figura 4.22: Difração de raios-X da metacaulinita.....	73
Figura 4.23: Aspecto da BL e granulometria da MC, CLE2 e BL.	77
Figura 4.24: Difração de raios-X da CLE2, MC e BL.....	81
Figura 4.25 Usina Verde S/A.	84
Figura 4.26: Composição do RSU.....	85
Figura 4.27: Etapas do processo de incineração do RSU.	87
Figura 4.28: Aspecto e granulometria da CVRSU “in-natura”.....	88

Figura 4.29: Aspecto e granulometria da CVRSU após moagem.	89
Figura 4.30: Difração de raios-X da CVRSU.	92
Figura 4.31: Amostras com CVRSU: (a) expansão da amostra e (b) estrutura porosa da amostra.	93
Figura 4.32: Etapas de mistura e sedimentação da cinza.	94
Figura 4.33: Etapas de eliminação do gás hidrogênio e filtração da CVRSU.	95
Figura 4.34: Aparência da cinza após secagem.	95
Figura 4.35: IAP da CVRSU sem lavagem e após lavagem.	96
Figura 4.36: Granulometria da CVRSU sem lavagem e após lavagem.	97
Figura 4.37: Difração de raios-X da CVRSU lavada.	100
Figura 5.1: Granulometria do cimento CII F-32.	104
Figura 5.2: Ensaio de compatibilidade: (a) cone de marsh + proveta e (b) medição do tempo de escoamento.	106
Figura 5.3: Curvas granulométricas dos aditivos minerais e cimento Portland.	107
Figura 5.4: Curva granulométrica do agregado miúdo.	109
Figura 5.5: Curva granulométrica do agregado graúdo.	110
Figura 5.6: Etapas de produção dos concretos.	113
Figura 5.7: Etapas de produção das misturas.	115
Figura 5.8: Fases de empacotamento do ensaio de demanda d'água (CORDEIRO, 2006).	118
Figura 5.9: Etapas do ensaio de vibração e compactação.	120
Figura 5.10: Ensaio de abatimento realizado na mistura CR60.	122
Figura 5.11: Etapas para obtenção do teor de ar incorporado.	123
Figura 5.12: Ensaio de espalhamento na mesa de consistência padrão.	124
Figura 5.13: Etapas da moldagem e cura.	125
Figura 5.14: Preparação e moldagem do prisma.	126
Figura 5.15: Selagem dos moldes e aquisição da temperatura.	127
Figura 5.16: Posicionamento dos relógios e selagem do corpo-de-prova com PVC.	128
Figura 5.17: Selagem dos corpos-de-prova com fita alumínio e novo posicionamento dos relógios.	129
Figura 5.18: Etapas para leitura da retração autógena na posição vertical.	130
Figura 5.19: Tipos de aquisições realizadas nas amostras.	133
Figura 5.20: Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.	135

Figura 5.21: Etapas do ensaio de penetração acelerada por cloretos.	136
Figura 5.22: Ensaio de permeabilidade a gás.	138
Figura 5.23: Amostras submetidas ao ataque por sulfatos.	141
Figura 5.24: Etapas de selagem do corpo-de-prova (SOUZA, 2008).	142
Figura 5.25: Etapas do ensaio de migração iônica.	143
Figura 5.26: Ensaio de absorção de água.	145
Figura 5.27: Gráfico típico do acréscimo de massa aparente em função da raiz quadrada do tempo.	146
Figura 5.28: Etapas da moldagem dos prismas (Fonte: SILVA, 2007).	147
Figura 5.29: Etapas do ensaio de retração por secagem.	148
Figura 5.30: Processo de carotagem e faceamento dos corpos-de-prova.	149
Figura 5.31: Amostras no estado íntegro e demolido.	150
Figura 5.32: Amostras submetidas a 1000°C.	151
Figura 6.1: Curvas teor de sólidos x tempo de escoamento entre o cimento e o SP.	152
Figura 6.2: Gráficos de tensão x deformação das misturas.	154
Figura 6.3: Evolução da resistência à compressão com a idade, para as misturas contendo CLE1 e CLE2.	157
Figura 6.4: Influência da CLE1 e CLE2 no módulo de elasticidade dos concretos.	159
Figura 6.5: Influência da CLE1 e CLE2 na deformação de pico das misturas.	160
Figura 6.6: Influência da CLE1 e CLE2 no coeficiente de Poisson das misturas.	161
Figura 6.7: Influência dos aditivos minerais na R_{tcd} das misturas, aos 28 dias.	162
Figura 6.8: Influência da CLE1 e CLE2 no ganho acumulativo de massa no tempo para as misturas.	166
Figura 6.9: Porosimetria por intrusão de mercúrio: CR60 e CLE1.	167
Figura 6.10: Porosimetria por intrusão de mercúrio: CR60 e CLE2.	168
Figura 6.11: Influência da CLE1 e CLE2 no ensaio de penetração acelerada por cloretos das misturas.	170
Figura 6.12: Influência da CLE1 e CLE2 na permeabilidade das misturas.	171
Figura 6.13: Influência da CLE1 na migração iônica dos concretos.	174
Figura 6.14: Curvas típicas de tensão x deformação das misturas.	181
Figura 6.15: Evolução da resistência à compressão com a idade.	184
Figura 6.16: Resistência à compressão das misturas com a idade.	186
Figura 6.17: Influência dos aditivos minerais no módulo de elasticidade das misturas.	187

Figura 6.18: Influência dos aditivos minerais na deformação de pico das misturas, aos 28 e 91 dias.....	189
Figura 6.19: Ruptura brusca do corpo-de-prova, aos 7 e 365 dias.	190
Figura 6.20: Influência dos aditivos minerais no coeficiente de Poisson das misturas, aos 28 dias.....	190
Figura 6.21: Influência dos aditivos minerais na R_{tcd} das misturas, aos 28 dias.	191
Figura 6.22: Influência dos aditivos minerais no ganho acumulativo de massa de água das misturas.	196
Figura 6.23: Influência da MC na distribuição de poros das misturas, aos 28 dias.	197
Figura 6.24: Influência da CLE2 na distribuição de poros das misturas, aos 28 dias.....	198
Figura 6.25: Influência da BL na distribuição de poros das misturas, aos 28 dias.	199
Figura 6.26: Influência dos aditivos minerais na permeabilidade a gás das misturas, aos 28 e 91 dias. ...	201
Figura 6.27: Influência dos aditivos minerais no ensaio de penetração acelerada por íons cloreto das misturas, aos 28 e 91 dias.....	203
Figura 6.28: Influência da MC na retração autógena do CR60.	205
Figura 6.29: Influência da MC na retração autógena do CR60 em escala logarítmica.....	206
Figura 6.30: Influência da CLE2 na retração autógena.	209
Figura 6.31: Influência da CLE2 na retração autógena: escala logarítmica.	210
Figura 6.32: Influência da BL na retração autógena.....	211
Figura 6.33: Influência da BL na retração autógena: escala logarítmica.....	212
Figura 6.34: Influência da MC na retração por secagem.	213
Figura 6.35: Gráfico de retração por secagem em relação à perda de massa das misturas.	214
Figura 6.36: Influência da CLE2 na retração por secagem.....	215
Figura 6.37: Gráfico de retração por secagem em relação à perda de massa das misturas de referência e com CLE2.	216
Figura 6.38: Influência da BL na retração por secagem.	217
Figura 6.39: Perda de massa da BL no tempo no ensaio de retração por secagem.....	218
Figura 6.40: Espalhamento das argamassas.....	230
Figura 6.41: Curvas típicas de tensão x deformação das misturas, aos 28 e 91 dias.	231
Figura 6.42: Evolução da resistência à compressão com a idade.	232
Figura 6.43: Influência da CVRSU no módulo de elasticidade das argamassas com a idade.	233
Figura 6.44: Influência da CVRSU na deformação de pico das argamassas com a idade.....	234
Figura 6.45: Influência da CVRSU na R_{tcd} das argamassas, aos 28 dias.	235

Figura 6.46: Ganho acumulativo de água em função da raiz quadrada do tempo para as misturas AR, CVRSU5% e CVRSU10%.....	237
Figura 6.47: Influência da CVRSU na distribuição de poros das misturas AR, CVRSU5% e CVRSU10%, aos 28 dias.	238
Figura 6.48: Influência da CVRSU na permeabilidade a gás das misturas, aos 28 e 91 dias.	240

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Quantidade diária de lixo coletado por unidade de disposição no Brasil.....	7
Tabela 2.2: - Distribuição típica dos componentes dos resíduos sólidos urbanos	8
Tabela 2.3: Composição do RSU no município do Rio de Janeiro.	9
Tabela 2.4: Análise química dos lodos “in-natura” gerado em várias E.T.E’s.....	13
Tabela 4.1: Teor de umidade, de sólidos totais e de matéria orgânica dos LE’s coletados.	44
Tabela 4.2: Resultados referentes a emissões gasosas no LE1 e na CLE1	47
Tabela 4.3: Diâmetros referentes a porcentagem de.....	56
Tabela 4.4: Características físico-químicas das amostras de CLE1 e CLE2	57
Tabela 4.5: Resultados obtidos para o índice de atividade pozolânica das amostras de CLE1 e CLE2.	59
Tabela 4.6: Resultados referente ao ensaio de lixiviação em amostras de CLE’s	61
Tabela 4.7: Resultados referentes ao ensaio de solubilização nas CLE’s.....	62
Tabela 4.8: Características físico-químicas da argila.	65
Tabela 4.9: Características físico-químicas da metacaulinita.	70
Tabela 4.10: Resultado referente ao índice de atividade pozolânica da MC.	70
Tabela 4.11: Resultados referentes ao ensaio de lixiviação na metacaulinita.....	74
Tabela 4.12: Resultados referentes ao ensaio de solubilização na metacaulinita.	75
Tabela 4.13: Características físico-químicas da CLE2, MC e BL.....	78
Tabela 4.14: Resultados referentes aos índices de atividade pozolânica das CLE2, MC e BL.	79
Tabela 4.15: Resultados referentes ao ensaio de lixiviação na MC, CLE2 e BL.	82
Tabela 4.16: Resultados referente ao ensaio de solubilização na BL	83
Tabela 4.17: Características química da CVRSU.....	90
Tabela 4.18 Análise química da CVRSU da caldeira.	91
Tabela 4.19: Resultado referente ao índice de atividade pozolânica CVRSU lavada.....	96
Tabela 4.20: Composição química da CVRSU lavada.	98
Tabela 4.21: Análise química da água de lavagem da CVRSU.....	99
Tabela 4.22: Resultados referentes ao ensaio de lixiviação na CVRSU lavada.	101
Tabela 4.23: Resultados referentes ao ensaio de solubilização na CVRSU lavada.	102
Tabela 5.1: Composição físico-química e mecânica do CPH F-32 do presente estudo.	105

Tabela 5.2: Resumo das características referentes aos aditivos minerais a ao cimento Portland empregados no presente estudo.	108
Tabela 5.3: Caracterização física do agregado miúdo do presente estudo.....	109
Tabela 5.4: Características físicas do agregado graúdo do presente estudo.	110
Tabela 5.5: Características físicas e químicas do superplastificante do presente estudo.	111
Tabela 5.6: Nomenclatura utilizada para designação dos concretos de alto desempenho.	112
Tabela 5.7: Traço e consumo das misturas para 1m ³ de concreto.	112
Tabela 5.8: Traço e consumo de materiais por m ³ de argamassa.	114
Tabela 5.9: Dados de entrada necessários para a formação do banco de dados.	117
Tabela 5.10: Compacidade experimental do cimento.....	119
Tabela 5.11: Compacidade experimental da areia e brita.	121
Tabela 5.12: Características dos extensômetros elétricos.....	133
Tabela 5.13: Classificação das misturas de acordo com relação entre a passagem de carga e a penetração dos íons cloreto (ASTM C 1202, 1997)	137
Tabela 5.14: Divisão do sistema de poros usada no presente estudo.....	139
Tabela 6.1: Consistência das misturas.	153
Tabela 6.2: Propriedades mecânicas dos concretos com CLE1 e CLE2, aos 28 e 91 dias.	155
Tabela 6.3: Evolução da resistência à compressão com a idade, com seus respectivos coeficientes de variação (%).	156
Tabela 6.4: Resultados de R _{tcd} e R _c , com seus respectivos coeficientes de variação (%) e as relações entre R _{tcd} e R _c	164
Tabela 6.5: Absorção de água, índice de vazios e massa específica das misturas.....	164
Tabela 6.6: Distribuição do tamanho de poros das misturas de referência e com CLE1 e CLE2.....	169
Tabela 6.7: Resultados de fluxo e coeficiente de difusão.....	175
Tabela 6.8: Resultados das misturas no estado fresco.	180
Tabela 6.9: Propriedades mecânicas dos concretos de referência e com aditivos minerais.....	182
Tabela 6.10: Resistência à compressão dos concretos em função do tempo, com seus respectivos coeficientes de variação (%).	183
Tabela 6.11: Resultados de R _{tcd} e R _c , com seus respectivos coeficientes de variação (%) e as relações entre R _{tcd} e R _c	192
Tabela 6.12: Resultados teóricos e experimentais relacionados ao concreto CR60.	193

Tabela 6.13: Resultados de absorção de água, índice de vazios, massa específica e absortividade das misturas de referência e com aditivos minerais, com seus respectivos coeficientes de variação.	194
Tabela 6.14: Distribuição do tamanho de poros das misturas de referência, MC, CLE2 e BL.	200
Tabela 6.15: Valores de retração autógena no tempo para as misturas CR60, MC5% e MC10%.	208
Tabela 6.16: Valores de retração autógena no tempo para as misturas	209
Tabela 6.17: Valores de retração autógena no tempo para as misturas CR60, BL5% e BL10%.	212
Tabela 6.18: Valores de retração por secagem no tempo para as misturas CR60, MC5% e MC10%.	214
Tabela 6.19: Valores de retração por secagem no tempo para as misturas CR60, CLE2-5% e CLE2-10%.	216
Tabela 6.20: Valores de retração por secagem no tempo para as misturas CR60, BL5% e BL10%.	218
Tabela 6.21: Resultados do ensaio de solubilização em amostras no estado íntegro.	219
Tabela 6.22: Resultados do ensaio de solubilização em amostras submetidas à situação de molhagem e secagem.	221
Tabela 6.23: Resultados do ensaio de solubilização em amostras no estado demolido.	222
Tabela 6.24: Resultados do ensaio de solubilização em amostras queimadas a 1000°C.	223
Tabela 6.25: Propriedades mecânicas das argamassas, aos 28 e 91 dias.	231
Tabela 6.26: Resistência à compressão das argamassas nas idades de 1, 3, 7, 28 e 91 dias – C.V. (%)...	232
Tabela 6.27: Resultados de Rc, Rtd e Rtd/Rc, aos 28 dias.	235
Tabela 6.28: Absorção de água, índice de vazios e massa específica das misturas.	236
Tabela 6.29: Distribuição do tamanho de poros das misturas AR, CVRSU5% e CVRSU10%.	239
Tabela 6.30: Resultados do ensaio de solubilização em amostras no estado íntegro.	241
Tabela 6.31: Resultados do ensaio de solubilização em amostras submetidas a situação de molhagem-secagem.	242
Tabela 6.32: Resultados do ensaio de solubilização em amostras no estado demolido.	243

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A: Área do corpo-de-prova em contato direto com a água.

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI: American Concrete Institute

ATD: Análise térmica diferencial

ATG: Análise termogravimétrica

BL: blenda

C₃A: Aluminato tricálcico

CAD: Concreto de alto desempenho.

C₄AF: Ferroaluminato tetracálcico

CH: Hidróxido de cálcio ou Portlandita

CLE: cinza de lodo de esgoto

CO₂: dióxido de carbono

COMLURB: Companhia de Limpeza Urbana do Rio de Janeiro

CR: concreto de referência

C₃S: Silicato tricálcico

C₂S: Silicato dicálcico

CŠH₂: Gesso

C-S-H: Silicato de cálcio hidratado.

C.V.: Coeficiente de variação.

CVRSU: cinza volante do resíduo sólido urbano

D: diâmetro

dc: diâmetro crítico

DMC: Diâmetro máximo característico do agregado.

E: módulo de elasticidade

E.T.E.: Estação de Tratamento de Esgoto.

ϵ : deformação de pico

ϵ_T : deformação térmica

ϵ_{e1} : Deformação axial no valor de $50\mu\epsilon$.

ϵ_{e2} : Deformação produzida pela tensão σ_2

K: Coeficiente de compactação.

LE: lodo de esgoto
MEC: Modelo de empacotamento compressível.
MF: Módulo de finura.
MC: metacaulinita
 μm : micrômetro
 $\mu\epsilon$: microstrain
P.S.: Ponto de saturação.
 P_t : Ponto de Transição.
Rc: resistência à compressão axial
RSU: resíduo sólido urbano
Rtcd: Resistência à tração por compressão diametral
S1: Absortividade no estágio inicial.
S2: Estágio de saturação.
S.P.: Superplastificante.
t: Tempo.
T: temperatura
 T_t : Tempo de transição entre os estágios S1 e S2.
TA: taxa de aquecimento
TR: tempo de residência
UR: umidade relativa
Vat: Volume total de água utilizado na mistura.
v: coeficiente de Poisson
W: Ganho acumulativo de água.

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional aliado ao desenvolvimento industrial e tecnológico vem intensificando a quantidade de material a ser descartado, pois o termo “qualidade de vida” passou a ser sinônimo de “elevado padrão de consumo” para a sociedade atual. Esta grande produção de materiais descartáveis passou a ser um dos principais motivos de degradação do meio ambiente. Para GRIPP (1998), a problemática dos resíduos sólidos aumenta em função da extensão, densidade e desenvolvimento sócio-econômico da comunidade.

Nos grandes centros urbanos observa-se uma situação mais crítica em função do rápido crescimento populacional, que é agravada pela migração das populações rurais em busca por melhores condições de vida. Devido ao baixo poder aquisitivo dessas populações, elas normalmente ocupam os arredores das grandes cidades provocando um crescimento físico sem planejamento. Essa ocupação desordenada do espaço físico urbano traz como consequência, além da escassez de áreas para a construção de novos aterros sanitários, o aumento no custo de transporte dos resíduos, visto que as distâncias entre o centro gerador de resíduo e o aterro tornam-se maiores, o que vem se tornando um problema de difícil solução.

Com isso, parte destes resíduos acaba sendo disposta em lixões que, na maioria das vezes, são desprovidos de planejamento e acabam poluindo o ar, solo ou águas subterrâneas (FARIAS, 2002). Esta situação está se tornando comum em praticamente todo o país e também em quase todo o mundo, trazendo reflexos negativos às condições sanitárias da comunidade, prejuízo à saúde pública e o meio ambiente (GRIPP, 1998).

Na tentativa de deter e inverter os efeitos de degradação do meio ambiente, em todos os países, por meio de um desenvolvimento sustentável e ambientalmente saudável, o tratamento e disposição dos resíduos foram reconhecidos pela Agenda 21 na Conferência Mundial de Meio Ambiente, que ocorreu no Rio de Janeiro, no ano de 1992. Foi então incorporado à Agenda 21, o capítulo 21, cujo tema é “Manejo

Ambientalmente Saudável dos Resíduos e Questões Relacionadas com os Esgotos”. Foram definidos quatro programas relacionados com os resíduos: (a) Redução ao mínimo dos resíduos; (b) Aumento ao máximo da reutilização e reciclagem ambientalmente saudáveis dos resíduos; (c) Promoção do depósito e tratamento ambientalmente saudáveis dos resíduos; (d) Ampliação do alcance dos serviços que se ocupam dos resíduos (SENADO FEDERAL, 2000).

Neste sentido, muitos países vêm adotando, além da técnica da reciclagem, a incineração porque além de reduzir substancialmente o volume de resíduo sólido a ser disposto nos aterros sanitários, o seu poder calorífico gera energia elétrica durante sua combustão, tornando-se uma prática interessante do ponto de vista ambiental. Apesar da incineração ser considerada como uma forma de disposição final, este processo não deveria se apresentar como uma solução completa e definitiva, visto que durante a queima dos resíduos são gerados dois tipos de cinza (cinza de fundo e cinza volante) e estas acabam necessitando de outra forma de disposição. Além disso, por estarem normalmente contaminadas com metais pesados, requerem processos de estabilização/solidificação antes de sua disposição direta nos aterros.

A construção civil, por consumir uma grande quantidade de matéria-prima natural, vem se tornando uma grande recicladora destes resíduos CECCATO (2003), ao mesmo tempo em que contribui para a prática do desenvolvimento sustentável. Várias são as possibilidades de uso destas cinzas neste setor: argamassas, concretos para pavimentação, concretos para estrutura (concretos de resistência convencional e de alto desempenho) e blocos cerâmicos. Nestes tipos de materiais a cinza tem sido utilizada como fíler mineral na produção de concreto asfáltico (AL SAYED, *et al.*, 1994), fíler para argamassas e concretos (FONTES, 2003; TAY, *et al.*, 2002) e agregados leve e miúdo (RÉMOND *et al.*, 2002; MORALES & AGOPYAN, 1992).

No presente estudo, foram produzidas cinzas finas de lodo de esgoto e de resíduo sólido urbano com granulometria inferior a do cimento, de forma a potencializar a sua ação físico-química, sendo as mesmas utilizadas como aditivo mineral em concretos de alto desempenho. Este tipo de matriz foi escolhido visando o encapsulamento dos metais pesados normalmente presentes nestes tipos de cinzas. O seu uso como aditivo mineral foi em função da minimização da emissão de CO₂ devido à redução do volume de cimento Portland na mistura. Esta prática vem sendo realizada com sucesso em relação

a resíduos agroindustriais (CORDEIRO, 2006), industriais (MASUERO, 2001; MOURA, 2000) e cerâmicos (GONÇALVES, 2005).

A produção de resíduos sólidos no Brasil vem crescendo de modo acelerado nos últimos anos. No caso de RSU, em 2000 foram coletados cerca de 228.413,0 toneladas/dia (IBGE, 2000). Dados de 2005, obtidos por meio da Companhia de Limpeza Urbana do Rio de Janeiro, indicou um recebimento municipal de 8.943t/dia. Deste montante, excluindo os resíduos de serviço de saúde, permanecem 8.900t/dia de RSU. Em relação ao lodo de esgoto, VOLSCHAN JUNIOR (1999) previu uma quantidade, em 2010, de aproximadamente, 1.500 toneladas/dia para o Rio de Janeiro. Estes dois tipos de resíduos, após processo de queima, geram entre 10% e 20% de cinza, em massa. Adotando-se um percentual de sólido fixo de 15%, isto significa dizer que existe a possibilidade de serem gerados, diariamente, cerca de 1.300 toneladas de cinza de RSU e 300 toneladas de cinza de lodo de esgoto. Estes valores demonstram a necessidade de viabilizar o uso dessas cinzas através de práticas sustentáveis. Neste sentido, a sua aplicação como aditivo mineral em matrizes cimentícias, de forma adequada e ambientalmente segura, contribuirá de modo relevante para a sustentabilidade.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal do presente estudo foi avaliar a viabilidade de aplicação das cinzas de lodo de esgoto (CLE) e de resíduo sólido urbano (CVRSU) como aditivo mineral na produção de concretos de alto desempenho ($f_{c28} = 60$ MPa) e argamassas. Para isso, além de um vasto programa de caracterização físico-química, mineralógica e ambiental desses materiais, foram também realizados ensaios físico-mecânicos e de durabilidade nos concretos e argamassas. Para avaliar o comportamento dessas cinzas a longo tempo, foram previstos ensaios físico-mecânicos até a idade de 365 dias.

Adicionalmente, como tais cinzas apresentam em sua composição metais pesados, foi investigado também o encapsulamento destes na microestrutura dos concretos através de ensaios ambientais de lixiviação e solubilização.

Em paralelo, com o propósito de conferir maior reatividade à CLE, foi produzida em laboratório uma mistura binária, designada de blenda (BL), composta de 50% de CLE e 50% de metacaulinita (MC). Este aditivo mineral foi empregado em concretos de alto

desempenho. A sua caracterização e desempenho foram realizados de maneira similar às cinzas.

1.2 ORGANIZAÇÃO DA TESE

A presente pesquisa é composta de 7 capítulos e está organizada da seguinte maneira:

Capítulo 1 – *Introdução*: neste capítulo se pode ter uma visão geral sobre os problemas causados pelos resíduos sólidos, a importância da reciclagem e os benefícios trazidos com o aproveitamento destes resíduos. Em seguida, são apresentados os objetivos do estudo.

Capítulo 2 – *Revisão bibliográfica sobre resíduos sólidos*: este capítulo aborda a composição, produção e emprego das cinzas de lodo de esgoto e de resíduo sólido urbano, utilizadas no presente estudo;

Capítulo 3 – *Revisão bibliográfica sobre aditivos minerais*: abordagem sobre os materiais cimentícios, as reações envolvidas no processo de hidratação das matrizes cimentícias e contribuição dos aditivos minerais às propriedades dos materiais;

Capítulo 4 – *Caracterização dos aditivos minerais*: coleta, produção e caracterização físico-química, mineralógica e ambiental dos aditivos minerais utilizados no presente estudo (cinzas de lodo de esgoto e do resíduo sólido urbano, metacaulinita e blenda);

Capítulo 5 – *Programa experimental*: apresenta-se o programa experimental realizado em argamassas e concretos de alto desempenho, bem como a metodologia dos ensaios físico-mecânicos, de durabilidade e ambiental realizados nas misturas no estado fresco e endurecido;

Capítulo 6 – *Apresentação e análise dos resultados*: neste capítulo os resultados obtidos durante a realização do programa experimental são apresentados e discutidos;

Capítulo 7 – *Conclusões e sugestões para futuros pesquisas*.

2 RESÍDUOS SÓLIDOS

No Brasil, a NBR 10004 (ABNT, 2004) define resíduos sólidos como *“resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível”*.

Outros autores definem resíduos sólidos como materiais heterogêneos oriundos de atividades humanas, os quais podem ser parcialmente utilizados, trazendo benefícios à saúde pública e economia de recursos naturais (FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE, 1999). Para MONTEIRO *et al.* (2001) resíduo sólido *“é todo material sólido ou semi-sólido indesejável e que necessita ser removido por ter sido considerado inútil por quem o descarta em qualquer recipiente destinado a este ato”*.

Existem diversas formas de classificação dos resíduos sólidos que, de acordo com FARIAS (2002), varia conforme os tipos de constituintes existentes na composição física do lixo. A ABNT, por exemplo, classifica o resíduo sólido através da NBR 10004 (ABNT, 2004) em três categorias. E esta tem por objetivo avaliar o seu risco ao meio ambiente e à saúde pública para que os mesmos possam ser manuseados e dispostos adequadamente. As classes previstas são:

Classe I – resíduo perigoso: são resíduos que em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosa, podem oferecer riscos à saúde pública ocasionando um aumento da mortalidade ou incidência de doenças (periculosidade) e/ou riscos ao meio ambiente quando o resíduo é manuseado ou destinado de forma inadequada, ou então, quando o resíduo apresentar uma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade. Após esta etapa, o ensaio de

lixiviação, conforme a NBR 10005 (ABNT, 2004), deve ser realizado na amostra. Caso algum parâmetro se apresente em concentração acima da máxima permitida (listagem F da NBR 10004, 2004), o mesmo será considerado resíduo perigoso. Caso contrário, a amostra deve ser submetida ao ensaio de solubilização (NBR 10006 – ABNT, 2004) para classificá-lo de acordo com as duas classes a seguir.

Classe II-A – resíduo não-inerte: são resíduos que não se enquadram nem nas características da classe I nem da classe II-B. Este tipo de resíduo pode apresentar características tais como: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.

Classe II-B – resíduo inerte: são resíduos que, quando colocados em contato com a água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, não solubiliza nenhum dos seus constituintes em concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, conforme anexo G da referida norma.

Outra forma de classificação utilizada é quanto à origem ou fonte geradora, que pode ser: *domiciliar, comercial, industrial, de serviços de saúde, portos, aeroportos, terminais ferroviários e rodoviários, agrícola, construção civil, limpeza pública*. Dentro desta classificação está inserido o resíduo que alguns autores designam como Resíduo Sólido Urbano (RSU). BIDONE (1999) o conceitua como material heterogêneo constituído por resíduos domésticos, comerciais e industriais, resíduos de varrição e os provenientes de serviços. Entende-se por serviços a limpeza de bocas de lobo e galerias, canalizações e órgãos acessórios da rede coletora de esgoto, a limpeza e poda de praças e jardins, além da coleta de resíduos de produção transiente (carcaça de animais, móveis abandonados, etc.). Porém, RSU podem ser apenas os resíduos domésticos, comerciais e industriais; ou mais, os resíduos de saúde. Para FARIAS (2002), o resíduo urbano é composto basicamente pelo lixo domiciliar, comercial, de atividade pública, e de serviços de saúde.

Diante do que foi exposto, torna-se muito difícil ter apenas um conceito para resíduo sólido urbano, pois a sua composição varia em função do serviço de coleta realizado em cada região. A cidade do Rio de Janeiro, por exemplo, conforme a Lei nº 3273/2001 sobre a Gestão do sistema de limpeza urbana do município, divide os resíduos sólidos

em dois tipos: *resíduos sólidos urbanos* e *resíduos sólidos especiais*.

Os *resíduos sólidos urbanos* abrangem: (1) Lixo domiciliar ou doméstico; (2) Resíduos de poda de manutenção de jardim, pomar ou horta; (3) Entulho de pequenas obras de reforma, de demolição ou de construção em habitações familiares; (4) Lixo público (parques, praias, avenidas, ruas e demais espaços públicos); (5) Lixo proveniente de feira livre; (6) Lixo de estabelecimentos comerciais, industriais ou de unidades de trato de saúde humana ou animal, cuja composição seja similar aos domiciliares. Os *resíduos sólidos especiais* abrangem, dentre outros, os lodos e lamas, com teor de umidade inferior a 70%, oriundos de estações de tratamento de água ou de esgotos sanitários ou de fossas sépticas ou postos de lubrificação de veículos ou assemelhados. Portanto, para esta pesquisa, o lodo de esgoto e a sua cinza foram considerados como resíduos sólidos especiais, apesar de alguns autores considerarem o lodo de esgoto como resíduo sólido urbano por ser proveniente do tratamento de esgoto doméstico.

2.1 RESÍDUO SÓLIDO URBANO – PRODUÇÃO E COMPOSIÇÃO

Atualmente, de acordo com a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB) realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em 2000, a quantidade diária de lixo coletado em todo o Brasil foi de 228.413 t/dia. O município do Rio de Janeiro (RJ) coletou uma quantidade de lixo de, aproximadamente, 8.343,0 t/dia. Na Tabela 2.1 estão apresentados os locais de disposição destes resíduos sólidos urbanos.

Tabela 2.1: Quantidade diária de lixo coletado por unidade de disposição no Brasil (PNSB, 2000).

Quantidade de lixo (t/dia)										
Local	Total	Vazadouro a céu aberto	Vazadouro em áreas alagadas	Aterro controlado	Aterro sanitário	Compostagem	Triagem	Incineração	Locais não-fixos	Outros
Brasil	228.413,0	48.321,7	232,6	84.575,5	82.640,3	6.549,7	2.265,0	1.031,8	1.230,2	1566,2

De acordo com os dados apresentados, verifica-se que no Brasil ainda há uma grande quantidade de lixo sendo depositada em vazadouros (22% do total) o que torna a situação preocupante. Nesta forma de disposição, o lixo é disposto sobre o solo, ou na água, no seu estado “in-natura”, sem qualquer tipo de proteção, causando um impacto

tanto para o meio ambiente quanto para a população. Por isso, os órgãos governamentais têm por obrigação encontrar meios de eliminar esta forma de disposição bem como tentar reduzir a quantidade de lixo a ser disposta nos aterros. Isto pode ser feito com o apoio da sociedade através da realização de coletas seletivas ou a criação de cooperativas que desenvolvam programas de reaproveitamento do RSU.

2.1.1 COMPOSIÇÃO

A caracterização do RSU é de suma importância para auxiliar no seu gerenciamento dentro de um município, pois a partir dela é possível avaliar a viabilidade de reciclagem e o aproveitamento da matéria orgânica bruta, além de reduzir a quantidade de resíduo a ser disposta nos aterros (SAKAI, 1996; FARIAS, 2002; SIKALIDIS *et al.*, 2002).

Vários fatores interferem na sua geração e, conseqüentemente na composição destes resíduos, dentre outros tem-se variações sazonais e clima, poder aquisitivo, hábitos e costumes da população e nível de industrialização do local. Isto reflete na variação da composição gravimétrica dos resíduos de cada cidade e, por conseguinte, entre os diversos países, tornando-se imprescindível a realização de um estudo individual de cada local (SÃO MATHEUS, 2008).

Tabela 2.2: - Distribuição típica dos componentes dos resíduos sólidos urbanos em países de baixa, média e alta industrialização

(Fonte: TCHOBANOGLOUS *et al.*, 1993 *apud* SÃO MATHEUS, 2008).

Componentes	Países de baixa industrialização	Países de média industrialização	Países de alta industrialização
Matéria orgânica	40-85	20-65	6-30
Papéis e papelão	1-10	8-30	20-45
Plástico	1-5	2-6	2-6
Têxteis	1-5	2-10	0-2
Couro e borracha	1-5	1-4	10-20
Madeira	1-5	1-10	1-4
Vidro	1-10	1-10	
Latas	1-5	1-5	
Alumínio	1-5	1-5	
Outros metais	1-40	1-30	

Através dos dados apresentados na Tabela 2.2, TCHOBANOGLOUS *et al.* (1993) *apud*

SÃO MATHEUS (2008) verificaram que nos países menos industrializados o percentual de matéria orgânica é maior quando comparado aos países de média e alta industrialização. Este fato é atribuído aos hábitos da população, pois nos países desenvolvidos o consumo de alimentos prontos e enlatados aumentam o lixo reciclado, reduzindo a produção de matéria putrescível. Na Tabela 2.3 encontra-se os dados de composição do RSU obtidos por meio da COMLURB e relacionados ao município do Rio de Janeiro.

Tabela 2.3: Composição do RSU no município do Rio de Janeiro.

Composição do RSU (%)			
Papel-papelão	13,51	Madeira	0,34
Plástico	15,34	Borracha	0,24
Vidro	3,24	Pano-trapo	1,58
Matéria orgânica	60,74	Couro	0,22
Metal	1,65	Osso	0,04
Inerte	0,86	Coco	1,17
Folha	1,06	Vela-parafina	0,01

Fazendo um comparativo com a distribuição do RSU apresentada por TCHOBANOGLIOUS *et al.* (1993) *apud* SÃO MATHEUS (2008), nota-se que a maior parte dos componentes do lixo encontram-se dentro da faixa apresentada pelos referidos autores. Diferenciando, apenas, com relação ao percentual de papel-papelão e plástico. Com relação ao teor de matéria orgânica, nota-se que o seu percentual ainda permanece elevado, refletindo os hábitos e costumes dos países em desenvolvimento, tal como bagaço e cascas de fruta, restos alimentares, dentre outros.

Diante desse fato, medidas precisam ser adotadas na intenção de minimizar a quantidade de resíduo produzida diariamente pela população. Contudo, mesmo que todo o esforço seja feito através de práticas de reciclagem e compostagem, uma grande parcela (matéria orgânica, pilhas e baterias, lâmpadas fluorescentes, pneus, etc) ainda requer tratamento face às atividades da sociedade moderna.

2.2 LODO DE ESGOTO – PRODUÇÃO E COMPOSIÇÃO

O tratamento dos esgotos pode ser dividido em duas fases: fase líquida e fase sólida. A fase líquida pode ser composta por esgotos domésticos, águas de infiltração e despejos industriais. A fase sólida é composta por subprodutos gerados durante o tratamento da fase líquida (sólidos grosseiros, areia e lodo). Dentre estes, o lodo de esgoto tem uma importância maior por ser considerado um resíduo de difícil tratamento e disposição final. O grande volume e massa gerados por este resíduo, aliados à escassez de áreas para a sua disposição, implicam na necessidade de se implementar métodos alternativos e eficientes que visem ao máximo sua reciclagem. Além disso, a presença de metais pesados e organismos patogênicos em sua composição, que são nocivos ao meio ambiente e à saúde da população, conferem a necessidade de dispô-lo adequadamente como forma de evitar uma possível contaminação do meio (FONTES *et al.*, 2004b).

As principais etapas do tratamento do lodo em uma Estação de Tratamento de Esgotos (E.T.E.) são: adensamento, estabilização, condicionamento, desidratação, higienização e disposição final. A implantação ou não de cada unidade vai depender das características do lodo gerado e do produto final que se deseje obter, além dos custos. Os custos representam em torno de 20 a 60% do total gasto com a operação de uma E.T.E., sendo, portanto, normalmente negligenciados na concepção desses sistemas de tratamento (ANDREOLI *et al.*, 2001; FERNANDES, 1999; TSUTIYA *et al.*, 2001). Na Figura 2.1 estão apresentadas as etapas do tratamento do lodo de esgoto existente na E.T.E. Alegria, local onde foi coletado o resíduo com suas respectivas funções.

Etapas	Função
 <p data-bbox="347 689 644 719">Adensadores por gravidade</p>	<p data-bbox="810 472 1353 591">Redução da umidade através de processos físicos (aumento na concentração de sólidos totais). Pode ser realizada através de adensadores por flotação e adensadores por gravidade</p>
 <p data-bbox="236 1111 754 1140">Estabilização biológica – Digestores anaeróbios</p>	<p data-bbox="799 880 1362 999">Degradação da matéria orgânica biodegradável presente no lodo. Evita a emissão de maus odores e reduz a concentração de patógenos no resíduo. A estabilização pode ser biológica, química ou térmica.</p>
 <p data-bbox="252 1514 738 1543">Condicionamento – Adição de polieletrólitos</p>	<p data-bbox="794 1261 1369 1440">Processo físico ou químico no qual partículas menores de lodo se unem as partículas maiores formando agregados com dimensões superiores a estas partículas. Pode ser realizado através da utilização de polímeros orgânicos, produtos químicos inorgânicos ou de tratamento térmico.</p>
 <p data-bbox="264 1865 727 1895">Desidratação do lodo através de centrífuga</p>	<p data-bbox="799 1655 1362 1805">Processo físico de redução do teor de umidade. Pode ser realizado ou por meio de secagem natural através de leitos de secagem ou lagoas de secagem de lodo, ou secagem mecânica usando filtro prensa, filtro esteira ou centrífugas.</p>

Figura 2.1: Função de cada etapa do tratamento do lodo de esgotos da E.T.E. Alegria (FONTES, 2003).

Dados obtidos por VOLSCHAN JUNIOR (1999) mostram que a produção anual de lodo de esgoto gerada no Rio de Janeiro, em 2010 foi estimada em 799.511 toneladas/dia. Isto significa uma produção diária de, aproximadamente 1.500 t/dia de massa de lodo de esgoto.

2.2.1 COMPOSIÇÃO

A composição do lodo de esgoto bruto varia conforme a qualidade do esgoto bruto e do tipo de sistema de tratamento existente nas E.T.E's. Porém, alguns componentes concentram-se no resíduo durante o seu tratamento, em quantidades variáveis, sendo alguns destes indesejáveis do ponto de vista ambiental. Dentre eles tem-se metais pesados, germes patogênicos e compostos orgânicos (ANDREOLI *et al.*, 2001; SANTOS, 2003). Como um dos objetivos do presente estudo é avaliar a eficiência das matrizes cimentícias na imobilização dos metais pesados, uma abordagem sobre o assunto será apresentado a seguir.

METAIS PESADOS

A definição de metais pesados do ponto de vista ambiental, segundo ANDREOLI *et al.* (2001) é : *“metal que, em determinadas concentrações e tempo de exposição, oferece riscos à saúde humana e ao ambiente, prejudicando a atividade dos organismos vivos”*.

Dentre os elementos químicos existentes, classificam-se nesta definição o Ag, As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Sb, Se e Zn. O ser humano sempre esteve exposto aos metais pesados, pois os mesmos são encontrados naturalmente no meio, em concentrações variáveis, porém inferiores às consideradas tóxicas (ANDREOLI *et al.*, 2001).

A presença de metais no esgoto doméstico pode ser atribuída, principalmente, aos despejos industriais que são lançados na rede coletora de esgotos urbanos ou às ligações clandestinas, além da contribuição pluvial que transporta os poluentes depositados nas ruas. Para ANDREOLI *et al.* (2001) a concentração desses metais na fase líquida, apesar de reduzida, pode vir a ser tóxica aos animais e plantas apesar de não haver relatos sobre contaminações deste tipo. Porém, com relação aos lodos, cuidados devem ser tomados em relação à sua disposição, visto que os mesmos são as principais fontes de metais pesados.

Como dito anteriormente, a qualidade dos esgotos domésticos varia conforme os hábitos

de cada região e o tipo de tratamento adotado nas E.T.E's, e estes vão influenciar diretamente na composição dos lodos de esgoto. Para avaliar a variabilidade dessa composição química, incluindo os metais pesados, na Tabela 2.4 encontram-se valores obtidos para várias E.T.E's.

Tabela 2.4: Análise química dos lodos “in-natura” gerado em várias E.T.E's.

Elementos químicos	ETE Alegria RJ ⁽¹⁾	ETE Penha RJ ⁽²⁾	ETE I. Gov RJ ⁽³⁾	ETE Belém PR ⁽⁴⁾	ETE Valparaíso ES ⁽⁵⁾	ETE Cetrel BA ⁽⁶⁾	ETE IAPI RS ⁽⁷⁾
	Lodo digerido	Lodo digerido	Lodo digerido	Lodo ativado	Lagoa aeróbia.	Lodo ativado	Lodo ativado
Concentração no lodo (mg/l)							
P	5300	4600	8200	16200	9600	15000	8000
K	5400	1900	1700	3000	698	200	1400
Ca	22000	20700	21000	15900	-	17500	8600
Fe	25000	-	-	-	21700	3300	14600
Al	37000	-	-	-	-	-	3400
S	11700	1600	1310	-	-	-	3200
Si	93000	-	-	-	-	-	-
Cd	2,5	3,0	2,0	n.d.	2,0	6,0	-
Cr	296	-	-	178	63	47	-
Cu	398	506	310	439	190	220	300
Pb	315	294	168	123	95	70	200
Mg	5100	4500	4400	6000	-	-	360
Hg	4,8	7,1	6,9	1,0	2,5	-	3,0
Ni	126	143	38,5	73	30	62	-
Zn	1400	1204	1031	824	1512	701	1000

Fonte: (1) FONTES, 2003; (2) e (3) VOLSCHAN JUNIOR, I. (2001); (4) ANDREOLI *et al.*, (1997); (5) MULLER *et al.*, (1999); (6) NEIVA, M.R. (1999); (7) GEYER, A.L.B. (2001); n.d.: não detectado

Verifica-se que os lodos de esgoto, apesar de apresentarem praticamente os mesmos elementos químicos em sua composição, contêm diferentes concentrações dos mesmos, mostrando que os hábitos da região e o tipo de tratamento adotado para cada E.T.E. interferem em sua composição. Além disso, pode-se perceber a presença de metais que são considerados nocivos ao ser humano e ao meio ambiente em todos os lodos. Este é um indicativo da necessidade de manusear este material de maneira adequada e segura, além de dispô-lo de forma ambientalmente correta.

2.3 DISPOSIÇÃO FINAL DOS RESÍDUOS SÓLIDOS

A disposição final de resíduos sólidos é uma preocupação crescente tanto para a administração pública quanto para os órgãos ambientais. A presença de metais pesados na composição de determinados resíduos sólidos, além do chorume que é liberado destes por meio de sua degradação, possui elevado potencial contaminante, contribuindo para impactos adversos ao meio ambiente (água, solo, flora e fauna) e, conseqüentemente à saúde da população quando depositados de forma inadequada.

Nas últimas décadas, com a rápida industrialização e urbanização houve um aumento considerável na produção de resíduos sólidos, o que acarretou sérios problemas ambientais. Em particular, a poluição causada pela disposição inadequada de parte dos resíduos sólidos que são produzidos diariamente pela sociedade de consumo. Ao mesmo tempo, os resíduos que são encaminhados aos aterros sanitários (resíduo sólido urbano e lodo de esgoto) vêm acarretando outros problemas, tais como: a escassez de espaços nesses locais devido ao grande volume disposto, redução da sua vida útil e também a pequena disponibilidade de áreas apropriadas para a implantação de novos aterros sanitários em conseqüência do rápido crescimento das cidades.

Na tentativa de minimizar a quantidade de resíduos sólidos gerada, muitos países vêm adotando a técnica da reciclagem. Uma outra alternativa interessante é a incineração visto que, além de reduzir a quantidade de resíduo a ser disposta nos aterros, durante o processo de combustão do RSU ocorre a co-geração de energia, devido ao poder calorífico do resíduo. Outro ponto interessante e atrativo é a possibilidade da cinza gerada durante a queima poder vir a ser utilizada como insumo na indústria da construção civil. Este fato, além de minimizar a quantidade de recursos não renováveis consumidos por este setor, promove a sustentabilidade.

2.3.1 PROCESSO DE INCINERAÇÃO

Durante o processo de incineração, ocorrem diversas reações que podem ser seqüencial ou simultânea, simples ou em cadeia, endotérmica ou exotérmica. A cinética química envolvida no processo é extremamente complexa, além de ser uma função do tipo do incinerador, da temperatura e da matéria-prima. Dois fatores fundamentais influenciam no processo de combustão: a presença de calor e a de ar para viabilizar algumas das reações. Isto implica na necessidade do equipamento de incineração ter condições de

trabalhar a temperaturas adequadas, e que o fornecimento de ar seja em quantidades satisfatórias e em locais convenientes (GRIPP, 1998).

A incineração tem como principal vantagem a redução do volume de resíduos, que chega a ser de aproximadamente 10 a 20% do volume total, além do aproveitamento energético devido ao processo de co-geração de energia. Em contrapartida, durante o processo de decomposição, apesar dos organismos patogênicos e compostos orgânicos tóxicos serem eliminados, os metais pesados continuam presentes nas cinzas e, portanto, torna-se necessária uma disposição final adequada para a mesma (TSUTIYA *et al.*, 2001).

Com isso, dúvidas sobre a viabilidade ambiental das usinas de incineração foram levantadas e estão sendo superadas em diversos países e instituições. Na década passada, havia na Alemanha uma forte oposição pública e política contra a incineração de resíduos. Muitos grupos tentaram extinguir esse tipo de tratamento por causa dessas emissões (dioxinas, benzenos e furanos) (VEHLOW, 1996). Atualmente, o rigor das leis ambientais referentes às emissões de poluentes para a atmosfera propiciou o surgimento de sistemas de controle de poluição do ar. Esses equipamentos operam e monitoram as emissões atmosféricas aos níveis especificados pelas normas existentes e aceitáveis do ponto de vista ambiental para cada país.

A partir do surgimento desses sistemas, a prática da incineração vem se tornando crescente em vários países. Na China, por exemplo, a incineração tem se tornado a opção preferida para dispor o resíduo sólido urbano. Atualmente, existem no país cerca de 70 incineradores de RSU (GAO *et al.*, 2008). Em Taiwan, 17 incineradores de RSU são, segundo HUANG *et al.*, (2003) o principal método de tratamento do resíduo.

Embora a incineração seja considerada como um tipo de disposição final, durante o seu processo de combustão dois tipos de cinza (fundo e volante) são gerados e necessitam de uma disposição segura e adequada por ainda conter em sua composição metais pesados. Uma disposição inadequada pode acarretar a lixiviação e/ou solubilização dos metais presentes em sua composição, e estes serem absorvidos, posteriormente, pelo meio ambiente. Por isso, as mesmas devem ser dispostas em aterros sanitários especiais, ou serem utilizadas como co-incineradoras em fornos de cimento ou termoelétricas ou também em misturas com o cimento que estão sendo realizadas atualmente no Japão e

na Europa (ANDREOLI *et al.*, 2001).

2.4 APROVEITAMENTO DAS CINZAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Neste item será apresentada uma revisão bibliográfica sobre o uso do resíduo sólido urbano como material de construção. A utilização destes resíduos como substituto parcial do cimento na produção de pastas, argamassas ou concretos será apresentado no item 3.2.4.

2.4.1 CINZA DE LODO DE ESGOTO

Desde 1975, o problema sobre a disposição do lodo de esgoto já era tema de discussão em congressos de Engenharia Sanitária (BROSCH, 1975). Hoje em dia, as regulamentações ambientais que tratam desse assunto vêm limitando as opções de disposição desse resíduo, mesmo após sua calcinação. Conforme classificação ambiental, normalmente a CLE é considerada um resíduo não-inerte, visto que os metais pesados presentes em sua composição podem vir a solubilizar no local de disposição, causando contaminação ambiental (GEYER 2001; FONTES, 2003). Na tentativa de encapsular esses metais pesados, pesquisas vêm sendo realizadas através do seu uso em matrizes cimentícias e cerâmicas

UTILIZAÇÃO DA CLE COMO AGREGADOS LEVE E MIÚDO

Agregados leves são materiais com elevada porosidade e baixa massa específica. Alguns são encontrados na natureza (diatomita, pedra pomes, escória, cinzas vulcânicas e os tufos); outros são produzidos a partir de subprodutos industriais (cinza volante e escória de alto forno). Este tipo de material normalmente é empregado para na produção de concretos e blocos leves, filtros, sistemas de drenagem, além de ser um excelente isolante térmico (CHEESEMAN & VIRDI, 2005).

BROSCH (1975) produziu este tipo de material utilizando o lodo de esgoto através do processo de sinterização e o aplicou em concreto leve. Segundo o autor, a qualidade do agregado foi considerada satisfatória quanto à resistência à abrasão e ao esmagamento. Já MORALES & AGOPYAN (1992) estudaram a viabilidade de utilização do lodo de esgoto digerido como fonte de matéria-prima para a obtenção do agregado leve. O resultado do estudo foi compatível com os requisitos e critérios estabelecidos pelas

normas brasileiras quanto ao uso de agregado leve para fins de produção de elementos de concreto para alvenaria, concreto estrutural ou para isolamento térmico. O custo de produção do material foi equiparado ao da argila expandida. Como os agregados leves consumidos na região de Londrina são provenientes de São Paulo, a sua utilização foi considerada viável.

Para CHEESEMAN & VIRDI (2005) a produção de agregado leve na Dinamarca é potencialmente viável porque os custos de disposição da CLE em aterros sanitários estão aumentando a cada dia devido ao rigor nas leis ambientais. Outro fator que acentua essa potencialidade é a escassez de agregados naturais em algumas regiões bem como os impostos cobrados por cada tonelada de agregado natural extraído.

A CLE também foi estudada para substituir o agregado miúdo em concretos. KHANBILVARD & AFSHARI (1995) substituíram até 30% de areia natural por CLE. Ao final do estudo foi constatado que mesmo havendo uma redução de 20% da resistência à compressão, aos 28 dias, em relação à mistura de referência, os resultados obtidos atenderam as exigências do ACI que especifica um mínimo de 20N/mm².

PRODUÇÃO DE TIJOLOS CERÂMICOS

TAY (1986, 1987) e TAY *et al.* (2002) avaliaram a viabilidade de utilizar CLE na produção de tijolos cerâmicos. A proporção de cinza misturada à argila variou entre 10% e 50%, em massa. Após o processo de mistura dos materiais, estes foram prensados para a formação dos tijolos e em seguida queimados a uma temperatura de aproximadamente 1100°C. Os resultados indicaram que à medida que o teor de CLE aumentava, a resistência à compressão diminuía. A maior redução ocorreu para a mistura com 50% de cinza onde a redução da resistência chegou a 20% em relação à mistura de referência.

PRODUÇÃO DE CIMENTO BIOLÓGICO

Estudos foram realizados por TAY & SHOW (1994) e TAY *et al.* (2002) com o objetivo de aproveitar o lodo de esgoto como material cimentício, ou seja, o lodo digerido e desidratado foi misturado com a cal e em seguida passaram por vários processos de queima, moagem, peneiramento, até serem transformados em um cimento biológico que foi denominado de “Bio-cimento”. Este novo cimento substituiu

parcialmente o cimento Portland na produção de argamassas. A melhor relação lodo:cal sugerida por estes trabalhos foi a de 0,50:0,50, a uma temperatura de queima de 1000°C com um tempo de residência de 4h. Verificou-se que até 30% de substituição de cimento Portland por “Bio-cimento” a resistência à compressão apresentou valores superiores à argamassa de referência.

2.4.2 CINZA VOLANTE DO RESÍDUO SÓLIDO URBANO

Durante o processo de incineração do RSU, a depender do tipo do incinerador, várias cinzas podem ser geradas em diversos pontos de queima do resíduo. Porém, as duas cinzas principais são a cinza de fundo e a cinza volante (fly ash) (WILES, 1996). No presente estudo optou-se por utilizar apenas a cinza volante, devido à mesma ser caracterizada por possuir alto teor de sais solúveis, quantidades significativas de substâncias perigosas, tais como metais pesados e componentes orgânicos, além de poluentes inorgânicos, por ser proveniente do sistema de lavagem dos gases. Conseqüentemente, a necessidade de dispor esse material em um aterro dotado de sistemas de impermeabilização, ou fazer um tratamento antes da sua disposição, ou reaproveitá-lo na produção de novos materiais de forma a reduzir a liberação de contaminantes para o meio ambiente tornaram-se uma necessidade. Muitos países que incineram os seus resíduos sólidos urbanos possuem leis de proteção ambiental muito rigorosas. A revisão bibliográfica sobre o uso da cinza retrata formas de tratamento antes da sua disposição em aterros, ou o seu uso como agregado, sendo poucos os artigos encontrados que aplicaram o uso desta cinza em matrizes cimentícias, objetivo deste estudo.

PROCESSO DE ESTABILIZAÇÃO E SOLIDIFICAÇÃO DO RSU

Na Itália, o tratamento mais aplicado para a inertização da cinza volante é o processo de solidificação/estabilização utilizando como ligante o cimento. Segundo MANGIALARDI (2001) há um efeito adverso nesse processo, que é o aumento considerável do volume a ser disposto devido à significativa quantidade de cimento a ser utilizado para inertizar o resíduo.

No Japão, de acordo com a nova regulamentação, para que este tipo de cinza seja disposto em aterros sanitários, a mesma deve passar por um processo de estabilização e solidificação. Neste caso, a solidificação é feita com cimento e a estabilização através

do uso de agentes químicos e extração com ácidos ou outros solventes (SAKAI, 1996).

Outra proposta de tratamento é o térmico (vitrificação ou sinterização) que tem por objetivo imobilizar componentes inorgânicos dentro de uma estrutura amorfa. O único contratempo encontrado pelos autores para esse tipo de tratamento é a volatilização parcial de alguns metais pesados durante a elevação da temperatura para a formação do produto final (POLETTINI *et al.*, 2001).

USO DO RSU COMO AGREGADO

O reuso do resíduo como agregado reciclado para a produção de concreto pode ser muito interessante, pois reduz o consumo de agregados naturais. Por outro lado, as suas propriedades químicas e de lixiviação requerem uma extensiva caracterização do material como forma de minimizar o impacto ambiental. MANGIALARDI (2001) utilizou a cinza volante com e sem pré-tratamento como agregado em concretos. O processo de pré-tratamento consistiu na lavagem do resíduo em água destilada para retirar os componentes solúveis. Em seguida, as amostras foram submetidas a uma temperatura de 1140°C por 60 minutos (processo de sinterização) e avaliadas quanto à perda ao fogo, resistência à compressão e estabilidade química. Os resultados indicaram que a cinza volante sem pré-tratamento não foi adequada para ser utilizada como agregado, após processo de sinterização. Já a cinza volante que recebeu pré-tratamento apresentou bons resultados podendo ser usada em concretos que não excedam resistência a 15MPa.

COLLIVIGNARELLI *et al.* (2002) também utilizou a cinza volante como agregado em concretos. Segundo os autores, o pré-tratamento de lavagem na cinza volante foi realizado para reduzir o teor de sulfato e cloretos que podem causar problemas de expansão e corrosão quando empregadas em matrizes cimentícias. Além deste processo de lavagem, a cinza foi estabilizada e solidificada através da mistura do resíduo com cimento, calcário, silicato de sódio, bentonita, escória de alto forno e água. Mesmo após processo de lavagem, os resultados obtidos com relação à concentração de sais solúveis no resíduo ficaram acima dos limites da norma para agregados naturais. Quanto aos metais pesados, o resíduo apresentou elevadas concentrações de cobre, chumbo e cádmio. Embora a presença da cinza volante tenha reduzido o valor de resistência à compressão para todas as misturas quando comparadas à referência, todos os resultados

obtidos ficaram acima do valor mínimo exigido pela norma de agregado natural (15MPa). Verificou-se também que a mistura produzida com a cinza sem o tratamento de lavagem apresentou valor de resistência à compressão bem inferior à mesma mistura com o tratamento de lavagem (12,5MPa e 27,3MPa), respectivamente.

Os autores concluíram que a cinza volante reutilizada como agregado pode ser uma alternativa interessante quando comparada à disposição final em aterros sanitários. Embora os concretos produzidos tenham apresentado resistência à compressão inferior à mistura de referência, eles atenderam a exigência mínima de 15MPa, aos 28 dias, para serem utilizados como concreto estrutural.

Já QUINA *et al.* (2004), avaliaram a possibilidade de incorporar cinzas volantes na produção de agregados leves mantendo as características de um produto comercial. Para a produção das misturas foram utilizados teores de cinza volante que variaram de 0 a 10% de substituição em relação à argila. Foram feitas também misturas com cinza volante lavada nos teores de substituição de 5 e 10%.

Os agregados leves produzidos foram testados quanto à sua densidade, resistência à compressão e absorção de água. Nesse estudo verificou-se o acréscimo da densidade à medida que o teor de cinza volante aumentava chegando a 19% para a mistura de 5% quando comparada à mistura de referência. Contudo, utilizando a cinza volante lavada, para o mesmo teor de substituição (5%) o aumento da densidade foi de 13%. O comportamento para a resistência à compressão foi similar ao da densidade, ou seja, a resistência à compressão aumentou na medida em que cinza foi incorporada à mistura chegando a ser 36% maior do que a mistura de referência. Para propriedades comerciais dos agregados leves, o aumento da resistência à compressão foi considerado favorável. O maior aumento de absorção de água ocorreu na mistura com 5% de cinza, em torno de 19% quando comparada à mistura de referência. Valores de absorção de água em agregados leves existentes no mercado são em torno de 16%. Porém, para a mesma mistura, só que utilizando cinza volante lavada, a absorção de água foi reduzida para 12% o que representou uma vantagem para o produto final.

3 USO DE ADITIVOS MINERAIS EM CONCRETOS

3.1 CIMENTO PORTLAND E SUAS REAÇÕES DE HIDRATAÇÃO: UM BREVE HISTÓRICO

O cimento Portland é conhecido como uma mistura, em proporções adequadas, de calcário e argila, ou de outros materiais que contenham em sua composição calcário, sílica, alumina e óxido de ferro, aquecidos até a temperatura de clínquerização (em torno de 1450°C) para a formação do clínquer. Após o resfriamento do clínquer, este é moído com 5% de gipsita ou sulfato de cálcio até a obtenção de uma granulometria da ordem de 1 a 75 μm . O material formado é designado como cimento Portland, onde os quatro compostos principais são conhecidos como: silicato tricálcico (C_3S)¹, silicato dicálcico (C_2S)¹, aluminato tricálcico (C_3A)¹ e ferroaluminato tetracálcico (C_4AF)¹, além do gesso ($\text{C}\check{\text{S}}\text{H}_2$)¹.

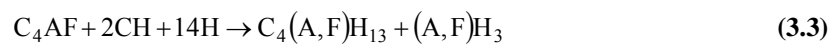
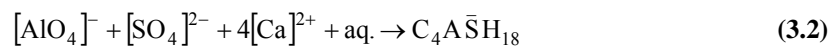
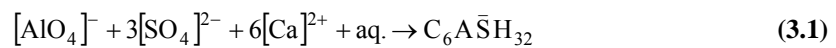
Segundo NEVILLE (1997) outros compostos também fazem parte da composição do cimento, porém representando uma pequena fração da sua massa, dentre eles tem-se: MgO, TiO₂, MnO₂, K₂O e Na₂O. Para MEHTA & MONTEIRO (2008) esses óxidos são designados como impurezas na composição do cimento, porque quando se eleva a temperatura para a formação do clínquer, eles têm a capacidade de entrar em soluções sólidas com cada um dos compostos principais do clínquer. Pequenas quantidades destas impurezas não comprometem a estrutura cristalina e a reatividade dos compostos com a água, porém o mesmo não acontece para grandes quantidades.

O processo de hidratação do cimento Portland tem início quando os seus compostos anidros entram em contato com a água, porém as reações ocorrem em velocidades diferentes devido à heterogeneidade do material. Os aluminatos se hidratam mais

¹ C = CaO; S = SiO₂; A = Al₂O₃; F = Fe₂O₃; Š = SO₃ e H = H₂O

rapidamente que os silicatos, sendo estes responsáveis pela pega e enrijecimento da pasta. Os silicatos, presentes em maior quantidade, são responsáveis pelo ganho de resistência do material.

Dentre os produtos formados durante o processo de hidratação do cimento Portland tem-se a etringita primária (Equação 3.1), proveniente da reação entre o C₃A e o sulfato de cálcio. Após todo o sulfato de cálcio ter sido consumido, a etringita torna-se instável sendo convertida lentamente em cristais de monossulfoaluminato de cálcio hidratado (Equação 3.2). O sulfato de cálcio também reage com o C₄AF, porém essa reação só irá prevalecer se o teor de C₃A for pequeno, caso contrário, a melhor representação do C₄AF é através da reação com o hidróxido de cálcio conforme a Equação 3.3 (YOUNG *et al.*, 1998).



A importância desses dois compostos para as propriedades da pasta não são muito significativas. O C₃A contribui apenas com um pequeno acréscimo na resistência inicial da pasta. O C₄AF contribui no acréscimo dessa resistência inicial e possui boa resistência ao ataque de águas agressivas e sulfatos.



Os silicatos de cálcio hidratados, apresentados nas Equações 3.4 e 3.5, compõem aproximadamente 75% a 80% do cimento Portland, sendo responsáveis pelas resistências inicial e em idades avançadas, respectivamente. Durante a hidratação destes compostos, ocorre a formação do hidróxido de cálcio ou Portlandita (CH) sendo que este produto contribui muito pouco para a resistência do material, além de ser facilmente lixiviado em presença de água. Este fato propicia o aumento da porosidade da matriz cimentícia, o que compromete a sua durabilidade devido à facilidade de

penetração de agentes agressivos no material.

Para melhorar a durabilidade e o comportamento físico-mecânico dessas matrizes cimentícias, aditivos minerais começaram a ser empregados em conjunto com o cimento Portland. Os efeitos benéficos proporcionados por esses materiais suplementares serão descritos no item 3.2.

Maiores detalhes sobre o comportamento e as propriedades conferidas à pasta de cimento Portland durante o processo de hidratação são encontrados em várias literaturas (MEHTA & MONTEIRO, 1994 e 2008; NEVILLE, 1997 e AÏTICIN, 2000).

3.2 ADITIVOS MINERAIS

Os aditivos minerais são materiais que após processamento físico e/ou térmico apresentam composições físicas e mineralógicas adequadas ao seu uso como material suplementar na produção de novos materiais cimentícios. Enquadram-se nesse conceito as pozolanas naturais (vidros e tufos vulcânicos, argilas e terras diatomáceas), os subprodutos industriais ou pozolanas artificiais (cinza volante, sílica ativa e cinza da casca do arroz) e os fileres (pó de pedra, filer calcário e material carbonático).

Atualmente, a utilização de subprodutos industriais e fileres como aditivo mineral na produção de novos materiais vem se tornando crescente. Ao mesmo tempo em que a sua inclusão traz benefícios técnicos ao produto final (materiais de construção, argamassas, concretos, cimento Portland e clínquer), o seu aproveitamento também contribui para a minimização do impacto ambiental, através da preservação dos recursos naturais não renováveis, bem como da redução da emissão de CO₂ e do consumo energético durante a produção do clínquer nas indústrias cimenteiras.

3.2.1 POZOLANAS

As pozolanas são definidas como “*materiais silicosos ou sílico-aluminosos que, por si só, têm pouco ou nenhum valor cimentício mas, quando finamente moído e na presença de água, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente formando compostos com propriedades cimentícias*” (NBR 12653, 1992; ASTM C 618, 1994).



A inclusão de pozolanas em matrizes cimentícias promove a reação entre a Portlandita (CH), proveniente da hidratação do C_3S e C_2S , com a sílica amorfa presente na composição destes materiais, produzindo silicatos de cálcio hidratado (C-S-H) adicionais, conforme apresentado na Equação 3.6. Esta reação é conhecida com reação pozolânica. A eliminação ou redução do CH traz significativas contribuições ao material, principalmente com relação à sua durabilidade.

Um material, para ser considerado pozolânico, deve atender a critérios físicos e químicos estabelecidos pela ASTM C 618 (2001) e NBR 12653 (ABNT, 1992). Estes critérios são baseados em porcentagens mínimas e máximas abrangendo alguns aspectos do material tal como: constituintes químicos (ex: $\sum Al_2O_3 + SiO_2 + Fe_2O_3$, teor de SO_3 , teor de álcalis, etc.), finura (quantidade retida na # 45 μ m) e atividade pozolânica do material. Apesar desta norma ser questionada por alguns pesquisadores (MEHTA & MONTEIRO, 2008; ISAIA & HELENE *apud* CORDEIRO 2001; MALHOTRA, 1996 *apud* CORDEIRO 2001), com relação às exigências químicas, pois, segundo eles, os parâmetros adotados não asseguram o comportamento reativo do aditivo mineral, muitos ainda a utilizam como forma de classificar o seu material (SHVARZMAN *et al.*, 2003; GONÇALVES, 2005; ARIKAN *et al.*, 2008). A NBR 12653 (ABNT, 1992) foi utilizada para classificar os aditivos minerais do presente estudo.

Atualmente, pesquisas com outros tipos de resíduos com características pozolânicas vêm sendo realizadas. CORDEIRO (2006) e CORDEIRO *et al.* (2008) avaliaram a viabilidade de utilização da cinza ultrafina do bagaço de cana-de-açúcar como aditivo mineral, após processo de queima e moagem controlados e os resultados indicaram que é possível a sua utilização em concretos de alto desempenho. O resíduo do tijolo cerâmico moído foi estudado por GONÇALVES (2005) e TOLEDO FILHO, *et al.*, (2007) em substituição parcial ao cimento Portland. O referido autor constatou a viabilidade técnica de utilização do resíduo como aditivo mineral. A viabilidade de uso da escória de cobre como adição e como agregado miúdo em concreto foi avaliado por MOURA (2000), onde concluiu que a utilização de 20% como adição e 40% como agregado miúdo, em volume, melhorou as propriedades físico-mecânicas e de durabilidade do concreto. SOUZA (2003) constatou a possibilidade de utilização de um

resíduo proveniente da indústria de papel que, após processo de beneficiamento, transformou-se em um metacaulim de elevada reatividade, em substituição parcial ao cimento Portland.

3.2.2 FÍLERES

Os fileres são materiais não reativos, finamente moídos, que devido às suas *características físicas* têm um efeito benéfico sobre as propriedades das argamassas e concretos, tais como trabalhabilidade, densidade, permeabilidade e porosidade (NEVILLE, 1997).

Por ser um material muito fino, os fileres exercem influência nas propriedades do concreto nos dois estados: fresco e endurecido. No estado fresco, a sua incorporação melhora a trabalhabilidade do material, diminuindo a segregação e a exsudação, além de beneficiar a sua fluidez. No estado endurecido, influenciam principalmente nas propriedades de durabilidade, onde o filer, devido à sua elevada finura, proporciona um refinamento na estrutura de poros, reduzindo o tamanho e o volume de poros maiores e a conectividade entre eles, dificultando a entrada de agentes agressivos no interior do material. Na resistência do material, a depender da sua finura e do tipo de matriz cimentícia (pasta, argamassa e concretos), o filer pode proporcionar ou não um incremento na resistência à compressão do material, conforme mostrado por GOLDMAN & BENTUR (1992).

3.2.3 MECANISMOS DE AÇÃO DOS ADITIVOS MINERAIS

As pozolanas e fileres, quando utilizados em matrizes cimentícias como adição ou como substituto parcial do cimento Portland, promovem mecanismos de ação física e/ou química durante a hidratação do material. A atuação de cada mecanismo é influenciada por diversos fatores que estão intrinsecamente ligados às características do aditivo mineral (tipo, teor, superfície específica, composição mineralógica, etc.).

A pozolana quando inserida no sistema cimento-água, desenvolve dois efeitos: químico e físico. A ação química, como explicada anteriormente, é atribuída à reação pozolânica entre a sílica amorfa presente no aditivo mineral e o hidróxido de cálcio produzido pelo cimento durante a hidratação, formando C-S-H adicionais. Essa reação não é imediata, pois necessita da formação prévia do hidróxido de cálcio. Já a ação física é imediata.

Proporcionada pela granulometria do material ser inferior à do cimento, os grãos preenchem os poros existentes na pasta, ainda no estado fresco, reduzindo o seu tamanho e a sua conectividade com outros poros, deixando a estrutura mais trabalhável, refinada e densa. Outra característica desta ação é o efeito de nucleação, no qual os grãos mais finos dos aditivos minerais nucleiam os grãos maiores e, por possuírem mais água aderida à sua superfície, “compartilham” a sua água com os grãos anidros do cimento, contribuindo para que a hidratação ocorra de forma mais rápida. Este efeito conduz à formação de mais produtos hidratados nas primeiras idades, onde o ganho de resistência é maior comparado aos 28 dias (GOLDMAN & BENTUR, 1992; CURCIO *et al.*, 1998; GONÇALVES, 2000; GEYER, 2001; CORDEIRO, 2001; ISAIA *et al.* 2003; CORDEIRO, 2006).

Os fileres, por serem quimicamente inertes, possuem apenas a ação física. LAWRENCE *et al.* (2003) atribuíram a ação física a três efeitos: efeito de diluição do cimento, efeito de distribuição do tamanho de grãos e efeito de nucleação heterogênea. O efeito de diluição está associado à quantidade de aditivo mineral utilizado na mistura, ou seja, quanto maior for o teor de substituição, menor será a quantidade de cimento e, conseqüentemente, menos cimento hidratado haverá no sistema. Este efeito também foi mostrado por WILD *et al.* (1996) e CORDEIRO *et al.* (2008). A distribuição do tamanho de grãos varia conforme a finura e o teor de substituição de cimento por aditivo mineral. Este efeito confere a redução da porosidade inicial da pasta. O terceiro efeito é o de nucleação heterogênea, proporcionado pelos aditivos minerais. Segundo os autores, estes aditivos funcionam como ativadores das reações de hidratação do cimento através da deposição dos hidratos sobre suas partículas. Para isso, a finura, teor de aditivo e a natureza do mineral utilizado são considerados neste efeito. OKJELLEN & LAGERBLAD (1995) estudaram a mineralogia dos fileres e concluíram que a aceleração das reações de hidratação, além de ser atribuída à ação física, pode também sofrer a influência da natureza mineral desses fileres, que pode ser uma das causas da precipitação dos hidratos sobre suas partículas. A superfície da calcita e da volastonita fornecem substratos benéficos para a deposição do hidróxido de cálcio sobre estes minerais. Tal comportamento conduzirá a uma menor concentração desse íon na solução do poro, podendo conduzir ao aumento na taxa de hidratação.

Dentro deste contexto, pode-se dizer que as ações química e física causadas pela

presença dos aditivos minerais à matriz cimentícia, modificam significativamente o seu comportamento físico, mecânico e de durabilidade. A seguir, serão apresentados os benefícios que estes aditivos minerais conferem às pastas, argamassas e concretos.

3.2.4 COMPORTAMENTO DOS ADITIVOS MINERAIS EM MATRIZES CIMENTÍCIAS

É de consenso geral que a presença de aditivos minerais promove melhorias as propriedades do material tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Dentre essas vantagens tem-se aumento da coesão e melhora da trabalhabilidade, aumento da resistência mecânica, minimização do surgimento de fissuras térmicas devido à liberação de calor ser lenta, redução da permeabilidade devido ao refinamento dos poros e uma durabilidade maior aos ataques químicos (MEHTA & MONTEIRO, 2008). Para NEVILLE (1997) as várias adições minerais influenciam na evolução da hidratação devido à sua composição química, reatividade, distribuição de tamanho e forma das partículas.

3.2.4.1 ESTADO FRESCO - TRABALHABILIDADE

Define-se trabalhabilidade como sendo o esforço exigido para manipular uma mistura de concreto fresco sem perda mínima de homogeneidade. Esta propriedade está associada a dois fatores importantes do concreto: consistência e coesão. A primeira se refere à fluidez da pasta que pode estar associada com a facilidade de mobilidade da pasta sem afetar a sua estabilidade. Já a coesão mede, qualitativamente, a resistência da pasta à exsudação e segregação (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

A incorporação de aditivos minerais às matrizes cimentícias contribui para a redução do tamanho e o volume de vazios, conferindo uma melhora da trabalhabilidade. Porém, a maioria dos aditivos empregados necessita de uma maior demanda d'água para manter a mesma consistência da mistura de referência. Essa perda de consistência normalmente é corrigida com o uso de superplastificantes (SP). Exceção deve ser dada à cinza volante e escória, que possuem a capacidade de reduzir o teor de água na mistura para uma determinada consistência (MEHTA & MONTEIRO, 2008). Esta influência, para ambos os aditivos, está associada à forma das partículas, bem como à sua finura (NEVILLE, 1997).

3.2.4.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

A resistência mecânica dos materiais contendo cimento Portland está ligada não somente à formação dos silicatos de cálcio hidratado, mas principalmente, ao volume de vazios existente na pasta, bem como à forma e dimensões do poro. Ou seja, há uma relação de dependência entre resistência da pasta, porosidade total e distribuição do tamanho de poros, visto que materiais com mesma porosidade podem apresentar valores de resistências diferentes em função da quantidade de poros menores existentes na pasta (NEVILLE, 1997). Outro fator que influencia bastante na resistência mecânica das matrizes cimentícias é a microfissuração, principalmente quando se tratar de concretos. Tanto concretos de resistência normal quanto os de alto desempenho apresentam fissurações, mesmo antes de serem submetidos a algum tipo de carregamento. Isto acarreta uma redução da resistência à tração do material. A microfissuração é mais intensa na chamada zona de transição (interface agregado graúdo-pasta) que, devido à presença do hidróxido de cálcio e dos poros capilares limitam a resistência mecânica dos concretos. O emprego dos aditivos minerais nos materiais cimentícios contribui para a redução da ação desses dois componentes, através da reação pozolânica e do efeito físico de preenchimento. Isto conduz ao aumento da resistência mecânica e, ao mesmo tempo, diminuição do tamanho de poros dos materiais.

3.2.4.3 DURABILIDADE

O American Concrete Institute (ACI, 2001) define durabilidade de um concreto como *“a capacidade deste material resistir a intempéries, ataques químicos, abrasão e outros processos de deterioração, mantendo a sua integridade, qualidade e capacidade de serviço quando exposto ao meio ambiente”*. Por isso, espera-se que as estruturas de concreto desempenhem as funções que lhe foram atribuídas durante sua vida útil, mesmo quando expostas a algum tipo de deterioração (NEVILLE, 1997). Porém, na prática isso não acontece, ou porque as edificações são executadas de forma incorreta, ou porque não são projetadas de acordo com o ambiente a que ficarão expostas.

As estruturas de concreto normalmente ficam expostas a diversos tipos de agentes agressivos e diferentes fatores destrutivos, que podem atuar de forma isolada ou em conjunto, variando conforme as condições do meio ambiente (PEREIRA, 2001). Estas ações podem ser físicas (mudanças de temperatura e umidade que geram ciclos de

molhagem e secagem, gelo e degelo, retração e fluência), químicas (reações álcali-agregado, íons agressivos como cloretos, sulfatos ou dióxido de carbono), mecânicas (abrasão, erosão ou cavitação) e segundo PEREIRA (2001) e AGUIAR (2006) há também a biológica (através dos microorganismos).

Sabe-se, porém, que todos os efeitos deletérios que pode ser causados às estruturas só serão possíveis se as mesmas estiverem pré-dispostas à ação desses agentes. Por isso, o tamanho e volume de poros, conectividade e tortuosidade, existência de microfissuração na zona de transição e grau de umidificação do material são de suma importância para garantir a durabilidade dos materiais cimentícios. Estas características, que são intrínsecas a cada material, controlam a facilidade com que os fluidos (líquidos e gases) podem escoar através dos seus interstícios.

Os principais mecanismos de transporte desses fluidos são: permeabilidade, difusão, migração e absorção. A permeabilidade é a facilidade com que um fluido pode passar através de um meio poroso, utilizando um gradiente de pressão. A difusão é o processo no qual um líquido, gás ou íon pode passar através do concreto sob a ação de um gradiente de concentração. O mecanismo da migração é similar ao de difusão, porém o sendo diferenciado pela aplicação de um gradiente de potencial elétrico que acelera o transporte dos íons. A absorção é o processo pelo qual um fluido pode penetrar em um concreto por sucção capilar e preencher os espaços vazios.

O crescente aumento na utilização de aditivos minerais, como adição ou em substituição parcial ao cimento Portland, trouxe diversos benefícios aos materiais cimentícios. O consumo do hidróxido de cálcio forma novos produtos de hidratação que contribuem para a redução dos poros capilares e refinamento da estrutura de poros que ocasiona um decréscimo da porosidade e um ganho na resistência mecânica, se curados adequadamente. Além disso, a densificação da microestrutura corrobora para dificultar a penetração dos íons agressivos. De acordo com KHATIB & WILD (1996) e MEHTA & MONTEIRO (2008), a redução da quantidade de hidróxido de cálcio na matriz cimentícia devido à reação pozolânica torna o material mais resistente ao ataque por sulfatos e à reação álcali-agregado.

TIPOS DE POROS E ÁGUAS EXISTENTES NAS MATRIZES CIMENTÍCIAS

Durante o processo de hidratação da pasta de cimento, diversos tipos de poros são formados e estes exercem uma influência significativa nas propriedades de durabilidade dos materiais cimentícios, pois têm um papel importante no fluxo dos íons no interior do material. Entre as várias designações existentes para os tipos de poros, no presente estudo foi adotada a de MEHTA & MONTEIRO (2008). *Espaço Interlamelar do C-S-H*: este tipo de poro não contribui significativamente no fluxo de água através do concreto (MEHTA & MONTEIRO, 2008; RAMACHANDRAN & BEAUDOIN, 2001). A sua existência não tem efeito adverso na resistência e permeabilidade da pasta, porém, devido ao seu tamanho reduzido, a sua remoção pode influenciar na retração por secagem e fluência. *Poros capilares*: são os espaços vazios não ocupados pelos componentes sólidos (cimento anidro e produtos de hidratação) da pasta de cimento. Portanto, o tamanho, a distribuição e o volume desses poros dependem do seu fator água/cimento e do grau de hidratação. Os poros maiores ($> 50\text{nm}$) influenciam, principalmente, na resistência à compressão e na permeabilidade, já os poros menores ($< 50\text{nm}$) influenciam na retração por secagem e na fluência (MEHTA & MONTEIRO, 2008). Segundo SILVA (2007), para matrizes cimentícias com relação a/c baixa este tipo de poro pode desaparecer nos primeiros dias de hidratação. O mesmo não acontece para relação a/c elevada, podendo estar presente no material após meses de hidratação. Por último estão os *vazios de ar* que podem ser de ar incorporado ou de ar aprisionado. Os vazios de ar incorporado são adicionados ao concreto através de aditivos e variam de 50 a 200 μm . Os vazios de ar aprisionado podem chegar a 3 mm sendo aprisionados a pasta fresca de cimento durante o processo de mistura. Por possuírem tamanhos superiores aos vazios capilares, são capazes de afetar negativamente a resistência à compressão e a permeabilidade.

Além dos vários tipos de poros presentes na pasta, torna-se necessário saber de que forma a água pode estar presente dentro destes materiais cimentícios. A sua classificação segundo MEHTA & MONTEIRO (2008) foi baseada de acordo com o grau de dificuldade ou de facilidade com que pode ser removida. Os referidos autores classificaram a água em quatro tipos: (1) *Água capilar*: encontra-se nos vazios maiores que 50 Å podendo ser dividida em dois tipos: água livre (vazios maiores que 0,05 μm) e água retida por tensão capilar (vazios capilares de 5 a 50 nm). A remoção da água livre

não causa variação no volume do concreto, porém a segunda pode causar retração no sistema. (2) *Água adsorvida*: são moléculas que estão fisicamente adsorvidas na superfície dos sólidos da pasta, podendo ser perdida por secagem causando retração na pasta quando a umidade relativa do ar for inferior a 30%. (3) *Água interlamelar*: sugere-se que esta água esteja fortemente ligada por pontes de hidrogênio entre as camadas de C-S-H sendo removida por meio de secagem forte (umidade relativa menor que 11%). (4) *Água quimicamente combinada*: parte integrante de vários produtos hidratados do cimento. A sua remoção só ocorre quando seus hidratos são decompostos por temperatura.

3.2.4.4 METACAULINITA E CINZAS DE LODO DE ESGOTO E DE RESÍDUO SÓLIDO URBANO EM MATRIZES CIMENTÍCIAS

Apesar de existirem diversos subprodutos que são utilizados como pozolanas ou fileres, seja em substituição parcial ao cimento Portland ou, como adição, ou na produção do clínquer, neste item a ênfase será dada ao comportamento destes três aditivos minerais na produção de pastas, argamassas e concretos.

METACAULINITA

Trabalhabilidade

GONÇALVES (2005) avaliou a consistência de argamassas contendo 10, 20, 30 e 40% de metacaulinita. Verificou-se que, para manter o mesmo espalhamento que a argamassa de referência, foi necessária a adição de superplastificante às misturas com MC e este foi incrementado à medida que o teor de substituição de cimento Portland por MC aumentou.

BROOKS & JOHARI (2001) e SOUZA (2003) estudaram a consistência de concretos contendo metacaulim através do ensaio de abatimento. Como esperado, verificou-se que a incorporação da MC reduziu o abatimento das misturas.

Esse comportamento se deve à maior finura e elevada superfície específica do material (SOUZA, 2003 e GONÇALVES, 2005).

Resistências à compressão e à tração

Com relação à resistência à compressão, ZHANG & MALHOTRA (1995) e CORDEIRO (2001) produziram concretos com 10% de MC, 10% de sílica ativa, além da referência (mistura sem aditivo mineral). Foi observado que a mistura com 10% de MC apresentou valores de resistência superiores à mistura de referência para todas as idades avaliadas. Porém, quando comparada com a sílica ativa, a MC, apesar de ter apresentado um maior ganho de resistência nas primeiras idades, a partir dos 28 dias, esta passou a ser menor. Este comportamento, segundo os autores, foi devido à aceleração das reações de hidratação nas idades iniciais e à rápida capacidade de reação da MC com o CH. Para CURCIO *et al.* (1998) esta aceleração nas reações de hidratação em argamassas contendo 15% de MC foi atribuída não somente à presença da sílica amorfa, mas também à presença da alumina na composição da MC. Ainda segundo CURCIO *et al.* (1998), foram produzidas argamassas com quatro MC's de diferentes origens e atividades pozolânicas. Os resultados obtidos indicaram similaridade aos de WILD & KHATIB (1997) e CORDEIRO (2001). Ou seja, os valores alcançados foram superiores à referência, exceção para a argamassa com 15% de MC, aos 3 dias, produzida por WILD & KHATIB (1997).

WILD *et al.* (1996) produziram concretos com teores de MC de 5 a 30%. Analisando a resistência à compressão, verificou-se que a maioria das misturas apresentou valores superiores à referência. A exceção foi na idade de 1 dia, para os teores de 25% e 30% de MC. Este comportamento foi atribuído ao efeito de diluição devido ao elevado teor de substituição de cimento por MC. A pesquisa também indicou o teor de 20% de MC como o teor ótimo, onde foi alcançada a maior resistência relativa, pois a partir deste teor houve uma redução da resistência, sendo esta ainda superior à referência. Com relação ao teor de MC, observou-se que as maiores resistências relativas foram obtidas nas idades de 7 e 14 dias, sugerindo que nestas idades ocorre a máxima reação pozolânica e, por conseguinte, há uma quantidade mínima de CH.

GONÇALVES (2005) fez substituições de até 40%, em massa, de cimento por MC e todas as argamassas apresentaram resistências à compressão superiores às suas respectivas misturas de referência. BROOKS *et al.* (2001) encontraram o mesmo comportamento em concretos, utilizando teores de substituição de 5-15%.

QIAN & LI (2001) *apud* SIDDIQUE (2008) investigaram a resistência à tração de concretos contendo 5-15% de MC. Os resultados mostraram o acréscimo da referida propriedade à medida que o teor de substituição aumentou, quando comparada à referência.

Durabilidade

Avaliando o refinamento na estrutura de poros, KOSTUCH *et al.* (1993) *apud* SABIR *et al.* (2001) observaram a redução no tamanho de poros da argamassa contendo 20% de MC, comparada à referência.

KHATIB & WILD (1996) avaliaram a estrutura de poros de pastas contendo teores entre 5 e 15% de MC através da porosimetria por intrusão de mercúrio. Concluiu-se que o diâmetro efetivo diminuiu e a proporção de poros com diâmetros inferiores a $0,02\mu\text{m}$ aumentou com o teor de substituição. Este incremento está associado à descontinuidade dos poros proporcionada pela metacaulinita até os 14 dias. Entre 14 e 28 dias observou-se um pequeno aumento no volume de poro total e, segundo os autores, este fato está interligado ao acréscimo na quantidade de CH e no declínio da resistência relativa. Após esta idade, o volume volta a reduzir em taxa decrescente. Pode-se dizer também que todas as pastas com MC apresentaram volume de poro maior que a pasta de referência.

FRÍAS & CABRERA (2000) também avaliaram a porosidade de pastas contendo teores entre 10 e 25% de MC. Os valores obtidos mostraram que a porosidade total das misturas contendo MC foi em torno de 16% maior que a referência. Com relação à porosidade capilar ($5-0,01\mu\text{m}$), as misturas contendo 10% de MC e a referência apresentaram ligeiro aumento, aos 14 dias, com relação às demais misturas. Foi observado um incremento na quantidade de poros inferiores a $0,01\mu\text{m}$ entre 7 e 90 dias comparado à referência, sendo este comportamento atribuído, pelos autores, como o período de início e fim da reação pozolânica.

As argamassas estudadas por GONÇALVES (2005), com teores de substituição entre 10 e 40% de cimento por MC, apresentaram redução da porosidade com o aumento no teor de MC. A porosimetria por intrusão de mercúrio realizada nas misturas com 10% e 20% de MC apresentou redução no volume de poros situados entre $0,01$ e $0,05\mu\text{m}$ e acréscimo no volume de poros situados entre $0,0025\mu\text{m}$ e $0,01\mu\text{m}$, indicando uma

redução no volume de poros maiores. A penetração acelerada de cloretos, segundo o referido autor, reduziu com o aumento do teor de MC. Para o teor de 10% foi considerada de baixa penetração, para 20% muito baixa.

Concretos foram produzidos por KHATIB & CLAY (2004) contendo teores de MC entre 5 e 15% e avaliaram que à medida que o teor de MC aumentou, houve uma redução da ação capilar. Porém, a absorção de água apresentou comportamento contrário. Os referidos autores compararam os resultados obtidos com pesquisas realizadas anteriormente (KHATIB & WILD, 1996) e concluíram que a absorção de água é dependente, principalmente, do volume total de poros e a ação capilar além de ser influenciada por este parâmetro, é também afetada pela finura e conectividade dos poros. Conseqüentemente, o comportamento dos concretos contendo MC foi considerado satisfatório.

KOSTUCH *et al.* (1993) *apud* SABIR *et al.* (2001) avaliaram a absorção de água e a difusão de íons cloro e sódio em argamassas contendo 20% de MC. Foi verificado que a presença da MC promoveu a redução desses dois parâmetros quando comparados à referência devido ao refinamento na estrutura de poros.

GRUBER *et al.* (2001) realizaram ensaios de penetração acelerada por cloretos em concretos, usando teores de substituição de 8% e 12%, em massa. Os resultados mostraram que, à medida que o teor de MC aumentou, a penetração de íons cloro reduziu. ZHANG *et al.* (1995) encontraram o mesmo comportamento utilizando 10% de MC, aos 28 e 91 dias. POON *et al.* (2006) *apud* SIDDIQUE (2008) estudaram este comportamento em concretos contendo teores de 5, 10, e 20% de MC, além da mistura de referência. A carga elétrica, aos 3, 7, 28 e 90 dias foi inferior à referência.

Retração autógena e por secagem

BROOKS *et al.* (2001) realizaram ensaios de retração autógena em concretos com 5%, 10% e 20% de MC, além da mistura de referência. A medição inicial da retração começou a partir do início de pega. Até 24 horas, verificaram que as misturas com MC apresentaram valores de retração menores que a referência, alcançando 65% para a mistura com 15% de MC. Os autores atribuíram este comportamento à redução no efeito de diluição devido à substituição de cimento por MC. A retração autógena contada

desde o início de pega apresentou valores de 445 $\mu\epsilon$, 485 $\mu\epsilon$, 419 $\mu\epsilon$, 327 $\mu\epsilon$ para as misturas de referência, com 5%, 10% e 15%, respectivamente. KINUTHIA *et al.* (2000) *apud* BROOKS *et al.* (2001), obtiveram o mesmo comportamento, sendo que a sua retração autógena máxima foi para o teor de 10% e menores para os teores de 20% e 30% de MC. ZHANG *et al.* (1995) avaliaram a retração por secagem em concreto contendo 10% de MC. As deformações obtidas foram inferiores à referência para todas as idades avaliadas, sendo de 472 $\mu\epsilon$ para a mistura MC10% e 596 $\mu\epsilon$ para a referência, aos 112 dias.

GLEIZE *et al.* (2007) estudaram a deformação por retração autógena em pastas contendo teores de MC de 5, 10, 15 e 20%. Os resultados mostraram que a longo prazo houve redução da retração com o aumento do teor de MC. Exceto para a mistura com 5% que apresentou valor similar à referência. Segundo os referidos autores, o comportamento observado para as pastas contendo MC foi de encontro aos da literatura onde se esperava o aumento da retração visto que, o refinamento dos poros propicia o aumento da tensão capilar como acontece com a sílica ativa.

CINZA DE LODO DE ESGOTO

Trabalhabilidade

MONZÓ *et al.* (1996) e MONZÓ *et al.* (2003) avaliaram a influência da granulometria da CLE na produção de argamassas. As granulometrias estudadas foram: (1) CLE sem peneiramento (2) CLE retida na peneira de 80 μm e (3) CLE retida na peneira de 40 μm . Foram substituídos entre 7,5 e 30% de cimento por CLE, em massa. Verificou-se redução no espalhamento das argamassas à medida que o teor de cinza aumentou. Este comportamento foi atribuído pelos autores à forma irregular das partículas de CLE que não permite o efeito lubrificante como acontece com as cinzas volantes que têm a forma esférica. Outro fator que também pode explicar tal comportamento é a alta absorção de água pelas partículas de CLE que pode influenciar no teor de água livre da mistura. No segundo estudo, a consistência das argamassas foi corrigida com superplastificante. FONTES (2003) obteve os mesmos resultados que os referidos autores quando substituiu parcialmente 5, 10, 15, 20 e 30% de cimento Portland por CLE em argamassas.

PAN *et al.* (2003) verificaram a influência da finura da CLE através da moagem na produção das argamassas. Neste trabalho, pode-se perceber que para um mesmo teor de substituição de cimento por CLE (20%), à medida que a finura aumentava, a trabalhabilidade também aumentava. Porém, os seus valores foram inferiores ao da argamassa controle. Segundo os autores, este aumento da trabalhabilidade foi causado pela mudança na morfologia das partículas devido à moagem da cinza, proporcionando um efeito lubrificante.

TAY (1986, 1987) e TAY *et al.* (2002) avaliaram o comportamento da CLE com diâmetro inferior a 150 µm em substituição parcial ao cimento Portland na produção de concretos. Os teores de substituição variaram de 5% a 20%, em massa. Com relação ao concreto no estado fresco verificou-se que o abatimento das misturas aumentou para elevadas porcentagens de CLE (misturas com 15% e 20% de CLE). GEYER (2001) em seu estudo encontrou o mesmo comportamento quando substituiu 20% de cimento Portland por CLE, em concretos. Uma das justificativas apresentadas pelo autor foi relacionada à superfície específica. Ou seja, pelo fato da cinza possuir uma menor área superficial que o cimento, ao ser incorporada à mistura propiciou um aumento na granulometria dos finos, necessitando de uma menor demanda de água para molhar os grãos. Com isso, passou a haver mais água livre na mistura, que contribuiu para o aumento da trabalhabilidade. Para os teores de 5% e 10%, TAY (1986, 1987) e TAY *et al.* (2002) observaram reduções de, respectivamente, 27% e 20%, em relação à referência, sendo este comportamento igual ao de FONTES (2003) quando incorporou 5% e 10% de CLE moída em substituição parcial ao cimento Portland, na produção de concretos de resistência convencional e de alto desempenho.

Resistências à compressão e à tração

O comportamento mecânico das argamassas produzidas por MONZÓ *et al.* (1996), para um teor de substituição de 15%, mostrou o aumento da resistência à compressão para as diferentes frações granulométricas de CLE em relação à mistura de referência. PAN *et al.* (2003) também avaliaram a finura da CLE por moagem, substituindo 20% de cimento Portland por cinza, e observaram que a resistência à compressão das misturas aumentou com a finura. Com base nos resultados, os autores concluíram que a CLE possui atividade pozolânica.

FONTES *et al.* (2004b) produziram argamassas com teores de substituição entre 5% e 30%, além da mistura de referência. Verificou-se a redução da resistência à compressão com o aumento do teor de substituição, porém os resultados obtidos foram considerados significativamente iguais à referência.

TAY (1986;1987) e TAY *et al.* (2002) avaliaram o desempenho da CLE em concretos, utilizando teores de substituição entre 5-20%. Os resultados indicaram a redução da resistência à compressão à medida que o teor de cinza aumentava, sendo o maior decréscimo para a mistura com 20% de CLE (32% em relação à mistura de referência – 0% de CLE). As misturas com 5% e 10% de CLE apresentaram reduções de 5% e 11%, respectivamente, comparado à referência. O mesmo comportamento foi encontrado por GEYER (2001), onde os decréscimos obtidos para os teores de 5% e 10% foram iguais aos dos referidos autores. Para o teor de 20%, a redução foi de 22% em relação à referência. FONTES *et al.* (2004a), para os mesmos teores de substituição, obtiveram variações, em relação à referência, inferiores a 3% para o concreto convencional (25MPa) e menores que 1% para o de alto desempenho (50MPa), sendo estas diferenças consideradas estatisticamente iguais à referência.

Ensaio de resistência à tração por compressão diametral foram realizados por FONTES (2003), onde verificou-se a redução deste parâmetro à medida que o teor de cinza aumentou tanto para o concreto de alto desempenho quanto para o concreto convencional, porém, estatisticamente foram considerados iguais à referência.

Durabilidade

TAY (1987) e TAY *et al.* (2002) investigaram a absorção de água em concretos contendo CLE. Os resultados obtidos mostraram que a CLE não influenciou nessa propriedade, onde os valores até 20% de substituição permaneceram muito próximos da referência. GEYER (2001) encontrou o mesmo comportamento que os referidos autores, utilizando uma relação a/mc de 0,5 e os mesmos teores de substituição. Porém, para uma relação a/mc de 0,8, foi verificado o decréscimo desta propriedade. O ensaio de absorção de água por capilaridade apresentou a mesma tendência que o de absorção de água por imersão.

FONTES (2003) e FONTES *et al.* (2004a, 2004b) observaram um incremento da

porosidade das argamassas, com o aumento do teor de CLE, quando comparado à referência. Em contrapartida, a presença da cinza promoveu uma redução da absorvidade tanto no estágio 1 quanto no estágio 2, aumentando a resistência à penetração de água. Os concretos convencional e de alto desempenho tiveram o mesmo comportamento das argamassas.

Ensaio ambientais

Devido à presença de metais pesados na composição da CLE e ao rigor nas leis ambientais, ensaios de solubilização e lixiviação começaram a ser realizados nas matrizes cimentícias visando avaliar o desprendimento destes metais para o meio ambiente.

GEYER (2001) realizou ensaio de solubilização no concreto de referência, e nos concretos contendo 10% e 20% de CLE. Os resultados mostraram que os metais pesados presentes na cinza ficaram retidos no interior do material, solubilizando apenas para o alumínio e a dureza que estão presentes também no concreto de referência. O autor atribuiu este comportamento não somente à presença das cinzas, mas principalmente, à composição química do concreto sem aditivo mineral.

FONTES (2003) e FONTES *et al.* (2004a, 2004b), além de avaliar o encapsulamento dos metais pesados em amostras de concreto no estado íntegro, investigaram também em amostras demolidas. Verificou-se que apenas a amostra no estado demolido apresentou o parâmetro de dureza acima do limite da norma.

CYR *et al.* (2007) realizaram ensaio de lixiviação, conforme norma NF P X31-211 para argamassas no estado íntegro e NF EM 12457-2 em argamassas moídas (fragmentos < 4mm). As amostras permaneceram em água deionizada por 24 horas, com taxa líquido/sólido de 10. Em seguida, o filtrado foi analisado com relação ao pH e metais pesados. Verificou-se que as amostras no estado demolido liberaram entre 3 a 6 vezes mais metais pesados (Ti, V, Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Sb, Ba e Pb) do que as no estado íntegro. Além disso, as duas amostras apresentaram concentrações de metais pesados acima da amostra de referência.

3.2.4.5 CINZA VOLANTE DO RESÍDUO SÓLIDO URBANO

Devido à escassa literatura sobre a utilização da cinza volante em substituição parcial ao cimento, a revisão bibliográfica deste item foi dividida conforme o tipo de matriz cimentícia (pasta, argamassa e concreto) e não pelas propriedades como foi feito para a cinza do lodo de esgoto e a metacaulinita. Vale ressaltar que no artigo de RÉMOND *et al.* (2002) a cinza substituiu parcialmente a areia e não o cimento que é o objetivo do presente estudo. Mesmo assim, ele foi incorporado a revisão como forma de avaliar o seu comportamento visto que a cinza foi utilizada como substituição.

ARGAMASSAS

RÉMOND *et al.* (2002) estudaram a possibilidade de utilizar a cinza volante, em substituição parcial à areia, na produção de argamassas. Inicialmente, o material foi peneirado (# 630 μm) e cuidadosamente homogeneizado, cujo objetivo foi eliminar os grãos ligeiramente maiores, visto que a cinza volante já é um resíduo muito fino.

Os teores de substituição de cinza volante por areia foram de 5 a 20% em massa, sendo denominados de M0, M5, M10, M15 e M20.

Para esses teores de substituição, verificou-se que o tempo de pega inicial e final aumentou com a presença da cinza sendo o maior valor registrado entre a M10 e a M15. Isso significa que a presença do resíduo foi o responsável pelo retardamento da pega.

A resistência à compressão foi avaliada para as idades de 7, 28, 90 e 565 dias. Verificou-se que a mistura M10 apresentou a maior resistência à compressão, quando comparada às outras misturas. Verificou-se também que a presença da cinza volante fez com que a resistência à compressão de todas as misturas aumentasse gradativamente até 90 dias. Porém, aos 565 dias ocorreu o contrário, ou seja, houve uma redução da resistência à compressão quando comparada aos 90 dias. Portanto, devido a este comportamento, pode-se dizer que a cinza possui uma baixa atividade pozolânica. Os referidos autores não conseguiram explicar esta redução da resistência à compressão aos 565 dias.

Em paralelo, foi realizado um estudo com as misturas M10 e M0. A mistura M10 foi produzida com cinza volante lavada sendo designada como M'10 e a mistura M0 foi

produzida com a água da lavagem da cinza volante (M'0). A substituição de 10% cinza volante sem tratamento por 10% de cinza volante tratada resultou na redução da resistência à compressão em torno de 20%. Por outro lado, a substituição da água destilada pela água de lavagem da cinza volante para produzir a mistura de referência (M'0) resultou em um aumento de 35% na resistência à compressão. Segundo os autores, não se tem ainda uma resposta conclusiva para a influência das frações não-solúvel e solúvel sobre a resistência à compressão. Foi sugerido que o ponto fraco das argamassas pode estar na ligação entre a pasta e cinza volante.

GAO *et al.* (2008) substituiu parcialmente o cimento por cinza volante do resíduo sólido urbano, em argamassas, nos teores de 10, 20 e 30%. A relação cimento/areia foi de 3 e a/mc de 0,5 para todas as misturas. A cinza foi submetida a processo de lavagem com o objetivo de reduzir os sais solúveis que são prejudiciais à resistência mecânica, sendo a relação líquido/sólido de 5 e tempo de mistura de 30'. Porém, conseguiram reduzir apenas o teor de cloro, ficando cálcio e sulfato ainda elevados. Para o teor de substituição de 30%, aos 28 e 180 dias, a resistência à compressão ficou 60% menor que a referência. Em contrapartida, 10 e 20% apresentaram melhor comportamento, sendo este último indicado pelos autores como o limite aceitável de substituição. A mistura com 10% de cinza teve resistências muito próximas da referência aos 3, 7 e 28 dias.

Para analisar a parte ambiental, o estudo propôs a utilização de um agente químico que tem por objetivo evitar a lixiviação dos metais pesados no tempo através da sua estabilização. Os testes foram realizados conforme a TCLP, em ácido acético, com pH de 2,88. Foram produzidos quatro tipos de misturas: (1) argamassa de referência, (2) argamassa com 20% de cinza volante, (3) argamassa com 20% de cinza volante + 0,25% de agente químico e (4) argamassa com 20% de cinza volante + 0,50% de agente químico, em duas condições (estado monolítico e fragmentado). No estado fragmentado, verificou-se que a amostra (2) apresentou maior concentração de metais pesados que as demais. A incorporação do agente físico proporcionou uma queda desta concentração, sendo mais expressiva para a mistura de maior teor (4). No estado monolítico, o cloro lixiviou apresentando valores superiores à referência. Os autores propuseram lavar a cinza até a concentração de 0,1%. Com relação aos outros metais, a amostra (2) apresentou pouca resistência à lixiviação, porém a adição do agente químico controlou esta reação ficando os resultados praticamente iguais à mistura (1).

AUBERT *et al.* (2007) utilizaram dois tipos de cinza volante na produção de argamassas. A diferença entre elas é que apenas uma possui em sua composição alumínio metálico e sulfatos. Antes de serem aproveitadas, ambas passaram por processo de estabilização que é detalhado em AUBERT *et al.* (2006). As argamassas foram produzidas substituindo 25% de cimento pelas cinzas. Verificou-se que entre 2 e 90 dias quanto menor a quantidade de cimento na mistura, menor a resistência à compressão da mistura. Este comportamento foi atribuído à natureza da cinza e à ocorrência ou não de expansão devido à presença do alumínio metálico. Para avaliar a reatividade destas duas cinzas, resultados experimentais de atividade pozolânica foram obtidos para os referidos materiais e comparados com um material inerte e com a cinza volante do carvão. Pode-se dizer, portanto, que a cinza que possui alumínio metálico em sua composição apresentou os menores resultados de resistência à compressão, devido à sua expansão. Sendo o índice de atividade obtido inferior ao do material inerte. Para a outra cinza, não foi observado nenhum tipo de fissuração proveniente da expansão, e os índices ficaram muito próximos e até superiores à cinza volante do carvão. Do ponto de vista tecnológico, os autores consideraram vantajosa a utilização da cinza volante como substituto parcial ao cimento. Com relação à parte ambiental, as matrizes cimentícias nos estados íntegro e fragmentado não conseguiram encapsular metais pesados considerados nocivos como o cromo e o antimônio, ficando acima do limite máximo para disposição em aterros sanitários no estado demolido.

CONCRETOS

Com o propósito de reduzir a quantidade de resíduo encaminhado aos aterros estudos foram realizados por AUBERT *et al.* (2004) para viabilizar a incorporação das cinzas volantes na produção de concretos, após tratamento físico-químico.

O tratamento físico-químico consistiu na lavagem da cinza com água, em seguida utilizou-se ácido fosfórico para estabilizar os metais pesados e, por último, a calcinação a uma temperatura superior a 600°C para eliminar as dioxinas. A introdução de cinza volante não tratada na produção de concreto normalmente influencia em suas propriedades no estado fresco, segundo os autores, reduz a trabalhabilidade e retarda o tempo de pega do material.

Nesse estudo cinco misturas foram moldadas: R (apenas cimento Portland), A12 e A50

(substituição do cimento por 12,5% e 50% de cinza volante) e S12 e S50 (12,5% e 50% de cimento foram substituídos por areia), e para avaliar a influência da incorporação da cinza volante nesses concretos, três propriedades foram estudadas: propriedade mecânica (resistência à compressão), propriedade física (permeabilidade a gás, índice de vazios e porosidade total) e o comportamento ambiental através da lixiviação.

Comparando as misturas A50 e S50 no que diz respeito às propriedades físicas, observou-se que a introdução de 150kg de cinza volante em substituição parcial ao cimento (A50) e 150kg de areia em substituição parcial ao cimento (S50) não afetou a porosidade total e o índice de vazios, porém o mesmo não aconteceu com a permeabilidade a gás onde houve uma redução da mesma para a mistura A50. Para a mistura A12 houve uma redução do índice de vazios e da permeabilidade a gás quando comparada à referência, significando que a cinza volante mais o cimento ajudam a selar a estrutura. Quanto à resistência à compressão, verificou-se que houve uma redução da resistência à compressão para as misturas A12 e A50 em relação à mistura de referência. Percebeu-se, no entanto, que as misturas S12 e S50 apresentaram praticamente o mesmo valor que as misturas com cinza. O resultado do ensaio de lixiviação realizado nos concretos sugere que o uso da cinza volante tratada é viável, tornando-se uma alternativa muito interessante com relação à simples disposição nos aterros. Os ensaios de lixiviação realizados em amostras nos estados monolítico e fragmentado apresentaram resultados inferiores ao máximo permitido para a utilização da cinza de fundo em estradas, indicando a boa alternativa de uso do material.

A mesma influência da cinza volante lavada nas propriedades do concreto foram observadas por BERTOLINI *et al.* (2004). Nesse estudo, foram substituídos 30% de cimento por cinza volante lavada. A redução da resistência à compressão chegou a 18% em relação à mistura de referência. Com relação à resistividade e penetração de cloro, a mistura contendo cinza volante apresentou comportamento inferior à referência, sendo este fato atribuído à estrutura de poros e permeabilidade do material.

4 PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS ADITIVOS MINERAIS

Neste capítulo descreve-se a produção e caracterização dos aditivos minerais utilizados no presente estudo. Os aditivos utilizados foram a cinza de lodo de esgoto (CLE), metacaulinita (MC), uma blenda (BL) de CLE e MC e cinza volante do resíduo sólido urbano (CVRSU).

4.1 CINZA DE LODO DE ESGOTO

4.1.1 COLETA DO LODO DE ESGOTO

O lodo de esgoto (LE) utilizado na presente pesquisa foi proveniente da Estação de Tratamento de Esgotos Alegria, situada no bairro do Caju, na região metropolitana da cidade do Rio de Janeiro. Na Figura 4.1 encontra-se um lay-out da E.T.E. Alegria.



Figura 4.1: Lay-out da ETE Alegria – local de coleta do LE

A coleta do resíduo ocorreu em duas etapas. A primeira etapa foi realizada no dia 16 de maio de 2002, onde foram coletados cerca de 300kg de lodo de esgoto. Os resultados dos ensaios de caracterização do lodo “in-natura”, a metodologia de produção da cinza

de lodo de esgoto com os seus resultados de caracterização estão apresentados a seguir e, também, em FONTES (2003). O lodo de esgoto proveniente da primeira coleta e a sua cinza serão designados, respectivamente, como LE1 e CLE1.

A segunda etapa foi realizada no dia 12 de maio de 2006, quando foram coletados cerca de 1.000kg de LE. Os ensaios de caracterização do lodo “in-natura” da segunda coleta, bem como a metodologia de produção da cinza e seus ensaios de caracterização são apresentados a seguir. O lodo e a cinza referentes à segunda coleta serão designados, respectivamente, como LE2 e CLE2. Na Figura 4.2 encontra-se amostras do lodo de esgoto referentes às duas coletas.



Figura 4.2: Aspecto dos lodos de esgotos “in-natura” após coleta.

4.1.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA

4.1.2.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS

A caracterização físico-química do LE consistiu de ensaios de teor de umidade, sólidos totais e matéria orgânica. Na Tabela 4.1 encontram-se os resultados referentes a esses ensaios para o LE1 e LE2. Estes ensaios foram realizados conforme NBR 6457 (ABNT, 1986) e MF 436 (FEEMA, 1983), respectivamente.

Tabela 4.1: Teor de umidade, de sólidos totais e de matéria orgânica dos LE’s coletados.

Parâmetros	Resultados (%)	
	LE1	LE2
Teor de umidade	66,2	65,2
Teor de sólidos totais	37,0	34,7
Teor de matéria orgânica	54,7	60,9

Os resultados indicaram que os parâmetros analisados não diferenciaram muito entre a 1ª e 2ª coletas, demonstrando a regularidade no tratamento do lodo. O teor de umidade apresentou diferença inferior a 1,5% entre as duas coletas. Com relação ao teor de sólidos totais e de matéria orgânica essas diferenças foram maiores, sendo de 6% e 11%, respectivamente. Na cidade do Rio de Janeiro normalmente este resíduo é encaminhado ao aterro sanitário. Porém, existe uma diretriz estadual para a destinação dos resíduos sólidos regida pela FEEMA. De acordo com a DZ 1311 (FEEMA, 1994), que trata do referido assunto, estabelece que os lodos de Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) e de fossas sépticas devem ser dispostos com um teor de umidade inferior a 70%. Observando a Tabela 4.1 pode-se notar que as duas coletas atenderam a esse requisito, podendo, portanto, serem dispostas nos aterros sanitários.

Através da norma MF436 (método gravimétrico) determinou-se a porcentagem de sólidos totais, voláteis e fixos do lodo de esgoto. O teor de sólidos totais foi obtido através da secagem do material à temperatura de 105°C por um período de 12 horas. Para o teor de matéria orgânica (resíduo volátil) o lodo foi calcinado à temperatura de 550°C, conforme norma. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 4.1. O teor de sólidos fixos é a quantidade de material que permanece no “cadinho” após processo de calcinação (resíduo não volátil). O LE1 e LE2 apresentaram teores de sólidos fixos de, aproximadamente, 17% e 14%, respectivamente. Ou seja, após processo de queima, o LE1 apresentará maior quantidade de material que o LE2.

4.1.3 PRODUÇÃO DAS CINZAS DE LODO DE ESGOTO

4.1.3.1 DEFINIÇÃO DA TEMPERATURA DE QUEIMA

A definição da temperatura de queima do LE foi feita com base em ensaios de análises térmica diferencial e termogravimétrica utilizando-se uma amostra do LE1. Esta mesma temperatura foi posteriormente utilizada para a queima do LE2. A Figura 4.3 apresenta os resultados de análise térmica diferencial (ATD) e termogravimétrica (ATG) realizada no LE1.

Observando-se a Figura 4.3 nota-se que houve uma perda de 60% da massa total de LE1 em função do elevado teor de matéria orgânica presente no resíduo. Essa reação é mais intensa entre 200-450°C, quando a perda de massa de material alcançou 45% da massa

total. A partir dos 650°C verifica-se, a perda total de resíduo volátil, e a curva torna-se constante.

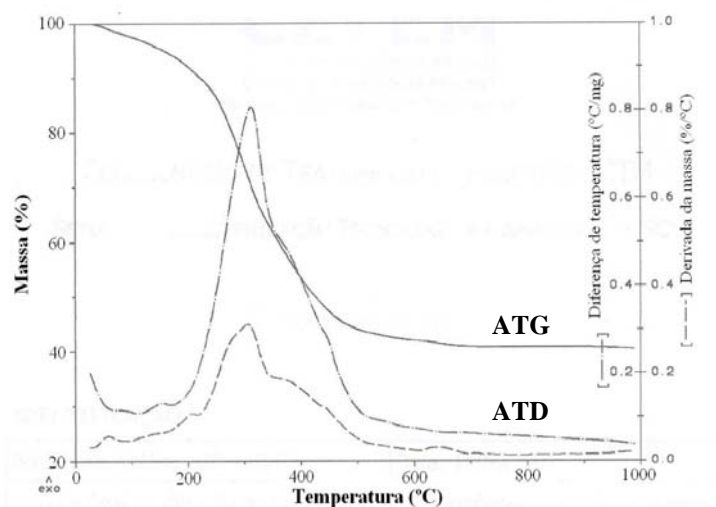


Figura 4.3: ATD e ATG do LE1.

Com base nas ATD e ATG apresentados acima, verifica-se que a perda de massa para a temperatura de 550°C é de 58%. Assim, foram selecionadas as temperaturas de 550°C e 650°C para a queima do lodo, visto que ambas não apresentavam diferenças expressivas nas perdas de massa e que a utilização de temperaturas maiores proporcionaria um maior gasto energético com a queima do material.

Para definir a temperatura de queima do lodo de esgoto, fez-se uma análise qualitativa dos possíveis compostos a serem emitidos para a atmosfera, durante o processo de calcinação por meio da espectroscopia por Fluorescência de Raios-X. Essa análise foi realizada no Programa de Engenharia Química do COPPE – Núcleo de Catálise (NUCAT) e o equipamento utilizado foi um Rigater Rix 3100 com tubo de rh (ródio). Os resultados para as duas temperaturas bem como para a amostra de lodo de esgoto encontram-se na Tabela 4.2.

Analisando os dados obtidos, percebe-se que após o processo de calcinação, há um aumento na massa de determinadas substâncias em relação ao lodo bruto. Este fato provavelmente ocorreu por causa da volatilização de algumas substâncias, o que proporcionou um acréscimo na concentração destes compostos. Verifica-se também que a CLE1 queimada a 650°C apresentou praticamente a mesma composição final que a

CLE1 queimada a 550°C. Portanto, com a finalidade de reduzir o gasto energético, optou-se por queimar o lodo de esgoto a 550°C.

Tabela 4.2: Resultados referentes a emissões gasosas no LE1 e na CLE1

Poluentes	lodo bruto	550°C	650°C
C	-	0,5855	0,5079
Na ₂ O	1,6128	0,0996	0,0976
MgO	0,3926	0,4821	0,5096
Al ₂ O ₃	0,1686	2,5691	2,5481
SiO ₂	1,0135	5,0990	4,9453
P ₂ O ₅	0,2396	0,9162	0,9154
SO ₃	0,5854	1,1152	1,1556
Cl	0,1025	0,0185	0,0149
K ₂ O	0,1202	0,3594	0,3477
CaO	0,6322	1,6872	1,8118
TiO ₂	0,1265	0,2660	0,2746
Cr ₂ O ₃	0,0088	0,0127	0,0146
MnO	0,0103	0,0125	0,0197
Fe ₂ O ₃	0,9359	1,6138	1,6636
NiO	0,0050	0,0098	0,0080
CuO	0,0154	0,0282	0,0288
ZnO	0,0531	0,0867	0,0894
Ga ₂ O ₃	0,0008	0,0000	0,0000
Rb ₂ O	0,0014	0,0021	0,0022
SrO	0,0042	0,0064	0,0071
Y ₂ O ₃	0,0000	0,0000	0,0054
ZrO ₂	0,0064	0,0091	0,0100
Nb ₂ O ₅	0,0000	0,0009	0,0000
SnO ₂	0,0000	0,0050	0,0058
Ag ₂ O	0,0162	0,0000	0,0000
PbO	0,0109	0,0148	0,0169
Outros*	93,9376		

* Outros: gás carbônico e água

4.1.3.2 PROCESSO DE QUEIMA

Conforme apresentado no item 4.1.2.1 o lodo de esgoto, após o processo de queima, apresenta teor de sólidos fixos de 17% para a CLE1 e 14% para a CLE2. Ou seja, a cada 10kg de LE queimado obtêm-se, por exemplo, 1,7kg de CLE1. A obtenção de pequenas quantidades de cinza deve-se ao elevado teor de matéria orgânica existente na composição deste resíduo. Portanto, para conseguir uma quantidade significativa de cinza seriam necessárias muitas queimas o que demandaria muito tempo e um maior gasto energético. Para agilizar o processo de queima optou-se por fazer uma pré-queima do LE de forma a eliminar a matéria orgânica existente no resíduo. Além disso, evitava-se a emanção de odores no interior do laboratório.

Para a pré-queima do LE1 utilizou-se um forno, situado na cidade de Leopoldina - MG. A temperatura máxima alcançada durante este processo foi de 420°C. Para a pré-queima do LE2 foi construído um forno na parte externa do Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ, onde a temperatura máxima alcançada foi de 350°C. Os fornos utilizados na pré-queima dos lodos estão apresentados na Figura 4.4.



(a) Forno para a pré-queima do LE1



(b) Forno para a pré-queima do LE2

Figura 4.4: Fornos utilizados para a pré-queima do lodo de esgoto.

4.1.4 METODOLOGIA DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

A seguir apresenta-se a metodologia utilizada nos ensaios de caracterização física, química, mineralógica e ambiental dos materiais “in-natura” e dos aditivos minerais utilizados no presente estudo.

4.1.4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

PROCESSO DE QUEIMA CONTROLADA

O processo de queima controlada da cinza de lodo de esgoto e da blenda foi realizado utilizando uma mufla existente no Laboratório de Estruturas (LABEST). A rampa de aquecimento do forno foi de 10°C/min e o tempo de permanência de 3 horas.

A queima da metacaulinita ocorreu em um forno rotativo e as condições de queima do material serão apresentadas no item 4.2. Na Figura 4.5 encontram os fornos utilizados na queima dos materiais do presente estudo.



(a) Mufla



(b) forno rotativo

Figura 4.5: Fornos utilizados no processo de queima controlada dos materiais.

PROCESSO DE MOAGEM

A moagem dos aditivos minerais teve por objetivo obter materiais que atendessem à finura exigida pela NBR 12653² (ABNT, 1992) para materiais pozolânicos. A CLE1 foi moída no Laboratório de Tecnologia dos Materiais do Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da COPPE/UFRJ, em moinho rotativo de porcelana com capacidade para 12 litros (Ver Figura 4.6). Foram utilizados 6 litros de corpos moedores

² A NBR 12653 (ABNT, 1992) estabelece 34% de material retido na peneira 45 µm como limite máximo.

de alumina e três litros de amostra por batelada a uma velocidade de 46rpm. O tempo de moagem foi de 3 horas.



(a) Colocação da CLE1 no moinho



(b) moagem do material

Figura 4.6: Moinho rotativo de porcelana utilizado na moagem da CLE1.

Visando otimizar o processo de moagem, os demais aditivos minerais foram moídos em moinho vibratório. O uso desse tipo de moinho reduziu o tempo de moagem e permitiu a obtenção de uma maior quantidade de material moído por batelada. Estudos comparativos entre a eficiência desses tipos de moinho são apresentados em CORDEIRO (2006).

A moagem da CVRSU “in-natura” foi realizada no Laboratório de Tecnologia dos Materiais do Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da COPPE/UFRJ, em moinho vibratório com volume interno de 56 litros. Para cada batelada, utilizou-se 8 litros de amostra e 16,4 litros de corpos moedores de aço com diâmetro de 2,5 cm (Ver Figura 4.7). O tempo de moagem foi de 2 horas.



(a) Moinho vibratório



(b) Corpos moedores de aço

Figura 4.7: Moinho vibratório de aço utilizado na moagem da CVRSU.

A CLE2, MC e BL foram moídas no Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), em moinho vibratório com diâmetro interno de 19mm e capacidade para 33 litros. Foram utilizados 8 litros de amostra e 16,5 litros de corpos moedores de aço, por batelada, divididos igualmente nos diâmetros de 18mm, 25mm, 32mm e 38mm. O tempo de moagem foi de 2 horas (Ver Figura 4.8).



(a) Moinho vibratório do CETEM
(Fonte: CORDEIRO, 2006)



(b) Corpos moedores de aço
no interior do moinho

Figura 4.8: Moinho vibratório de aço utilizado na moagem da CLE2, MC e BL.

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A curva granulométrica dos materiais “in-natura” foi obtida por meio do peneiramento e análise por sedimentação, seguindo os critérios da NBR 7181 (ABNT, 1984). Esse ensaio foi realizado no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ.

A granulometria dos materiais moídos foi obtida utilizando granulômetro a laser MasterSizer 2000 (Ver Figura 4.9). Esse ensaio foi realizado no Laboratório de Estruturas (LabEst), em álcool etílico PA 95%, com agitação de 1500 rpm. O ultra-som permaneceu ligado durante todo o ensaio para garantir a dispersão do material.



Figura 4.9: Granulômetro a laser – MasterSizer 2000

MASSA ESPECÍFICA

A massa específica dos materiais “in-natura” foi realizada seguindo o método do picnômetro, conforme a NBR 6508 (ABNT, 1984), no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ.

A massa específica dos aditivos minerais foi realizada no Laboratório de Estruturas (LABEST) da COPPE/UFRJ, utilizando o frasco volumétrico de Le Chatelier, conforme a NM23 (NM, 2000).

4.1.4.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

ANÁLISE QUÍMICA

As análises químicas dos aditivos minerais e do cimento foram realizadas no LabEst e no Laboratório de raios-X do Centro Nacional de Energia Nuclear (CNEN)/Instituto de Energia Nuclear (IEN) por meio da espectroscopia por fluorescência de energia dispersiva de raios-X (Ver Figura 4.10). Os respectivos equipamentos utilizados foram o EDX 720 e 800 da marca Shimadzu, com tubo de ródio e detector de Si (Li), resfriado com nitrogênio líquido. Foram pesquisados todos os elementos compreendidos na faixa do Ti ao U e do Na ao SC. As amostras foram prensadas com substrato de ácido bórico para formar uma pastilha.



(a) EDX 720 - LabEst



(b) Pastilha com a amostra prensada

Figura 4.10: Equipamento e amostra utilizados na análise química dos aditivos minerais.

A presença dos metais pesados nos aditivos minerais foi confirmada através de uma varredura qualitativa do Ti ao U, utilizando espectrômetro por fluorescência de raios-X

da marca Rigaku Denk, modelo semi-automático com tubo de prata de 30mA e 40kW. Esta análise foi realizada no Laboratório de raios-X do CNEN/IEN.

ANÁLISE TÉRMICA DIFERENCIAL E TERMOGRAVIMÉTRICA

A análise térmica diferencial e termogravimétrica foi realizada no LabEst no equipamento SQT 600, com calorimetria diferencial de varredura (DSC), em atmosfera de nitrogênio com rampa de 10°C/min. Na Figura 4.11 mostra-se o equipamento SQT 600 utilizado na referida análise.



Figura 4.11: Equipamento de análise térmica diferencial e termogravimétrica com DSC.

TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA, TEOR DE SÓLIDOS TOTAIS E TEOR DE UMIDADE

Os teores de matéria orgânica e de sólidos totais do Lodo de Esgoto foram realizados conforme a MF 436 (FEEMA, 1980). O teor de umidade do resíduo seguiu o procedimento da NBR 6457 (ABNT, 1986). Esses ensaios foram realizados no Laboratório de Engenharia do Meio Ambiente da Escola Politécnica da UFRJ.

PERDA AO FOGO

A perda ao fogo dos aditivos minerais foi realizada conforme a NBRNM 18 (ABNT, 2004). Inicialmente, o material foi pesado (massa inicial) e calcinado à temperatura de 950°C por 50 minutos. Após resfriamento do forno, o material foi colocado em dessecador e, em seguida, pesado para obtenção da massa final.

ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA

O índice de atividade pozolânica (IAP) dos aditivos minerais foi determinado através da relação entre a resistência à compressão da argamassa com material pozolânico e argamassa de referência (cimento Portland), aos 28 dias, expresso em porcentagem. Este ensaio foi realizado conforme a NBR 5752 (ABNT, 1992).

4.1.4.3 CARACTERÍSTICAS MINERALÓGICAS

DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

A composição mineralógica dos aditivos minerais foi obtida por difração de raios-X. O espectro de difração foi coletado pelo método do pó em um equipamento Bruker D8 (Ver Figura 4.12) nas seguintes condições de operação: radiação de cobre $K\alpha$ (30 kV/40 mA); velocidade do goniômetro de $0,02^\circ 2\theta$ por passo com tempo de contagem de 1 segundo por passo e coletados de 5 a $70^\circ (2\theta)$. A interpretação qualitativa de espectro foi efetuada em software Bruker Diffrac^{Plus}. Esses ensaios foram realizados no LabEst.

Para quantificar o teor de amorfos presente no aditivo mineral, fez-se refinamento por Rietveld, utilizando um equipamento Bruker - AXS nas seguintes condições de operação: radiação de Co $K\alpha$ (40 kV/35 mA); velocidade do goniômetro de $0,02^\circ 2\theta$ por passo com tempo de contagem de 3,0 segundos por passo e coletados de 5 a $80^\circ (2\theta)$. A interpretação qualitativa de espectro foi efetuada em software Bruker Diffrac^{Plus} e os espectros foram refinados e quantificados no software TOPAS R. Para esta análise é considerado aceitável um erro inferior a 6,0%.



Figura 4.12: Equipamento de Difração de raios-X – Bruker

4.1.4.4 CARACTERÍSTICAS AMBIENTAIS

Para classificar o aditivo mineral quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde humana (periculosidade do material) foram realizados ensaios de lixiviação e solubilização. Estes ensaios foram feitos na BIOAGRI Ambiental, conforme a NBR 10005 e NBR 10006 (ABNT, 2004), respectivamente. A classificação dos aditivos minerais foi feita de acordo com os anexos F e G da NBR 10004 (ABNT, 2004).

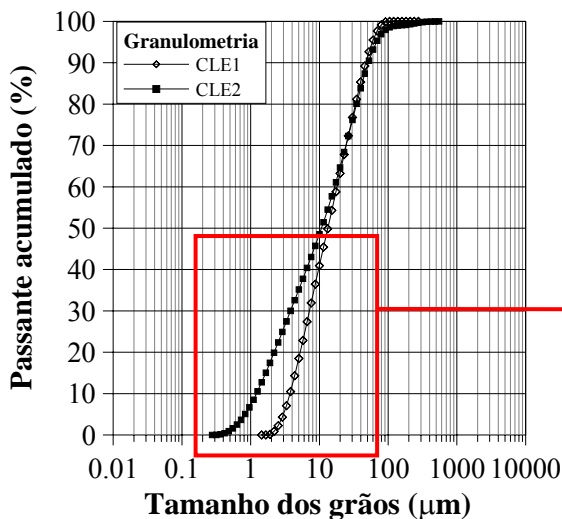
4.1.5 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA, MINERALÓGICA E AMBIENTAL

4.1.5.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS

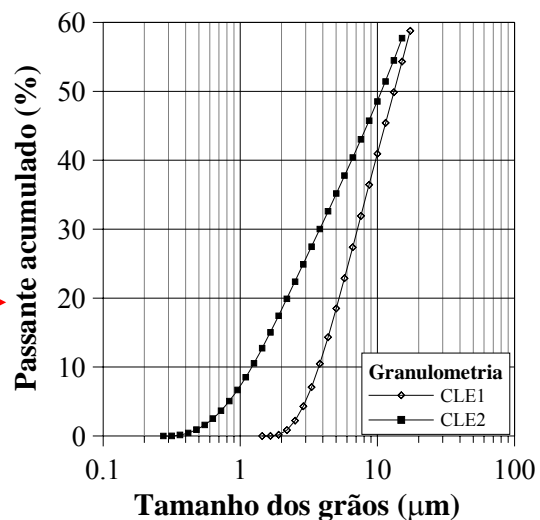
Na Figura 4.13 estão apresentadas a CLE1 e CLE2 e suas respectivas curvas granulométricas.



(a) Aspecto das cinzas CLE1 e CLE2



(b) Curvas granulométricas da CLE1 e CLE2



(c) Ampliação das duas curvas granulométricas para $\phi < 20\text{mm}$

Figura 4.13: Aspecto e curvas granulométricas da CLE1 e CLE2.

Observando-se as duas curvas apresentadas na Figura 4.13, nota-se que as CLE1 e CLE2 apresentam praticamente a mesma curva granulométrica para grãos maiores que $20\mu\text{m}$ (d_{60}). Portanto, para melhor analisar a finura das cinzas, além dos diâmetros d_{10} , d_{50} e d_{90} , normalmente apresentados, serão mostrados também, os diâmetros referentes ao d_5 , d_{20} e d_{30} . Na Tabela 4.3 encontram-se o tamanho dos grãos referentes à porcentagem de material passante acumulado das duas cinzas.

Tabela 4.3: Diâmetros referentes a porcentagem de material passante acumulado para as cinzas CLE1 e CLE2.

Porcentagem de material passante acumulado	Tamanho do grão (μm)	
	CLE1	CLE2
d_5	3,0	0,8
d_{10}	3,8	1,2
d_{20}	5,1	2,1
d_{30}	7,1	3,9
d_{50}	13,0	11,0
d_{90}	48,0	52,0

Onde:

$d_{x\%}$: tamanho do grão correspondente a “x”% de material passante acumulado;

Analisando a composição granulométrica das duas cinzas, percebe-se que 5%, 10%, 20% e 30% dos grãos de CLE1 apresentam diâmetros inferiores a $3,0\mu\text{m}$, $3,8\mu\text{m}$, $5,1\mu\text{m}$ e $7,1\mu\text{m}$, respectivamente, enquanto a CLE2 apresenta, nestas mesmas porcentagens, diâmetros inferiores a $0,8\mu\text{m}$, $1,2\mu\text{m}$, $2,1\mu\text{m}$ e $3,9\mu\text{m}$. A influência desta elevada finura apresentada pela CLE2 quando comparada com a CLE1 será observada, principalmente, nas propriedades de durabilidade dos concretos. Com relação ao d_{50} , as duas cinzas apresentaram diâmetros bem próximos. O d_{90} , a CLE1 apresentou diâmetro inferior a CLE2.

No que diz respeito à NBR 12653 (ABNT, 1992), as duas cinzas atenderam à exigência física para a quantidade de material retido na peneira $45\mu\text{m}$ (máximo de 34%), sendo este percentual de 11% para a CLE1 e 14% para a CLE2.

A composição química, teor de álcalis e de umidade, perda ao fogo e massa específica

das CLE1 e CLE2 encontram-se na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Características físico-químicas das amostras de CLE1 e CLE2

Parâmetros	Concentração (%)		
	CLE1	CLE2	NBR 12653 (ABNT, 1999)
SiO ₂	39,02	45,68	SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ > 70%
Al ₂ O ₃	19,09	20,16	
Fe ₂ O ₃	12,48	8,69	
CaO	10,12	7,50	
MgO	1,89	2,33	
P ₂ O ₅	4,94	3,02	
SO ₃	6,38	7,99	< 4,0%
K ₂ O	1,76	2,20	
Na ₂ O	1,26	ND	
TiO ₂	ND	1,19	
Cr ₂ O ₃	0,31	0,05	
ZnO	0,57	0,43	
PbO	0,07	0,06	
CuO	0,03	0,11	
MnO	0,12	0,08	
NiO	0,26	0,03	
SeO	0,06	ND	
ZrO ₂	ND	0,02	
SrO	ND	0,02	
BaO	1,63	0,43	
Álcalis disponíveis (%)	2,42	1,45	< 1,5
Teor de umidade (%)	1,5	1,7	< 3,0
Perda ao fogo (%)	7,3	7,6	< 10
Massa específica (g/cm ³)	2,68	2,69	-

ND: não detectado.

Conforme descrito no capítulo 2, o lodo de esgoto proveniente de várias E.T.E.'s apresentaram grande variabilidade nos resultados, apesar de possuírem praticamente os mesmos compostos em sua composição. Este comportamento foi atribuído às características do esgoto bruto e ao tipo de tratamento. Apesar das cinzas do presente estudo serem provenientes do lodo de esgoto de uma mesma E.T.E., eles foram

coletados em épocas diferentes o que influenciou na qualidade do esgoto bruto e, por conseguinte na concentração dos elementos químicos. Este tipo de comportamento é muito comum quando se analisa resíduos heterogêneos. Isto é um indicativo da variabilidade do material, significando dizer que mesmo que as CLE's apresentem os mesmos parâmetros, suas concentrações podem variar significativamente. Por isso, os resultados obtidos referem-se às amostras de CLE da E.T.E. Alegria referente aos dias de coleta anteriormente especificados e não a qualquer CLE.

Com relação à concentração de metais pesados, a presença destes na cinza é um indicativo de que se estes resíduos forem dispostos de qualquer forma no meio ambiente, os metais podem vir a solubilizar e, a depender da sua concentração, contaminar as áreas adjacentes, comprometendo todo o ecossistema.

Quanto às exigências químicas da NBR 12653 (ABNT, 1992), constatou-se que o somatório de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ foi de 70,59% para a CLE1 e 74,53% para a CLE2, atendendo ao limite mínimo da norma que é de 70%. O mesmo aconteceu para o teor de umidade e perda ao fogo. Porém o teor de álcalis, referente à CLE1, ficou acima de 1,5% e as duas cinzas não atenderam ao requisito de porcentagem máxima de SO_3 . A influência destes dois parâmetros no comportamento das misturas não será expressiva visto que os teores de substituição de cimento pelo aditivo mineral são baixos (5 e 10%).

ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA

O índice de atividade pozolânica, segundo a NBR 5752 (ABNT, 1992), fixa os valores de consistência em $225 \pm 5\text{mm}$. Para manter a mesma consistência para todas as misturas, a incorporação de 35% de aditivo mineral em substituição parcial ao cimento Portland poderá demandar uma maior quantidade de água à mistura, fazendo a relação água/material cimentício (a/mc) variar. Na Tabela 4.5 estão apresentados os resultados de IAP obtidos para as CLE1 e CLE2, bem como a quantidade de material cimentício e água utilizados para cada mistura.

Tabela 4.5: Resultados obtidos para o índice de atividade pozolânica das amostras de CLE1 e CLE2.

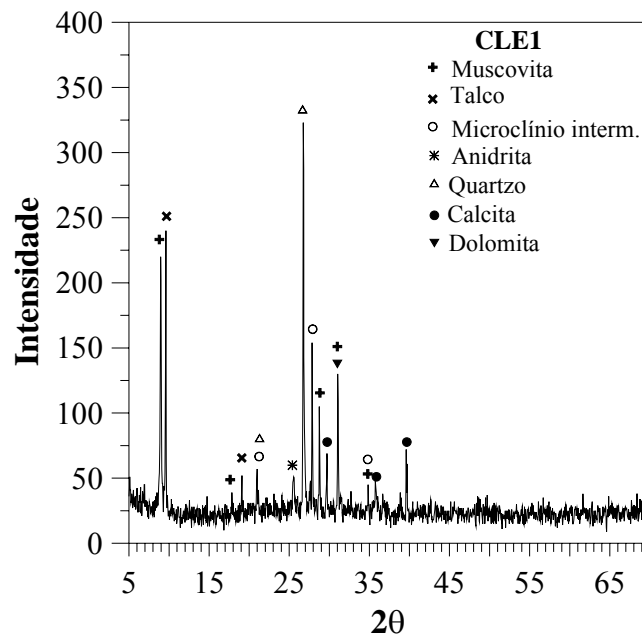
Material	Quantidade (g)		Água (g)	Consistência (mm)	Relação a/mc	IAP (%)
	Cimento	Aditivo mineral				
Cimento	312	-	157,47	225	0,50	-
CLE1	202,8	95,64	187,18	225	0,63	91
CLE2	202,8	96,0	191,7	225	0,64	97

Os resultados de IAP alcançados pelas CLE1 e CLE2 ficaram acima do limite mínimo exigido pela norma NBR 12653 (ABNT, 1992), para material pozolânico que é de 75%, indicando que as duas cinzas apresentam alguma reatividade. É importante ressaltar que para obter a mesma consistência foi necessário adicionar mais água às misturas contendo CLE1 e CLE2. Para o caso da CLE2 a relação a/mc atingiu 0,64, enquanto a referência apresentou a/mc igual a 0,50. Caso a consistência tivesse sido corrigida com superplastificante (SP), maiores valores de IAP teriam sido observados.

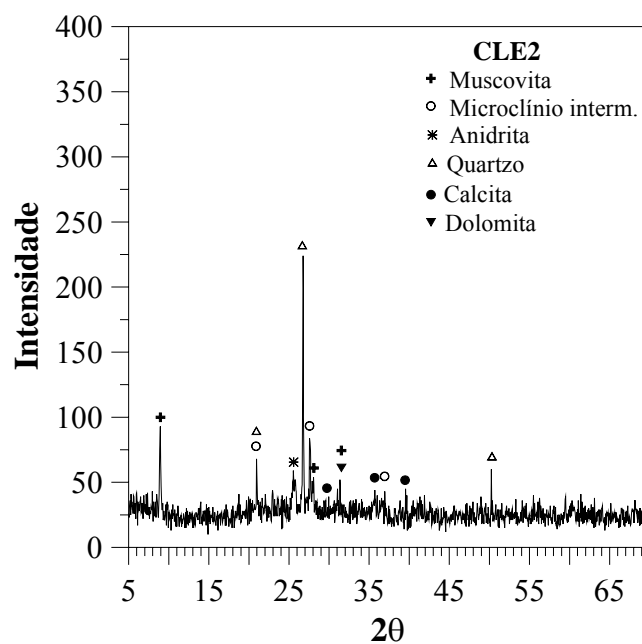
A diferença nos valores de IAP obtidos para a CLE1 e CLE2 que foram de, respectivamente, 91 e 97%, é atribuído ao fato da CLE2 possuir maior finura (ver item 4.1.5.1), além de um maior teor de amorfos (ver item 4.1.5.2), o que torna o material mais reativo quando comparado à CLE1.

4.1.5.2 CARACTERÍSTICAS MINERALÓGICAS

As difrações de raios-X das CLE1 e CLE2 encontram-se na Figura 4.14.



(a) CLE1



(b) CLE2

Figura 4.14: Difrações de raios-X: (a) CLE1 e (b) CLE2.

Analisando os difratogramas apresentados na Figura 4.14, verifica-se que a CLE1 apresenta uma maior intensidade dos picos, comparado à CLE2, o que indica uma maior cristalinidade do material. O não aparecimento do talco e a menor intensidade dos picos é um indicativo da maior amorfização da CLE2. Nota-se também que os compostos identificados nas difrações de raios X das CLE's estão de acordo com a análise química

do material (Ver Tabela 4.4). Os resultados referentes ao refinamento por Ritivield realizado nas duas cinzas indicaram um teor de amorfos de 32% para a CLE1 e 40% para a CLE2 com erro inferior a 6,0% e 5,4%, respectivamente.

4.1.5.3 CARACTERÍSTICAS AMBIENTAIS

Os resultados referentes aos ensaios de lixiviação e solubilização em amostras de CLE's estão apresentados nas Tabela 4.6 e Tabela 4.7, respectivamente.

A NBR 10004/87 foi utilizada nos ensaios ambientais realizados na CLE1 (norma vigente na época). Para os ensaios ambientais da CLE2 foi utilizada a NBR 10004 (ABNT, 2004).

Tabela 4.6: Resultados referente ao ensaio de lixiviação em amostras de CLE's

Parâmetros	Concentração (mg/L)			
	CLE1	NBR 10004 (ABNT, 1987)	CLE2	NBR 10004 (ABNT, 2004)
Fluoreto	104	150,0	< 0,1	150,0
Mercúrio	NA	0,1	< 0,00005	0,1
Prata	< 0,003	5,0	< 0,005	5,0
Arsênio	NA	5,0	< 0,01	1,0
Bário	< 0,01	100,0	0,105	70,0
Cádmio	NA	0,5	0,021	0,5
Chumbo	< 0,014	5,0	0,050	1,0
Cromo	0,02	5,0	0,029	5,0
Selênio	< 0,01	1,0	0,043	1,0
pH final	NA	-	5,17	-

ND: não detectado; NA: não avaliado.

Os resultados do ensaio de lixiviação realizados nas amostras de CLE's indicaram que os parâmetros analisados encontraram-se abaixo do limite máximo permitido por norma (NBR 10004, Anexo F). Conseqüentemente, as CLE's podem ser classificadas como resíduo não perigoso.

Analisando os resultados de solubilização realizados nas CLE1 e CLE2 e apresentados na Tabela 4.7, nota-se que as mesmas apresentaram parâmetros acima do limite máximo permitido pela NBR 10004 (Anexo G). Isto significa que quando em contato com a

água, estes metais presentes nos resíduos sólidos podem vir a solubilizar no local de disposição. A CLE1 apresentou os parâmetros de manganês e sulfato acima do limite máximo estipulado pela norma. A CLE2 além do manganês e sulfato solubilizou o selênio e o alumínio. A partir desta análise verifica-se que o manganês e o sulfato apresentaram comportamentos sistemáticos, ou seja, foram identificados tanto na CLE1, quanto na CLE2. Portanto, a possibilidade destes dois elementos fazerem parte da composição da CLE é muito maior do que a do alumínio e do selênio visto que os mesmo apareceram, somente, na CLE1. Como dito anteriormente, este tipo de comportamento é muito comum quando se analisa resíduos heterogêneos. Ou seja, existe a probabilidade destes dois elementos não aparecerem em outra amostra da mesma E.T.E., porém, coletada em outro dia.

Tabela 4.7: Resultados referentes ao ensaio de solubilização nas CLE's.

Parâmetros	Concentração (mg/L)			
	CLE1	NBR 10004 (ABNT, 1987)	CLE2	NBR 10004 (ABNT, 2004)
Mercúrio	NA	0,001	< 0,00005	0,001
Prata	< 0,03	0,05	< 0,005	0,05
Alumínio	< 0,05	0,2	2,3	0,2
Arsênio	NA	0,05	< 0,01	0,01
Bário	< 0,01	1,0	0,162	0,7
Cádmio	NA	0,005	< 0,001	0,005
Chumbo	< 0,015	0,05	< 0,01	0,01
Cobre	< 0,002	1,0	0,012	2,0
Cromo	0,02	0,05	0,026	0,05
Ferro	< 0,02	0,3	< 0,01	0,3
Manganês	0,698	0,1	0,248	0,1
Selênio	< 0,01	0,01	0,041	0,01
Sódio	7,71	200	5,6	200,0
Zinco	< 0,002	5,0	0,149	5,0
Nitrato (como N)	0,4	10	< 0,1	10,0
Cloreto	60,2	250	51,0	250,0
Sulfato	2442	400	3192	250,0
Fluoreto	< 0,1	1,5	0,6	1,5
pH final	NA	-	7,48	-

ND: não detectado; NA: não avaliado.

Mesmo assim, conforme os resultados obtidos para esta amostragem e de acordo com a NBR 10004, as amostras de CLE1 e CLE2 foram classificadas como resíduo classe II-A: não-inerte.

4.2 METACAULINITA

4.2.1 COLETA DA ARGILA CAULÍNICA

De acordo com a literatura, as argilas do grupo das caulinitas e montimorilonitas são consideradas as mais reativas (HE *et al.*, 1995; SOUZA SANTOS, 1975). HE *et al.* (1995) estudaram a influência de diversos tipos de argila e da temperatura de calcinação na resistência à compressão das argamassas. Ao final da pesquisa eles avaliaram que as argilas caulínica, independente da temperatura, e a montimorilonítica apresentaram maiores reatividades. No presente estudo optou-se por utilizar a argila caulínica que foi coletada na Jazida do Carmo localizada no Distrito de Campo Limpo em Campos dos Goytacazes, estado do Rio de Janeiro. A jazida pertence à indústria de tijolos e telhas cerâmicas AC Cerâmica Ltda., localizada em Campos dos Goytacazes (Ver Figura 4.15).



Figura 4.15: Foto de satélite da AC Cerâmica Ltda.

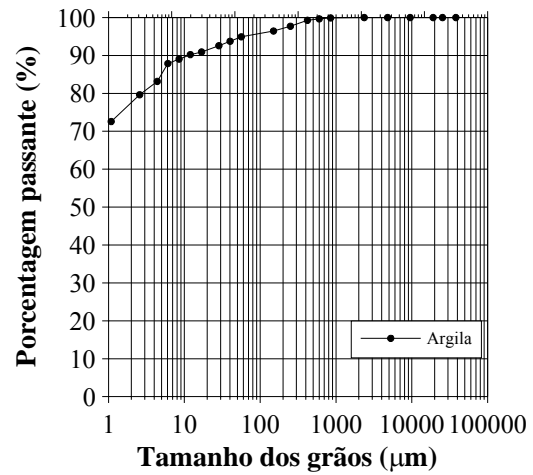
4.2.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E MINERALÓGICA

4.2.2.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS

Na Figura 4.16 e Tabela 4.8 encontram-se a curva granulométrica e as características físico-químicas da argila caulínica, respectivamente.



(a) Aspecto da argila caulinitica



(b) Curva granulométrica da argila caulinitica

Figura 4.16: Aspecto e granulometria da argila caulinitica.

Analisando-se a curva granulométrica da argila verificou-se que 72% dos seus grãos possuem diâmetros inferiores a 1μm. A composição granulométrica do material indicou um percentual de argila de 78%. Na Tabela 4.8 estão apresentadas as características físico-químicas da argila caulinitica.

Tabela 4.8: Características físico-químicas da argila.

Parâmetros	Concentração (%)
SiO ₂	51,98
Al ₂ O ₃	38,40
Fe ₂ O ₃	4,85
SO ₃	0,22
CaO	0,39
TiO ₂	1,40
K ₂ O	0,74
MgO	1,93
ZnO	0,01
Cr ₂ O ₃	0,03
MnO	0,02
CuO	0,03
Perda ao fogo (%)	23,0
Massa específica (g/cm ³)	2,62

Verifica-se que os principais compostos presentes na argila caulínica são SiO_2 e Al_2O_3 . Segundo LEA *apud* BARATA (1998) uma argila, que será transformada em pozolana, deve conter em sua composição teores de SiO_2 entre 50 e 65% e de Al_2O_3 entre 17 e 38%, sendo a reatividade do material influenciada pelo teor de Al_2O_3 . Ou seja, quanto maior o teor de alumina, maior a atividade pozolânica da metacaulinita. É importante ressaltar a presença no caulim de determinados elementos químicos que são considerados metais pesados, tal como zinco, cromo e cobre. Este fato pode estar associada dois fatores: (1) ou a algum tipo de contaminação da jazida pela ação antrópica, visto que na literatura não foi encontrada a presença de metais pesados nem na composição química do caulim puro (HE *et al.*, 1995; SALVADOR, 1995; LIMA, 2004; SIDDIQUE, 2008) nem do caulim beneficiado (resíduo proveniente da fabricação do papel) (BARATA, 1998; SOUZA, 2003) e (2) ou como impureza. De acordo com ANDREOLI *et al* (2001) estes elementos são encontrados em todos ambientes naturais (rochas, solo, etc.) em concentrações variáveis, entretanto, inferiores às consideradas nocivas à população e ao meio ambiente.

4.2.3 CARACTERÍSTICAS MINERALÓGICAS

Na Figura 4.17 encontra-se a difração de raios-X realizada na argila caulínica.

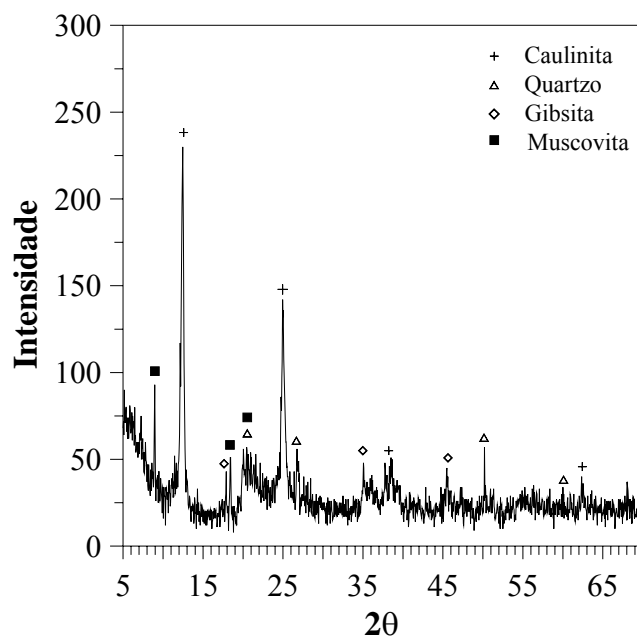


Figura 4.17: Difração de raios-X da argila "in-natura".

Analisando o difratograma verifica-se, além da presença do pico do argilomineral caulinita, a existência de picos referentes ao quartzo, gipsita e muscovita. Estes minerais, principalmente o quartzo, são normalmente encontrados neste tipo de solo.

4.2.4 PRODUÇÃO DA METACAULINITA

4.2.4.1 PROCESSO DE QUEIMA

Dados existentes na literatura técnica (HE *et al.*, 1995, SALVADOR, 1995; CORDEIRO, 2001; LIMA, 2004; SIDDIQUE, 2008) mostraram que a argila caulínica torna-se reativa quando calcinada entre 500° e 850°C sendo que as condições de temperatura, tal como tipo de forno, tempo de permanência, taxas de aquecimento e resfriamento, influenciam diretamente no comportamento reativo da metacaulinita. Sabe-se que nesta faixa de temperatura ocorre a desidroxilação da caulinita, resultando em um material amorfo, com estrutura desordenada e elevada reatividade. Segundo SCANDIUZZI e ANDRIOLO *apud* BARATA (1998) e CORDEIRO (2001), a argila caulínica estará bem calcinada quando não apresentar picos endotérmicos até a recristalização da metacaulinita, em sua análise térmica diferencial (ATD), devendo ter apenas um pico exotérmico em torno de 950°C.

CORDEIRO (2001) avaliou a reatividade da argila para diferentes temperaturas de calcinação (550° a 950°C) e verificou que o material se mostrou mais reativo quando calcinado à temperatura de 650°C. Como a argila utilizada nesta pesquisa é proveniente da mesma jazida do referido autor, e 650°C encontra-se dentro da faixa de temperatura apresentada por diversos autores (500° a 850°C), a temperatura de queima neste trabalho foi de 650°C.

A queima da argila caulínica foi realizada em um forno rotativo existente no LabEst, onde foram necessárias queimas prévias à queima final, visando o ajuste das condições de calcinação do material. Durante este processo algumas variáveis, tal como velocidade de rotação do forno, inclinação e quantidade de argila a ser colocada no equipamento, influenciaram diretamente no tempo de permanência do material dentro do forno e, conseqüentemente, na qualidade da metacaulinita.

Após a definição das condições de queima, a argila caulínica foi queimada utilizando os seguintes parâmetros: (1) temperatura de queima de 650°C, velocidade de rotação do

forno de 21rpm e inclinação do eixo do forno de 3,56°. Após duas horas de permanência nessa temperatura, o processo de alimentação do forno com o material foi iniciado. O tempo de alimentação foi de 10 segundos, a cada 3 minutos. Foi definido este intervalo de tempo com base na eficiência da queima do material. O processo de queima da argila está ilustrado na Figura 4.18.



(a) Forno rotativo



(b) Sistema de alimentação do forno



(c) Controlador da velocidade de rotação do forno



(d) Saída do material



(e) Argila caulínica



(f) Metacaulinita

Figura 4.18: Processo de queima da argila caulínica.

4.2.5 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA, MINERALÓGICA E AMBIENTAL

4.2.5.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS

Na Figura 4.19 encontra-se a curva granulométrica da MC, após processo de moagem, e na Tabela 4.9 sua caracterização físico-química.

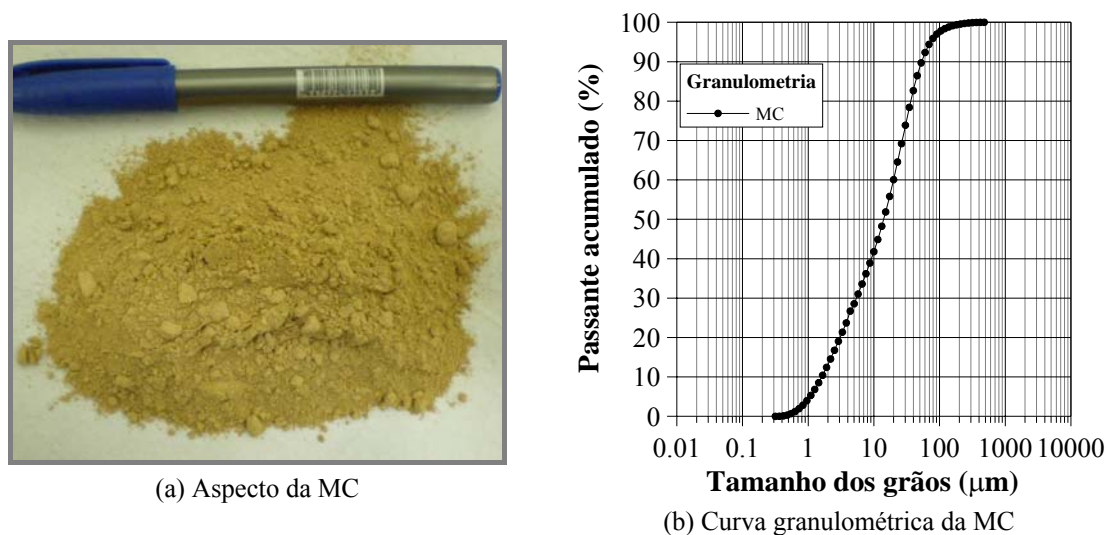


Figura 4.19: Aspecto e granulometria da MC.

Analisando a curva granulométrica da MC verificou-se que esta apresentou diâmetros de $1,1\mu\text{m}$ para d_5 , $1,6\mu\text{m}$ para d_{10} , $3,0\mu\text{m}$ para d_{20} , $5,5\mu\text{m}$ para d_{30} , $15\mu\text{m}$ para d_{50} e $52\mu\text{m}$ para d_{90} . No que diz respeito à exigência física da NBR 12653 (ABNT, 1992), a metacaulinita apresentou 86% de material com diâmetro inferior a $45\mu\text{m}$, sendo, portanto, adequada para uso como pozolana.

A análise química, perda ao fogo, massa específica, teor de álcalis disponíveis e umidade da metacaulinita estão apresentadas na Tabela 4.9.

A metacaulinita atendeu às exigências químicas da NBR 12653 (ABNT, 1992), onde o somatório de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ foi igual a 96,21%, o teor de SO_3 , umidade, perda ao fogo e álcalis disponíveis ficaram dentro do limite estipulado pela referida norma.

Com relação aos metais pesados (cromo, zinco e cobre), verificou-se que mesmo após processo de queima, estes permaneceram no material, com as mesmas concentrações. Embora esses metais estejam em concentrações baixas comparado aos outros óxidos,

ensaios ambientais de lixiviação e solubilização foram realizados na metacaulinita visando avaliar o seu grau de desprendimento.

Tabela 4.9: Características físico-químicas da metacaulinita.

Parâmetros	Concentração (%)		
	Argila caulinitica	MC	NBR 12653
SiO ₂	51,98	53,64	SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ > 70,0%
Al ₂ O ₃	38,40	38,11	
Fe ₂ O ₃	4,85	4,46	
SO ₃	0,22	0,17	< 4,0%
CaO	0,39	0,46	
TiO ₂	1,40	1,24	
K ₂ O	0,74	0,70	
MgO	1,93	1,11	
ZnO	0,01	0,01	
Cr ₂ O ₃	0,03	0,03	
MnO	0,02	0,02	
CuO	0,03	0,03	
Perda ao fogo (%)	23,0	4,2	< 10,0%
Teor de umidade (%)	-	1,6	< 3,0%
Álcalis disponíveis (%)	0,49	0,46	< 1,5
Massa específica (g/cm ³)	2,70	2,62	

ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA

Na Tabela 4.10 encontra-se o resultado referente ao IAP da metacaulinita e a quantidade de cimento e aditivo mineral utilizado na produção das argamassas de referência e com metacaulinita.

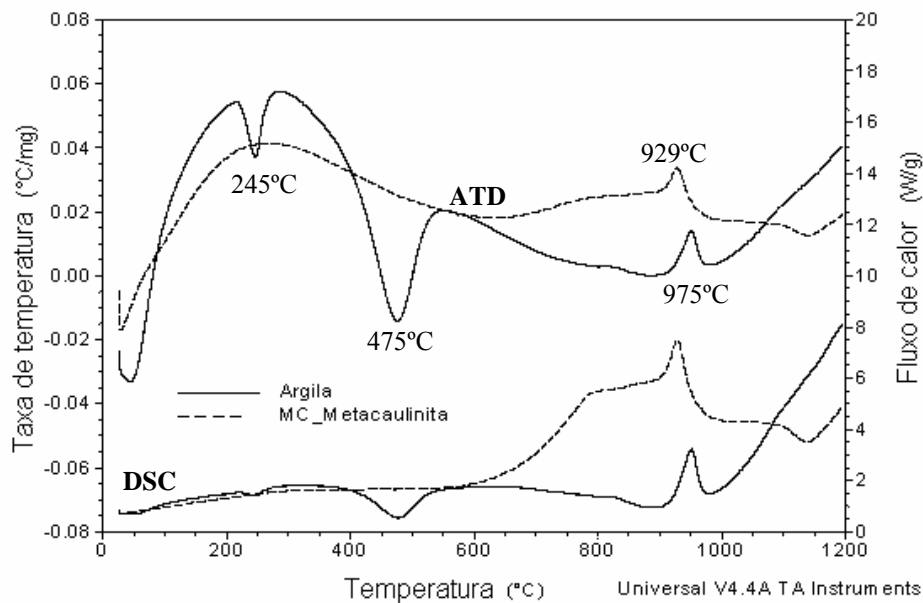
Tabela 4.10: Resultado referente ao índice de atividade pozolânica da MC.

Material	Quantidade (g)		Água (g)	Consistência (mm)	Relação a/mc	IAP (%)
	Cimento	Aditivo mineral				
Cimento	312	-	157,47	225	0,50	-
Metacaulinita	202,8	93,43	189,61	225	0,64	117

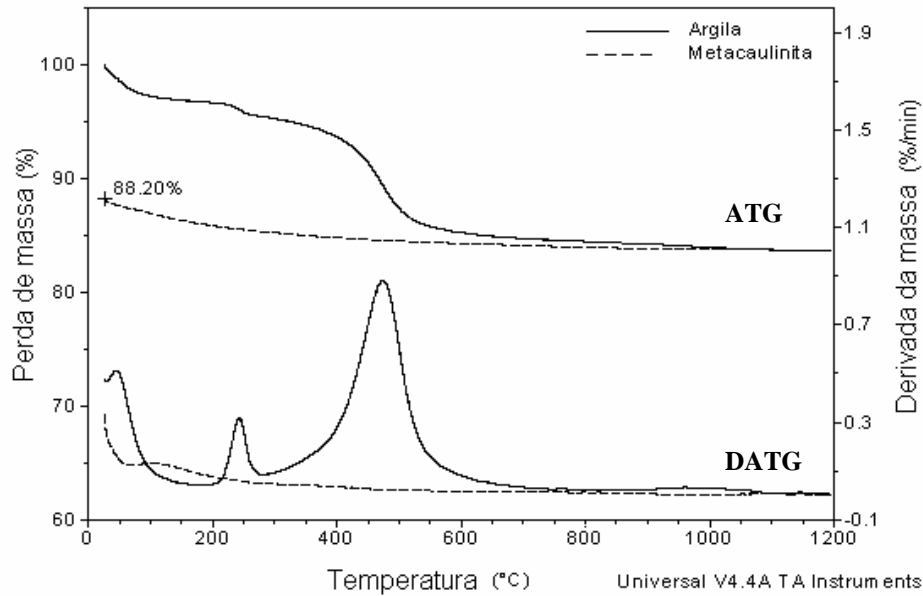
Verifica-se através dos resultados apresentados acima que mesmo a relação a/mc não sendo constante entre as misturas, a metacaulinita obteve um IAP bem superior ao mínimo exigido pela NBR 12653 (ABNT, 1992) para material pozolânico (mínimo de 75%), indicando a elevada reatividade do material. É importante ressaltar que para obter a consistência de $225\text{mm} \pm 5\text{mm}$ foi necessário adicionar mais água à mistura contendo MC. Isto fez com que a relação a/mc fosse para 0,64, enquanto a referência apresentou a/mc igual a 0,50. Caso a consistência tivesse sido corrigida com SP, maior valor de IAP teria sido observado para a MC.

ANÁLISE TÉRMICA DIFERENCIAL E TERMOGRAVIMÉTRICA

Na Figura 4.20 estão apresentadas as curvas de análise térmica diferencial (ATD) e termogravimétrica (ATG) com calorimetria diferencial de varredura (DSC) da argila caulínica e metacaulinita.



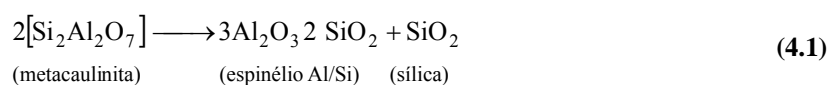
(a) Análise térmica diferencial com DSC.

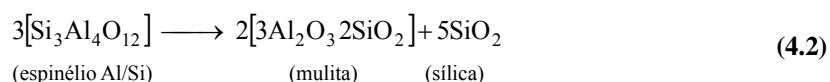


(b) Análise termogravimétrica

Figura 4.20: Curvas de análise térmica diferencial e termogravimétrica com DSC.

A ATD apresentada na Figura 4.20(a) mostra o comportamento da argila caulinitica e metacaulinita com a temperatura. A argila apresenta picos endotérmicos em 245°C e 475°C, sendo estes referentes à perda de água da gibsita e desidroxilação da caulinita (formação da metacaulinita), respectivamente. Este último pico serve para caracterizar, segundo CORDEIRO (2001), a temperatura mínima para o desarranjo cristalino da caulinita. O pico exotérmico em 975°C se refere à recristalização da argila a partir da metacaulinita. Pode-se dizer que a faixa de temperatura para transformar a argila caulinitica em aditivo mineral está compreendida entre 500°C e 950°C. A metacaulinita não apresentou picos endotérmicos, apenas um pico exotérmico a 929°C indicando que o material foi bem calcinado. A presença de um pico endotérmico entre 1100°C e 1150°C pode ser atribuída ao início da decomposição da metacaulinita em espinélio Al/Si, que seria a fase cristalina da mulita, de acordo com as equações abaixo (SOUZA SANTOS *apud* CORDEIRO, 2001).





Durante as reações endotérmicas ocorre a liberação de calor. Verifica-se uma redução no fluxo de calor inferior a 0,5W/g e 1,0W/g para os picos situados entre 200°C e 500°C. Em torno de 950°C há um aumento desse fluxo de 1,0W/g para 3,0W/g, em função da reação exotérmica. A partir desta temperatura houve um ganho expressivo no fluxo de calor.

A Figura 4.20(b) mostra a ATG realizada na argila caulínica e metacaulinita. Para esta análise, as amostras foram secas em estufa a $38 \pm 1^\circ\text{C}$ para retirar a umidade do material. Verifica-se que a perda de massa da argila foi em torno de 16%, sendo a maior perda referente à desidroxilação da caulinita (em torno de 9%). A argila caulínica apresentou uma perda ao fogo de 23%, conforme mostrado na Tabela 4.9. Esta diferença no percentual de perda de massa pode ser atribuída ao elevado grau de absorção de umidade das argilas (HE *et al.*, 1995). Para a metacaulinita verificou-se que a perda de massa foi de 4,2%, coincidindo com o valor de perda ao fogo do referido material.

4.2.5.2 CARACTERÍSTICAS MINERALÓGICAS

Na Figura 4.21 encontra-se a difração de raios-X da metacaulinita.

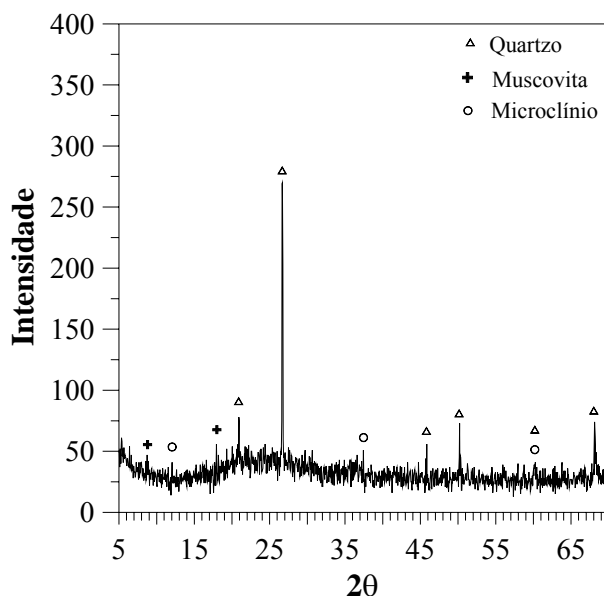


Figura 4.21: Difração de raios-X da metacaulinita.

Verifica-se que, após processo de queima, o material apresentou comportamento amorfo, apresentando apenas os picos referentes ao quartzo e à muscovita, que permanecem no material após processo de queima. O refinamento por Ritivield realizado na metacaulinita indicou um teor de amorfos de 78%, com erro inferior a 5,95%.

4.2.5.3 CARACTERÍSTICAS AMBIENTAIS

Por ser considerada uma pozolana natural, a MC não precisa ser classificada ambientalmente. Porém, como forma de avaliar a contribuição de cada material na avaliação ambiental da blenda, visto que a mesma foi produzida com MC e CLE2, tornou-se necessário realizar ensaios de solubilização e lixiviação na MC.

Nas Tabela 4.10 e Tabela 4.11 estão apresentados os resultados referentes aos ensaios de lixiviação e solubilização, porém a MC não será classificada conforme a NBR 10004 (ABNT, 2004). Através dos resultados obtidos verifica-se que o alumínio, ferro e cromo podem vir a contribuir na solubilização da blenda.

Tabela 4.11: Resultados referentes ao ensaio de lixiviação na metacaulinita.

Parâmetros	Concentração (mg/L)	
	MC	NBR 10004 (ABNT, 2004)
Fluoreto	0,8	150,0
Mercúrio	< 0,00005	0,1
Prata	< 0,005	5,0
Arsênio	< 0,01	5,0
Bário	1,0	100,0
Cádmio	< 0,001	0,5
Chumbo	< 0,01	5,0
Cromo	0,073	5,0
Selênio	0,011	1,0
pH final	5,06	-

Tabela 4.12: Resultados referentes ao ensaio de solubilização na metacaulinita.

Parâmetros	Concentração (mg/L)	
	MC	NBR 10004 (ABNT, 2004)
Mercúrio	< 0,00005	0,001
Prata	< 0,005	0,05
Alumínio	4,9	0,2
Arsênio	< 0,01	0,05
Bário	0,060	1,0
Cádmio	< 0,001	0,005
Chumbo	< 0,01	0,05
Cobre	0,011	1,0
Cromo	0,159	0,05
Ferro	1,6	0,3
Manganês	0,043	0,1
Selênio	< 0,008	0,01
Sódio	11,2	200
Zinco	0,049	5,0
Nitrato (como N)	< 0,2	10
Cloreto	12,3	250
Sulfato	142	400
Fluoreto	< 0,2	1,5
pH final	7,18	-

4.3 BLENDAS

4.3.1 PRODUÇÃO

A blenda é um material produzido em laboratório através da queima conjunta de 50% de CLE2 pré-queimada e de 50% de argila caulínica. Com o propósito de conferir à CLE2 uma maior reatividade, procurou-se juntar a esta, um material que possuísse elevada atividade pozolânica. No presente estudo optou-se por utilizar a argila caulínica, porque é um material muito reativo após ativação térmica, como visto anteriormente. A definição da temperatura de queima da blenda foi feita com base no comportamento de queima dos dois materiais. Conforme descrito nos itens 4.1 e 4.2, a CLE2 e a argila caulínica foram queimadas, respectivamente, a 550°C e 650°C. Como a metacaulinita apresentou alta reatividade nessa temperatura e a CLE apresentou a mesma emissão de poluentes quando calcinada nesta temperatura, definiu-se pela temperatura de 650°C para queimar a blenda.

4.3.2 PROCESSO DE QUEIMA

O processo de queima controlada da blenda foi realizado em uma mufla, utilizando a mesma taxa de aquecimento (TA) e tempo de residência (TR) utilizados para a CLE1, CLE2 e MC (TA = 10°C/min, e TR = 3 horas). Sabe-se que ambos os materiais perderão massa durante o processo de queima. Para manter o percentual de 50% de metacaulinita e 50% de CLE2, após processo de queima, fez-se uma média da perda de massa de cada material durante processo de queima realizado previamente. Essa perda foi acrescida na massa de cada material, antes de iniciar a queima conjunta.

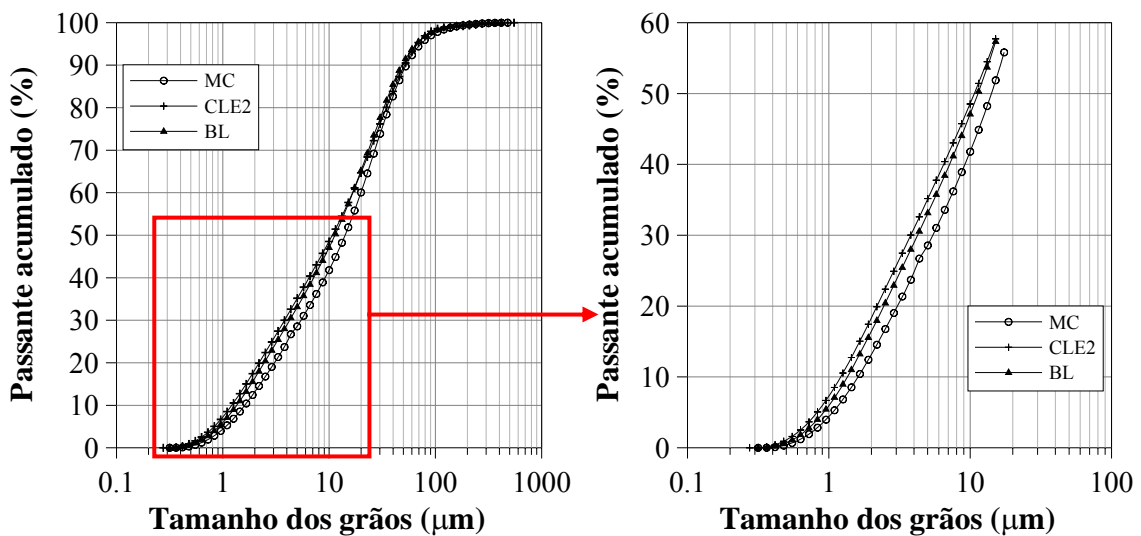
4.3.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA, MINERALÓGICA E AMBIENTAL

4.3.3.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS

Na Figura 4.22 estão apresentados o aspecto da blenda, após queima e moagem, e a curva granulométrica do material.



(a) Aspecto da BL



(b) Curvas granulométricas da MC, CLE2 e BL

(c) Ampliação das curvas granulométricas da MC, CLE2 e BL para o tamanho < 20µm

Figura 4.22: Aspecto da BL e granulometria da MC, CLE2 e BL.

Analisando a constituição granulométrica da curva, verificou-se que a BL, após processo de moagem, apresentou diâmetros de 0,9µm para d_5 , 1,3µm para d_{10} , 2,5µm para d_{20} , 4,1µm para d_{30} , 11µm para d_{50} e 52µm para d_{90} . Comparando a granulometria da BL com a CLE2 e MC verifica-se que não existem variações tão expressivas entre

estes aditivos. Quanto à finura exigida pela NBR 12653 (ABNT, 1999), a BL apresentou em torno de 89% de material com diâmetro inferior a 45µm, podendo, portanto, ser utilizada como pozolana.

Na Tabela 4.13 estão apresentadas as caracterizações físico-químicas das CLE2, MC e BL, visando comparar a composição entre estes aditivos minerais.

Tabela 4.13: Características físico-químicas da CLE2, MC e BL.

Parâmetros	Concentração (%)			
	CLE2	MC	BL	NBR 12653 (ABNT, 1992)
SiO ₂	45,68	53,64	49,85	SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ > 70,0%
Al ₂ O ₃	20,16	38,11	29,56	
Fe ₂ O ₃	8,69	4,46	7,16	
SO ₃	7,99	0,17	3,71	< 4,0%
CaO	7,50	0,46	3,63	
TiO ₂	1,19	1,24	1,36	
K ₂ O	2,20	0,70	1,42	
MgO	2,33	1,11	1,45	
P ₂ O ₅	3,02	ND	1,34	
BaO	0,43	ND	ND	
ZnO	0,43	0,01	0,26	
Cr ₂ O ₃	0,05	0,03	0,04	
MnO	0,08	0,02	0,04	
CuO	0,11	0,03	0,07	
PbO	0,06	ND	0,03	
ZrO ₂	0,02	ND	0,03	
NiO	0,03	ND	0,02	
SrO	0,02	ND	0,01	
Perda ao fogo (%)	7,6	4,2	6,9	< 10,0
Teor de umidade (%)	1,5	1,6	1,6	< 3,0
Álcalis disponíveis (%)	1,45	0,46	0,93	< 1,5
Massa específica (g/cm ³)	2,69	2,62	2,62	-

ND: não detectado.

Analisando os resultados, nota-se que a BL assumiu características químicas inerentes aos dois materiais (CLE2 e MC). Além disso, os parâmetros mostram que a

concentração de óxidos da BL ficou, na maioria das vezes, entre a faixa de valores apresentadas pela CLE2 e MC. Com relação aos metais pesados já era esperada a presença destes na composição da BL, visto que tanto a CLE2 quanto a MC possuem estes elementos em sua composição.

As exigências químicas da NBR 12653 (ABNT, 1992) foram atendidas pela BL, sendo o somatório de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ igual a 86,6% e os teores de álcalis disponíveis, umidade, SO_3 e perda ao fogo inferiores ao máximo permitido, podendo o material ser utilizado como pozolana.

ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA

Na Tabela 4.14 encontra-se a quantidade de cimento e aditivo mineral utilizado na produção das argamassas, bem como os valores de IAP obtidos para as misturas com CLE2, MC e BL.

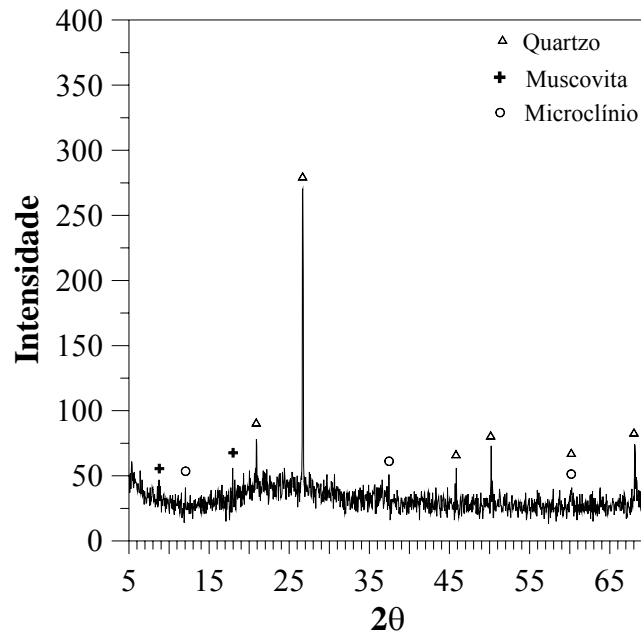
Tabela 4.14: Resultados referentes aos índices de atividade pozolânica das CLE2, MC e BL.

Material	Quantidade (g)		Água (g)	Consistência (mm)	Relação a/mc	IAP (%)
	Cimento	Aditivo mineral				
Cimento	312	-	157,47	225	0,50	-
CLE2	202,8	96,0	191,7	225	0,64	97
MC	202,8	93,43	189,61	225	0,64	117
BL	202,8	93,50	192,58	225	0,65	115

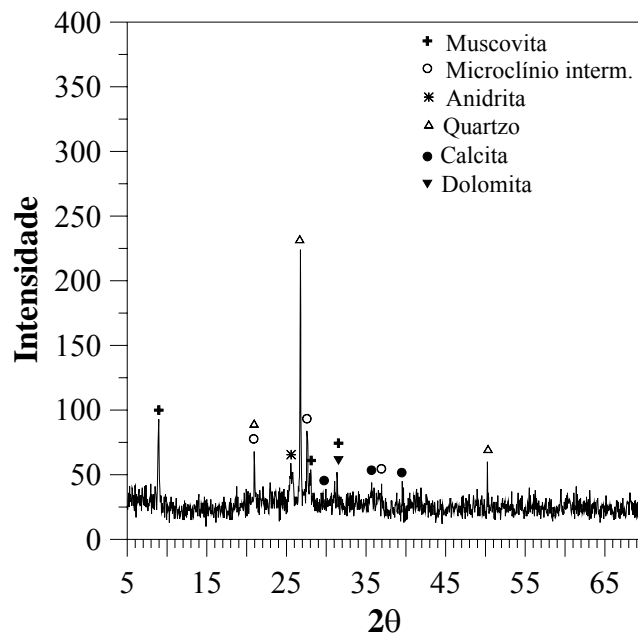
Os resultados obtidos para o IAP indicam que a BL apresentou comportamento bem superior ao mínimo exigido pela NBR 12653 (ABNT, 1992) para material pozolânico (> 75%). Verifica-se também que a diferença entre o índice da MC e BL é inferior a 2%, sendo estas consideradas significativamente iguais. Pode-se dizer, portanto, que a idéia de conferir à CLE2 uma maior reatividade através da inclusão de um material de alta reatividade, como a MC, transformando-os em uma blenda foi bem sucedida. Pois o IAP da CLE2 que já era de 97%, com a presença da MC passou a ser de 115%, havendo um acréscimo de 19%. Isto pode ser atribuído ao benefício físico-químico proporcionado pelos dois materiais (finura e atividade pozolânica) que intensificou a reatividade da BL para o mesmo nível da MC.

4.3.3.2 CARACTERÍSTICAS MINERALÓGICAS

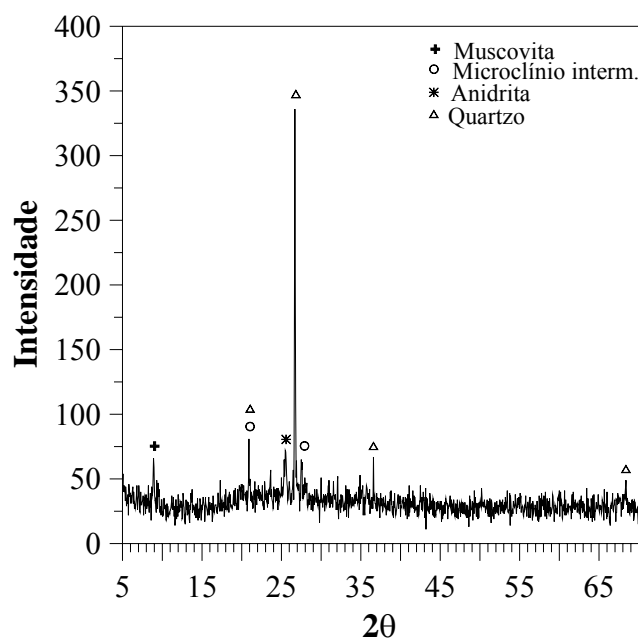
Para efeito de comparação, na Figura 4.23 encontram-se as difrações de raios-X da MC, BL e CLE2.



(a) MC



(b) CLE2



(c) BL

Figura 4.23: Difração de raios-X da CLE2, MC e BL.

Através dos difratogramas apresentados na Figura 4.23, verifica-se que a BL apresenta os mesmos compostos que a MC e a CLE2, conforme análise química, porém com intensidades de pico diferentes. Através do refinamento de Rietveld verificou-se um teor de amorfos de 61% para a BL, com erro inferior a 5,9%. A CLE2 e a MC apresentaram teores de amorfos de, respectivamente, 40% e 78%. Nota-se que a BL apresentou um valor médio entre estes dois aditivos, que já era esperado, visto que a BL é composta de 50% de CLE2 e 50% de MC. Pode-se dizer também que o valor de 61% para o teor de amorfos confirma a questão do efeito físico-químico do IAP da BL, sendo, neste caso, o efeito físico preponderante sobre o químico.

Não foi verificada a formação de nenhuma nova fase na composição da blenda devido à queima conjunta da CLE2 e MC.

4.3.3.3 CARACTERÍSTICAS AMBIENTAIS

Pelo fato da BL ter sido produzida com um material que é considerado um resíduo (CLE2), fez-se necessário a realização de ensaios ambientais no referido material.

Nas Tabela 4.15 e 4.16 encontram-se, respectivamente, os resultados referentes aos ensaios de lixiviação e solubilização realizados na BL. Para efeito comparativo apresentam-se também os resultados da CLE2 e MC para os referidos ensaios.

Tabela 4.15: Resultados referentes ao ensaio de lixiviação na MC, CLE2 e BL.

Parâmetros	Concentração (mg/L)			
	CLE2	MC	BL	NBR 10004 (ABNT, 2004)
Fluoreto	< 0,1	0,8	5,1	150,0
Mercúrio	< 0,00005	< 0,00005	< 0,00005	0,1
Prata	< 0,005	< 0,005	< 0,005	5,0
Arsênio	< 0,01	< 0,01	< 0,01	5,0
Bário	0,105	1,0	0,059	100,0
Cádmio	0,021	< 0,001	0,005	0,5
Chumbo	0,050	< 0,01	< 0,01	5,0
Cromo	0,029	0,073	0,046	5,0
Selênio	0,043	0,011	0,038	1,0
pH final	5,17	5,06	5,08	-

Analisando os resultados de lixiviação obtidos para a BL verifica-se que, com exceção do fluoreto, todos os parâmetros apresentaram valores situados entre a CLE2 e MC. Apesar do fluoreto não refletir este comportamento, os índices obtidos ficaram abaixo no limite máximo permitido pela NBR 10004 (ABNT, 2004). Portanto, a BL pode ser classificada como um resíduo não perigoso.

Com relação aos resultados de solubilização observa-se que os parâmetros alumínio, cromo, ferro, manganês, selênio e sulfato apresentaram valores acima do máximo permitido pela NBR 10004 (ABNT, 2004).

A partir dos ensaios ambientais, a BL foi classificada como resíduo classe II-A: não-inerte.

Tabela 4.16: Resultados referente ao ensaio de solubilização na BL

Parâmetros	Concentração (mg/L)			
	CLE2	MC	BL	NBR 10004 (ABNT, 2004)
Mercúrio	< 0,00005	< 0,00005	< 0,00005	0,001
Prata	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,05
Alumínio	2,3	4,9	1,8	0,2
Arsênio	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,05
Bário	0,162	0,060	0,090	1,0
Cádmio	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,005
Chumbo	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,05
Cobre	0,012	0,011	< 0,005	1,0
Cromo	0,026	0,159	0,903	0,05
Ferro	< 0,01	1,6	0,660	0,3
Manganês	0,248	0,043	0,150	0,1
Selênio	0,041	< 0,008	0,093	0,01
Sódio	5,6	11,2	7,2	200
Zinco	0,149	0,049	0,079	5,0
Nitrato (como N)	< 0,1	< 0,2	< 0,1	10
Cloreto	51,0	12,3	24,0	250
Sulfato	3192	142	2893	400
Fluoreto	0,6	< 0,2	0,3	1,5
pH final	7,48	7,18	8,22	-

4.4 CINZA VOLANTE DO RESÍDUO SÓLIDO URBANO

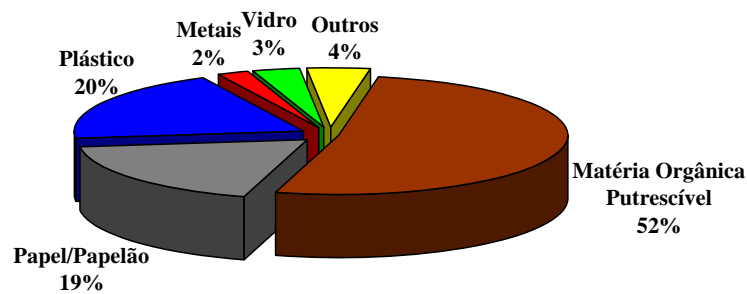
4.4.1 PRODUÇÃO

A UsinaVerde é uma empresa de capital privado situada na cidade universitária da UFRJ - Ilha do Fundão, e tem como objetivo apresentar soluções ambientais para a destinação final dos resíduos sólidos urbanos, resíduos dos serviços de saúde e alguns tipos de resíduos industriais através do processo de incineração com co-geração de energia (ver Figura 4.24). Atualmente, a UsinaVerde vem tratando o Resíduo Sólido Urbano (RSU), onde procura através do processo de incineração, propiciar o aproveitamento racional do lixo, convertendo-o, se possível, em insumos.

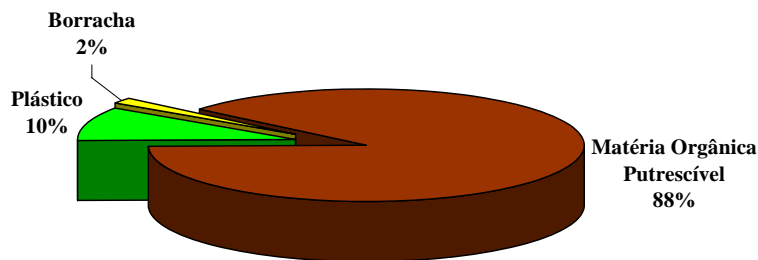


Figura 4.24 UsinaVerde S/A.

O RSU utilizado na UsinaVerde vem da Companhia Municipal de Limpeza Urbana do Rio de Janeiro (COMLURB), após processo de reciclagem. Todavia, ao chegar à usina, passa por nova triagem. A composição do RSU após processo de reciclagem da COMLURB e da UsinaVerde encontra-se na Figura 4.25.



(a) COMLURB



(b) UsinaVerde

Figura 4.25: Composição do RSU.

4.4.1.1 PROCESSO DE INCINERAÇÃO

O RSU após a etapa de pesagem passa por processo de triagem, como dito anteriormente, onde os materiais recicláveis são segregados manualmente, e com o auxílio de detectores de metais localizados nas duas esteiras por onde os resíduos são conduzidos. Após a segunda esteira, o RSU é triturado e o material fino separado com o auxílio de peneira rotativa e encaminhado para secagem, visando a redução do teor de umidade. Em seguida, o RSU triturado passa por nova moagem, em moinho de facas, e é depositado em um silo Combustível Derivado do Resíduo (CRD). Estes resíduos (matéria orgânica e resíduos combustíveis não recicláveis) são encaminhados para o forno de incineração que opera a uma temperatura de 950°C. Durante o processo de combustão, são produzidas duas cinzas: cinza de fundo e cinza volante. A cinza de fundo é depositada no fundo da câmara de pós-combustão, encaminhada ao tanque de decantação e disposta em caçambas; os gases quentes e a cinza volante (fly-ash) são exauridos da câmara de pós-combustão e aspirados para a caldeira de recuperação onde

ocorre o aproveitamento energético (co-geração de energia). Há uma geração efetiva de 0,6MW de energia elétrica por tonelada de lixo tratado. Posteriormente, os gases são neutralizados em um conjunto de lavadores e, em seguida, os gases limpos são aspirados e descarregados na atmosfera. A solução de lavagem é recolhida nos tanques de decantação onde ocorre a neutralização com as cinzas do próprio processo e hidróxido de cálcio, o que ocasiona a mineralização (decantação dos sais), sendo esta solução posteriormente reaproveitada no processo de lavagem (recirculação). Em seguida, a cinza volante é encaminhada para os tanques de decantação onde periodicamente é retirada e armazenada em caçambas. Ao final do processo de incineração são obtidos de 8 a 10%, em volume, das duas cinzas, que representam cerca de 80% de cinza pesada e 20% de cinza volante (dados fornecidos pela USINAVERDE S/A). Atualmente, a cinza de fundo está sendo testada, em substituição à areia, na fabricação de tijolos e pisos. Anteriormente, ambas as cinzas eram encaminhadas ao aterro sanitário de Gramacho. Na Figura 4.26 encontram-se as etapas do processo de incineração.

No presente estudo optou-se por estudar a cinza volante por esta fazer parte do sistema de lavagem dos gases e, provavelmente, conter em sua composição uma maior concentração de metais pesados. Além disso, esta cinza possui granulometria inferior à da cinza de fundo, o que propicia uma redução do gasto energético com a moagem do material.



(a) Pesagem do RSU



(b) Processo de triagem



(c) Câmara de pós combustão



(d) Sistema de lavagem dos gases



(e) Cinza de fundo



(f) cinza volante (CVRSU)

Figura 4.26: Etapas do processo de incineração do RSU.

4.4.1.2 COLETA E SECAGEM

A coleta da CVRSU ocorreu no dia 23 de março de 2006. Foram coletados cerca de 500 kg de material úmido e o mesmo foi acondicionado em sacos plásticos com capacidade de 50 kg e, em seguida, armazenado em bombonas.

A secagem do material foi realizada em duas etapas. A primeira etapa consistiu na secagem do material ao ar com o objetivo de retirar o excesso de umidade. Na etapa seguinte, o material foi colocado em bandejas, pesado, e seco em estufa a uma temperatura de aproximadamente $110^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ até constância de massa. Ao final do processo de secagem, o material foi novamente armazenado em bombonas.

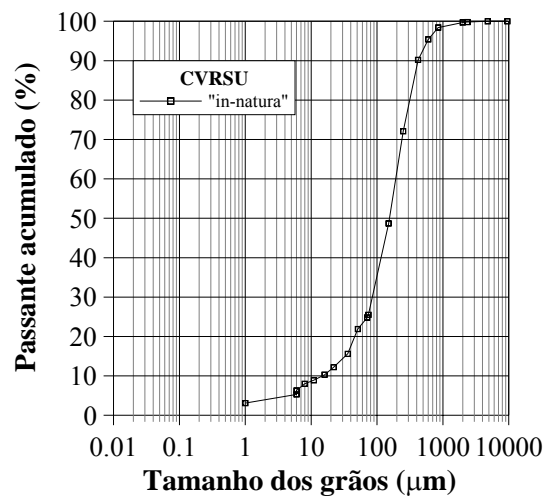
4.4.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E MINERALÓGICA

4.4.2.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS

Na Figura 4.27 encontra-se a curva granulométrica da CVRSU “in-natura” e o aspecto da cinza após processo de secagem.



(a) Aspecto da CVRSu “in-natura”



(b) Curva granulométrica da CVRSU “in-natura”

Figura 4.27: Aspecto e granulometria da CVRSU “in-natura”.

Verifica-se que a curva granulométrica da CVRSU “in-natura” não atende ao requisito físico exigido pela NBR 12653 (ABNT, 1992) para material pozolânico, onde a quantidade de material passante acumulado deve ser superior a 66%. Por isso, tornou-se necessário moer o material para que o mesmo possua finura adequada, visto que esta

característica influencia diretamente no comportamento do aditivo mineral quanto à sua reatividade e efeito de nucleador junto às partículas de cimento. Os diâmetros correspondentes ao d_{90} , d_{50} e d_{10} são, respectivamente, $d_{90} = 400\mu\text{m}$, $d_{50} = 106\mu\text{m}$ e $d_{10} = 15\mu\text{m}$.

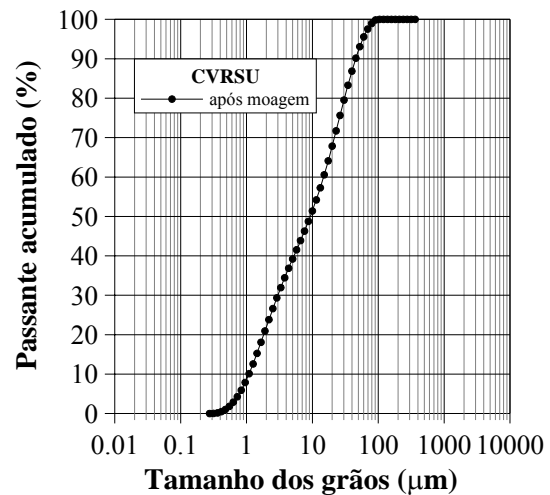


Figura 4.28: Aspecto e granulometria da CVRSU após moagem.

Analisando a curva granulométrica da CVRSU após processo de moagem (Ver Figura 4.28), verificou-se que 90% dos seus grãos apresentaram diâmetro inferior a $45\mu\text{m}$. Isto significou que o tempo de moagem de 2 horas foi suficiente para que a cinza atendesse a exigência física da NBR 12653 (ABNT, 1999) com relação à quantidade de material retido na peneira $45\mu\text{m}$ (máximo de 34%). Os diâmetros correspondentes ao d_{90} , d_{50} , d_{30} , d_{20} , d_{10} e d_5 são, respectivamente, $45\mu\text{m}$, $9,5\mu\text{m}$, $3,0\mu\text{m}$, $1,9\mu\text{m}$, $1,1\mu\text{m}$ e $0,8\mu\text{m}$.

Na Tabela 4.17 encontram-se os resultados da análise química da CVRSU.

Tabela 4.17: Características química da CVRSU

Parâmetros	Concentração (%)
SiO ₂	44,26
Al ₂ O ₃	18,16
Fe ₂ O ₃	9,27
SO ₃	0,64
CaO	15,39
P ₂ O ₅	2,94
TiO ₂	3,52
K ₂ O	2,61
MgO	2,23
ZnO	0,46
Cr ₂ O ₃	0,16
MnO	0,13
PbO	0,11
CuO	0,06
ZrO ₂	0,04
SrO	0,04
Ni	0,003

Os principais óxidos encontrados na CVRSU, em ordem de concentração, foram SiO₂, Al₂O₃, CaO e Fe₂O₃. Essa constituição principal é a mesma apresentada pela cinza volante originada do processo de queima do carvão em usinas termoeletricas, com exceção dos metais pesados. Segundo HUANG & CHU (2003) sem cloretos e poluentes, esta cinza é similar à cinza volante do carvão e, portanto, tem atividade pozolânica. Com relação à NBR 12653 (ABNT 1992) para material pozolânico, o somatório de SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ é igual a 71,7%, sendo maior que o mínimo exigido que é de 70%.

Verificou-se, também, a presença de metais pesados tal como zinco, cromo, manganês e chumbo em sua composição. Isto significa que se a cinza for disposta de maneira inadequada, esses metais podem vir a lixiviar ou solubilizar para o meio ambiente podendo vir a contaminá-lo. A presença destes metais também foi encontrada por vários autores (GAO *et al.*, 2008; AUBERT *et al.*, 2006, RÉMOND *et al.*, 2002). Assim, uma

grande preocupação dos pesquisadores é encontrar uma forma adequada e segura de aproveitamento deste resíduo devido à presença dos metais pesados em sua composição.

Embora diversos autores (AUBERT *et al.*, 2006; BERTOLINI *et al.*, 2004; RÉMOND *et al.*, 2002; MULDER, 1996) caracterizem a CVRSU pelo elevada concentração de cloretos e sulfatos, verifica-se que a CVRSU do presente estudo não apresentou elevados teores desses elementos em sua composição. Este fato ocorreu devido à neutralização das cinzas com a solução de lavagem (hidróxido de sódio) ocasionando a solubilização e decantação dos sais. Para avaliar este comportamento, na Tabela 4.18 encontra-se a análise química da CVRSU antes de ser neutralizada com a solução de lavagem, ou seja, esta cinza é proveniente da caldeira de recuperação.

Tabela 4.18 Análise química da CVRSU da caldeira.

Parâmetros	Concentração (%)
SiO ₂	13,54
Al ₂ O ₃	14,46
Fe ₂ O ₃	3,47
SO ₃	11,51
CaO	38,77
P ₂ O ₅	1,68
TiO ₂	4,41
K ₂ O	2,86
ZnO	0,61
Cr ₂ O ₃	0,15
MnO	0,13
PbO	0,10
CuO	0,09
ZrO ₂	0,06
SrO	0,12
Cl	8,03

Analisando os resultados obtidos pode-se afirmar que a solução de lavagem carrou os óxidos solúveis (CaO, Cl, SO₃) e, com isso, além de aumentar a concentração dos outros componentes na CVRSU após neutralização, o Cl não foi detectado e o CaO e SO₃ reduziram expressivamente.

4.4.2.2 CARACTERÍSTICAS MINERALÓGICAS

Na Figura 4.29 encontra-se a difração de raios-X realizada na CVRSU.

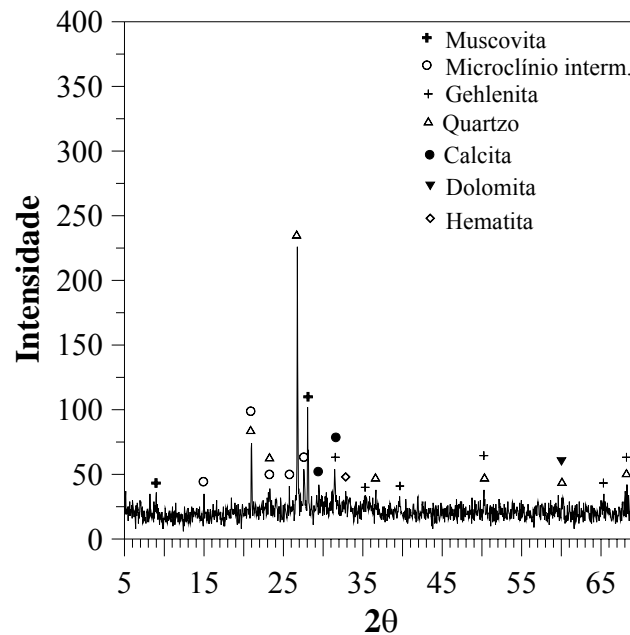


Figura 4.29: Difração de raios-X da CVRSU.

A CVRSU apresentou picos agudos bem definidos, e os principais compostos encontrados em sua composição foram quartzo, gehlenita, calcita e microclínio.

4.4.2.3 ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA

O índice de atividade pozolânica (IAP) da CVRSU foi realizado conforme descrito no item 4.1.4.2. Porém, o processo de desmoldagem só pode ser realizado 2 dias após a moldagem em virtude das misturas não estarem totalmente endurecidas. Nesta etapa foi observada a presença de fissuras e muitos vazios nos corpos-de-prova (Ver Figura 4.30). Após 28 dias de cura, durante o ensaio de resistência à compressão, verificou-se que a argamassa com CVRSU apresentou redução na carga de ruptura de 72% em relação à argamassa de referência. Este comportamento pode estar associado ao fato das argamassas terem apresentado uma estrutura interna muito porosa, ocasionada pelo aprisionamento do gás hidrogênio dentro da mistura fresca.

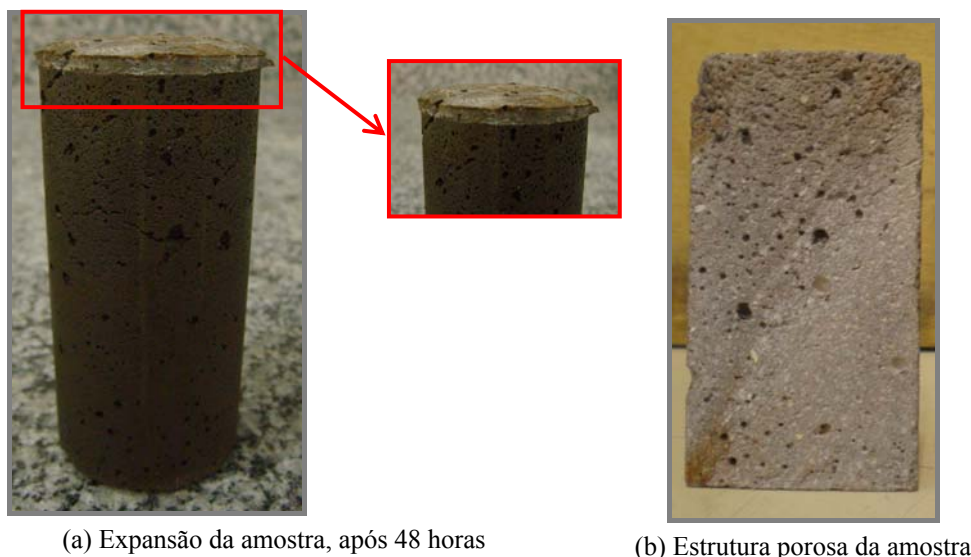
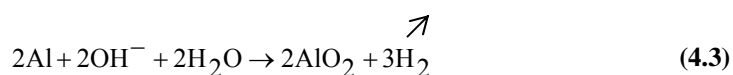


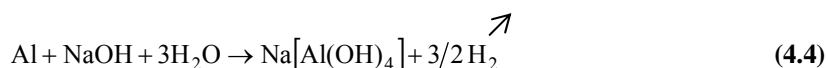
Figura 4.30: Amostras com CVRSU: (a) expansão da amostra e (b) estrutura porosa da amostra.

BERTOLINI *et al.* (2004) explicaram que este fenômeno ocorre porque o alumínio metálico presente nas cinzas reage em ambientes alcalinos, que é o caso das matrizes cimentícias, produzindo gás hidrogênio. Normalmente, após moldagem esse gás fica aprisionado na mistura, produzindo uma rede de bolhas conectadas, que contribui para o aumento da permeabilidade e conseqüente redução da resistência à compressão.

Em ambientes alcalinos (pH elevado), o alumínio metálico é dissolvido formando o gás hidrogênio, conforme a Equação 4.3:



O uso da CVRSU em matrizes cimentícias, onde o ambiente é alcalino, propiciou a reação do alumínio metálico com os íons OH^- , gerando o gás hidrogênio (Ver Equação 4.4). Esse gás ficou aprisionado no interior da matriz cimentícia formando “bolhas” que, provavelmente, foram as responsáveis pela expansão e elevada porosidade e redução da carga de ruptura do material.



Para prevenir o problema de formação do gás e tentar viabilizar o uso da CVRSU em materiais cimentícios, autores (MULDER, 1996; MANGIALARDI *et al.* 1999;

COLLIVIGNARELLI *et al.*, 2002; BERTOLINI *et al.*, 2004) propõem a realização de um pré-tratamento na CVRSU.

O processo de lavagem da cinza foi realizado seguindo o procedimento utilizado por MANGIALARDI *et al.* (1999) que é descrito a seguir. A CVRSU foi lavada em duas etapas, utilizando uma relação líquido/sólido de 25 e um tempo de mistura de 15'. Em seguida, a mistura foi mantida em repouso por 24 horas para a sedimentação da cinza e formação do gás hidrogênio (Figura 4.31).



(a) Etapa de mistura – 15'



(b) Repouso por 24 horas

Figura 4.31: Etapas de mistura e sedimentação da cinza.

Após o período de 24 horas, a mistura foi filtrada utilizando uma membrana Millipore de $0,45\mu\text{m}$ e bomba de vácuo (Figura 4.32). Durante o processo de filtração, o gás hidrogênio foi eliminado.



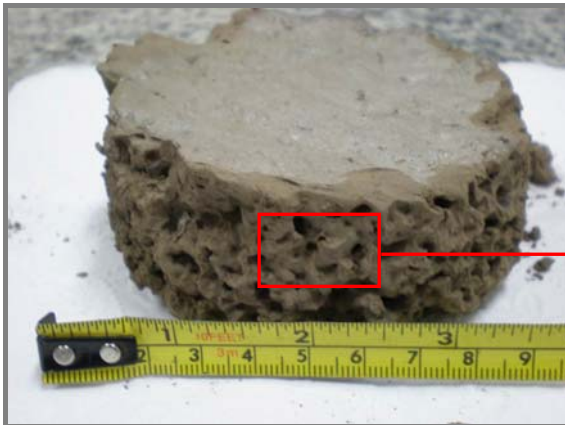
(a) Eliminação do gás hidrogênio



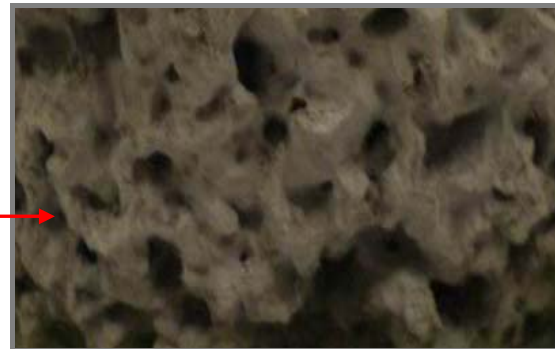
(b) Processo de filtração

Figura 4.32: Etapas de eliminação do gás hidrogênio e filtração da CVRSU.

Em seguida, a cinza foi submetida à secagem em estufa a $105 \pm 1^\circ\text{C}$ (Figura 4.33). A segunda etapa de lavagem da cinza seguiu o mesmo procedimento utilizado na primeira etapa, diferenciando apenas no tempo de sedimentação que foi de 48 horas.



(a) CVRSU após secagem na estufa



(b) Vazios deixados pelo gás hidrogênio

Figura 4.33: Aparência da cinza após secagem.

ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA DA CVRSU LAVADA

Na Figura 4.34 encontra-se o índice de atividade pozolânica da CVRSU sem lavagem e após processo de lavagem.

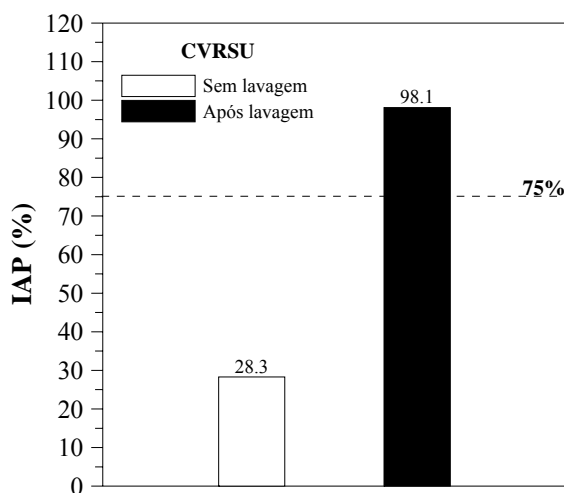


Figura 4.34: IAP da CVRSU sem lavagem e após lavagem.

Verificou-se que após processo de lavagem da CVRSU, esta apresentou índice de atividade pozolânica de 98%, atendendo ao limite mínimo exigido pela NBR 12653 (ABNT, 1992) para material pozolânico. Este acréscimo aconteceu, provavelmente, devido à eliminação do gás hidrogênio. Além disso, analisando a Tabela 4.19, verifica-se que este índice poderia ser ainda maior caso a relação a/mc fosse mantida fixa e a consistência corrigida através do uso de superplastificante, indicando uma possível reatividade da CVRSU.

Tabela 4.19: Resultado referente ao índice de atividade pozolânica CVRSU lavada.

Material	Quantidade (g)		Água (g)	Consistência (mm)	Relação a/mc	IAP (%)
	Cimento	CVRSU				
Cimento	312	-	157,47	225	0,50	-
CVRSU	202,8	94,57	174,68	225	0,59	98

4.4.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA, MINERALÓGICA E AMBIENTAL

Após processo de lavagem realizado na CVRSU, fez-se nova caracterização do material, devido à possibilidade de perda de grãos durante a filtração e também, a liberação de elementos químicos presentes na cinza.

4.4.3.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS

Na Figura 4.35 encontram-se as curvas granulométricas da CVRSU antes e após processo de lavagem.

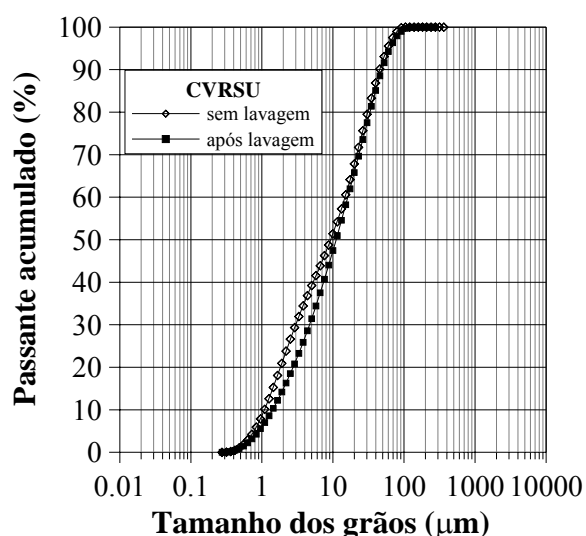


Figura 4.35: Granulometria da CVRSU sem lavagem e após lavagem.

Analisando as duas curvas granulométricas verificou-se que a CVRSU lavada apresentou uma granulometria ligeiramente mais grossa, principalmente para os diâmetros entre 0,7 – 10 μm , que a CVRSU sem lavagem. Isto significou que houve perda de grãos durante o processo de lavagem e filtração da cinza. A nova constituição granulométrica da CVRSU lavada foi $d_{90} = 52\mu\text{m}$, $d_{50} = 11,4\mu\text{m}$, $d_{30} = 4,9\mu\text{m}$, $d_{20} = 2,9\mu\text{m}$, $d_{10} = 1,4\mu\text{m}$ e $d_5 = 0,9\mu\text{m}$ enquanto a CVRSU sem lavagem foi $d_{90} = 45\mu\text{m}$, $d_{50} = 9,5\mu\text{m}$, $d_{30} = 3,0\mu\text{m}$, $d_{20} = 1,9\mu\text{m}$, $d_{10} = 1,1\mu\text{m}$ e $d_5 = 0,8\mu\text{m}$. Essa nova granulometria da CVRSU também atendeu à exigência física da NBR 12653 (ABNT, 2004), onde 88% dos grãos apresentaram diâmetro inferior a 45 μm .

Os resultados de análise química, perda ao fogo, teor de umidade, álcalis disponíveis e

massa específica encontram-se na Tabela 4.20.

Tabela 4.20: Composição química da CVRSU lavada.

Óxidos	Concentração (%)		
	Sem lavagem	Após lavagem	NBR 12653 (ABNT, 1999)
SiO ₂	44,26	44,65	SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ > 70%
Al ₂ O ₃	18,16	18,50	
Fe ₂ O ₃	9,27	9,26	
SO ₃	0,64	0,36	< 4,0%
CaO	15,39	15,02	
P ₂ O ₅	2,94	2,95	
TiO ₂	3,52	3,41	
K ₂ O	2,61	2,62	
MgO	2,23	2,19	
ZnO	0,46	0,46	
Cr ₂ O ₃	0,16	0,15	
MnO	0,13	0,11	
PbO	0,11	0,12	
CuO	0,06	0,09	
ZrO ₂	0,04	0,04	
SrO	0,04	0,05	
Ni	0,003	0,01	
Perda ao fogo (%)	-	4,7	< 10%
Teor de umidade (%)	-	1,1	< 3,0%
Álcalis disponíveis (%)	1,72	1,72	< 1,5
Massa específica (g/cm ³)	2,65	2,65	-

Comparando os resultados obtidos antes e após processo de lavagem verificou-se pequenos acréscimos e decréscimos na concentração de alguns óxidos. Dentre os óxidos que apresentaram as maiores reduções encontram-se o SO₃ (44%), Mn (15%) e Cr₂O₃ (6%). No Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) dispõe da Resolução CONAMA N° 357 (2005) para padrões para lançamento de efluentes líquidos em corpos receptores. No Rio de Janeiro, esses padrões são regulamentados pela FEEMA (Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente), através da norma técnica NT 202 (1986). Em face da existência dessas normas, foi feita uma análise na

água de lavagem da cinza para avaliar o nível de concentração de metais e verificar se os mesmos encontram-se dentro do limite máximo permitido (Ver Tabela 4.21) para serem lançados na rede de esgotamento sanitário.

Tabela 4.21: Análise química da água de lavagem da CVRSU.

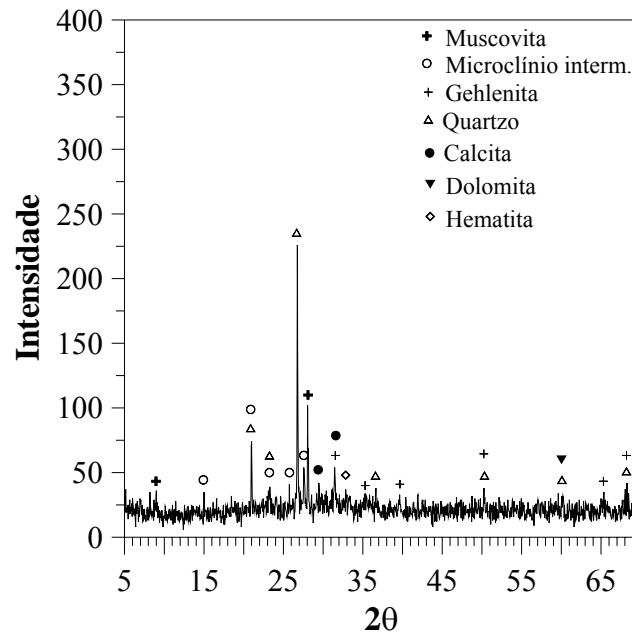
Parâmetros	Concentração (mg/L)	Concentração máxima permitida (mg/L)	
		NT 202 FEEMA	CONAMA Nº 357
Cálcio	15,4	-	-
Ferro	0,059	15,0 (solúvel)	15,0 (solúvel)
Sulfato	52,0	-	-
Cromo	< 0,01	0,5	0,5
Cobre	< 0,005	0,5	1,0 (dissolvido)
Níquel	< 0,01	1,0	2,0
Chumbo	< 0,01	0,5	0,5
Estrôncio	0,097	-	-
Zinco	0,056	1,0	5,0
Manganês	< 0,01	1,0 (solúvel)	1,0 (solúvel)

Analisando os resultados de concentração dos metais presentes na água, verificou-se que todos os valores ficaram abaixo da concentração máxima permitida pelas normas da FEEMA e CONAMA. Isto indica que a água de lavagem pode ser lançada na rede de esgotamento sanitário.

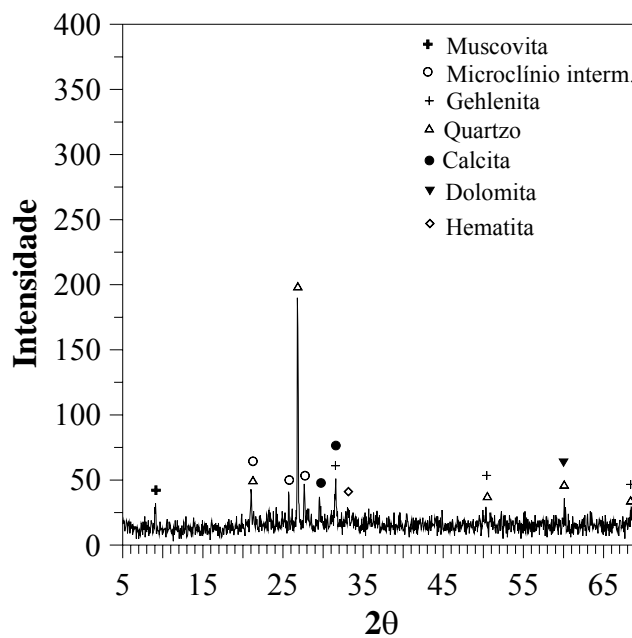
Com relação às exigências químicas da NBR 12653 (ABNT, 1992), a CVRSU lavada apresentou o somatório de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ foi igual a 72,41%, indicando um ligeiro incremento deste parâmetro. Com relação ao teor de SO_3 verifica-se que houve uma redução de 44% em relação à cinza sem lavagem. Este comportamento está associado à análise química da água de lavagem (Ver Tabela 4.21) onde se observa a presença de 52mg/l de sulfato, que confirma esta redução. O teor de álcalis disponíveis apresentou valor ligeiramente maior que o limite máximo exigido pela norma, que, como dito anteriormente, não influenciará expressivamente no comportamento do material devido ao baixo valor de substituição.

4.4.3.2 CARACTERÍSTICAS MINERALÓGICAS

Na Figura 4.36 encontram-se as difrações de raios-X realizadas na CVRSU antes e após processo de lavagem, com o objetivo de comparar o comportamento do material.



(a) CVRSU sem lavagem



(b) CVRSU após lavagem

Figura 4.36: Difração de raios-X da CVRSU lavada.

Através dos difratogramas pode-se dizer que a CVRSU após processo de lavagem apresentou a mesma composição mineralógica da CVRSU sem lavagem, porém com uma intensidade menor dos picos. Este comportamento está associado, provavelmente, à solubilização de alguns elementos na água lavada. AUBERT *et al.* (2004) avaliaram a mineralogia da CVRSU e encontraram uma fase amorfa referente ao aluminossilicato de cálcio. Já GAO *et al.* (2008) observaram a presença de uma fase hidratada referente ao plagioclásio, indicando, segundo os autores, a viabilidade de uso da cinza lavada em cimentos. No presente estudo essas fases não foram identificadas. RÉMOND *et al.* (2002) também reportaram a dificuldade em identificar as diversas fases presentes no material, visto que a cinza é um material heterogêneo e a sua composição química não é bem definida como os outros materiais.

Com relação ao refinamento por Ritivield, a CVRSU lavada apresentou um teor de amorfos de 47%, com um erro inferior a 6,0%.

4.4.3.3 CARACTERÍSTICAS AMBIENTAIS

Nas Tabela 4.22 e 4.23 encontram-se os resultados referentes às análises químicas realizadas no lixiviado e no solubilizado da CVRSU lavada e os limites máximos permitidos pela NBR 10004 (ABNT, 2004) para os parâmetros analisados.

Tabela 4.22: Resultados referentes ao ensaio de lixiviação na CVRSU lavada.

Parâmetros	Concentração (mg/L)	
	CVRSU	NBR 10004 (ABNT, 2004)
Fluoreto	1,3	150
Mercúrio	<0,00005	0,1
Prata	< 0,005	5,0
Arsênio	< 0,01	1,0
Bário	0,094	70,0
Cádmio	0,012	0,5
Chumbo	0,029	1,0
Cromo	0,024	5,0
Selênio	0,037	1,0
pH final	5,12	-

Verificou-se que todos os parâmetros ficaram abaixo do limite máximo permitido pela NBR 10004 – Anexo F (ABNT, 2004). Com isso, pode-se dizer que a CVRSU lavada pode ser classificada como um resíduo não perigoso.

Tabela 4.23: Resultados referentes ao ensaio de solubilização na CVRSU lavada.

Parâmetros	Concentração (mg/L)	
	CVRSU	NBR 10004 (ABNT, 2004)
Índice de fenóis	< 0,01	0,01
Mercúrio	<0,00005	0,001
Prata	< 0,005	0,05
Alumínio	2,8	0,2
Arsênio	< 0,01	0,01
Bário	0,044	0,7
Cádmio	< 0,001	0,005
Chumbo	< 0,01	0,01
Cobre	< 0,008	2,0
Cromo	0,013	0,05
Ferro	0,566	0,3
Manganês	< 0,01	0,1
Selênio	< 0,008	0,01
Sódio	41,7	200
Zinco	< 0,01	5,0
Nitrato (N)	< 0,2	10,0
Cloreto	40,6	250
Sulfato	44,6	250
Fluoreto	0,3	1,5
pH final	9,2	-

Comparando-se os resultados obtidos com os valores máximos permitidos pela NBR 10004 – Anexo G (ABNT, 2004), pode-se dizer que os parâmetros ferro e alumínio ficaram acima do limite. Conseqüentemente, a CVRSU lavada foi classificada como resíduo classe II A – não inerte. Ressalta-se ainda que o alumínio e o ferro não são considerados elementos tóxicos ao meio ambiente e à saúde da população.

5 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental realizado no presente estudo foi elaborado com o objetivo de avaliar a influência dos aditivos minerais (CLE, MC, BL e CVRSU) em concretos e argamassas. A CLE1, CLE2, MC e BL foram empregadas em concretos de alto desempenho, em substituição parcial ao cimento Portland, nos teores de 5% e 10% em massa. Optou-se por concreto de alto desempenho devido à maior possibilidade de encapsulamento dos metais pesados presentes na composição destes aditivos em sua matriz cimentícia, face a sua microestrutura ser mais densa que o concreto de resistência convencional. A CVRSU foi utilizada em argamassas, nos mesmos teores de substituição que nos concretos. Por ser um estudo exploratório, optou-se pelo mesmo tipo de matriz cimentícia inicialmente utilizado por FONTES (2003) para avaliar o comportamento da cinza de lodo de esgoto.

A primeira etapa do programa consistiu na caracterização físico-química e mecânica dos materiais a serem utilizados nas misturas. Em seguida, após a obtenção das dosagens de referência, as argamassas e os concretos foram produzidos utilizando os teores de substituição previamente definidos (5% e 10%), além da mistura de referência. O comportamento dos aditivos minerais nas matrizes cimentícias foi avaliado através de ensaios experimentais tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Esta etapa foi apresentada da seguinte forma: (1) Análise dos concretos com CLE1 e CLE2; (2) Análise dos concretos contendo apenas CLE1; (3) Análise dos concretos contendo MC, CLE2 e BL e (4) Análise das argamassas com CVRSU.

Por último, fez-se um comparativo entre os resultados obtidos experimentalmente e os teóricos relacionados ao concreto de referência (CR60). Para a obtenção dos valores teóricos, utilizou-se o programa computacional BetonlabPro 2[®], onde os parâmetros analisados foram abatimento, massa específica, teor de ar incorporado e resistência à compressão.

5.1 COMPOSIÇÃO DOS MATERIAIS

A seguir, será apresentada a caracterização dos demais materiais utilizados para a produção das argamassas e concretos do presente estudo, visto que os aditivos minerais foram caracterizados previamente no capítulo 4.

5.1.1 CIMENTO PORTLAND

O cimento utilizado no presente estudo foi o CII F-32. As caracterizações físico-químicas e mecânicas do cimento Portland estão apresentadas na Figura 5.1 e Tabela 5.1.

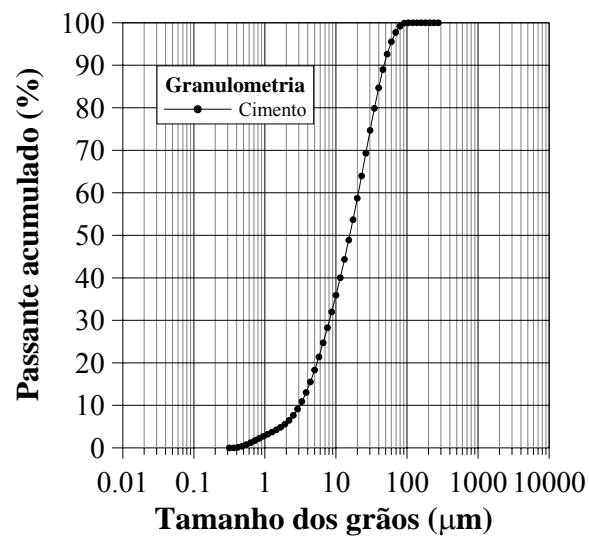


Figura 5.1: Granulometria do cimento CII F-32.

O cimento Portland apresentou diâmetros de $1,8\mu\text{m}$ para d_5 , $3,1\mu\text{m}$ para d_{10} , $5,5\mu\text{m}$ para d_{20} , $8,0\mu\text{m}$ para d_{30} , $16,0\mu\text{m}$ para d_{50} e $48\mu\text{m}$ para d_{90} .

Tabela 5.1: Composição físico-química e mecânica do CPII F-32 do presente estudo.

Características físico-químicas e mecânicas	Resultados
Na ₂ O (%)	0,83
MgO (%)	2,54
Al ₂ O ₃ (%)	4,42
SiO ₂ (%)	16,33
P ₂ O ₅ (%)	0,19
SO ₃ (%)	3,38
Cl (%)	0,26
K ₂ O (%)	0,46
CaO (%)	66,68
TiO ₂ (%)	0,29
MnO (%)	0,07
Fe ₂ O ₃ (%)	4,21
Perda ao fogo (%)	5,3
Equivalente alcalino, em Na ₂ O (%)	1,13
Massa específica (g/cm ³)	3,06
Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	38,0

5.1.1.1 ENSAIO DE COMPATIBILIDADE CIMENTO X SUPERPLASTIFICANTE

A compatibilidade entre o cimento e o superplastificante é determinada por meio de medições do tempo necessário para que uma determinada quantidade de pasta, feita com esses dois materiais, escoe através de um cone padronizado conhecido como cone de Marsh e ocupe o volume de 1 litro (Ver Figura 5.2). Estas medições foram realizadas em tempos pré-determinados. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Estruturas do COPPE/UFRJ.

À medida em que as leituras são feitas, o tempo de escoamento da pasta tende a tornar-se constante a partir de um determinado teor de superplastificante. O ponto a partir do qual se observa que o teor de SP não altera a reologia da pasta (tempo de escoamento constante) é denominado de ponto de saturação (P.S.).

A seqüência do ensaio foi a seguinte:

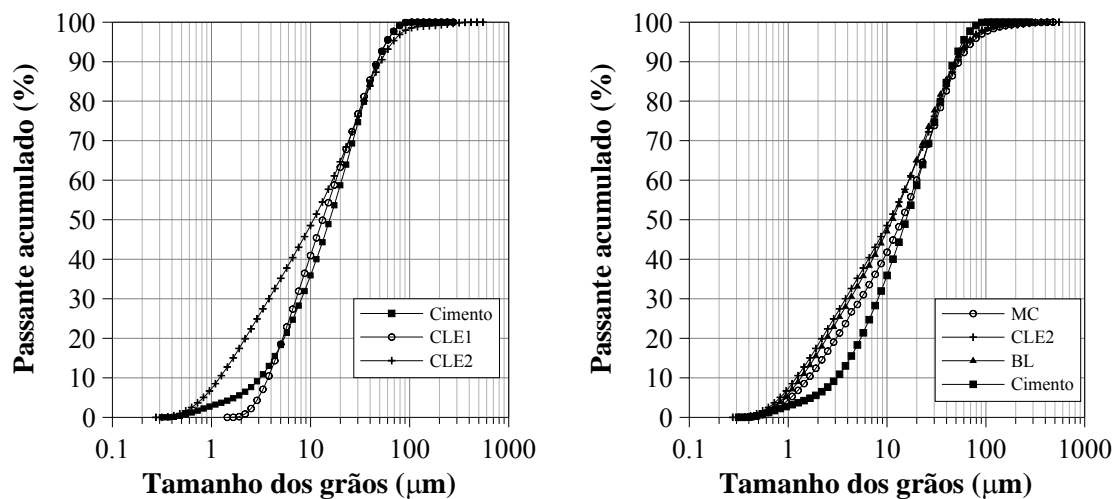
1. Pesagem do cimento CP II F-32, superplastificante e água;
2. Inicialmente adiciona-se a água junto com o SP. Em seguida, coloca-se gradativamente o cimento com o liquidificador ligado (acionamento do cronômetro);
3. Misturar por 2'30", contados a partir da colocação do cimento;
4. Após esse período, raspar as paredes do liquidificador e deixar a mistura em repouso. Bater a mistura por 30 segundos antes de iniciar a leitura;
5. Medição do tempo de escoamento nos intervalos de 5, 15, 30 e 60 minutos.



Figura 5.2: Ensaio de compatibilidade: (a) cone de marsh + proveta e (b) medição do tempo de escoamento.

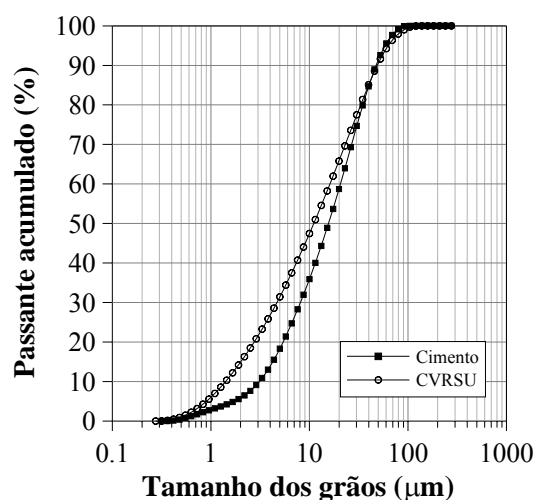
5.1.2 RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DOS MATERIAIS CIMENTÍCIOS

Como no capítulo anterior os aditivos minerais foram descritos de forma detalhada, neste item serão mostradas as curvas granulométricas dos aditivos minerais em comparação com a do cimento Portland (Figura 5.3) e uma tabela resumo com as principais características de cada material estudado (Tabela 5.2).



(a) Granulometria da CLE1, CLE2 e cimento.

(b) Granulometria da MC, CLE2, BL e cimento.



(c) Granulometria da CVRSU e cimento.

Figura 5.3: Curvas granulométricas dos aditivos minerais e cimento Portland.

Através da Figura 5.3 verifica-se que os aditivos minerais apresentaram curvas granulométricas inferiores ao cimento. Esta característica pode contribuir na aceleração das reações de hidratação do cimento, proporcionada pelo efeito de nucleação dos compostos anidros devido à presença de um material com maior teor de finos. Este comportamento pode vir a influenciar na estrutura de poros do material, reduzindo conectividade e tortuosidade entre os poros. Exceção para a CLE1 onde a granulometria além de ser praticamente igual à do cimento, na fração inferior ao d_{10} apresentou grãos ligeiramente maiores.

Tabela 5.2: Resumo das características referentes aos aditivos minerais a ao cimento Portland empregados no presente estudo.

Características	Cimento	CLE1	CLE2	MC	BL	CVRSU
d ₅	1,8	3,0	0,8	1,1	0,9	0,9
d ₁₀	3,1	3,8	1,2	1,6	1,3	1,4
d ₂₀	5,5	5,1	2,1	3,0	2,5	2,9
d ₃₀	8,0	7,1	3,9	5,5	4,1	4,9
d ₅₀	16,0	13,0	11,0	15,0	11,0	11,4
d ₉₀	48,0	48,0	52,0	52,0	52,0	52,0
IAP (%)	100	91	97	117	115	98
Teor de amorfos (%)	-	32	40	78	61	47
Massa específica (g/cm ³)	3,06	2,68	2,69	2,62	2,62	2,65
Perda ao fogo (%)	5,3	7,3	7,6	4,2	6,9	4,7
Análise química (%)						
SiO ₂	16,33	39,02	45,68	53,64	49,85	44,65
Al ₂ O ₃	4,42	19,09	20,16	38,11	29,56	18,50
Fe ₂ O ₃	4,21	12,48	8,69	4,46	7,16	9,26
CaO	66,68	10,12	7,50	0,46	3,63	15,02
Na ₂ O	0,83	1,26	ND	ND	ND	ND
MgO	2,54	1,89	2,33	1,11	1,45	2,19
P ₂ O ₅	0,19	4,94	3,02	ND	1,34	2,95
SO ₃	3,38	6,38	7,99	0,17	3,71	0,36
Cl	0,26	ND	ND	ND	ND	ND
K ₂ O	0,46	1,76	2,20	0,70	1,42	2,62
TiO ₂	0,29	ND	1,19	1,24	1,36	3,41
MnO	0,07	0,12	0,08	0,02	0,04	0,11
PbO	ND	0,07	0,06	ND	0,03	0,12
Cr ₂ O ₃	ND	0,31	0,05	0,03	0,04	0,15
NiO	ND	0,26	0,03	ND	0,02	0,01
CuO	ND	0,03	0,11	0,03	0,07	0,09
ZnO	ND	0,57	0,43	0,01	0,26	0,46
Se	ND	0,06	ND	ND	ND	ND
BaO	ND	1,63	0,43	ND	ND	ND
ZrO ₂	ND	ND	0,02	ND	0,03	0,04
SrO	ND	ND	0,02	ND	0,01	0,05
Classificação ambiental	-	II-A: não inerte	II-A: não inerte		II-A: não inerte	II-A: não inerte

Analisando as principais características dos materiais cimentícios apresentados na Tabela 5.2, pode-se dizer que a CLE2, BL, MC e CVRSU apresentam granulometrias iguais e inferiores ao cimento e à CLE1. Com relação à reatividade (IAP) e ao teor de amorfos dos materiais, em ordem crescente, encontram-se a MC, BL, CVRSU, CLE2 e CLE1, ressaltando que os resultados obtidos para o IAP poderiam ser maiores caso a consistência das argamassas tivesse sido corrigida com SP. A análise química indicou

que os principais óxidos encontrados na CLE, MC e BL foram SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , a CVRSU ao invés do óxido de ferro apresentou maior concentração para o óxido de cálcio (CaO). Isto se deve ao processo de lavagem realizado na saída dos gases do incinerador. Ambientalmente todos os aditivos minerais foram classificados como classe II-A: não-inerte, precisando ser dispostos de maneira adequada, devido à presença de metais pesados em suas composições.

5.1.3 AGREGADOS

5.1.3.1 AGREGADO MIÚDO

O agregado miúdo utilizado para a produção das argamassas e concretos foi uma areia de rio, onde as características físicas e sua composição granulométrica estão apresentadas, respectivamente, na Tabela 5.3 e na Figura 5.4.

Tabela 5.3: Caracterização física do agregado miúdo do presente estudo.

Ensaio	Resultado	Norma
Módulo de finura (mm)	2,8	NBR NM 248 – ABNT, 2003
Dimensão máxima característica (mm)	2,36	NBR NM 248 – ABNT, 2003
Massa específica (g/cm^3)	2,64	NBR NM 52 – ABNT, 2003
Absorção (%)	1,23	NBR NM 30 – ABNT, 2003

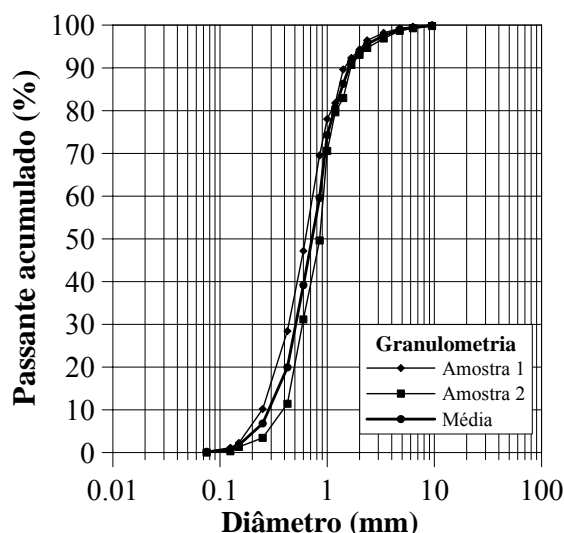


Figura 5.4: Curva granulométrica do agregado miúdo.

5.1.3.2 AGREGADO GRAÚDO

O agregado graúdo foi proveniente da britagem de uma rocha granítica, fornecida pela BRITABRÁS. Dessa amostragem foi extraído um matacão, onde foram carotados corpos-de-prova de 50mm de diâmetro e 100mm de altura para a obtenção da resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à tração por compressão diametral da rocha. A composição granulométrica e a caracterização física da brita 0 utilizada para produzir o concreto de alto desempenho do presente estudo estão apresentadas na Tabela 5.4 e na Figura 5.5, respectivamente.

Tabela 5.4: Características físicas do agregado graúdo do presente estudo.

Ensaio	Resultado	Norma
Módulo de finura (mm)	5,6	NBR NM 248 – ABNT, 2003
Dimensão máxima característica (mm)	9,5	NBR NM 248 – ABNT, 2003
Massa específica (g/cm ³)	2,69	NBR NM 53 – ABNT, 2003
Absorção (%)	1,08	NBR NM 53 – ABNT, 2003
Resistência à compressão da rocha (MPa) – C.V. (%)	145,4 – 3,47	International Society for Rock Mechanics (IESA, 1984)
Resistência à tração por compressão diametral da rocha (MPa) – C.V. (%)	10,24 – 4,46	International Society for Rock Mechanics (IESA, 1984)
Módulo de elasticidade da rocha (GPa) – C.V.(%)	45,14 – 0,74	-

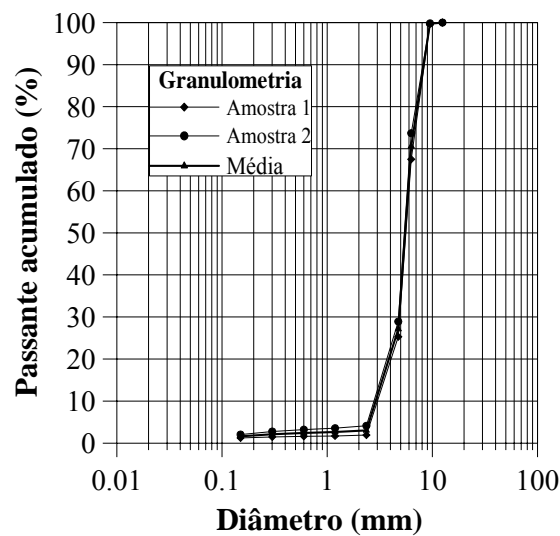


Figura 5.5: Curva granulométrica do agregado graúdo.

5.1.4 ADITIVO QUÍMICO

O aditivo químico utilizado foi o superplastificante Conplast SP430 à base de naftaleno sulfonado, cujas características estão apresentadas na Tabela 5.5.

Tabela 5.5: Características físicas e químicas do superplastificante do presente estudo.

Ensaio	Especificação		Resultados referente ao SP utilizado*
	Máximo	Mínimo	
Teor de sólidos (%)	39,0	42,0	42,0
pH	7,5	9,5	7,88
Densidade (g/cm ³)	1,2	1,22	1,218

* Resultados fornecidos pelo fabricante ANCHORTEC Comercial e industrial Ltda.

5.1.5 ÁGUA

Para a produção das argamassas e concretos foi utilizada água deionizada, devido ao elevado teor de ferro na água proveniente do sistema de abastecimento.

5.2 DOSAGEM

5.2.1 CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO

Nesse estudo, o concreto de alto desempenho (CAD) foi produzido visando obter uma resistência à compressão de 60 MPa, aos 28 dias. Para avaliar a influência dos aditivos minerais nas propriedades dos concretos, foram produzidas misturas com teores de substituição, em massa, de 5% e 10% em relação ao cimento Portland, além da mistura de referência. As nomenclaturas utilizadas no presente estudo, para cada mistura, estão apresentadas na Tabela 5.6.

Tabela 5.6: Nomenclatura utilizada para designação dos concretos de alto desempenho.

Descrição	Nomenclatura
Concreto de referência (sem aditivo mineral)	CR60
Concreto com 5% de MC	MC5%
Concreto com 10% de MC	MC10%
Concreto com 5% de BL	BL5%
Concreto com 10% de BL	BL10%
Concreto com 5% de CLE1	CLE1-5%
Concreto com 10% CLE1	CLE1-10%
Concreto com 5% de CLE2	CLE2-5%
Concreto com 10% de CLE2	CLE2-10%

A dosagem do CAD foi baseada nos métodos propostos por O'REILLY (1998) *apud* CORDEIRO (2001) e AÍTICIN (2000). Na Tabela 5.7 encontram-se o traço e o consumo de material utilizado no presente estudo para 1m³ de concreto. Para o cálculo do consumo de material foi considerado um teor de ar aprisionado de 2%, valor típico para concretos de alto desempenho.

Tabela 5.7: Traço e consumo das misturas para 1m³ de concreto.

Mistura	Traço em massa (cimento:aditivo:areia:brita:água)	Consumo (kg/m ³)					
		cimento	aditivo mineral	areia	brita	água	SP
CR60	1:1,42:1,49:0,31	566,94	-	805,05	844,74	175,75	5,10
CLE1-5%	0,95:0,05:1,42:1,49:0,31	537,87	28,31	803,98	843,61	175,51	5,10
CLE1-10%	0,9:0,1:1,42:1,49:0,31	508,88	56,54	802,90	842,48	175,29	7,35
MC5%	0,95:0,05:1,42:1,49:0,31	537,74	28,30	803,78	843,40	175,47	7,92
MC10%	0,9:0,1:1,42:1,49:0,31	508,63	56,51	802,51	842,07	175,20	8,48
CLE2-5%	0,95:0,05:1,42:1,49:0,31	537,89	28,31	804,01	843,64	175,52	4,53
CLE2-10%	0,9:0,1:1,42:1,49:0,31	508,92	56,55	802,97	842,55	175,30	5,09
BL5%	0,95:0,05:1,42:1,49:0,31	537,74	28,30	803,78	843,40	175,48	5,66
BL10%	0,9:0,1:1,42:1,49:0,31	508,63	56,51	802,51	842,07	175,20	7,35

Para a produção dos CAD's foi utilizado um misturador de eixo vertical com capacidade útil de 100 litros. Inicialmente os materiais secos foram pesados e ensacados até a hora da moldagem. Vale ressaltar que a umidade superficial presente no agregado miúdo, obtida através do frasco de Chapman, e a água presente no superplastificante foram subtraídas do valor da água a ser adicionada à mistura. Todas as misturas foram

realizadas em uma sala climatizada com temperatura de $21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

As etapas da moldagem estão apresentadas a seguir e ilustradas na Figura 5.6. Inicialmente fez-se a homogeneização do agregado miúdo e graúdo no misturador planetário, por 1 minuto. Em seguida, adicionou-se o cimento com o aditivo mineral (previamente homogeneizados no saco plástico), misturando por mais 1 minuto. Após a etapa de homogeneização dos materiais secos, colocou-se parte da água junto aos materiais secos e misturou-se por mais 1 minuto. A água restante foi misturada ao superplastificante e adicionada em pequenas proporções à mistura. Após a colocação de todos os materiais, misturou-se por aproximadamente 5 minutos, até a completa homogeneização da mistura.



(a) Misturador planetário



(b) Homogeneização do agregado miúdo e graúdo



(c) Colocação do cimento e do aditivo mineral.



(d) Mistura final

Figura 5.6: Etapas de produção dos concretos.

5.2.2 ARGAMASSAS

As argamassas foram produzidas com o objetivo de avaliar a influência da CVRSU nas propriedades mecânicas, ambientais e de durabilidade do material. Para isso foram utilizados teores de substituição de 5% e 10% em relação à massa de cimento Portland. Por ser um estudo exploratório, optou-se pelo mesmo tipo de matriz cimentícia e traço inicialmente utilizado por FONTES (2003) para avaliar o comportamento da cinza de lodo de esgoto. Portanto, as argamassas foram produzidas com relação areia/material cimentício de 1,5 e o fator água/cimento de 0,5.

A nomenclatura adotada para as misturas foi CVRSU0% (matriz), CVRSU5% (mistura com 5% de CVRSU em substituição parcial ao cimento Portland) e CVRSU10% (mistura com 10% de CVRSU em substituição parcial ao cimento Portland). Na Tabela 5.8 estão apresentados o traços e o consumo de materiais por m³ de argamassa.

Tabela 5.8: Traço e consumo de materiais por m³ de argamassa.

Mistura	Traço em massa (cimento:aditivo:areia:água)	Consumo (kg/m ³)			
		cimento	CVRSU	areia	água
AR	1:1,5:0,5	716,86	0	1.075,28	358,43
CVRSU5%	0,95:0,05:1,5:0,5	679,78	35,78	1.073,34	357,78
CVRSU10%	0,9:0,1:1,5:0,5	642,84	71,43	1.071,40	357,13

Para a produção das argamassas foi utilizada uma argamassadeira com capacidade de 20 litros. As etapas da produção estão apresentadas a seguir e ilustradas na Figura 5.7.

Inicialmente foi feita a homogeneização dos materiais secos: (cimento + aditivo mineral por 1 minuto) e areia (por mais 1 minuto). Após esse período, a água foi adicionada continuamente. Os materiais foram misturados por 5 minutos, sendo 2,5 minutos na velocidade 1 e 2,5 na velocidade 2.



(a) Homogeneização do cimento



(b) homogeneização do cimento com a areia



(c) Adição da água



(d) Mistura final

Figura 5.7: Etapas de produção das misturas.

5.2.3 **VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS UTILIZANDO O PROGRAMA BETONLABPRO 2[®]**

O programa BetonLabPro 2[®] é uma ferramenta computacional baseada no modelo de empacotamento compressível (MEC), proposto por DE LARRAD (1999) e tem por objetivo dosar e otimizar os concretos de acordo com os critérios de utilização de cada material (resistência à compressão requerida, abatimento necessário, dentre outros). Através deste programa foi possível comparar os dados obtidos experimentalmente no presente estudo, tanto no estado fresco como no estado endurecido, com os dados

teóricos. Essa comparação foi feita para a mistura de referência (CR60) e os parâmetros confrontados foram abatimento, teor de ar incorporado e massa específica no estado fresco, e resistência à compressão aos 7, 28 e 91 dias no estado endurecido.

5.2.3.1 *MODELO DE EMPACOTAMENTO COMPRESSÍVEL (MEC)*

O modelo de empacotamento compressível tem por objetivo otimizar as misturas granulares e com isso obter a sua compacidade máxima. Ele divide-se em duas partes: empacotamento virtual e empacotamento real da mistura granular seca, correlacionados através de um parâmetro K , denominado de índice de empacotamento.

O índice de empacotamento é uma característica inerente ao material e depende do método utilizado para compactar a mistura. Para lançamento simples ($K = 4,7$), para o pilonamento ($K = 4,5$), para lançamento e vibração no chão ($K = 4,75$), para demanda d'água ($K = 6,7$), para vibração e compactação com pressão de 10 kPa ($K = 9$) e para empacotamento virtual ($K = \infty$). A compactação das misturas granulares secas foi obtida para $K = 9$ porque, segundo DE LARRAD (1999), possui uma variabilidade menor dos resultados (maior índice conhecido – não virtual). Uma visão mais detalhada sobre o MEC pode ser encontrada no trabalho de SILVA (2004) e FORMAGINI (2005).

5.2.3.2 *PROGRAMA BETONLABPRO 2[®]*

Para utilizar o programa BetonlabPro 2[®] foi necessário inicialmente montar um banco de dados com as características inerentes a cada material (granulometria, compacidade, absorção de água, etc.) a ser utilizado na obtenção dos resultados teóricos da mistura de referência (Ver Tabela 5.9). Em seguida, foi realizada a calibração dos parâmetros “p” e “q” e a dosagem da mistura. As etapas de utilização do programa BetonlabPro 2 estão apresentadas no Anexo A.

Tabela 5.9: Dados de entrada necessários para a formação do banco de dados.

Dados de entrada	Cimento	Agregados	SP
Granulometria	X	X	
Massa específica	X	X	X
Resistência à compressão	X		
Módulo de elasticidade		X	
Constituintes do cimento	X		
Composição de Bogue	X		
Ponto de saturação	X		X
Compacidade experimental	X	X	
Teor de sólidos			X
Absorção de água		X	

ENSAIOS COMPLEMENTARES PARA USO DO BETONLABPRO 2[®]

A compacidade experimental é o empacotamento máximo alcançado pelos grãos de um determinado material. Esse parâmetro é obtido de duas maneiras: para materiais finos (cimento e aditivo mineral) utiliza-se o método de demanda d'água ($K = 6,7$) e para materiais com granulometria superior a $100\mu\text{m}$ utiliza-se o método de vibração e compactação com pressão de 10kPa ($K = 9$).

Demanda d' água

O ensaio de demanda d'água tem por objetivo obter o empacotamento máximo dos grãos em presença de água (DE LARRAD, 1999), ou seja, é a quantidade máxima de água, ou água + SP, para preencher os vazios existentes entre os grãos (SILVA, 2007).

Este ensaio consiste na adição progressiva de água ao material fino até o alcance da fase capilar. As etapas do ensaio foram as seguintes: pesar 350g de material fino (cimento, aditivo mineral, ou cimento + aditivo mineral). Em seguida, colocá-lo em uma argamassadeira com capacidade para 2 litros. Quando se fizer uso de SP, este deve ser adicionado com um pouco de água a esta mistura seca. Ligar o equipamento em velocidade baixa, e adicionar água gradativamente por 1 minuto. Após esse tempo, raspar as paredes da cuba, mudar a velocidade do misturador para alta e continuar a adicionar água, até a mistura atingir a fase capilar. O valor de demanda d'água foi calculado a partir da média de 3 ensaios. Na Figura 5.8 encontram-se ilustradas as fases

de empacotamento obtidas durante o ensaio de demanda d'água.

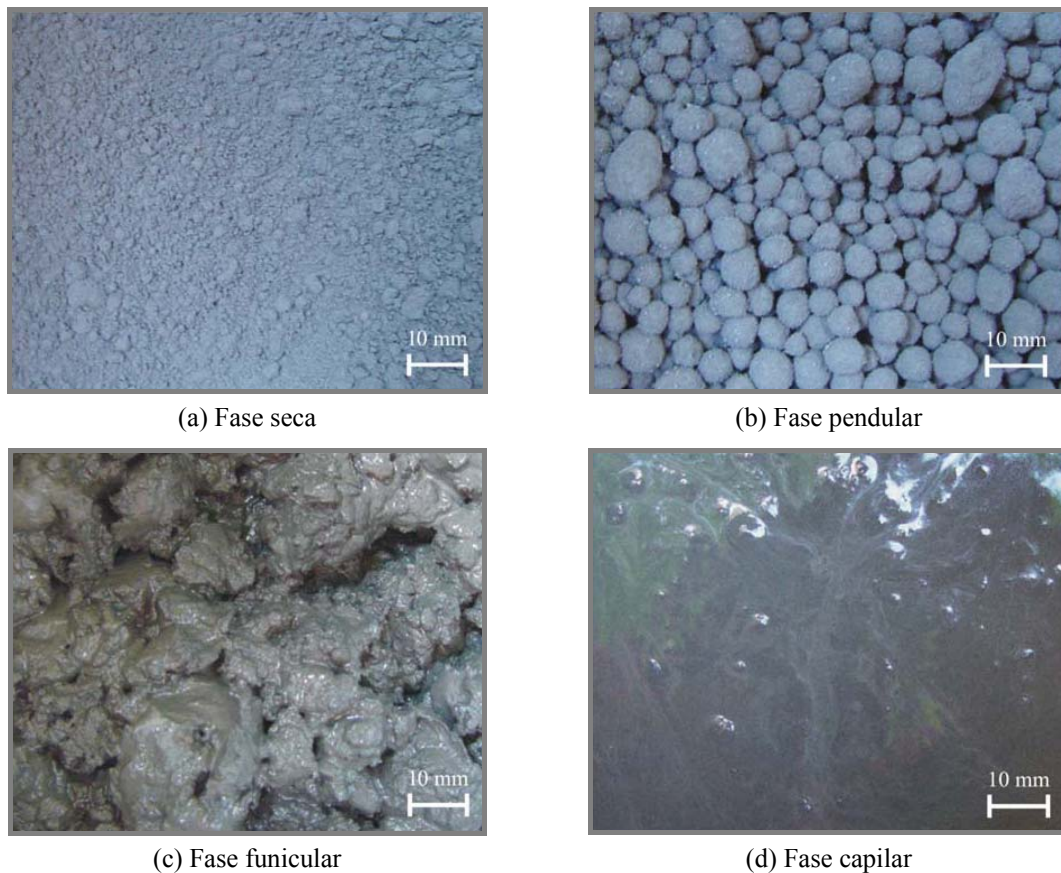


Figura 5.8: Fases de empacotamento do ensaio de demanda d'água (Fonte: CORDEIRO, 2006).

O ensaio de demanda d'água é caracterizado pela presença de quatro fases. Na primeira fase, conhecida como fase seca o material fino encontra-se desordenado, pois não há adição de água (Figura 5.8a). À medida que a água é adicionada, a fase pendular é alcançada. Nesse caso, a água penetra por entre os grãos formando pequenas pontes líquidas (Figura 5.8b). A terceira fase é denominada de funicular, e é caracterizada pela molhagem de todos os grãos pela água (Figura 5.8c). A quarta e última fase (Figura 5.8d) é atingida quando a água consegue ocupar todos os vazios existentes entre o material fino. Essa fase é a capilar (ponto de demanda d'água). O cálculo da compacidade para um único material é realizado de acordo com a Equação 5.1.

$$C = \frac{1}{1 + m_{e1} \times \frac{m_{H_2O}}{m_1}} \quad (5.1)$$

Onde:

m_{e1} : massa específica do material 1;

m_{H_2O} : massa de água utilizada;

m_1 : massa de material 1 (350g).

Na Tabela 5.10 estão apresentados os valores de compacidade obtidos para o cimento.

Tabela 5.10: Compacidade experimental do cimento.

Material	Compacidade experimental	
	Sem SP	Com SP
Cimento	0,557	0,612

Ensaio de vibração e compactação com pressão de 10kPa

Este ensaio foi proposto por DE LARRAD (1999) e adaptado por SILVA (2004). O ensaio consiste na adição de material seco dentro de um cilindro com 160mm de diâmetro e 320mm de altura e aplicar sobre este uma pressão constante de 10kPa, proporcionada por um pistão maciço de 200N, somado ao efeito de vibração atribuído pela mesa vibratória com frequência de 68Hz, durante 3 minutos.



(a) cilindro e pistão posicionados na mesa vibratória



(b) cilindro com o material - brita



(c) colocação do pistão sobre o cilindro – vibração e compactação



(d) leitura da altura do pistão

Figura 5.9: Etapas do ensaio de vibração e compactação.

Na Figura 5.9 estão mostradas as etapas do ensaio de vibração + compactação. Inicialmente o cilindro é posicionado e fixo na mesa vibratória. Em seguida, o material é adicionado no interior do cilindro. Faz-se a leitura inicial da altura do pistão. A mesa vibratória é então acionada por 3 minutos. Faz-se nova leitura da altura do pistão. A compacidade do material é calculada através da Equação 5.2.

$$C = \frac{4m_s}{A \times h \times m_c} \quad (5.2)$$

Onde:

m_s : massa de material seco (3,0kg para o agregado miúdo e 7,5kg para o agregado

gráudo);

A e h: área da seção transversal e altura do cilindro;

m_e : massa específica do material.

Na Tabela 5.11 estão apresentados os resultados de compactidade obtidos para o agregado miúdo e gráudo utilizados no presente estudo.

Tabela 5.11: Compactidade experimental da areia e brita.

Material	Compactidade (β)	
Brita	0,499	
Areia	d < 0,850 mm	0,6250
	d > 0,850 mm	0,6150

O agregado miúdo foi dividido em duas classes de tamanho: grãos inferiores a 850 μ m e grãos superiores a 850 μ m. Para o agregado gráudo foi considerado apenas uma classe de tamanho, pois o mesmo apresentava 72% dos grãos com tamanhos acima de 4,75mm e inferior a 9,5mm. Para dividi-lo em duas classes seria necessária uma quantidade significativa de brita, para obter 7,5 kg de material para cada classe, após peneiramento.

5.3 PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO

5.3.1 CONSISTÊNCIA

A consistência dos concretos foi determinada pelo ensaio de abatimento por tronco de cone (slump-test), segundo a NBR NM67 (ABNT, 1998). As misturas foram moldadas visando obter abatimento de $150\text{mm} \pm 10\text{mm}$. Na Figura 5.10 mostra-se o abatimento da mistura CR60 (mistura de referência).



Figura 5.10: Ensaio de abatimento realizado na mistura CR60.

Para os concretos, além da consistência, determinou-se o teor de ar incorporado e massa específica das misturas (ver Figura 5.11). O teor de ar incorporado foi determinado experimentalmente, pelo método pressométrico, segundo a NBR NM47 (ABNT, 2002). A massa específica e o teor de ar pelo método gravimétrico (teórico) foram obtidos segundo a NBR 9833 (ABNT, 1987).



(a) Adensamento da 1ª camada



(b) Adensamento da 2ª camada



(c) Rasamento e limpeza do molde



(d) Obtenção do teor de ar incorporado

Figura 5.11: Etapas para obtenção do teor de ar incorporado.

A consistência das argamassas foi obtida pela mesa de consistência padrão (Ver Figura 5.12). Em função da argamassa de referência, estipulou-se um espalhamento de $320 \pm 10\text{mm}$ para todas as misturas.



Figura 5.12: Ensaio de espalhamento na mesa de consistência padrão.

5.4 MOLDAGEM, ADENSAMENTO E CURA DOS CORPOS-DE-PROVA

Após a homogeneização da mistura, corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos foram moldados e curados conforme a NBR 5738 (ABNT, 2003). A moldagem foi realizada em três camadas, sendo cada camada adensada em mesa vibratória com velocidade de rotação de 62Hz, por 30 segundos. Em seguida, os mesmos foram cobertos por mantas umedecidas, para evitar a perda de água da mistura, por um período de 24 horas. Após esse tempo os corpos-de-prova foram desmoldados e encaminhados à câmara úmida ($T = 21^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 100\%$), onde permaneceram até as idades dos ensaios.



(a) Adensamento da mistura



(b) Armazenamento dos corpos-de-prova moldados para início do processo de cura



(c) Câmara úmida

Figura 5.13: Etapas da moldagem e cura.

5.5 PROPRIEDADE ENTRE O ESTADO FRESCO E O ENDURECIDO

5.5.1.1 RETRAÇÃO AUTÓGENA

Para avaliar a influência dos aditivos minerais no mecanismo de retração autógena dos concretos foram moldados 03 corpos-de-prova com dimensões de 75mm x 75mm x 285mm. Este ensaio seguiu a metodologia adotada por BALTHAR (2004) e por SILVA (2007). As etapas do procedimento do ensaio de retração autógena na posição horizontal estão apresentadas a seguir.

A preparação dos moldes consistiu no envolvimento dos mesmos com folha de poliestireno com espessura de 3mm, de forma a minimizar o atrito existente entre o molde e a mistura. Em seguida, pinos metálicos foram colocados nas laterais (menor

dimensão) do molde para auxiliar no posicionamento dos extensômetros (relógios). Antes do início da moldagem os prismas foram posicionados em uma placa metálica e sob esta foi colocada uma borracha, de forma a evitar qualquer tipo de vibração na bancada e comprometer as leituras dos relógios. Além disso, foi obtido o “G” de todos os prismas (distância entre as extremidades dos pinos) (Figura 5.14-a, b, c).



Figura 5.14: Preparação e moldagem do prisma.

A moldagem dos prismas foi feita em três camadas, sendo cada camada vibrada manualmente com o auxílio de espátula para não alterar o posicionamento do pino. O enchimento do molde foi feito em sala climatizada, com controle de temperatura e umidade ($T = 21 \pm 2^\circ\text{C}$; $\text{UR} = 50 \pm 2\%$). Após a moldagem, os termopares foram posicionados no meio do vão e na metade da altura do molde. Para o perfeito encaixe do termopar, foi feito um furo com o auxílio de uma barra de aço (Figura 5.15-a). Em seguida, os moldes foram fechados com uma folha de poliestireno e, posteriormente envolvidos com filme de PVC, para evitar a perda de umidade (Figura 5.15-b). A

aquisição da temperatura foi realizada através da conexão dos termopares tipo J ao programa my PCLab (Figura 5.15-c).



(a) Posicionamento do termopar no centro do molde



(b) Selagem do molde com PVC



(c) Aquisição da temperatura

Figura 5.15: Selagem dos moldes e aquisição da temperatura.

Trinta minutos antes do início da pega do concreto, as porcas presas aos parafusos foram retiradas para o posicionamento dos relógios. O tempo de pega foi obtido pelo aparelho de Vicat no concreto peneirado (# 4,75mm). Após o posicionamento dos relógios nos parafusos, leituras iniciais foram feitas (L_A e L_B). As leituras foram feitas a cada hora, tornando-se mais espaçadas à medida que a temperatura do corpo-de-prova se igualava à da sala climatizada (Figura 5.16-a, b).



(a) Detalhe do posicionamento do relógio



(b) Posicionamento dos relógios



(c) Selagem do corpo de prova com PVC

Figura 5.16: Posicionamento dos relógios e selagem do corpo-de-prova com PVC.

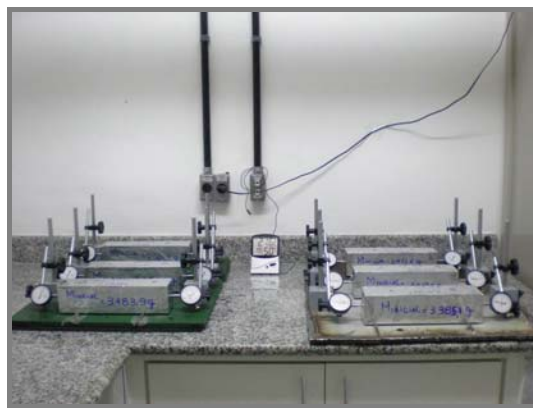
Após estabilização da temperatura (\pm uma semana), os corpos-de-prova foram desmoldados e selados. Inicialmente com filme de PVC e em seguida com fita alumínio. Antes do novo posicionamento dos relógios, os corpos-de-prova foram pesados em balança digital, com capacidade de $4,8\text{kg} \pm 0,01\text{g}$, para o controle da perda de massa de água (Figura 5.16-c e Figura 5.17-a, b). Os corpos-de-prova permaneceram na posição horizontal por mais uma semana (Figura 5.17-c), antes de iniciar as leituras na posição vertical.



(a) Selagem do corpo-de-prova com fita alumínio



(b) Detalhe da selagem na parte lateral do corpo-de-prova



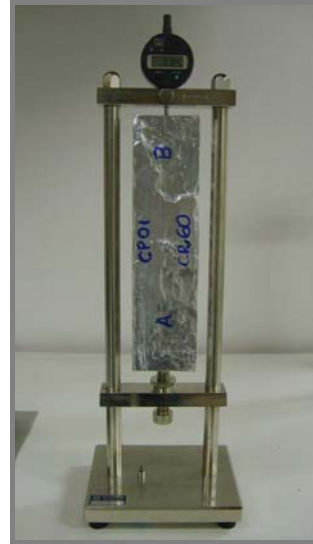
(c) Posicionamento dos relógios

Figura 5.17: Selagem dos corpos-de-prova com fita alumínio e novo posicionamento dos relógios.

Após serem passados para a posição vertical, os corpos-de-prova passaram a ser pesados e medidos regularmente (Ver Figura 5.18). Como dito anteriormente, o controle da perda de massa foi feito com o auxílio de uma balança digital e a variação de comprimento do prisma com o auxílio de uma base metálica dotada de um extensômetro digital (relógio comparador). De acordo com ILLSTON & POMEROY (1975) a perda de massa de água do prisma não deve exceder 0,5% da massa total de água do corpo-de-prova. Ultrapassando esse valor, é um indicativo de que além da retração autógena está ocorrendo também a retração por secagem. Portanto, no presente estudo foram consideradas as medições de massa e comprimento até os corpos-de-prova alcançarem este valor de 0,5% (idade de 112 dias).



(a) Pesagem e



(b) Leitura da variação dimensional na posição vertical.

Figura 5.18: Etapas para leitura da retração autógena na posição vertical.

O cálculo da retração autógena foi realizado conforme procedimento da ASTM C 490 (2000). Vale ressaltar que para as leituras iniciais de variação do comprimento (até a estabilização da sala) foi anotada a referida temperatura, para se calcular a deformação térmica ($\epsilon_T = \alpha\Delta T$). Essa deformação foi descontada da retração, assumindo um coeficiente de expansão térmica do concreto de $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ e ΔT de $(T_1 - T_0)$, onde T_1 é a temperatura obtida na hora da leitura e T_0 é a temperatura obtida no início do ensaio (início da pega), sendo essa constante.

As Equações 5.3, 5.4 e 5.5 referem-se, respectivamente, ao cálculo da retração autógena na posição horizontal, vertical e cálculo da perda de massa do prisma.

$$\epsilon_{ah} = \frac{(L_A + L_B)}{G} - \alpha\Delta T \quad (5.3)$$

Onde:

ϵ_{ah} : retração autógena na posição horizontal ($\mu\epsilon$);

L_A e L_B : Leituras dos extensômetros na referida idade (mm)

G : Comprimento de referência entre os pinos (m)

$$\epsilon_{av} = \frac{(L_f - L_i)}{G} + \epsilon_{ah} \quad (5.4)$$

Onde:

ε_{av} : retração autógena na posição vertical ($\mu\varepsilon$);

ε_{ah} : retração autógena na posição horizontal ($\mu\varepsilon$);

L_f : leitura da referida idade (mm);

L_i : leitura inicial (primeira leitura na posição vertical, em mm);

G: Comprimento de referência entre os pinos (m)

$$P_m = \frac{(m_f - m_i)}{m_i} \times 100 \quad (5.5)$$

Onde:

P_m : perda de massa de água (%);

m_f : massa do prisma na referida idade (g);

m_i : massa do prisma na leitura anterior (g);

Para avaliar a influência dos aditivos minerais nas propriedades dos concretos, no estado endurecido, foram realizados *ensaios mecânicos* de resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral; *ensaios físicos* de retração por secagem e de absorção por imersão, absorção por capilaridade; *ensaios de durabilidade* de permeabilidade a gás, penetração acelerada por íons cloro, difusividade iônica, ataque por sulfatos e *ensaios ambientais* de solubilização.

5.6 PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO

As propriedades do concreto no estado endurecido, com exceção da difusividade iônica e penetração acelerada por íons cloretos, foram avaliadas estatisticamente por análise de variância (ANOVA), ao nível probabilístico de 5% ($p < 0,05$). Esta análise admite como hipótese que os valores médios de todos os tratamentos são iguais. Caso essa hipótese seja rejeitada ($f_{calculado} > f_{tabelado}$) utiliza-se o teste de Tukey para comparar a significância das médias de cada mistura contendo resíduo com a média da mistura de referência (MONTGOMERY, 1997).

5.6.1 ENSAIOS MECÂNICOS

As propriedades mecânicas foram avaliadas através dos ensaios de resistência à compressão nas idades de 1, 3, 7, 28, 91 dias e de resistência à tração por compressão diametral, aos 28 dias.

5.6.1.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O ensaio de resistência à compressão foi realizado em uma prensa Shimadzu com capacidade de carga de 1000kN onde os resultados de carga e deslocamento longitudinais e transversais são armazenados por meio de um sistema de aquisição de dados composto de um condicionador ADS 2000 de 16 bits e um “software” AQDados versão 7.02.08 da Empresa Lynx.

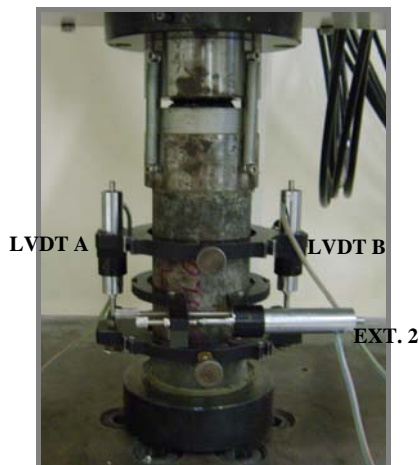
Para os concretos de referência (CR60) e com CLE1, a taxa de deslocamento para ensaiar os corpos-de-prova foi de 0,01 mm/min, onde os deslocamentos longitudinal e transversal foram medidos, respectivamente, por dois transdutores elétricos (LVDT A e LVDT B), diametralmente opostos, localizados na parte central da amostra, e por um transdutor elétrico (EXT 2) situado no eixo transversal da amostra (Ver Figura 5.19a). Para as argamassas foi utilizado apenas o sistema de aquisição do deslocamento longitudinal, sem o EXT.2.

Para as misturas com metacaulinita, blenda e CLE2, como a carga de ruptura esperada era elevada e havia a possibilidade da amostra “estourar” e danificar os transdutores elétricos, optou-se por utilizar extensômetros elétricos. Os extensômetros foram colados no sentido longitudinal e transversal da amostra, diametralmente opostos entre si (Ver Figura 5.19b). Foram utilizados dois extensômetros para cada sentido. As características dos extensômetros estão apresentadas na Tabela 5.12. A taxa de deslocamento utilizada no ensaio foi de 0,1mm/min.

Tabela 5.12: Características dos extensômetros elétricos.

Características	Valores
Marca	KYOWA
Tipo	KC-80-120-A1-11
Comprimento	84mm
Resistência (24°C, 50%RH)	119,8 ± 0,2
Fator de medida	2,13 ± 1,0%

A resistência à compressão foi determinada usando corpos-de-prova cilíndricos, com dimensões de 100mm x 200mm para os concretos e 50mm x 100mm para as argamassas. Porém, a aquisição de dados foi realizada apenas para as idades de 28 e 91 dias, onde obteve-se a curva tensão x deformação. Nas demais idades a carga foi obtida com velocidade de 0,1mm/min. Todos os corpos-de-prova foram capeados no topo e na base, com enxofre líquido e cinza volante, com a finalidade de obter superfícies planas para uma distribuição uniforme da carga. O valor de resistência à compressão para cada mistura foi a média de 3 corpos-de-prova.



(a) Aquisição com LVDT



(b) Aquisição com extensômetro elétrico

Figura 5.19: Tipos de aquisições realizadas nas amostras

Com a realização deste ensaio, outros dois parâmetros foram obtidos: módulo de elasticidade e coeficiente de poisson.

O módulo de elasticidade é uma medida de resistência à deformação elástica do material. No presente estudo, esse parâmetro foi calculado através do módulo secante para uma tensão de 40% da tensão limite da curva tensão x deformação (ASTM C 469, 1994). O módulo de elasticidade foi calculado conforme a Equação 5.6.

$$E = \frac{\sigma_{c2} - \sigma_{c1}}{\varepsilon_{a2} - \varepsilon_{a1}} \quad (5.6)$$

Onde:

σ_{c1} : tensão de compressão correspondente à deformação axial ε_{c1} no valor de $50\mu\epsilon$;

σ_{c2} : tensão de compressão correspondente a 40% da carga última

ε_{a1} : deformação axial no valor de $50\mu\epsilon$;

ε_{a2} : deformação axial produzida pela tensão σ_{c2} .

O coeficiente de poisson é definido como a relação entre as deformações transversal e longitudinal, em função do carregamento axial dentro do limite elástico. O coeficiente de Poisson foi calculado através da Equação 5.7.

$$\nu = \frac{\varepsilon_{t2} - \varepsilon_{t1}}{\varepsilon_{a2} - \varepsilon_{a1}} \quad (5.7)$$

Onde:

ε_{t1} : deformação transversal no eixo transversal da amostra produzida pela σ_{c1} ;

ε_{t2} : deformação transversal no eixo transversal da amostra produzida pela σ_{c2} .

5.6.1.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral (Ver Figura 5.20) foi baseado no método proposto para rochas, conforme o International Society for Rock Mechanics (IESA, 1984). Foram utilizados discos de 50mm para argamassas e 100mm para concretos, com espessura de 25mm. A carga de ruptura foi obtida através da máquina de ensaios SHIMADZU, a uma velocidade de 0,3mm/min. O valor de resistência à tração para cada mistura foi a média de 10 corpos-de-prova.



(a) Ensaio em argamassas com 50mm de diâmetro



(b) Ensaio em amostra com 100mm de diâmetro

Figura 5.20: Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

5.6.2 ENSAIOS DE DURABILIDADE

Para avaliar os ensaios de durabilidade os corpos-de-prova foram retirados da câmara úmida, ao atingir a idade do ensaio, e encaminhados para secagem em estufa à temperatura de $45^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ com ventilação interna até constância de massa. Optou-se pela secagem a 45°C ao invés de 105°C como sugerem as normas, na intenção de manter a integridade dos produtos de hidratação do cimento Portland (CORDEIRO, 2006).

5.6.2.1 PENETRAÇÃO ACELERADA POR ÍONS CLORETO

Este ensaio tem por objetivo medir a quantidade de corrente elétrica que passa através de uma amostra com 50mm de espessura e 100mm de diâmetro, quando aplicada uma diferença de potencial de 60V entre os eletrodos. O procedimento do ensaio foi realizado conforme a ASTM C 1202 (1997) e consistiu inicialmente na selagem e saturação da amostra. Em seguida, a mesma foi posicionada entre duas células de acrílico, uma contendo 3,0% de cloreto de sódio e a outra 0,3N de hidróxido de sódio. Cada célula possui um eletrodo conectado a um resistor de $0,01\Omega$. Aplicou-se uma tensão de 60V, por um período de 6 horas, onde a cada 30 minutos leituras da quantidade de carga foram feitas. As etapas do ensaio estão apresentadas na Figura 5.21.



(a) Selagem do corpo-de-prova.



(b) Saturação dos corpos-de-prova.

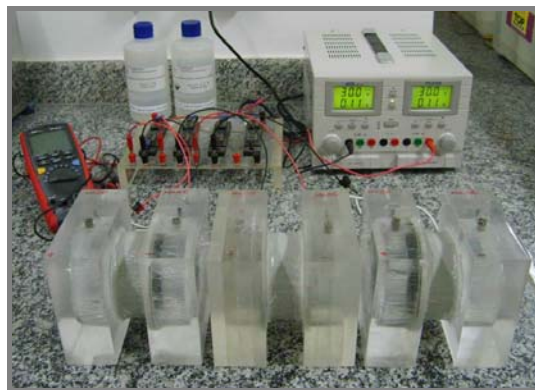


Figura 5.21: Etapas do ensaio de penetração acelerada por cloretos.

Ao término do ensaio calculou-se a intensidade de corrente e, posteriormente a carga elétrica através da Equação 5.8. Os valores de carga elétrica obtidos foram utilizados para classificar os concretos de acordo com a Tabela 5.13.

$$Q = 900 \times (I_0 + 2 \times I_{30} + 2 \times I_{60} + \dots + I_{360}) \quad (5.8)$$

Onde:

Q: carga elétrica (coulombs);

I_n : corrente elétrica em n minutos após a aplicação da tensão.

Tabela 5.13: Classificação das misturas de acordo com relação entre a passagem de carga e a penetração dos íons cloreto (ASTM C 1202, 1997)

Q (C)	Penetração acelerada por íons cloreto
> 4.000	Alta
2.000 – 4.000	Moderada
1.000 – 2.000	Baixa
100 – 1.000	Muito baixa
< 100	Desprezível

5.6.2.2 PERMEABILIDADE A GÁS

O permeâmetro utilizado para o ensaio foi proposto por CABRERA & LYNSDALE (1988). Segundo os autores, para garantir apenas o fluxo vertical na amostra, confeccionou-se um anel com borracha de silicone onde a amostra foi posicionada.

Antes de montar o ensaio, a amostra foi selada lateralmente com uma fita de alumínio. Em seguida, o corpo-de-prova, com dimensões de 100mm de diâmetro e 25mm de espessura, foi encaixado dentro da borracha de silicone e ambos colocados dentro do recipiente cilíndrico. Após o fechamento do recipiente por quatro parafusos existentes ao seu redor e um no eixo central, abriu-se o fluxo de gás de nitrogênio. A pressão desse gás foi controlada por manômetro posicionado na tampa do equipamento, sendo o seu valor variando entre 2 e 5 bar, dependendo da mistura. Esperou-se o fluxo entrar em regime constante (± 15 minutos). Após esse período, medidas foram realizadas com o auxílio de um cronômetro e de um sistema de bolhas para medição de fluxo que fica acoplado ao permeâmetro. Mediu-se o tempo que uma bolha leva para percorrer determinado volume (ver Figura 5.22).

A permeabilidade intrínseca na amostra é então calculada através da Equação 5.9:

$$k = \frac{2 \times P_2 \times Q \times l \times \eta}{A \times (P_1^2 - P_2^2)} \quad (5.9)$$

Onde:

k: permeabilidade intrínseca (m^2);

Q: vazão (m^3/s)

P_1 : pressão igual a 1bar;

P_2 : pressão aplicada (2 ou 5bar);

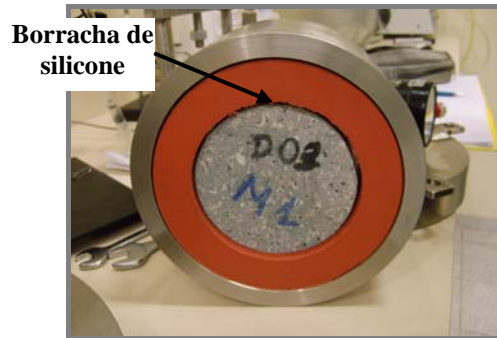
l: espessura da amostra (m);

η : viscosidade do nitrogênio a 20°C ($\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$);

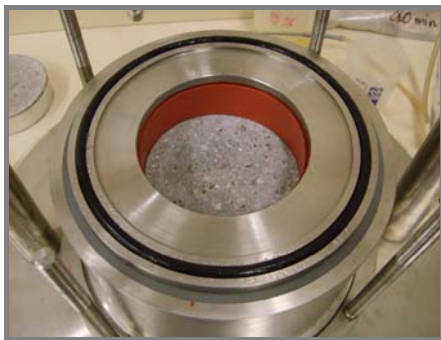
A: área da seção transversal da amostra (m^2).



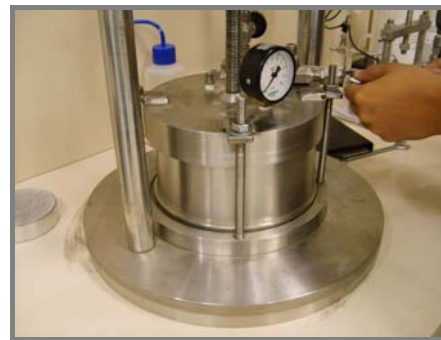
(a) permêmetro aberto



(b) colocação da da borracha de silicone e da amostra dentro do anel de aço



(c) Montagem do permeâmetro



(d) Fechamento do permeâmetro



(e) permeâmetro a gás em execução

Figura 5.22: Ensaio de permeabilidade a gás.

5.6.2.3 POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO

Este método é utilizado para caracterizar a estrutura interna de vários sistemas de poros (cerâmicas, argilas e matrizes cimentícias), reproduzindo a distribuição do tamanho dos poros do material. Apesar das inúmeras vantagens, a preparação das amostras influencia fortemente nos resultados, principalmente em concretos, devido à presença dos agregados graúdos (BEAUDOIN & MARCHAND, 1999).

Os ensaios de intrusão foram realizados na ABCP/SP, em um porosímetro Autopore II 9215 da Micrometics. O ângulo de contato entre o sólido e o mercúrio foi de 130° e os resultados estão apresentados na forma de gráficos (diâmetro médio de poros x volume acumulado de mercúrio).

A classificação utilizada no presente estudo para a divisão do sistema de poros foi conforme MINDESS *et al.* (2002) *apud* ALIGIZAKI (2006), apresentada na Tabela 5.14.

Tabela 5.14: Divisão do sistema de poros usada no presente estudo
(Fonte: MINDESS *et al.*, 2002 *apud* ALIGIZAKI, 2006).

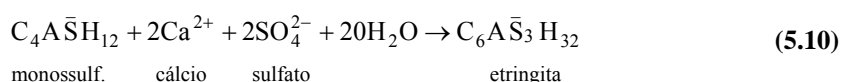
Denominação		Diâmetro (Hm)
Microporos entre camadas	↑ Poros de gel ↓	< 0,0005
Microporos		0,0005 a 0,0025
Pequenos capilares	↑ Poros capilares ↓	0,0025 a 0,01
Capilares médios		0,01 a 0,05
Grandes capilares		0,05 a 10,0
Ar aprisionado		0,1mm a 1,0mm

5.6.2.4 ATAQUE POR SULFATOS

Dentre os aditivos minerais utilizados no presente estudo, a CLE1 foi utilizada inicialmente como forma de avaliar a resistência dos concretos quando expostos ao ataque por sulfato. O comportamento dos demais aditivos a este ataque será investigado

posteriormente.

A solução usada foi o sulfato de sódio (Na_2SO_4), conforme procedimento descrito na ASTM C 1012 (1995). Quando o concreto contendo cimento Portland entra em contato com a solução de sulfato de sódio, o monossulfoaluminato de cálcio proveniente das reações do cimento Portland é transformado em etringita. A Equação 5.10 (TAYLOR, 1997) apresenta a reação que ocorre no interior do concreto. Próximo à superfície das amostras, a taxa Ca/Si reduz e o hidróxido de cálcio começa a ser consumido. Por conseguinte, o gesso é formado iniciando o processo de fissuração das amostras. Este mecanismo conduz à redução da resistência mecânica, expansão, fragmentação da superfície e desintegração do material (TAYLOR, 1997).



Foram produzidas misturas com 5% e 10% de cinza, além da mistura de referência. Após processo de moldagem e cura, conforme descrito no item 5.5, as amostras referentes a cada mistura foram colocadas separadamente, em container de plástico, com a referida solução. Estes containeres foram dispostos em uma câmara com temperatura de $40^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$. Optou-se por expor as misturas à temperatura visando acelerar o ataque (Ver Figura 5.23). Foi definido, a princípio, que a troca da solução seria realizada em função do pH das misturas, quando este ficasse em torno de 12 ± 1 . Porém, observou-se que 24 horas após a troca da solução, o pH atingia esse valor. Então, foram realizadas medições de pH semanais para avaliar o seu comportamento. Verificou-se que entre uma semana e outra a variação foi muito pequena, permanecendo dentro dessa faixa de 12 ± 1 . Em função deste comportamento, ficou decidido que a solução seria trocada a cada 28 dias e o pH monitorado semanalmente.

A cada troca de solução de sulfato as amostras foram pesadas, com o objetivo de avaliar a perda de massa de material. Foram previstos corpos-de-prova para avaliar a resistência à compressão (5 cilindros de $\phi = 50\text{mm}$ e $h = 100\text{mm}$), resistência à tração por compressão diametral (6 cilindros de $\phi = 50\text{mm}$ e espessura de 25mm), massa específica e índice de vazios (5 cilindros de $\phi = 50\text{mm}$ e $h = 50\text{mm}$), variação linear dimensional (2 prismas de 75 x 75 x 285mm) e difração de raios-X (discos de 10mm de espessura). No Anexo B estão apresentados os gráficos de perda de massa e variação

linear dimensional referente a este ensaio visto que, aos 495 dias, não foi verificada a perda de massa das amostras.



(a) Câmara de 40°C



(b) Containeres dispostos no interior da câmara de 40°C

Figura 5.23: Amostras submetidas ao ataque por sulfatos.

5.6.2.5 MIGRAÇÃO IÔNICA

Dentre os aditivos minerais utilizados no presente estudo optou-se por avaliar a intensidade de penetração de cloretos em concretos com CLE1. O comportamento dos demais aditivos a este parâmetro será investigado posteriormente.

Este ensaio, proposto por ANDRADE (1993), tem por objetivo avaliar a penetração de cloretos quando uma diferença de potencial (ddp) de 12V é aplicada ao sistema. Ele difere do ensaio de penetração acelerada por cloretos com relação à ddp aplicada que é de 60V para este ensaio. Segundo a referida autora, esta tensão elevada de 60V proporciona o aquecimento da amostra modificando a velocidade de fluxo dos íons, e com isso a corrente total medida não corresponde apenas ao fluxo de cloretos.

O ensaio de migração iônica consiste no posicionamento de um disco de concreto, com espessura de 25mm, entre duas células, sendo uma célula contendo cloreto de sódio a uma concentração de 0,5M (célula negativa) e a outra contendo água deionizada (célula positiva). Alguns autores sugerem a utilização de amostras com espessura menor para que o ensaio atinja o estado estacionário de forma mais rápida (GEIKER *et al.*, 1995), não invalidando, porém, o uso de espessuras maiores. A única influência desta

característica é no tempo de duração do ensaio. A concentração de cloretos foi obtida com o tempo através da célula positiva (água). Este ensaio foi realizado conforme metodologia descrita por SOUZA (2008).

Inicialmente o corpo-de-prova, com 100mm de diâmetro e 25mm de espessura, foi selado em sua face curva com fita alumínio de forma a garantir o fluxo unidirecional. Em seguida, o mesmo foi posicionado no interior de um CAP de PVC de diâmetro 100mm, tendo as laterais entre a conexão e a amostra vedadas com silicone (Ver Figura 5.24). Após esta etapa, o corpo-de-prova foi colocado em água até constância de massa, para garantir a saturação do corpo-de-prova no início do ensaio de migração.



(a) Vedação da face curva com fita alumínio.



(b) Colocação de silicone na parte inferior do CAP para vedação da amostra.



(c) Posicionamento e vedação da amostra.

Figura 5.24: Etapas de selagem do corpo-de-prova (SOUZA, 2008).

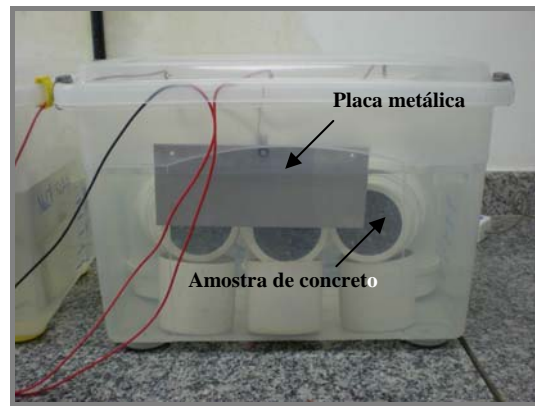
A célula positiva foi montada utilizando tubo, tê e CAP de PVC, com diâmetro de 100mm. Após montagem, a mesma foi colocada no interior de uma caixa plástica contendo solução de NaCl (célula negativa). Em seguida, barras de aço inoxidável foram fixadas na parte superior do CAP formando os eletrodos positivos, enquanto que

o eletrodo negativo foi obtido a partir de uma placa metálica presa na lateral da célula negativa. Os eletrodos foram ligados à fonte de corrente contínua, aplicando uma diferença de potencial de 12 V (Ver Figura 5.25-a, b).

Alíquotas de água da célula positiva foram tiradas continuamente para analisar a concentração de cloretos no tempo (Ver Figura 5.25-c).



(a) montagem do ensaio (SOUZA, 2008).



(b) Ensaio em andamento.



(c) Coleta da amostra de água (SOUZA, 2008).

Figura 5.25: Etapas do ensaio de migração iônica.

Através deste ensaio obtêm-se o coeficiente de difusão iônica (D) que é um dos parâmetros utilizados para prever a vida útil das estruturas de concreto. A equação 5.11, apresentada a seguir, foi modificada por ANDRADE (1993) e permite calcular o coeficiente de difusão iônica.

$$D = \frac{J \times R \times T \times 1}{z \times F \times C_{Cl} \times \Delta E} \quad (5.11)$$

Onde:

D: coeficiente efetivo de difusão (cm²/s);

J: fluxo de íons (mol/s.cm²);

R: constante do gás (1,9872 cal/mol.K);

T: temperatura (K);

l: espessura do corpo de prova (cm);

z: carga elétrica (para cloretos, igual a 1);

F: constante de Faraday (23063 cal/V.eq);

C_{Cl}: concentração de íons cloretos na célula negativa (mol/cm³);

ΔE: diferença de potencial aplicada (V).

O fluxo de íons (J) é obtido pela equação 5.12 (YANG *et al.*, 2003).

$$J = \frac{K \times V}{A} \quad (5.12)$$

Onde:

J: fluxo de íons pela amostra (mol/s.cm²);

K: coeficiente obtido pela tangente do gráfico, concentração de cloretos x tempo, no estado estacionário (M/s);

V: volume de água deionizada na célula (l);

A: área da amostra em contato com a solução (cm²);

5.6.3 ENSAIOS FÍSICOS

Os ensaios físicos foram divididos em ensaio de absorção de água por imersão e por capilaridade e ensaio de retração por secagem. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ. Para os ensaios de absorção por imersão e capilaridade os corpos-de-prova foram submetidos ao mesmo processo de secagem apresentado nos ensaios de durabilidade. Ou seja, as amostras foram ensaiadas após secagem em estufa com ventilação interna, à temperatura de 45°C ± 2°C, até constância de massa.

5.6.3.1 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO E POR CAPILARIDADE

O ensaio de absorção por imersão foi realizado conforme a NBR 9778 (ABNT, 2005), em corpos-de-prova cilíndricos com dimensões de 100mm de diâmetro por 200mm de altura, com o objetivo de obter a absorção de água, o índice de vazios e a massa específica do concreto para todas as misturas (Ver Figura 5.26-a).

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado conforme a NBR 9779 (ABNT, 1995), em corpos-de-prova cilíndricos com dimensões de 75mm de diâmetro por 150mm de altura, com a finalidade de obter o acréscimo de massa de água em função do tempo (Ver Figura 5.26-b).



(a) Absorção de água por imersão



(b) Absorção de água por capilaridade

Figura 5.26: Ensaio de absorção de água.

No ensaio de absorção de água por capilaridade, as amostras foram seladas em sua face curva, com o objetivo de garantir o fluxo unidirecional (HALL, 1989) como também evitar a perda de umidade. O ensaio foi conduzido por um período de 986 horas para todas as misturas. Nesse ensaio também foi calculada a absorvibilidade do material, obtida em dois estágios. O primeiro estágio é caracterizado pelo comportamento linear de ganho de massa de água em relação ao tempo (S1). Este fenômeno ocorre nos poros capilares maiores. No segundo estágio (S2), o ganho de massa de água em relação ao tempo segue um comportamento não linear. Este estágio é conhecido como período de saturação e o fluxo de água ocorre em poros capilares menores. O ponto de mudança do estágio de absorção para o estágio de saturação é denominado de ponto de transição (Pt)

(ver Figura 5.27).

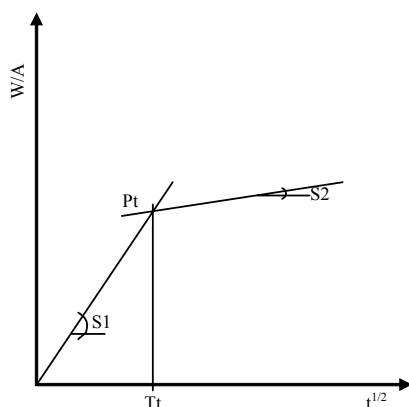


Figura 5.27: Gráfico típico do acréscimo de massa aparente em função da raiz quadrada do tempo.

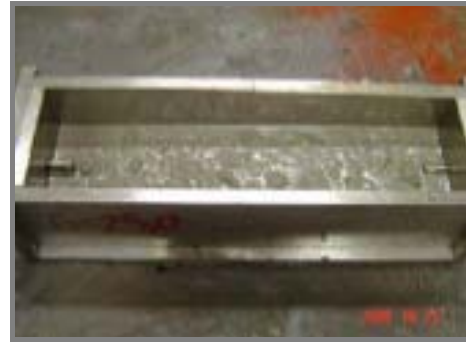
5.6.3.2 *RETRAÇÃO POR SECAGEM*

O ensaio de retração por secagem foi feito de acordo com a ASTM C 157 (1991), diferindo apenas no processo de cura. Os corpos-de-prova do presente estudo foram mantidos na câmara úmida até os 28 dias, ao invés de serem curados em água saturada com cal. Na Figura 5.28 encontram-se as etapas de moldagem dos prismas utilizados no ensaio de retração por secagem.

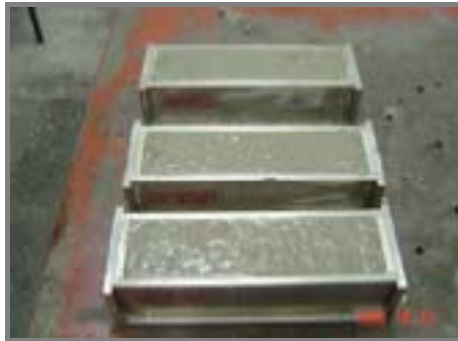
Antes da moldagem foram colocados pinos nas laterais dos moldes (menor dimensão) e, em seguida, mediu-se a distância entre as suas extremidades para obtenção do “G” (Figura 5.28-a). Os moldes foram preenchidos com concreto, em duas camadas, sendo cada camada vibrada com o auxílio da mesa vibratória (Figura 5.28-b, c). Os mesmos permaneceram na sala climatizada, conforme descrito no item 5.4, onde após 24 horas foram desmoldados e encaminhados à câmara úmida onde permaneceram por 28 dias. Antes de serem colocados na câmara úmida, foi feita uma leitura inicial do prisma, utilizando o relógio comparador.



(a) 03 Moldes de 75x75x285mm



(b) Colocação da 1ª camada



(c) Colocação da 2ª camada

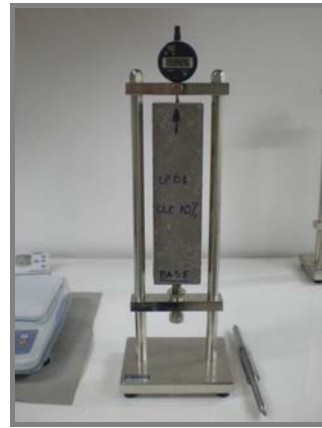
Figura 5.28: Etapas da moldagem dos prismas (Fonte: SILVA, 2007).

Decorrido esse período, os corpos-de-prova foram retirados da câmara úmida e armazenados em uma sala climatizada, onde procedeu-se a leitura final do período de cura, que corresponde à leitura inicial do processo de retração por secagem.

Durante os primeiros 28 dias foram realizadas leituras regulares. Além da variação de comprimento, as amostras foram pesadas, em balança digital, conforme mostra a Figura 5.29, para avaliar a perda de massa de água. No presente estudo essas medições foram realizadas até a idade de 300 dias.



(a) Barra de invar - referência



(b) Medição no relógio comparador



(c) Pesagem da amostra



(d) Local de armazenamento das amostras

Figura 5.29: Etapas do ensaio de retração por secagem.

5.6.4 ENSAIOS AMBIENTAIS

Para avaliar o comportamento das argamassas e concretos mediante a presença de metais pesados em sua composição foram considerados quatro tipos de situação para as amostras serem ensaiadas: (1) amostras no estado íntegro; (2) ciclos de molhagem e secagem (3) amostras no estado demolido e (4) amostras queimadas a 1000°C. Posteriormente, ensaios de solubilização foram realizados nessas amostras para avaliar o desprendimento dos metais pesados. Para esses ensaios foram utilizadas apenas amostras das misturas de referência e com maior teor de aditivo mineral (amostras com 10% de aditivo mineral).

5.6.4.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Para esses ensaios foi moldado um prisma com dimensões de 40x40x160mm, de onde

após 28 dias de cura, foram carotados cilindros com diâmetro de 25,4mm e altura de 51mm, conforme mostra a Figura 5.30.



(a) Carotagem das amostras



(b) faceamento das amostras

Figura 5.30: Processo de carotagem e faceamento dos corpos-de-prova.

AMOSTRAS NO ESTADO ÍNTEGRO E DEMOLIDO

As amostras utilizadas para estes ensaios foram colocadas em estufa com circulação de ar, a uma temperatura de $38 \pm 1^\circ\text{C}$, onde permaneceram até constância de massa. Após esta etapa, corpos-de-prova íntegros, com dimensões de 2,54 cm de diâmetro e 5,1 cm de altura foram submetidos ao ensaio de solubilização (Ver Figura 5.31-a).

Para o ensaio no estado demolido, as amostras foram trituradas e o material passante pela peneira # 6,3mm foi submetido ao ensaio de solubilização (Ver Figura 5.31-b). Deve-se salientar que esta situação simula a condição do material após o término da vida útil.



(a) Estado íntegro



(b) Estado demolido

Figura 5.31: Amostras no estado íntegro e demolido.

CICLOS DE MOLHAGE E SECAGEM

Ciclos de molhagem e secagem foram realizados com o objetivo de simular situações reais de sol e chuva e com isso avaliar o desprendimento de metais pesados quando exposto a esta situação.

Após processo de cura, cinco cilindros de 25,4mm de diâmetro e 51,0mm de altura, para cada mistura, foram submetidos a 25 ciclos de molhagem e secagem (imersas em água por 24 horas e secas a $37^{\circ}\text{C} \pm$ por 48 horas). Ao final, foram realizados ensaio de solubilização nestas amostras.

AMOSTRAS QUEIMADAS A 1000°C

As amostras foram queimadas em uma mufla até a temperatura de 1000°C . A rampa de aquecimento foi de $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ e o tempo de residência de 1 hora. Optou-se por utilizar uma rampa de subida baixa para evitar o risco de fragmentação térmica, pois a intenção não foi simular uma situação de incêndio e sim avaliar o comportamento dos metais pesados após desidratação do C-S-H (Ver Figura 5.32).



(a) Mufla



(b) Amostras no interior do forno

Figura 5.32: Amostras submetidas a 1000°C.

6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

6.1 CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO

6.1.1 COMPATIBILIDADE ENTRE CIMENTO X SUPERPLASTIFICANTE

Na Figura 6.1 estão apresentadas às curvas referentes ao ensaio de compatibilidade entre o cimento CP II F 32 e o superplastificante Conplast SP430 à base de naftaleno sulfonado.

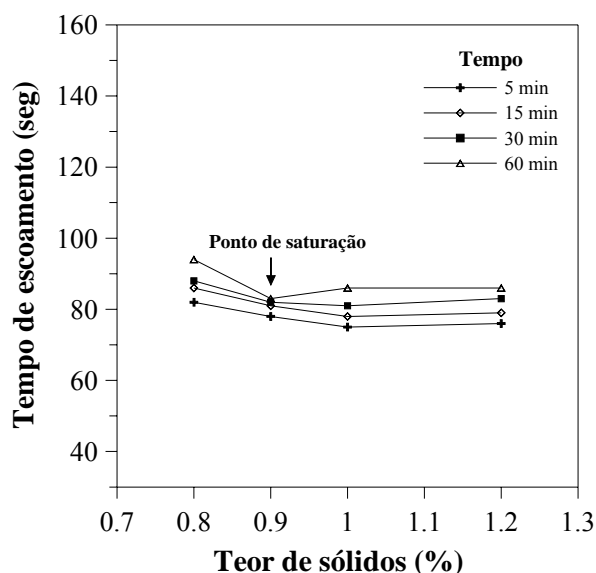


Figura 6.1: Curvas teor de sólidos x tempo de escoamento entre o cimento e o SP.

Os resultados mostram que entre 0,8% e 0,9% de teor de sólidos há uma redução do tempo de escoamento. Para 1% e 1,2% não se observa nenhuma alteração expressiva da reologia. Desta forma, o ponto de saturação do CP II-F 32 com o SP foi de 0,9%.

6.1.2 CONCRETOS CONTENDO CLE1 E CLE2

6.1.2.1 CONSISTÊNCIA

Na Tabela 6.1 estão apresentadas as consistências dos concretos contendo CLE1 e CLE2. Utilizando o mesmo teor de SP que as misturas CR60 e CLE1-5%, não foi possível realizar o ensaio de abatimento na mistura CLE1-10%, devido ao seu aspecto “muito seco”. Portanto, o teor de SP foi corrigido de 0,9% para 1,3% obtendo assim, um abatimento de 140mm. Para a mistura com 5% de CLE2, foi necessária a correção do teor de SP de 0,9 para 0,8% para que o abatimento permanecesse dentro da faixa estabelecida.

Tabela 6.1: Consistência das misturas.

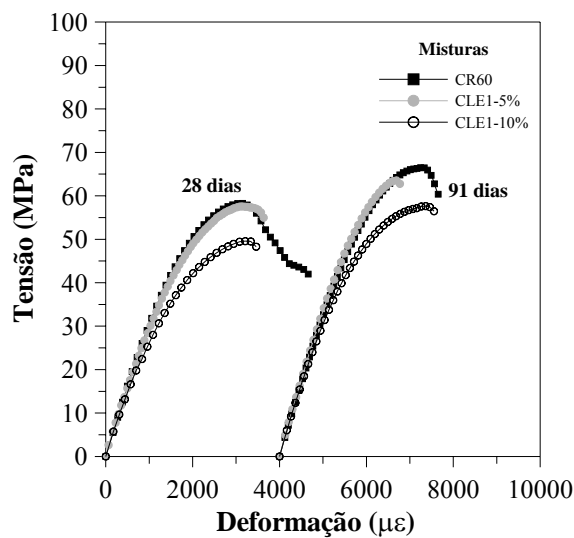
Misturas	Teor de sólidos de SP (%)	Abatimento (mm)
CR60	0,9	160
CLE1-5%	0,9	140
CLE1-10%	1,3	140
CLE2-5%	0,8	150
CLE2-10%	0,9	145

Verifica-se que todas as misturas apresentaram abatimento dentro dos valores estabelecidos ($150\text{mm} \pm 10\text{mm}$).

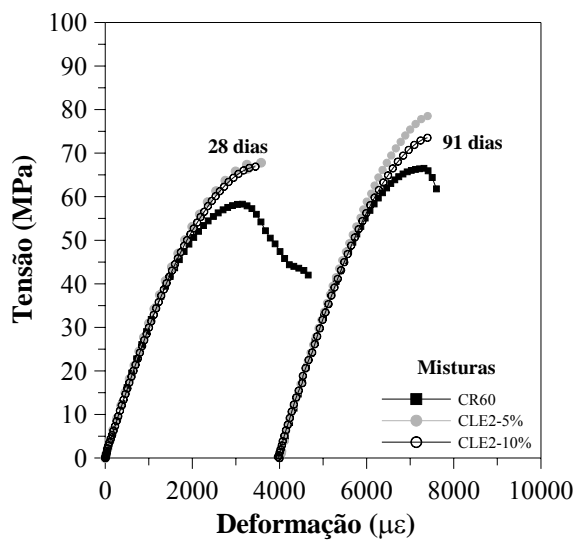
Resultados similares, só que em argamassas, foram obtidos por MONZÓ et al. (1996) e MONZÓ *et al.* (2003) para a CLE. Os referidos autores concluíram que a trabalhabilidade das misturas reduzia à medida que o teor de CLE aumentava. Eles associaram este comportamento à morfologia irregular das partículas de CLE e à alta absorção de água da sua superfície.

6.1.2.2 COMPORTAMENTO TENSÃO X DEFORMAÇÃO

Na Figura 6.2 estão apresentadas as curvas tensão x deformação e na Tabela 6.2 encontram-se as propriedades mecânicas das misturas com CLE1 e CLE2, aos 28 e 91 dias. Através das curvas tensão x deformação pode-se observar o acréscimo no ramo linear elástico das misturas com CLE2 comparado à CLE1. Tal comportamento foi obtido devido à maior resistência à compressão dessas misturas que contribuiu para a ruptura explosiva destes corpos-de-prova. Por isso, as misturas com CLE2 não apresentam pós-pico das curvas.



(a) Misturas com CLE1



(b) Misturas com CLE2

Figura 6.2: Gráficos de tensão x deformação das misturas.

Tabela 6.2: Propriedades mecânicas dos concretos com CLE1 e CLE2, aos 28 e 91 dias.

Misturas	Resistência à compressão (MPa) – C.V.		E (GPa) – C.V.		ϵ axial ($\mu\epsilon$) x 10^3 – C.V.		Rtd (MPa) aos 28 dias – C.V.	ν aos 28 dias – C.V.
	28 dias	91 dias	28 dias	91 dias	28 dias	91 dias		
CR60	59,5 – 3,98	65,9 – 0,86	31,5 – 1,87	32,6 – 1,92	3,04 – 3,58	3,25 – 3,48	4,8 – 11,53	0,20 – 7,42
CLE1-5%	58,0 – 2,28	63,2 – 0,77	30,5 – 1,98	33,8 – 1,5	3,05 – 4,49	2,74 – 1,29	4,69 – 13,64	0,18 – 1,79
CLE1-10%	50,2 – 5,2	56,4 – 2,97	28,1 – 2,79	30,8 – 2,7	3,08 – 3,67	3,06 – 9,00	4,71 – 12,35	0,20 – 5,18
CLE2-5%	68,4 – 1,08	74,7 – 4,68	30,2 – 3,11	32,9 – 2,07	3,41 – 0,36	2,88 – 1,69	5,46 – 10,32	0,21 – 8,03
CLE2-10%	66,4 – 5,29	70,9 – 5,43	30,1 – 2,61	31,6 – 2,47	3,52 – 2,17	3,16 – 11,47	4,90 – 11,05	0,20 – 4,84

6.1.2.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A evolução da resistência à compressão dos concretos com a idade estão apresentadas na Tabela 6.3 e ilustradas na Figura 6.3.

Tabela 6.3: Evolução da resistência à compressão com a idade, com seus respectivos coeficientes de variação (%).

Misturas	Resistência à compressão (MPa) – C.V. (%)					
	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias	365 dias
CR60	35,5 – 0,72	46,7 – 1,98	51,4 – 3,95	59,5 – 3,62	65,9 – 0,85	75,1 – 2,99
CLE1-5%	33,1 – 2,45	48,3 – 1,00	51,4 – 3,33	58,0 – 2,28	63,2 – 0,77	74,8 – 2,32
CLE1-10%	23,7 – 1,52	38,2 – 0,52	42,0 – 0,48	51,3 – 3,54	56,4 – 2,97	67,5 – 3,19
CLE2-5%	34,8 – 3,02	52,3 – 1,96	58,4 – 2,73	68,4 – 1,08	74,7 – 4,68	81,5 – 2,89
CLE2-10%	32,0 – 0,75	48,9 – 2,61	54,7 – 4,96	66,4 – 5,29	70,9 – 5,43	78,9 – 1,35

O concreto de referência foi dosado visando uma resistência à compressão, aos 28 dias, de 60MPa. Verifica-se que o resultado obtido para a referida mistura foi de 59,5MPa, indicando que o mesmo atendeu às especificações. Quando 5% de CLE1 foi incorporado à mistura, a resistência à compressão reduziu para 58,0MPa, mesmo assim, foi estatisticamente igual à referência. Utilizando 5% de CLE2, este parâmetro aumentou para 68,0MPa. Para o teor de 10%, a CLE1 apresentou valor de resistência à compressão de 51,3MPa, sendo este 13,8% inferior à mistura de referência. Para a CLE2 este valor foi de 66,4MPa, 11,6% maior que a referência. Apesar das duas cinzas terem a mesma procedência e composição química similares, a CLE2 proporcionou melhor comportamento, pois possui uma finura maior, além de teor de amorfos e IAP maiores quando comparado a CLE1.

GEYER (2001) avaliando a resistência à compressão em concretos obteve resultados inferiores à mistura de referência, para os mesmos teores de substituição. Este comportamento foi associado à baixa ação pozolânica da cinza.

Em relação à mistura de referência, nota-se que a resistência à compressão apresentou acréscimos e decréscimos desta propriedade nas demais idades (1, 3, 7, 91 e 365 dias). Este comportamento foi considerado significativo, somente, nas idades de 3 e 91 dias, para a mistura CLE1-5%. Para o teor de 10% a presença da CLE1 propiciou reduções

significativas na resistência à compressão, para todas as idades, em relação à mistura de referência. Contudo, verificou-se que, ao longo do tempo, essa diferença decresceu de 33,6% (1 dia) para 10,1% aos 365 dias.

A redução da resistência à compressão para as misturas com 5% e 10% de CLE1 pode ser atribuída à baixa reatividade da CLE1.

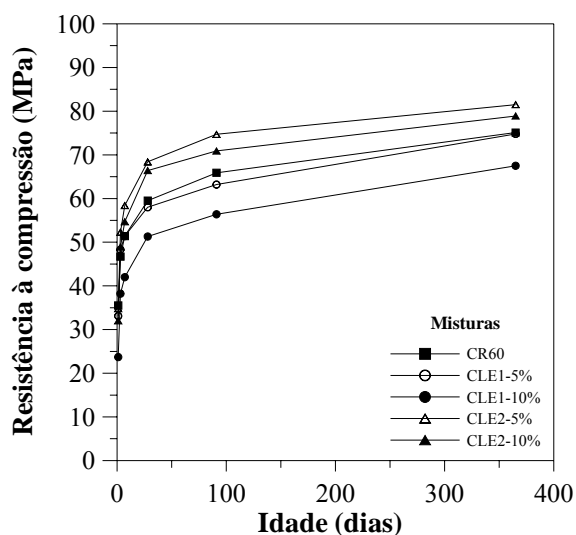


Figura 6.3: Evolução da resistência à compressão com a idade, para as misturas contendo CLE1 e CLE2.

Para as misturas CLE2-5% e CLE2-10%, verifica-se o acréscimo de resistência à compressão com a idade, em relação à referência, exceção para a idade de 1 dia, onde decréscimo de, respectivamente, 2% e 10% foram observados. Após o teste de Tukey, pode-se dizer que a presença de 5% de cinza não foi significativa somente nas idades de 1 e 3 dias comparada à mistura CR60. Com relação à mistura com 10% de CLE2, diferenças estatísticas foram obtidas aos 1, 3 e 28 dias em relação à mistura de referência. O comportamento do concreto com CLE2 em relação ao CR60 pode estar associado, provavelmente, à finura do material que propiciou a atuação da cinza como agente nucleador dos grãos anidros do cimento durante a hidratação da mistura e a presença de alguma reatividade devido ao valor do IAP.

Com relação ao teor, as misturas CLE1-5% e CLE1-10% foram consideradas significativamente diferentes entre si, para todas as idades. O mesmo não aconteceu para a CLE2, onde para as idades de 7, 28 e 91 dias essas misturas foram consideradas

iguais.

Avaliando o tipo de cinza, o teste de Tukey indicou que a resistência à compressão das misturas com 10% de CLE1 foi considerada significativamente diferente das misturas com 10% de CLE2, para todas as idades. O mesmo comportamento foi verificado para o teor de 5% de cinza. Exceção para a idade de 1 dia. Com relação ao teor, diferenças foram observadas nas idades de 1 e 3 dias entre 5% e 10% de CLE2.

Dentro deste contexto, nota-se que a CLE2 proporcionou aos concretos valores de resistência à compressão superiores aos concretos com CLE1. A melhoria deste parâmetro pode ser atribuída a três fatores: (1) a diferença de granulometria entre as duas cinzas provavelmente propiciou uma melhor ação física da CLE2; (2) a CLE1 apresentou um teor de amorfos inferior ao da CLE2, o que indica uma menor reatividade do material e (3) o IAP da CLE1 foi menor que o da CLE2. A atuação dessas três ações pode talvez, ter proporcionado esta diferença de resistência à compressão entre os concretos contendo CLE2 e CLE1.

MÓDULO DE ELASTICIDADE

Na Figura 6.4 encontram-se os valores dos módulos de elasticidade para as misturas contendo CLE1 e CLE2, aos 28 e 91 dias, além da mistura de referência.

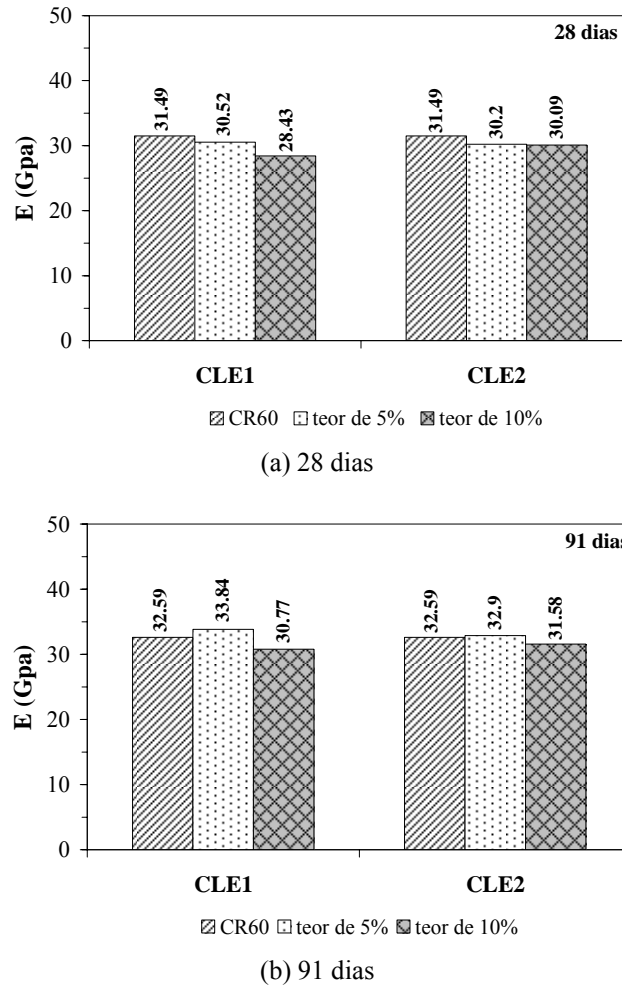


Figura 6.4: Influência da CLE1 e CLE2 no módulo de elasticidade dos concretos.

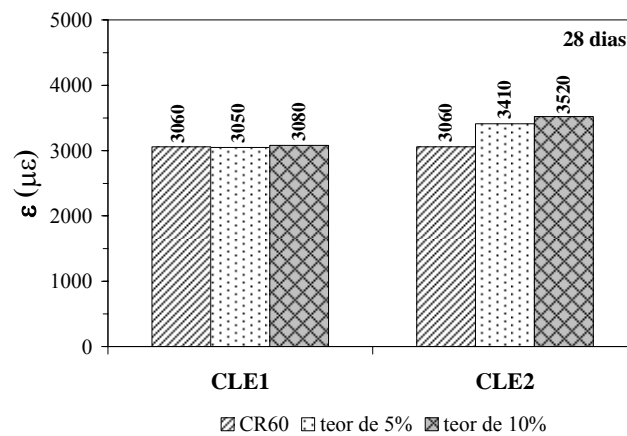
Analisando os resultados obtidos, verifica-se que a presença de CLE1 ou de CLE2 não propiciou variação expressiva deste parâmetro para as duas idades quando comparado à mistura CR60. Exceção para a CLE1-10%, que apresentou decréscimos de 9,7% aos 28 dias e 5,6% aos 91 dias, em relação à referência. Estatisticamente, somente esta mistura, nas duas idades, diferiu significativamente da referência.

Com relação ao teor, a presença de 5% ou de 10% de CLE2 não interferiu nesta propriedade. Porém, o mesmo não aconteceu para CLE1, onde 5% e 10% de cinza

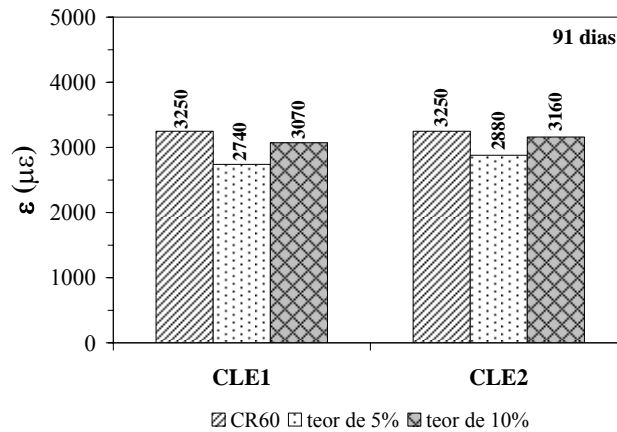
foram consideradas diferentes entre si. Entre as idades, os módulos de elasticidade obtidos aos 28 dias foram estatisticamente diferentes aos 91 dias, para cada mistura. Exceção para as misturas CLE2-10% e CR60. Quanto ao tipo de cinza, a incorporação de 5% de CLE1 foi considerada igual a 5% de CLE2 para esta propriedade, nas idades de 28 e 91 dias. O mesmo comportamento foi obtido para o teor de 10%.

DEFORMAÇÃO DE PICO

A Figura 6.5 apresenta as deformações de pico das misturas de referência e com cinza, aos 28 e 91 dias.



(a) 28 dias



(b) 91 dias

Figura 6.5: Influência da CLE1 e CLE2 na deformação de pico das misturas.

Analisando os resultados de deformação em relação à referência, nota-se que aos 28 dias, a incorporação de 5% ou de 10% de CLE1 não promoveu variação deste

parâmetro. Para a CLE2 acréscimos de 11,4% e 15% foram observados para os teores de 5% e 10% de substituição, respectivamente. Aos 91 dias, reduções da deformação foram obtidas para as duas cinzas, nos dois teores de substituição, comparada à referência. Os valores reduzidos de deformação apresentados para as misturas CLE2-5% e CLE2-10% quando comparado aos 28 dias foi atribuído à ruptura frágil das misturas que, por conseguinte, não propiciou a formação total da curva tensão x deformação (Ver Figura 6.2). Portanto, não foi feita análise estatística para essas misturas, aos 91 dias. O teste de Tukey indicou que, apenas, o concreto CLE1-5% foi considerado significativamente diferente do concreto CR60, aos 91 dias.

Com relação ao teor de 5% e 10% de CLE1 ou de CLE2, os valores de deformação foram considerados iguais entre si.

Entre as idades, os módulos obtidos aos 28 dias foram significativamente iguais aos 91 dias, para cada mistura. Exceção para a mistura CLE2-5%.

Quanto ao tipo de cinza, as misturas com 5% de CLE1 foram consideradas significativamente diferentes às misturas com 5% de CLE2, aos 28 e 91 dias. O mesmo comportamento foi obtido para as misturas com 10% de cinza, nas referidas idades.

COEFICIENTE DE POISSON

Na Figura 6.6 encontra-se os valores do coeficiente de Poisson para as misturas de referência e com CLE1 e CLE2, aos 28 dias.

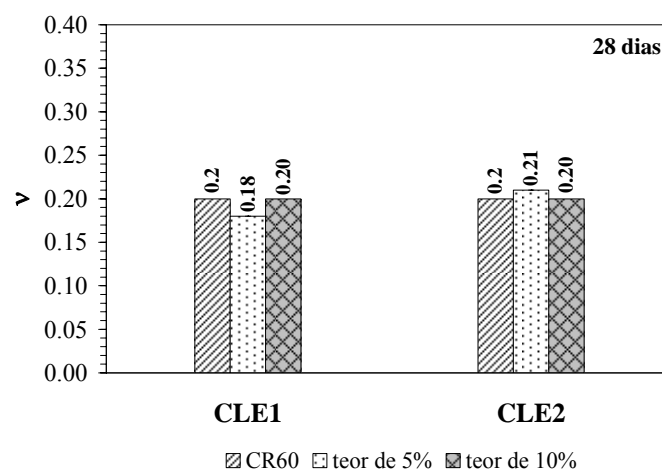


Figura 6.6: Influência da CLE1 e CLE2 no coeficiente de Poisson das misturas.

Observa-se que não houve variação expressiva do coeficiente de Poisson entre as misturas com CLE1 e CLE2, em relação à referência.

As misturas CLE1-5% e CLE2-5% apresentaram, respectivamente, decréscimo de 10% e acréscimo de 5% no coeficiente de Poisson, em relação à mistura de referência. Para as misturas com 10% de CLE1 e CLE2, esse parâmetro não variou. Estatisticamente, as misturas com CLE1 e CLE2 foram consideradas iguais à mistura CR60.

Quanto ao teor de cinza, a mistura CLE1-5% foi considerada significativamente diferente da mistura CLE1-10%. As misturas CLE2-5% e CLE2-10% foram consideradas iguais entre si. Com relação ao tipo de cinza, pode-se dizer que a utilização de diferentes cinzas (CLE1 e CLE2), para um mesmo teor, não alterou significativamente essa propriedade.

6.1.2.4 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Na Figura 6.7 estão apresentados os resultados de resistência à tração por compressão diametral (R_{tcd}) para as misturas de referência e com CLE, aos 28 dias.

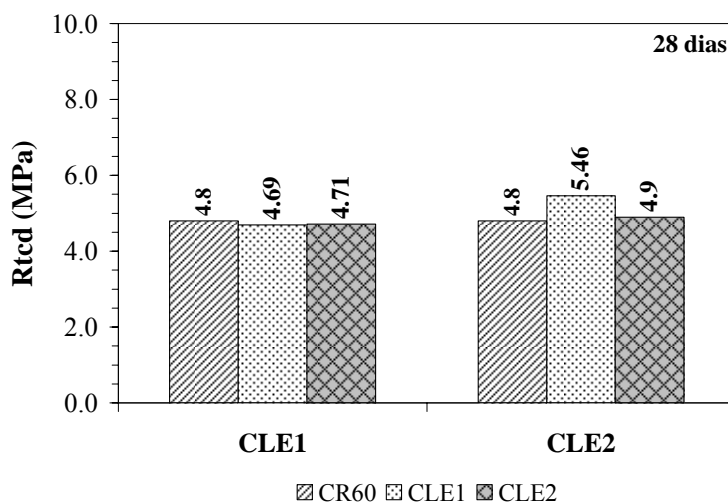


Figura 6.7: Influência dos aditivos minerais na R_{tcd} das misturas, aos 28 dias.

De um modo geral, verifica-se que a R_{tcd} das misturas com cinza apresentaram comportamento similar a R_c , em relação à referência. Ou seja, a presença da CLE1 propiciou ligeira redução deste parâmetro. Em contrapartida, a CLE2 contribuiu para o

aumento da R_{tcd} sendo, este, mais expressivo para a mistura CLE2-5% ($\cong 14,0\%$).

A R_{tcd} para as misturas com CLE1 apresentou valores inferiores a 2,5% da mistura de referência. A análise de variância indicou que a presença da CLE1 não influenciou essa propriedade mecânica. O mesmo comportamento foi encontrado por FONTES (2003).

As misturas com CLE2 apresentaram com acréscimos de 14% para CLE2-5% e 2% para CLE2-10%, sendo esta última considerada igual à CR60.

Com relação ao teor de CLE, as misturas com 5% e 10% de cinza foram consideradas significativamente iguais entre si para as duas cinzas. Quanto ao tipo de cinza, estatisticamente, 10% de CLE1 e de CLE2 foram consideradas iguais entre si. O mesmo não aconteceu para o teor de 5% de cinza.

RELAÇÃO ENTRE R_{TCD} E R_C

OLUOKUN (1991) *apud* NEVILLE (1997) e DE LARRAD (1999) propuseram, inicialmente, uma relação entre R_{tcd} e resistência à compressão (R_c) para concretos. Porém, pelo fato dessa relação atender a concretos com R_c de até 60MPa, modificações foram sugeridas por DE LARRAD (1999) onde após várias análises, chegou a Equação 6.1, com erro médio de 0,3MPa.

$$R_{tcd} = 0,468 \times R_c^{0,57} \quad (6.1)$$

Além da relação proposta por DE LARRAD (1999) foi utilizada, também, a relação proposta pelo ACI 363 (1984), para concretos com resistência à compressão entre 21 e 83 MPa (Ver Equação 6.2).

$$R_{tcd} = 0,59 \times R_c^{0,5} \quad (6.2)$$

No presente estudo foram utilizadas estas duas relações visando avaliar os resultados de R_{tcd} obtidos experimentalmente com os propostos por DE LARRAD (1999) e ACI 363 (1997). Na Tabela 6.4 estão apresentados os resultados referentes à R_c , R_{tcd} experimental e teórico.

Tabela 6.4: Resultados de R_{tcd} e R_c , com seus respectivos coeficientes de variação (%) e as relações entre R_{tcd} e R_c .

Misturas	R_c (MPa)	R_{tcd} experimental (MPa)	Relações entre R_{tcd} e R_c (teórico)	
			DE LARRAD (1999)	ACI 363 (1984)
CR60	59,2 – 3,45	4,80 – 11,53	4,79	4,54
CLE1-5%	58,0 – 2,28	4,69 – 13,64	4,74	4,49
CLE1-10%	50,2 – 5,2	4,71 – 12,35	4,36	4,18
CLE2-5%	68,4 – 1,08	5,46 – 10,32	5,20	4,88
CLE2-10%	66,4 – 5,29	4,90 – 11,05	5,12	4,81

Analisando os resultados obtidos para os concretos do presente estudo (Ver Tabela 6.4), pode-se dizer que os mesmos apresentaram valores de R_{tcd} dentro da faixa de dados ($R_{tcd} \pm 0,3\text{MPa}$) proposta por DE LARRAD (1999). Com relação ao ACI (1984), estes apresentaram decréscimos de até 11% na R_{tcd} , comparada aos valores experimentais. Este comportamento mostra que os fatores obtidos por DE LARRAD (1999) apresentaram melhor correlação com o presente estudo.

6.1.2.5 ENSAIO DE ABSORÇÃO POR IMERSÃO E CAPILARIDADE

Na Tabela 6.5 estão apresentados os resultados referentes aos ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica das misturas.

Tabela 6.5: Absorção de água, índice de vazios e massa específica das misturas.

Misturas	Absorção de água por imersão – C.V. (%)	Índice de vazios – C.V. (%)	Massa específica (g/cm^3) – C.V. (%)	Absortividade ($\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{t}^{1/2}$)		
				Pt	Estágio 1	Estágio 2
CR60	1,61 – 3,70	3,80 – 3,55	2,36 – 0,19	4,53	0,0332	0,0122
CLE1-5%	1,54 – 3,88	3,64 – 3,77	2,35 – 0,18	4,53	0,0217	0,0102
CLE1-10%	1,54 – 9,59	3,61 – 9,15	2,34 – 0,40	4,53	0,0256	0,0126
CLE2-5%	0,87 – 5,31	2,09 – 5,19	2,40 – 0,12	2,24	0,0143	0,0089
CLE2-10%	0,83 – 0,42	1,97 – 0,53	2,38 – 0,11	2,24	0,0141	0,0097

Inicialmente verifica-se que a incorporação de CLE reduziu a absorção de água e o índice de vazios das misturas, sendo este comportamento mais expressivo ($\cong 48,0\%$)

para as misturas contendo CLE2, em relação à de referência. A absorvidade também apresentou este mesmo comportamento, sendo as misturas com 5% e 10% de CLE2 as que apresentaram menores ganhos de água no tempo, para os dois estágios. Em contrapartida, para a massa específica praticamente não houve variação expressiva deste parâmetro, entre as misturas com cinza e a referência.

Os decréscimos obtidos nos valores de absorção de água por imersão e índice de vazios obtidos para as misturas CLE1-5% e CLE1-10% não foi refletido na resistência à compressão dessas misturas. A análise estatística demonstrou que a incorporação da CLE1 nas misturas não promoveu alteração significativa desses parâmetros, o que explica tal comportamento.

Outros autores (TAY, 1987; TAY *et al.*, 2002 e GEYER, 2001) não verificaram alteração da absorção de água quando 20% de cimento foi substituído por CLE. Este comportamento foi associado à granulometria dos materiais (cimento e cinza) usados nos estudos de cada um dos autores citados.

A mistura com 5% de CLE2 apresentou redução de 46% em relação à mistura de referência, para os ensaios de absorção de água e índice de vazios. Para a mistura com 10% de cinza esse decréscimo aumentou para 48%. O teste de Tukey indicou que os valores médios das misturas com CLE2 são significativamente diferentes da mistura de referência. Essa redução expressiva no índice de vazios, atribuída à presença da cinza, elevou a resistência à compressão destas misturas, em relação à referência. A redução da resistência à compressão à medida que o teor de CLE2 aumenta, pode ter sido ocasionado pelo fato da CLE2 ser um material com baixa atividade pozolânica.

Comparando as massas específicas das misturas CR60, CLE1-5% e CLE1-10%, estas foram consideradas iguais entre si. Para as misturas contendo CLE2, apesar das diferenças serem pequenas, inferiores a 2%, mesmo assim, estes foram considerados significativamente diferentes da mistura CR60.

Com relação ao teor de cinza, a presença de 5% ou de 10% de CLE1 ou de CLE2, não influenciou significativamente nessas propriedades. Quanto ao teor, verificou-se que 5% e 10% de CLE1 ou de CLE2 não promovem diferenças significativas para as três propriedades analisadas.

Na Figura 6.8 encontram-se os gráficos de ganho de massa de água em função do tempo para todas as misturas.

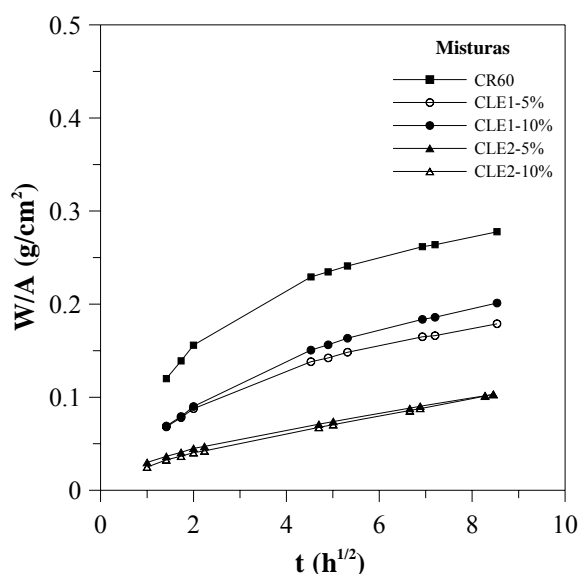
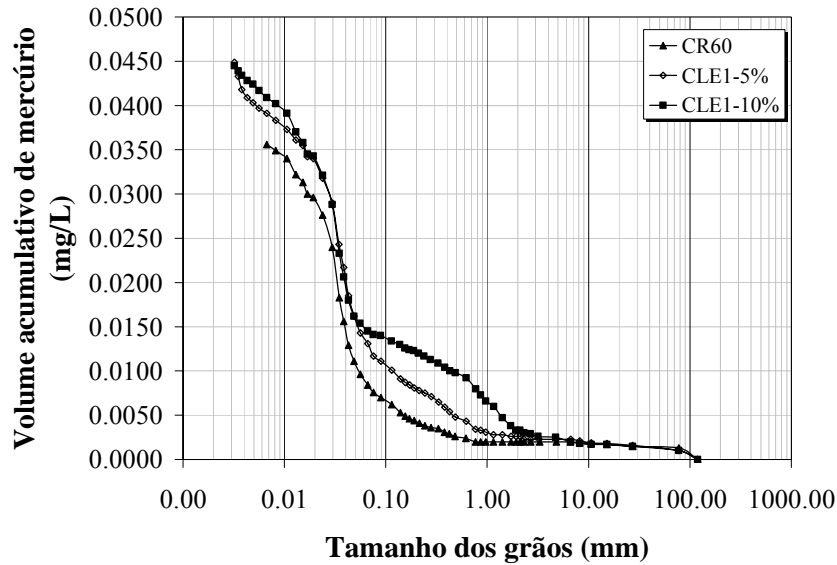


Figura 6.8: Influência da CLE1 e CLE2 no ganho acumulativo de massa no tempo para as misturas.

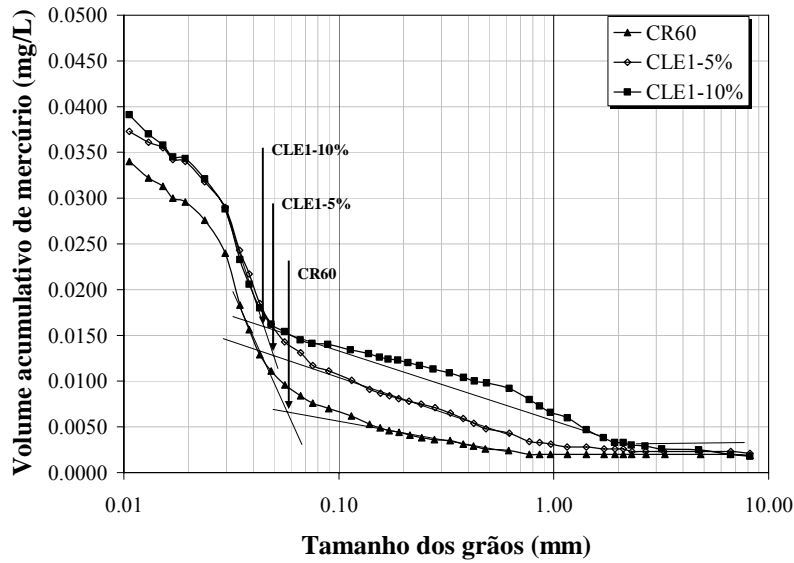
A Tabela 6.5 mostra que o ponto de transição da CLE1 foi de 4,53h e da CLE2 foi de, apenas, 2,24h. Isto demonstra que as misturas com CLE2 entraram no estágio 2 (estágio de saturação) mais rápido que as misturas com CLE1, indicando a possibilidade do refinamento na estrutura de poros ser maior para a mistura com CLE2, comparado a CLE1.

Com relação à absorvidade, as misturas com 5% e 10% CLE1 apresentaram, no estágio 1, valores inferiores à mistura CR60, em torno de 35% e 23%, respectivamente. Estatisticamente, essa redução foi considerada significativa somente para a mistura CLE1-5% em relação à referência. No estágio 2, houve pequena variação da absorvidade entre as misturas CR60, CLE1-5% e CLE1-10%, no entanto, sendo consideradas estatisticamente iguais entre si. As misturas com 5% e 10% de CLE2 promoveram reduções da absorvidade mais significativas que a CLE1 tanto no estágio 1 quanto no estágio 2, quando comparada à referência. Este comportamento foi significativo, nos dois estágios, em relação à mistura de referência.

Na Figura 6.9 encontra-se a porosimetria por intrusão de mercúrio das misturas de referência e com CLE1.



(a) Porosimetria por intrusão de mercúrio: CR60, CLE1-5% e CLE1-10%



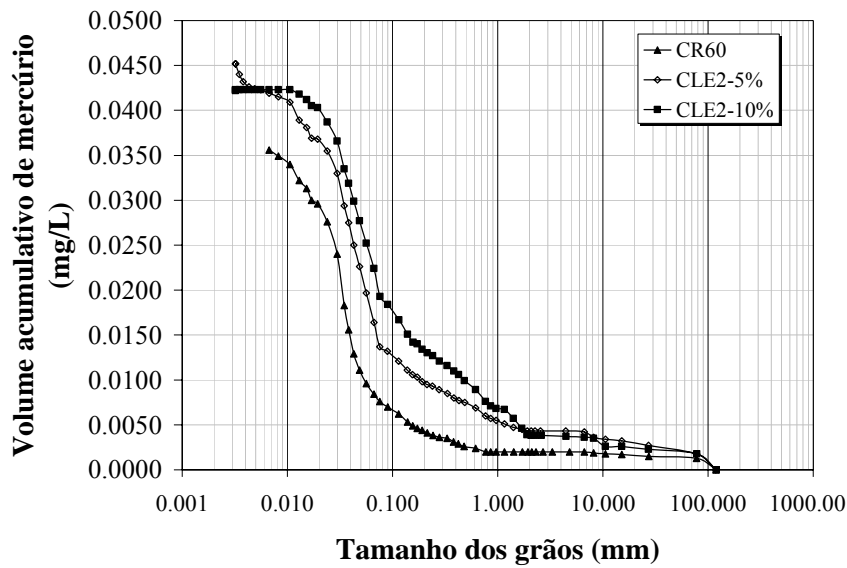
(b) Ampliação da Figura 6.9 (a).

Figura 6.9: Porosimetria por intrusão de mercúrio: CR60 e CLE1.

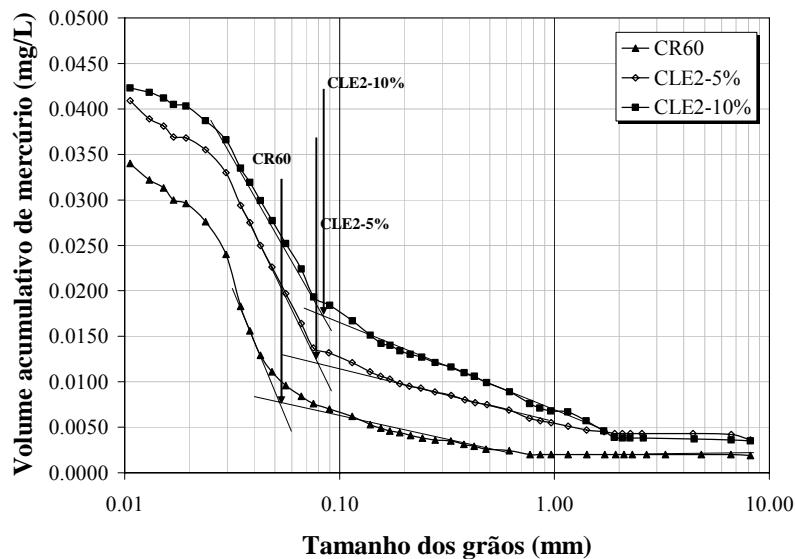
Uma das características do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio é a existência de um diâmetro, designado como diâmetro “crítico” (d_c), a partir do qual a intrusão de mercúrio passa a ser considerada significativa. De acordo com LIU *et al.* (1995), a depender do comportamento da curva, em função dos dados experimentais, o “ d_c ” pode ser determinado facilmente. Porém, em muitos casos o diâmetro pode

aparecer entre dois dados experimentais. Nesta situação, tangentes devem ser traçadas a partir do menor e maior diâmetro em que a intrusão não é considerada significativa e isto foi feito no presente estudo.

Na Figura 6.9 (b), nota-se que o diâmetro crítico das misturas de referência e com 5% e 10% de CLE1 são, respectivamente, 0,059 μm , 0,049 μm e 0,045 μm . Na Figura 6.10 encontra-se a porosimetria por intrusão de mercúrio das misturas de referência e com CLE2.



(a) Porosimetria por intrusão de mercúrio: CR60, CLE2-5% e CLE2-10%



(b) Ampliação da Figura 6.10 (a)

Figura 6.10: Porosimetria por intrusão de mercúrio: CR60 e CLE2.

Analisando a porosimetria por intrusão de mercúrio destas misturas, observou-se que o diâmetro crítico das misturas de referência e com 5% e 10% de CLE2 foram de, respectivamente, 0,06 μm , 0,08 μm e 0,085 μm .

Tabela 6.6: Distribuição do tamanho de poros das misturas de referência e com CLE1 e CLE2.

Misturas	Volume de mercúrio (%)			
	Pequenos capilares (0,0025 < ϕ < 0,01 μm)	Médios capilares (0,01 < ϕ < 0,05 μm)	Grandes capilares (0,05 < ϕ < 10 μm)	> 10,0 μm
CR60	9,83	63,48	21,91	4,78
CLE1-5%	19,47	48,23	28,10	4,20
CLE1-10%	16,40	48,99	30,56	4,04
CLE2-5%	13,72	42,48	36,73	7,08
CLE2-10%	1,19	39,29	53,33	6,19

Com base nos resultados obtidos pode-se dizer que a presença da CLE1 proporcionou um refinamento da estrutura de poros devido à redução do diâmetro crítico em relação à referência. Porém, o mesmo não aconteceu para a mistura CLE2. A partir dos dados apresentados na Tabela 6.6, verifica-se que as misturas com CLE2 não demonstram o refinamento na estrutura de poros esperado, quando comparada à CLE1 e a referência. Sabe-se que a porosimetria por intrusão de mercúrio é uma técnica analítica que tem como desvantagem a possibilidade de quebra dos grãos durante a realização do ensaio em função da pressão aplicada para intrudir o mercúrio na amostra. Este fato traz como consequência a modificação de toda a estrutura de poros do material. Isto pode explicar a distribuição de tamanho de poros obtida para a CLE2, principalmente para a mistura com 10% de cinza. O pequeno percentual de microporos e o acréscimo no percentual de macroporos confirmam tal comportamento quando comparado à mistura CLE2-5%.

Dentro deste contexto, verifica-se que a presença da CLE1 proporcionou a redução dos médios capilares, aumentando a concentração de pequenos capilares, sendo este mais significativo para o teor de 5% de cinza. Tal comportamento propiciou a redução da absorvidade, através da desconectividade entre os poros. Para a CLE2-5% apesar do aumento nos pequenos capilares, este comportamento não condiz com os resultados obtidos para a resistência à compressão. Para os mesmos serem coerentes, os grandes capilares que influenciam diretamente na resistência à compressão teriam que apresentar

valores inferiores aos das misturas com CLE1 e de referência, aumentando o volume de pequenos capilares. O mesmo vale para a mistura CLE2-10%.

6.1.2.6 PENETRAÇÃO ACELERADA POR ÍONS CLORO

Na Figura 6.11 encontram-se os valores do ensaio de penetração acelerada por íons cloreto realizados nas misturas de referência e com CLE, aos 28 dias.

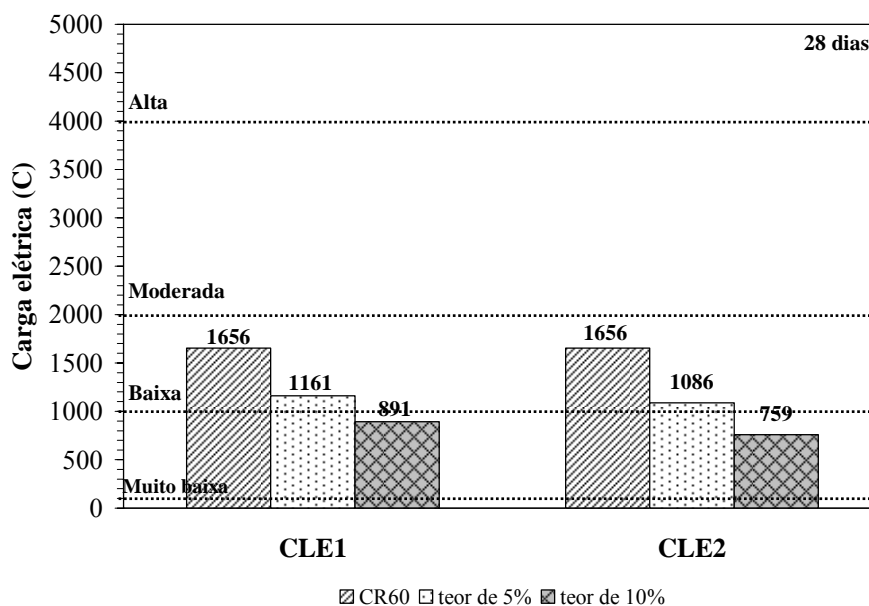


Figura 6.11: Influência da CLE1 e CLE2 no ensaio de penetração acelerada por cloretos das misturas.

Através dos resultados apresentados verifica-se que à medida que o teor de CLE1 ou CLE2 aumenta, a penetração acelerada de íons cloro reduz. Essas reduções foram de 30%, 46%, 34% e 54%, para as misturas CLE1-5%, CLE1-10%, CLE2-5% e CLE2-10%, respectivamente. De acordo com a ASTM C 1202 (1997), os concretos CR60, CLE1-5% e CLE2-5% foram classificados como de *baixa* penetração aos íons cloro. Os concretos CLE1-10% e CLE2-10% foram classificados como de penetração *muito baixa* aos íons cloro, indicando a redução da porosidade das misturas na presença dos aditivos minerais.

Com relação à influência da granulometria das cinzas, verifica-se que a CLE2 proporcionou uma resistência maior à penetração dos íons cloro, apesar das duas cinzas

apresentarem a mesma classificação.

6.1.2.7 PERMEABILIDADE A GÁS

Na Figura 6.12 estão apresentados os resultados referentes ao ensaio de permeabilidade realizados nas misturas de referência e com CLE1 e CLE2, aos 28 dias.

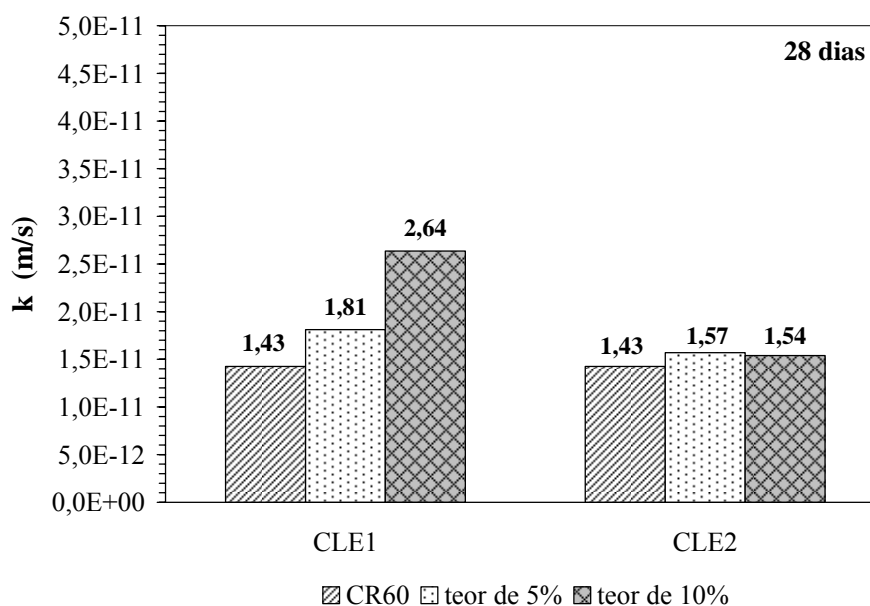


Figura 6.12: Influência da CLE1 e CLE2 na permeabilidade das misturas.

Apesar de haver uma tendência de aumento da permeabilidade das misturas à medida que o teor de CLE1 aumenta essa diferença não foi relevante, visto que os resultados estatísticos indicaram que não há influência significativa entre as misturas CR60, CLE1-5% e CLE1-10%. Para as misturas contendo CLE2, ligeiro acréscimo desta propriedade foi observado CLE2-5%, em relação à referência. Para a mistura CLE2-10%, ocorreu um decréscimo de 9%. Apesar de não serem expressivos, a incorporação de CLE2 influenciou menos que o CLE1 nesta propriedade para os dois teores de substituição.

Com relação ao teor e tipo de cinza nenhuma significância foi encontrada entre os valores das misturas.

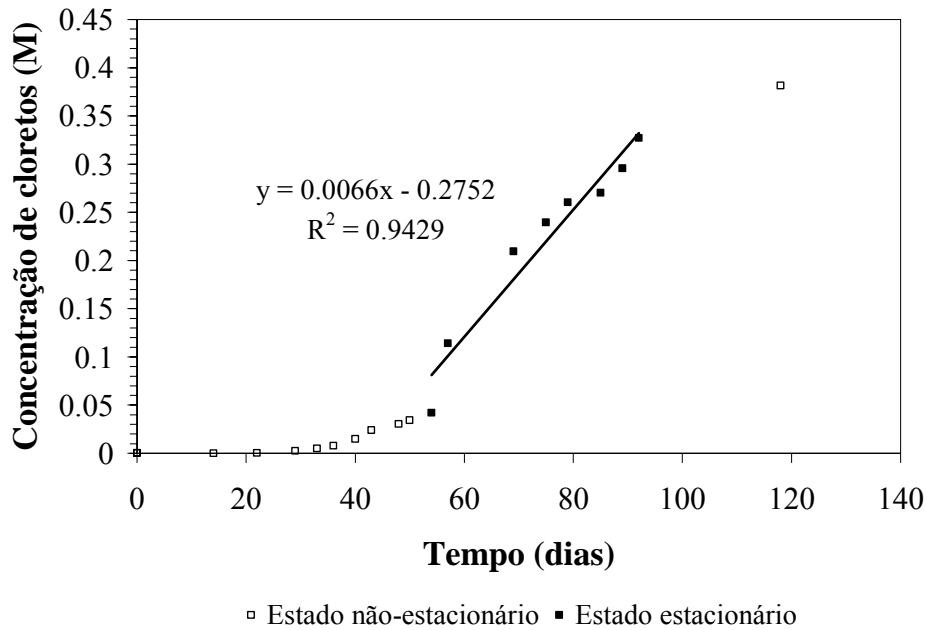
Os resultados obtidos para todos os parâmetros físicos e de durabilidade demonstraram

que a presença tanto da CLE1 como da CLE2 propiciaram o refinamento da estrutura de poros do material através da redução no volume dos médios capilares e aumento nos pequenos capilares. Para a CLE1 o comportamento foi mais expressivo para o teor de 5% de cinza. No entanto, para a CLE2, o comportamento dos concretos superou significativamente o de referência para os dois teores de substituição. O maior teor de finos e índice de atividade pozolânica da CLE2 em relação a CLE1 contribuiu para este comportamento. Sendo assim, a presença desses aditivos minerais nos concretos pode vir a tornar o material mais durável.

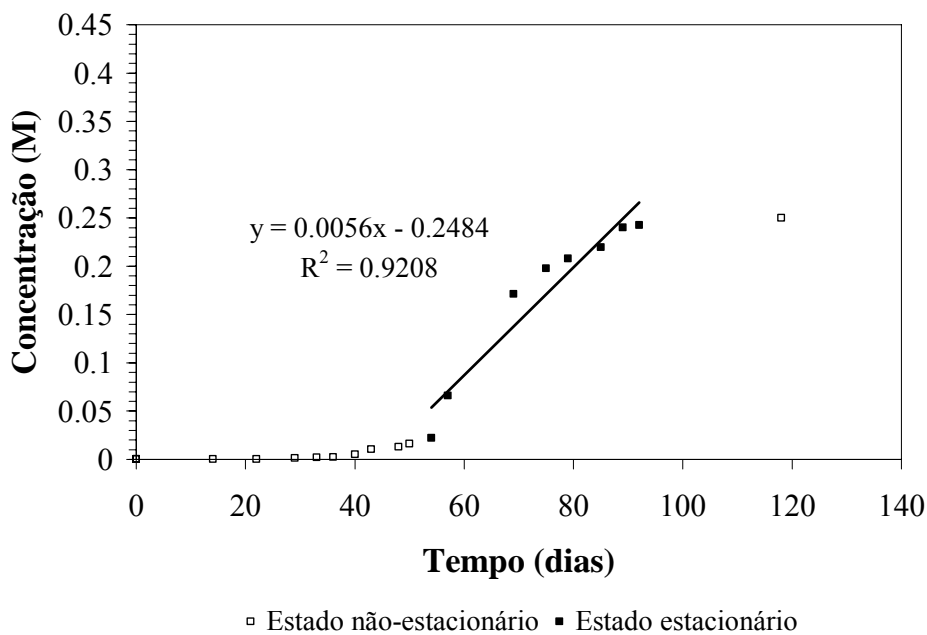
6.1.3 ENSAIOS ADICIONAIS REALIZADOS COM A CLE1

6.1.3.1 MIGRAÇÃO IÔNICA

Na Figura 6.13 estão apresentadas as curvas de migração iônica obtidas para as misturas CR60, CLE1-5% e CLE1-10%.



(a) CR60



(b) CLE1-5%

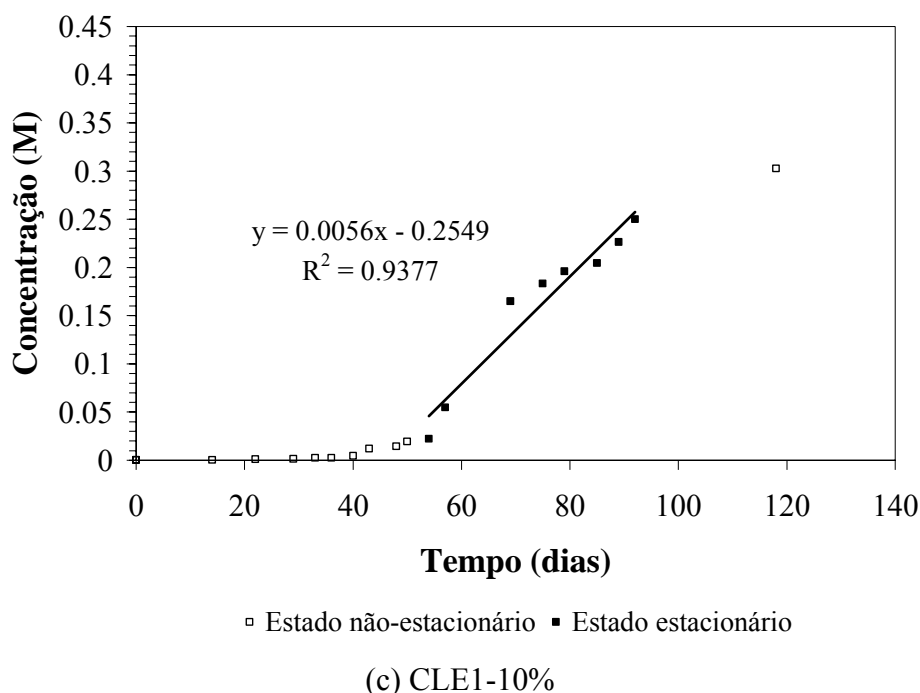


Figura 6.13: Influência da CLE1 na migração iônica dos concretos.

Analisando os resultados verifica-se que o concreto CR60 apresentou uma maior concentração de cloretos quando comparado às misturas CLE1-5% e CLE1-10%. Este comportamento demonstra que a presença da cinza, provavelmente, reduziu a conectividade e tortuosidade entre os poros, dificultando o ingresso dos íons cloro através das amostras. Aos 54 dias, início do estado estacionário (onde o fluxo se torna constante), a mistura de referência apresentou uma concentração de cloretos de 0,042M, enquanto as misturas com 5% e 10% de CLE1 apresentaram-se iguais, sendo este de 0,022M. Ao final do estado estacionário, aos 92 dias, essas concentrações passaram para, respectivamente, 0,33M, 0,24M e 0,25M, o que mostra o benefício proporcionado pela cinza, nesta propriedade. Este comportamento é um indicativo de que a cinza pode vir a contribuir para o aumento na durabilidade do material.

Com relação ao teor de substituição de cimento por CLE1, pode-se dizer que 5% ou 10% apresentaram a mesma tendência de comportamento.

Tabela 6.7: Resultados de fluxo e coeficiente de difusão obtidos para as misturas CR60, CLE1-5% e CLE1-10%

Misturas	J (mol/cm².s)	D (cm²/s)
CR60	$2,67 \times 10^{-9}$	$2,86 \times 10^{-8}$
CLE1-5%	$2,27 \times 10^{-9}$	$2,43 \times 10^{-8}$
CLE1-10%	$2,27 \times 10^{-9}$	$2,43 \times 10^{-8}$

Os resultados de coeficiente de difusão dispostos na Tabela 6.7, podem ser comparados aos obtidos por YANG (2006). O referido autor utilizou um concreto (C30), com dosagem próxima a do presente estudo e obteve um “D” de $3,48 \times 10^{-8}$ cm²/s, que não difere muito do valor apresentado pelo CR60, validando os resultados obtidos para a CLE1.

6.1.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS CONCRETOS COM CLE1 E CLE2

Com base nos ensaios de caracterização das CLE1 e CLE2 e nas análises dos resultados obtidos para concretos produzidos com as referidas cinzas pode-se dizer que:

As CLE1 e CLE2, após ensaios de lixiviação e solubilização foram classificadas como resíduo classe II-A: não inerte, sendo necessário, portanto, uma disposição adequada e segura dessas cinzas de modo a impedir que os metais pesados presentes em suas composições sejam desprendidos para o meio ambiente.

CONCRETOS NO ESTADO FRESCO

Quando incorporada aos concretos, verificou-se a redução do abatimento, sendo necessário a utilização de SP para corrigir o abatimento das misturas para $150\text{mm} \pm 10\text{mm}$, valor este previamente definido durante a dosagem dos concretos desta pesquisa.

RESISTÊNCIA MECÂNICA

Os pequenos decréscimos observados aos 7 e 28 dias não influenciaram significativamente na incorporação de 5% de CLE1 na mistura de referência. O mesmo não aconteceu para CLE1-10%, sendo considerada estatisticamente diferente da referência para todas as idades (1, 3, 7, 28, 91 e 365 dias). Porém, ao longo do tempo verificou-se que essa diferença decresceu de 33,6% (1 dia) para 10,1%, aos 365 dias. Este comportamento da CLE1 foi atribuído à baixa atividade pozolânica da cinza.

A utilização de CLE2 se comportou de modo contrário à CLE1, apresentando valores de resistência à compressão superiores à referência. Apenas nas idades de 1 e 3 dias o teor de 5% de cinza foi considerado estatisticamente diferente da mistura CR60. Com relação à mistura com 10% de CLE2, diferenças estatísticas foram obtidas aos 1, 3 e 28 dias em relação à mistura de referência. O comportamento do concreto com CLE2 em relação ao CR60 pode estar associado, provavelmente, à finura do material que propiciou a atuação da cinza como agente nucleador dos grãos anidros do cimento durante a hidratação da mistura e a presença de alguma reatividade devido ao valor do IAP.

Os valores superiores de resistência à compressão obtidos para a CLE2 em relação a CLE1 foi atribuído a três fatores: (1) a diferença de granulometria entre as duas cinzas,

provavelmente, propiciou uma melhor ação física da CLE2; (2) a CLE1 apresentou um teor de amorfos inferior ao da CLE2, o que indica menor reatividade do material e (3) o IAP da CLE1 foi menor que o da CLE2. A atuação dessas três ações pode talvez, ter proporcionado esta diferença de resistência à compressão entre os concretos contendo CLE2 e CLE1.

Com relação à resistência à tração por compressão diametral pode-se dizer que a presença da CLE1 não influenciou este parâmetro. A CLE2 apresentou valores superiores à referência, sendo considerados estatisticamente diferentes. Esta propriedade seguiu a mesma tendência de comportamento da resistência à compressão.

Para o módulo de elasticidade, a presença de 5% de CLE1 e 5% e 10% de CLE2 não influenciaram significativamente neste parâmetro, nas idades de 28 e 91 dias, comparado à referência. O mesmo não aconteceu para a mistura CLE1-10% onde os decréscimos foram estatisticamente diferentes da mistura CR60.

Os resultados de deformação indicaram que aos 28 dias, a incorporação de 5% ou de 10% de CLE1 não promoveu variação deste parâmetro, em relação à referência. Para a CLE2 pequenos acréscimos foram observados para os mesmos teores de substituição na referida idade. Aos 91 dias, pequenas reduções da deformação foram obtidas para as duas cinzas, comparadas à referência. Tal comportamento foi atribuído à ruptura frágil das misturas que, por conseguinte, não propiciou a formação total da curva tensão x deformação. O teste de Tukey indicou que, apenas o concreto CLE1-5% foi considerado significativamente diferente do concreto CR60, aos 91 dias.

O coeficiente de Poisson não apresentou variação significativa com a incorporação de CLE1 e CLE2.

PROPRIEDADES FÍSICAS E DE DURABILIDADE

Reduções no índice de vazios e absorção de água foram observados à medida que o teor de substituição aumentou, sendo estes decréscimos mais expressivos para a CLE2 o que se refletiu no acréscimo da resistência à compressão do material.

As massas específicas das misturas com CLE1 não apresentaram variações significativas em relação à referência. Em contrapartida, a CLE2 mesmo tendo

incrementos inferiores a 2% foram consideradas diferentes da CR60, para os dois teores.

A CLE1 e a CLE2 contribuíram para a redução da absorvidade nos dois estágios, em relação à referência. Para a CLE1, este comportamento foi atribuído à redução da conectividade e tortuosidade entre os poros.

O diâmetro crítico das misturas de referência e com 5% e 10% de CLE1 foram de, respectivamente, 0,06 μ m, 0,049 μ m e 0,045 μ m. As misturas com CLE2 apresentaram diâmetros críticos de 0,08 μ m e 0,085 μ m.

Com base nos resultados obtidos pode-se dizer que a presença das cinzas proporcionou um refinamento da estrutura de poros devido à redução do diâmetro crítico em relação à referência. Porém, a partir dos dados de distribuição de poros, verificou-se que as misturas com CLE2 não mostram o refinamento na estrutura de poros esperado, quando comparada a CLE1 e a referência. Este comportamento foi associado a uma possível quebra dos grãos durante a realização do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio. Mesmo assim, em função dos resultados obtidos para as misturas com CLE2 nas demais propriedades, provavelmente, o seu refinamento foi maior que as misturas com CLE1. Neste contexto, pode-se dizer que a CLE1 proporcionou a redução dos médios capilares, aumentando a concentração de pequenos capilares, sendo este mais significativo para o teor de 5% de cinza. Tal comportamento propiciou a redução da absorvidade, devido a possível desconectividade entre os poros.

Através da penetração acelerada por íons cloro, verificou-se que a CLE1 e CLE2 proporcionaram o refinamento na estrutura de poros do material o que dificultou a penetração da solução pelos interstícios do material. A inclusão de 5% de CLE manteve as duas misturas na mesma classificação da referência (baixa penetração aos íons cloro). Porém, quando 10% de cinza foi incorporado à mistura, a classificação passou a ser de *muito baixa* penetração iônica, mostrando o benefício ocasionado aos materiais devido à presença do aditivo mineral.

Com relação à permeabilidade, a incorporação de CLE1 não influenciou nesta propriedade, sendo os valores iguais à referência. O mesmo não aconteceu para as misturas com CLE2, onde os valores obtidos foram ditos significativos.

MIGRAÇÃO IÔNICA

Os resultados indicaram que o concreto CR60 apresentou maior concentração de cloretos quando comparada às misturas CLE1-5% e CLE1-10%, demonstrando que, a cinza, provavelmente, reduziu a conectividade entre os poros, dificultando a migração dos íons cloros através dos poros do material. Pode-se dizer, portanto que a presença da CLE1 na mistura de referência pode vir a contribuir para o aumento da durabilidade do material.

6.1.5 CONCRETOS COM MC, CLE2 E BL

6.1.5.1 CONSISTÊNCIA

Na Tabela 6.8 estão apresentados os resultados de abatimento, massa específica e teor de ar incorporado dos concretos no estado fresco.

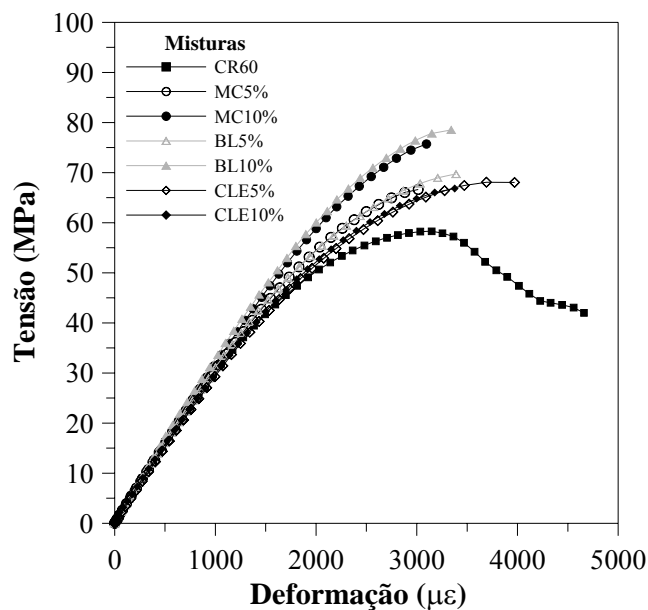
Tabela 6.8: Resultados das misturas no estado fresco.

Misturas	Abatimento (mm)	Massa específica do concreto (kg/dm ³)	Teor de ar (%)	
			Método gravimétrico (teórico)	Método pressométrico (experimental)
CR60	160	2,391	2,0	2,5
MC5%	160	2,373	2,5	2,8
MC10%	170	2,352	3,2	3,2
BL5%	160	2,370	2,5	2,8
BL10%	145	2,363	2,8	2,4
CLE2-5%	150	2,376	2,5	2,5
CLE2-10%	145	2,363	2,9	2,8

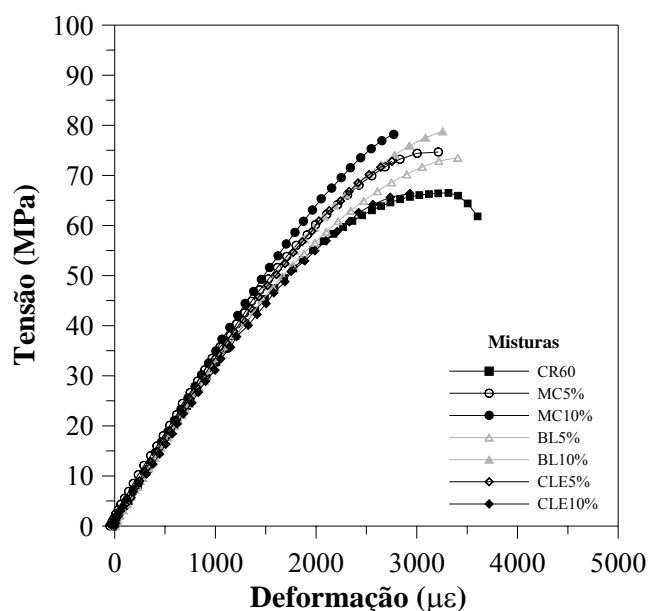
Analisando os resultados de abatimento, verifica-se que todas as misturas ficaram dentro da faixa estabelecida (150 ± 10 mm), exceção para a mistura MC10% que apresentou abatimento de 170mm. Este comportamento pode estar associado ao elevado teor de ar incorporado apresentado pela referida mistura que, proporcionou uma maior fluidez à mistura. Para as demais misturas, os resultados referentes ao teor de ar variaram entre 2,5 e 2,8%. Segundo AITICIN (2000), os concretos de alto desempenho aprisionam de 1% a 3% de ar, portanto, os valores obtidos foram considerados satisfatórios.

6.1.5.2 GRÁFICO TENSÃO X DEFORMAÇÃO

Na Figura 6.14 encontram-se as curvas típicas de tensão x deformação das misturas de referência e com aditivos minerais, aos 28 e 91 dias. Em seguida, na Tabela 6.9, estão mostrados os valores médios das propriedades mecânicas referentes a essas misturas, com seus, respectivos coeficientes de variação.



(a) 28 dias



(b) 91 dias

Figura 6.14: Curvas típicas de tensão x deformação das misturas.

Através das curvas tensão x deformação pode-se observar o acréscimo no ramo linear elástico das misturas com aditivos minerais, principalmente, para as misturas contendo 10% de MC e BL. A presença desses materiais conduziu ao acréscimo de sua resistência à compressão. Este comportamento ocorreu devido à interface agregado-pasta ser mais resistente, reduzindo o surgimento de fissuras nessa região durante o seu carregamento (SILVA, 2007).

Tabela 6.9: Propriedades mecânicas dos concretos de referência e com aditivos minerais.

Misturas	Resistência à compressão (MPa) – C.V.		E (GPa) – C.V.		ϵ axial ($\mu\epsilon$) x 10 ³ – C.V.		R _{td} (MPa) aos 28 dias – C.V.	ν aos 28 dias – C.V.
	28 dias	91 dias	28 dias	91 dias	28 dias	91 dias		
CR60	59,2 – 3,45	65,9 – 0,86	31,5 – 1,87	32,6 – 1,92	3,06 – 3,15	3,25 – 3,59	4,80 – 11,53	0,19 – 7,79
MC5%	67,0 – 1,15	73,7 – 2,21	30,8 – 1,78	32,2 – 0,54	3,17 – 5,35	3,14 – 0,16	5,36 – 15,52	0,19 – 2,79
MC10%	76,8 – 0,99	80,3 – 3,47	32,5 – 3,23	34,6 – 2,65	3,11 – 3,81	2,96 – 8,21	5,65 – 12,32	0,20 – 7,07
CLE2-5%	68,4 – 1,08	74,7 – 4,68	30,2 – 3,11	32,9 – 2,07	3,41 – 0,36	2,88 – 1,69	5,46 – 10,32	0,21 – 8,03
CLE2-10%	66,4 – 5,29	70,9 – 5,43	30,1 – 2,61	31,6 – 2,47	3,52 – 2,17	3,16 – 11,47	4,90 – 11,05	0,20 – 4,44
BL5%	69,2 – 2,52	74,0 – 1,72	31,0 – 1,25	32,4 – 1,72	3,40 – 2,29	3,26 – 3,41	5,45 – 9,55	0,20 – 3,01
BL10%	78,5 – 0,73	79,7 – 2,21	32,6 – 0,76	34,8 – 1,91	3,34 – 0,86	2,79 – 2,07	6,13 – 9,74	0,21 – 5,51

6.1.5.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Na Tabela 6.10 são apresentados a evolução de crescimento da resistência à compressão com a idade, para todas as misturas.

Tabela 6.10: Resistência à compressão dos concretos em função do tempo, com seus respectivos coeficientes de variação (%).

Misturas	Resistência à compressão (MPa) – C.V. (%)					
	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias	365 dias
CR60	35,5 – 0,72	46,7 – 1,98	51,4 – 3,95	59,5 – 3,62	65,9 – 0,85	75,1 – 2,99
MC5%	32,8 – 0,98	50,3 – 4,69	59,5 – 0,87	67,0 – 1,15	73,7 – 2,21	77,8 – 2,31
MC10%	35,8 – 2,25	54,4 – 0,25	64,4 – 2,93	76,8 – 0,99	80,3 – 3,47	84,6 – 0,11
CLE2-5%	34,8 – 3,02	52,3 – 1,96	58,4 – 2,73	68,4 – 1,08	74,7 – 4,68	81,5 – 2,89
CLE2-10%	32,0 – 0,75	48,9 – 2,61	54,7 – 4,96	66,4 – 5,29	70,9 – 5,43	78,9 – 1,35
BL5%	30,1 – 1,73	52,1 – 1,71	56,6 – 1,75	69,2 – 2,52	74,0 – 1,02	80,1 – 0,67
BL10%	27,0 – 2,53	52,7 – 1,39	64,1 – 1,38	78,5 – 0,73	79,7 – 2,21	85,0 – 3,23

Através dos dados obtidos, verifica-se que, aos 28 dias, a resistência à compressão prevista para o concreto de referência foi alcançada. Ao incorporar aditivo mineral à mistura, nota-se que acréscimos deste parâmetro foram obtidos para todos os dois teores de substituição comparada a CR60. Os aumentos mais expressivos foram observados para as misturas MC10% e BL10% de, respectivamente, 29,1% e 31,9%. As demais misturas sofreram acréscimos entre 11,6% e 16,3%.

Avaliando a evolução de crescimento da resistência à compressão observa-se que na idade de 1 dia, MC10% e CLE2-5% apresentaram valores estaticamente iguais à CR60. As demais misturas diferiram significativamente, sendo o pior comportamento obtido para a BL10%, com redução de 23,9% em relação à referência. No entanto, já aos 3 dias, todas as misturas superaram a referência, comportamento este que se manteve até a idade de 365 dias.

Na Figura 6.15 estão apresentadas o ganho de resistência à compressão no tempo para as misturas contendo MC, CLE2 e BL, além da referência.

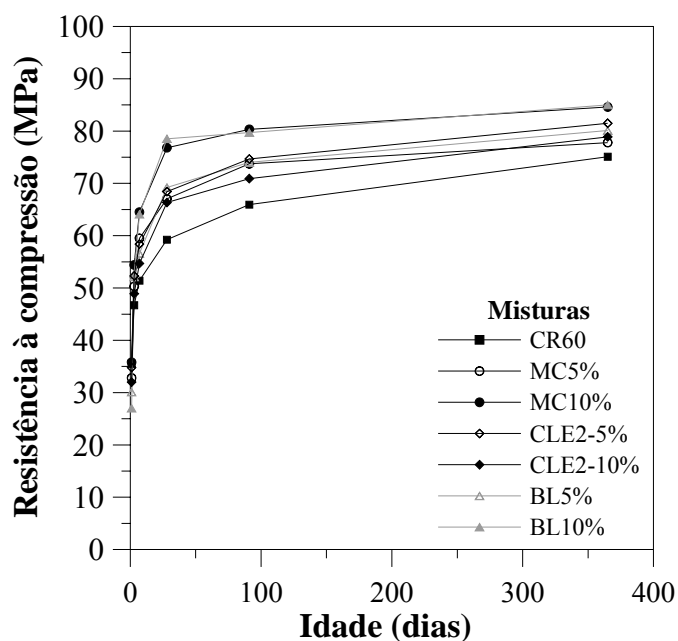


Figura 6.15: Evolução da resistência à compressão com a idade.

As maiores taxas de crescimento entre 1 e 3 dias foram apresentadas para as misturas BL10% (1,95) e BL5% (1,73). As demais misturas ficaram com valores entre 1,31 e 1,5, sendo o menor valor apresentado pela mistura CR60. Observa-se que, até os 28 dias, as taxas de crescimento das misturas com aditivo mineral continuaram superiores à referência. Por exemplo, a resistência à compressão, aos 28 dias, cresceu 33%, em relação idade anterior, enquanto que a CR60 na mesma idade, cresceu 16%.

Este ganho rápido de resistência à compressão até os 28 dias pode ser explicado através de dois mecanismos: (1) ação física e (2) ação química. A ação física está ligada à finura dos aditivos minerais que atuam como pontos de nucleação, acelerando as reações de hidratação do cimento. A ação química produz mais produtos hidratados através das reações pozolânicas.

A mistura com 5% de MC foi considerada significativamente diferente da referência nas idades de 1, 7, 28, 91 dias. Aumentando o teor para 10%, estas diferenças passaram a ser nas idades de 3, 7, 28, 91 e 365 dias. Quando 5% de CLE2 foi incorporado às misturas, a resistência à compressão foi considerada igual a CR60 nas idades de 1 e 3 dias. Para 10%, essa igualdade foi obtida para as idades de 7, 91 e 365 dias.

No caso das misturas contendo MC, por este aditivo mineral possuir elevado IAP,

provavelmente a ação química foi preponderante sobre a ação física. Alguns autores (ZHANG *et al.*, 1995 e CORDEIRO, 2001) sugerem que o efeito físico age imediatamente (1º dia de hidratação) e a partir do terceiro dia inicia-se a ação química, proporcionado pela rápida capacidade de reação da MC com CH. Comportamentos similares ao do presente estudo também foram obtidos por outros autores (WILD *et al.*, 1996; CURCIO *et al.*, 1998 e CORDEIRO, 2001), em concretos e (BROOKS *et al.*, 2001; CORDEIRO, 2001 e GONÇALVES, 2005) em argamassas. Para misturas com IAP menores, como no caso da CLE2, porém com finura maior, o mecanismo de ação física pode preponderar sobre o químico.

Com relação à BL, o ganho de resistência à compressão em todas as idades foi considerado significativamente diferente da referência. Devido aos resultados obtidos para o IAP, teor de amorfos e granulometria do referido material, este comportamento pode ser atribuído ao efeito sinérgico entre a ação física e química da BL.

Quanto ao teor de substituição, verificou-se que o crescimento da resistência para as misturas contendo MC e BL à medida que o teor de substituição aumenta, para todas as idades avaliadas. Os valores médios de resistência à compressão indicaram que o teor de substituição influenciou significativamente neste parâmetro, ou seja, 5% e 10% de MC ou de BL foram considerados diferentes entre si. Para as misturas contendo CLE2, o aumento no teor de substituição reduziu o ganho de resistência, para todas as idades. Porém, nas idades de 7, 28, 91 e 365 dias, os teores de 5% ou de 10% de CLE2 foram considerados iguais entre si.

Analisando a influência do aditivo mineral para o mesmo teor, pode-se dizer que a mistura MC5% foi considerada igual a BL5% e CLE2-5%, para as idades de 3, 7, 28, 91 e 365 dias. O teor de 10% indicou que a MC e a BL foram estatisticamente diferentes da CLE2 para todas as idades. O mesmo não aconteceu entre MC e BL, pois nas idades de 3, 7, 28, 91 e 365 dias foram consideradas iguais entre si.

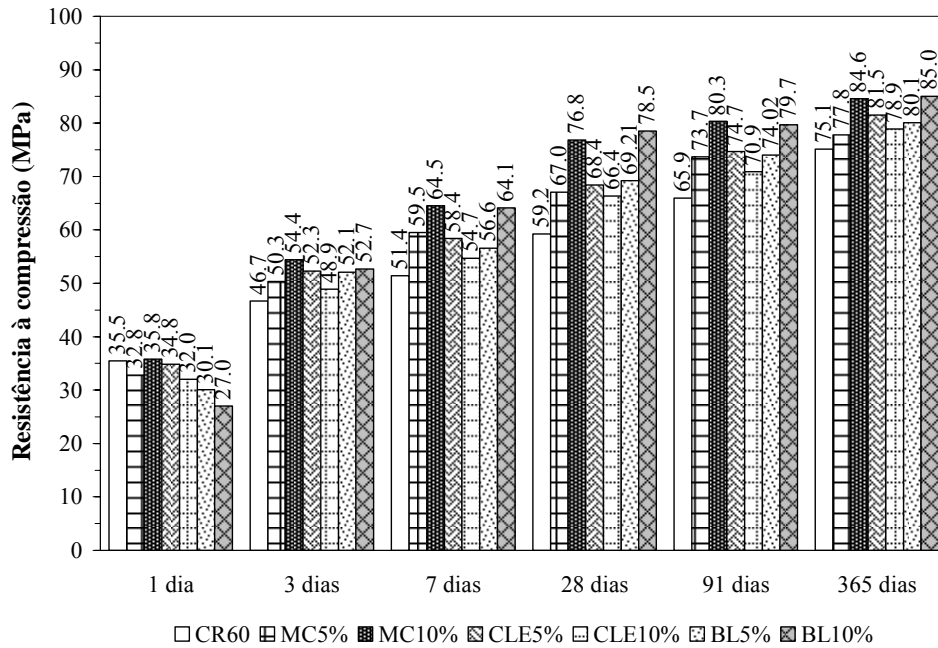


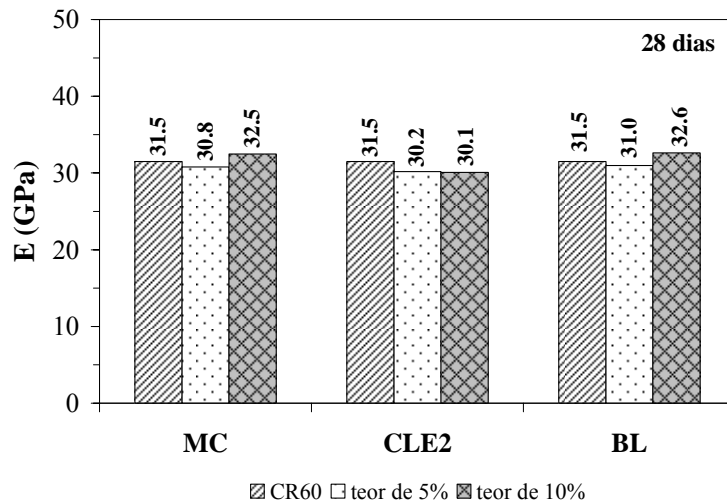
Figura 6.16: Resistência à compressão das misturas com a idade.

De um modo geral, através da Figura 6.16, pode-se dizer que a substituição parcial de cimento Portland por aditivos minerais conferiu aos concretos valores de resistência à compressão superior ao concreto de referência, para todas as idades. A utilização de 5% de MC e CLE2, como dito anteriormente, apresentaram resistências iguais. Quando estes dois aditivos minerais foram incorporados à mistura na forma de 10% de BL, os resultados obtidos foram iguais a 10% de MC, a partir dos 3 dias. Este comportamento já era esperado visto que, os valores de MC5% foram considerados iguais aos da CLE2-5%. Porém, ao incorporar 10% de CLE2 à mistura, houve uma perda de resistência à compressão em relação a BL10% e MC10%, demonstrando a menor reatividade da CLE2 quando comparada a MC e BL. O IAP e teor de amorfos destas misturas apresentaram este mesmo comportamento. Analisando a mistura BL5% verifica-se que a mesma possui resultados de resistência à compressão igual à MC5%. Provavelmente, misturas com 2,5% de MC ou de CLE2 apresentariam os mesmos valores de resistência. Como não houve a redução deste parâmetro para a mistura com 5% de CLE2, pode-se concluir que o teor de 5% de MC e CLE2 para produzir uma BL, foi considerado o teor ótimo no presente estudo. Isto porque como a mistura CLE2-10% apresentou redução da resistência a resistência à compressão em relação a MC10%, a produção de uma BL20%, com 10% de cada material, provavelmente, apresentará resultado inferior a

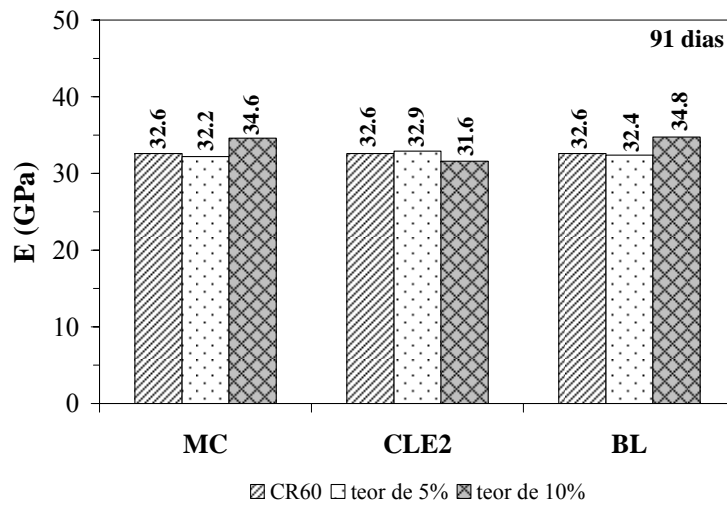
MC20%.

MÓDULO DE ELASTICIDADE

Na Figura 6.17 estão apresentados os resultados referentes ao módulo de elasticidade das misturas de referência e com aditivos minerais, aos 28 e 91 dias.



(a) 28 dias



(b) 91 dias

Figura 6.17: Influência dos aditivos minerais no módulo de elasticidade das misturas.

Inicialmente verifica-se que a incorporação de aditivos minerais, nos teores de 5% e 10% não modificou expressivamente o módulo de elasticidade das misturas em relação à referência. Os maiores valores deste parâmetro foram obtidos para as misturas

MC10% e BL10%, para as duas idades. Estes acréscimos foram de, respectivamente, 3,2% e 3,5%, aos 28 dias e 6,1% e 6,7%, aos 91 dias.

De acordo com a análise de variância, a incorporação de 5 e 10% de aditivos minerais em substituição parcial ao cimento, não influenciou significativamente no módulo, comparado à referência, aos 28 dias. Aos 91 dias, apenas, as misturas com 10% de MC e BL apresentaram diferenças estatísticas em relação referência. Entre si, somente 5% de CLE2 foi considerado igual a 10% de CLE2 nas duas idades.

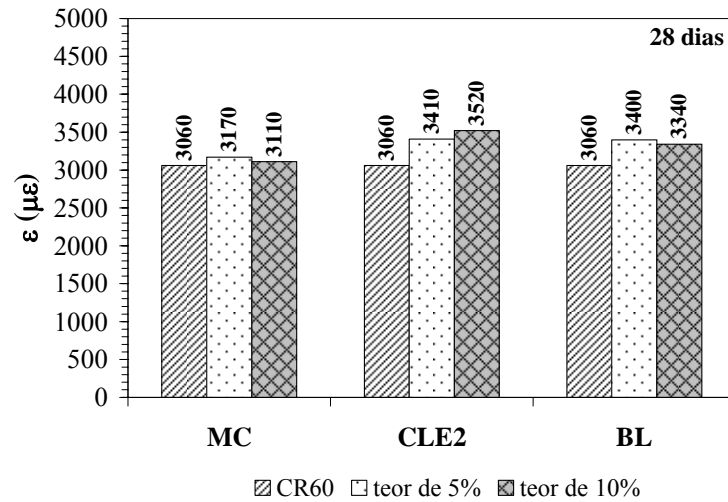
No que diz respeito à idade, a análise estatística indicou que os valores médios dos módulos de elasticidade obtidos aos 28 e 91 dias, foram considerados significativamente diferentes entre si, para as misturas MC10%, BL5%, BL10% e CLE2-5%.

Analisando o tipo de aditivo mineral, para um mesmo teor verificou-se que, aos 28 e 91 dias, 5% de MC, CLE2 e BL foram consideradas iguais entre si. Para o teor de 10%, MC e BL foram significativamente diferentes da mistura CLE2, nas duas idades. Entre si, MC e BL foram estatisticamente iguais.

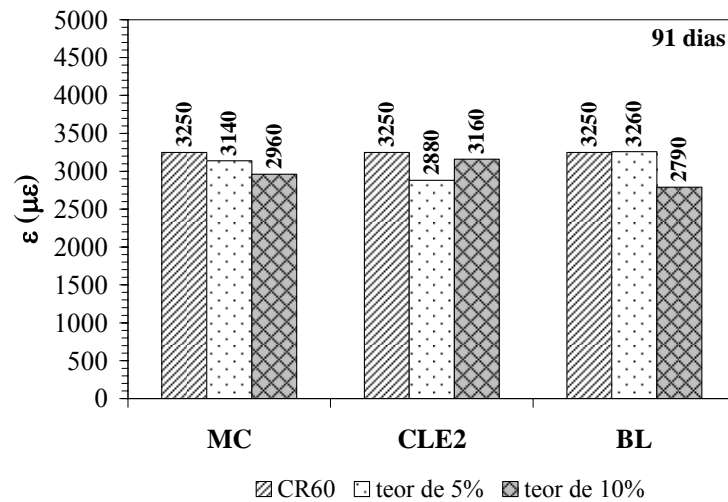
DEFORMAÇÃO DE PICO

Na Figura 6.18 estão apresentados os valores de deformação de pico obtidos para as misturas de referência e com aditivos minerais, nas idades de 28 e 91 dias.

Observa-se que a deformação de pico das misturas contendo aditivo mineral foram superiores à referência, aos 28 dias, sendo estes entre 1,6 e 15%. As misturas MC5% e MC10% apresentaram os menores aumentos e este fato está associado à ruptura brusca dos corpos-de-prova antes de atingirem a deformação de pico, como pode ser visto na Figura 6.14. Aos 91 dias, este mesmo tipo de comportamento foi observado nas misturas MC10%, CLE2-5% e BL10%. Apesar da mistura MC5% apresentar valor inferior à referência ($\cong 3,4\%$), a curva tensão x deformação não indicou ruptura brusca dos corpos-de-prova. Os demais decréscimos variaram entre 2,8 e 14,2%. A mistura BL5% foi dita igual à referência. Pelo fato de algumas misturas não apresentarem o valor real de deformação de pico, optou-se por não avaliar estatisticamente esta propriedade.



(a) 28 dias



(b) 91 dias

Figura 6.18: Influência dos aditivos minerais na deformação de pico das misturas, aos 28 e 91 dias.

Este comportamento pode ser atribuído a densificação da zona de transição propiciada pelos aditivos minerais, que reduziu o surgimento de fissuras nessa região, aumentando a sua rigidez. Tal fato ocasionou o rompimento brusco das amostras, a partir dos 7 dias, como pode ser observado na Figura 6.19.



(a) 7 dias



(b) 365 dias

Figura 6.19: Ruptura brusca do corpo-de-prova, aos 7 e 365 dias.

6.1.5.4 COEFICIENTE DE POISSON

A Figura 6.20 apresenta os valores do coeficiente de Poisson para as misturas de referência e com aditivos minerais, aos 28 dias.

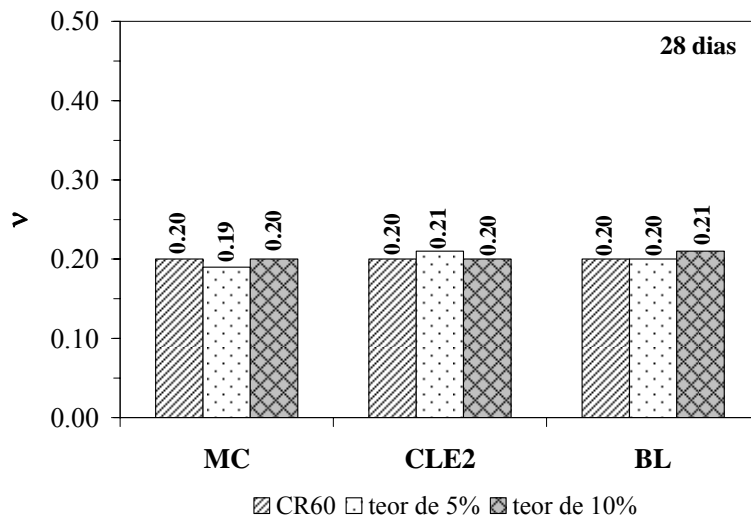


Figura 6.20: Influência dos aditivos minerais no coeficiente de Poisson das misturas, aos 28 dias.

Não verificou-se alterações expressivas no coeficiente de Poisson quando aditivos minerais foram incorporados à mistura de referência. Apesar da mistura MC5% ter apresentado redução de 5%, em relação a CR60 e as misturas CLE2-10% e BL5%

acréscimos de 5%, a análise de variância, indicou que todas as misturas são iguais entre si. Pode-se dizer, portanto que a presença do aditivo mineral não influenciou no coeficiente de Poisson.

6.1.5.5 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

A Figura 6.21 apresenta os resultados de resistência à tração por compressão diametral (Rtcd) das misturas de referência e com aditivos minerais, aos 28 dias.

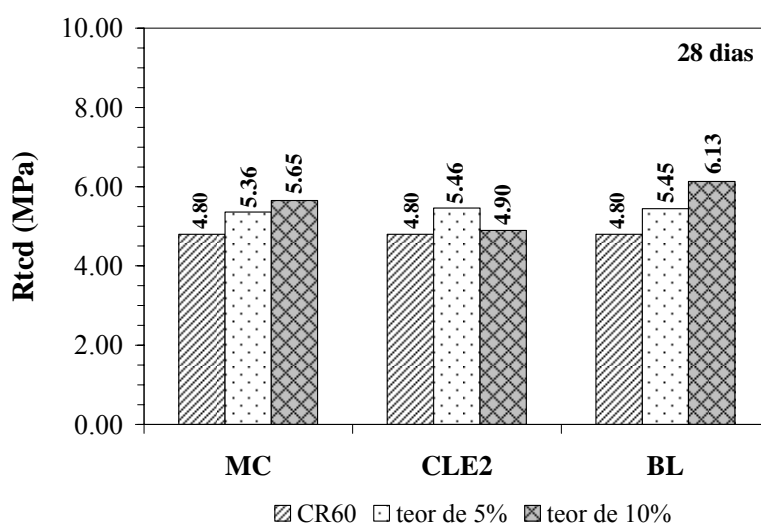


Figura 6.21: Influência dos aditivos minerais na Rtcd das misturas, aos 28 dias.

Foram observados acréscimos na Rtcd das misturas com aditivos minerais, quando comparadas à referência. Ao incorporar 5% de MC, CLE2 ou BL, esses aumentos foram de, respectivamente, 11,7%, 13,8% e 13,5%. Quando 10% foi adicionado às misturas, apenas a CLE2 sofreu redução quando comparada ao teor de 5%, porém permaneceu ligeiramente superior a referência, sendo este acréscimo de 2,0%. A MC e a BL aumentaram 17,7% e 27,7%, respectivamente, em relação à CR60. Estatisticamente, somente a mistura CLE2-10% foi considerada igual à referência.

Com relação ao teor de cinza, as misturas com 5% e 10% de MC foram ditas iguais entre si. O mesmo comportamento foi obtido para a BL. Quanto ao tipo de aditivo mineral, verificou-se que a incorporação de 5% de MC ou CLE2 ou BL não influenciou significativamente nos resultados. Porém, para o teor de 10%, MC e BL foram

consideradas diferentes de CLE2. Entre si, MC e BL foram ditas iguais.

Dentro deste contexto, observa-se que a resistência à tração por compressão diametral apresentou o mesmo comportamento da resistência à compressão, sendo o acréscimo de R_{tcd} associado ao efeito físico-químico proporcionado por cada aditivo mineral. Portanto, pode-se dizer que a presença do aditivo mineral à mistura de referência melhorou o seu desempenho mecânico.

Na Tabela 6.11, estão apresentados os resultados referentes à R_c , R_{tcd} experimental e teórico, através das relações propostas por DE LARRAD (1999) e ACI 363 (1997), conforme mostrado no item 6.1.2.4.

Tabela 6.11: Resultados de R_{tcd} e R_c , com seus respectivos coeficientes de variação (%) e as relações entre R_{tcd} e R_c .

Misturas	R_c (MPa)	R_{tcd} (MPa) (experimental)	Relações entre R_{tcd} e R_c (teórico)	
			DE LARRAD (1999) (teórico)	ACI 363 (1984) (teórico)
CR60	59,2 – 3,45	4,80 – 11,53	4,79	4,54
MC5%	67,0 – 1,15	5,05 – 17,87	5,14	4,83
MC10%	76,8 – 0,99	5,65 – 12,32	5,56	5,17
CLE2-5%	68,4 – 1,08	5,46 – 10,32	5,20	4,88
CLE2-10%	66,4 – 5,29	4,90 – 11,05	5,12	4,81
BL5%	69,2 – 2,52	5,45 – 9,55	5,24	4,91
BL10%	78,5 – 0,73	6,13 – 9,74	5,63	5,23

Analisando os resultados obtidos para os concretos do presente estudo, pode-se dizer que os mesmos apresentaram valores de R_{tcd} dentro da faixa de dados ($R_{tcd} \pm 0,3\text{MPa}$) proposta por DE LARRAD (1999). Exceção deve ser dada a mistura BL10% que apresentou valor de R_{tcd} 3% acima da faixa de dados. Com relação ao ACI (1997), estes apresentaram decréscimos de até 15% na R_{tcd} , comparada aos valores experimentais. Após análise e comparação dos dados obtidos experimentalmente com os teóricos, pode-se dizer que a relação proposta por DE LARRAD (1999) apresentou boa correlação com os dados obtidos experimentalmente no presente estudo.

6.1.5.6 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS TEÓRICOS E OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Na Tabela 6.12 encontram-se os resultados teóricos obtidos através do programa computacional BetonlabPro 2[®] e os resultados experimentais do presente estudo.

Tabela 6.12: Resultados teóricos e experimentais relacionados ao concreto CR60.

Propriedades		Resultados	
		Teórico	Experimental
Estado fresco	Abatimento (cm)	10,6	16,0
	Teor de ar (%)	2,3	2,5
	Massa específica (g/cm ³)	2,401	2,391
Estado endurecido	Resistência à compressão (MPa)		
	7 dias	55,3	51,4
	28 dias	59,1	59,5
	91 dias	62,2	65,9

A partir dos dados acima, verifica-se que os resultados teóricos de massa específica e resistência à compressão ficaram próximos dos resultados experimentais, porém o mesmo não aconteceu para o abatimento, que apresentou uma diferença de 34% entre o experimental e o teórico. Este comportamento pode estar associado ao maior teor de ar obtido no resultado experimental que proporcionou maior fluidez à mistura, aumentando o seu abatimento. Portanto, pode-se dizer que houve uma boa correlação entre os resultados previstos pelo programa computacional BetonlabPro 2[®] e os resultados experimentais obtidos no presente estudo. Os valores teóricos encontram-se apresentados no Anexo A.

6.1.5.7 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO E POR CAPILARIDADE

Na Tabela 6.13 estão apresentados os resultados de absorção de água por imersão, índice de vazios, massa específica no estado endurecido e absorptividade para todas as misturas.

Tabela 6.13: Resultados de absorção de água, índice de vazios, massa específica e absorptividade das misturas de referência e com aditivos minerais, com seus respectivos coeficientes de variação.

Misturas	Absorção de água por imersão – C.V. (%)	Índice de vazios – C.V. (%)	Massa específica (g/cm^3) – C.V. (%)	Absortividade ($\text{g/cm}^2 \cdot \text{t}^{1/2}$)	
				Estágio 1	Estágio 2
CR60	1,61 – 3,70	3,80 – 3,55	2,36 – 0,19	0,0332	0,0122
MC5%	0,85 – 1,71	2,04 – 1,54	2,41 – 0,16	0,0128	0,0053
MC10%	0,69 – 1,94	1,63 – 2,04	2,36 – 0,10	0,0110	0,0053
CLE2-5%	0,87 – 5,31	2,09 – 5,19	2,40 – 0,12	0,0143	0,0089
CLE2-10%	0,83 – 0,42	1,97 – 0,53	2,38 – 0,11	0,0141	0,0097
BL5%	0,78 – 2,40	1,87 – 2,00	2,40 – 0,40	0,0117	0,0067
BL10%	0,67 – 4,30	1,60 – 4,15	2,39 – 0,15	0,0111	0,0042

É evidente que a incorporação de aditivos minerais propiciou a redução de todos os parâmetros apresentados na Tabela 6.13. Para a absorção de água e índice de vazios estes decréscimos variaram entre 47,2% a 58,4%. As diferenças mais expressivas foram para as misturas MC10% e BL10%, sendo os valores de, respectivamente, 57,1% e 58,4%, comparada à referência. Este comportamento condiz com o aumento da resistência mecânica das misturas.

Com relação à massa específica, apesar do cimento Portland ser substituído por aditivos com menores densidades, valores ligeiramente maiores deste parâmetro foram observados em relação à referência. Este comportamento, provavelmente, está associado à densificação da microestrutura do material, propiciada pela ação físico-química dos aditivos minerais. Exceção para a mistura MC10%, que apresentou valor igual à referência. Tal fato pode ser explicado pelo excesso de SP que, provavelmente, incorporou mais ar a mistura, reduzindo este parâmetro.

Quanto à absorptividade, verificou-se que este parâmetro também apresentou redução nos dois estágios, com a presença dos aditivos minerais. Intensidade maior de

decréscimo foi observada para as misturas MC10% e BL10%.

Fazendo a análise de cada aditivo mineral, observou-se que a incorporação de 5% e 10% de MC, em substituição parcial ao cimento Portland, diminuiu a absorção de água e índice de vazios em, respectivamente, 47% e 57%, sendo este comportamento significativo em relação à referência. O mesmo foi observado para BL e CLE2 onde ambas apresentaram reduções significativas de, respectivamente, 52% e 38% para o teor de 5% e 58% e 42% para o teor de 10%, em relação à referência. Estatisticamente, 5% de MC foi considerado significativamente diferente de 10% de MC. O mesmo vale para a BL. Em contrapartida, utilizar 5% ou 10% de CLE2, não influencia nestas duas propriedades.

Para a massa específica, apesar dos incrementos das misturas com 5% de aditivo mineral (MC, CLE2 e BL) ser de apenas 2%, este foi considerado significativo em relação à referência. Para as misturas com 10% os acréscimos foram inferiores a 1%. Porém, somente a mistura MC10% foi considerada igual a CR60. Nesta propriedade, utilizar 5% ou 10% não foi significativo para a BL, para as demais sim.

Com relação ao tipo de aditivo mineral, 5% de BL, CLE2 ou MC foram consideradas iguais entre si, para as três propriedades analisadas. Utilizando 10% essa diferença passou a ser significativa entre MC e BL com relação à CLE2 para o índice de vazios e absorção de água. Para a massa específica, as três misturas foram consideradas diferentes entre si.

A partir dos gráficos apresentados na Figura 6.22, pode-se observar que a incorporação de aditivos minerais às misturas reduziu o ganho de massa de água no tempo em relação à mistura de referência, refletindo os valores de absorvidade apresentados na Tabela 6.13.

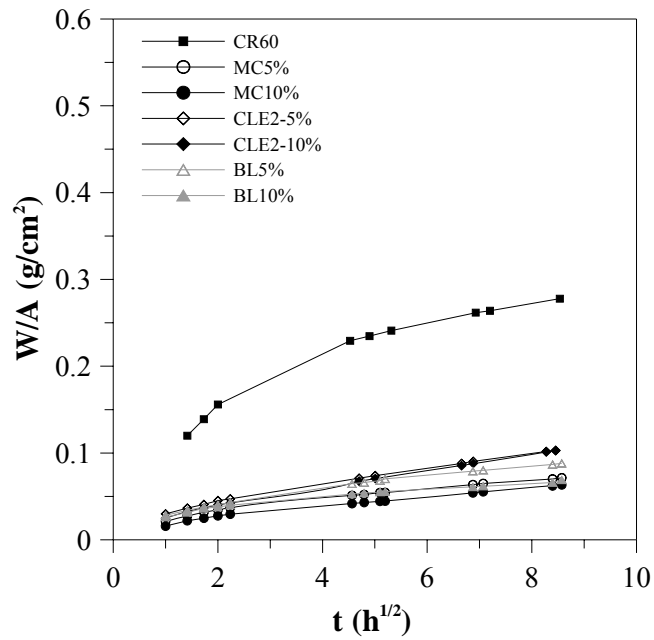
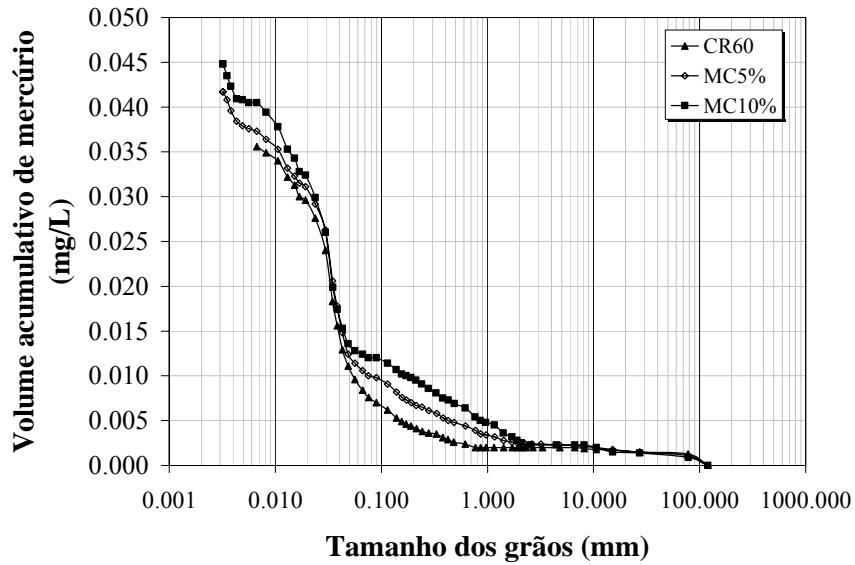
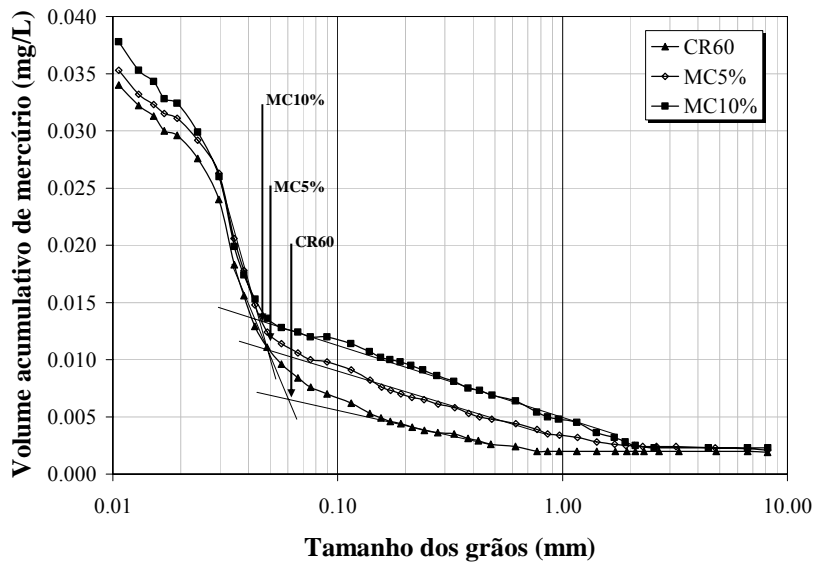


Figura 6.22: Influência dos aditivos minerais no ganho acumulativo de massa de água das misturas.

A presença da MC nos teores de 5% e 10% reduziu a absorvidade em, respectivamente, 61% e 67% no estágio 1 e 57% no estágio 2, em relação à mistura de referência. Para as misturas CLE2-5% e CLE2-10% esses decréscimos foram de, respectivamente 57% e 27% no estágio 1 e 27% e 20% no estágio 2. As misturas com 5% e 10% de BL foram reduzidas em, respectivamente 65% e 67%, no estágio 1 e 45% e 69%, no estágio 2. Através da distribuição de poros das misturas obtidas pela técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio, pode-se avaliar a influência dos aditivos minerais na estrutura de poros dos materiais. Na Figura 6.23 encontra-se a porosimetria por intrusão e mercúrio realizado nas misturas com MC, além da referência.



(a) Porosimetria por intrusão de mercúrio: CR60 e MC



(b) Ampliação de Figura 6.23 (a)

Figura 6.23: Influência da MC na distribuição de poros das misturas, aos 28 dias.

Avaliando os resultados obtidos verifica-se que o diâmetro crítico (d_c) obtido para as misturas de referência, MC5% e MC10%, foram de, respectivamente, $0,06\mu\text{m}$, $0,049\mu\text{m}$ e $0,045\mu\text{m}$. Na Figura 6.24 encontra-se a porosimetria por intrusão e mercúrio realizado nas misturas com CLE2, além da referência.

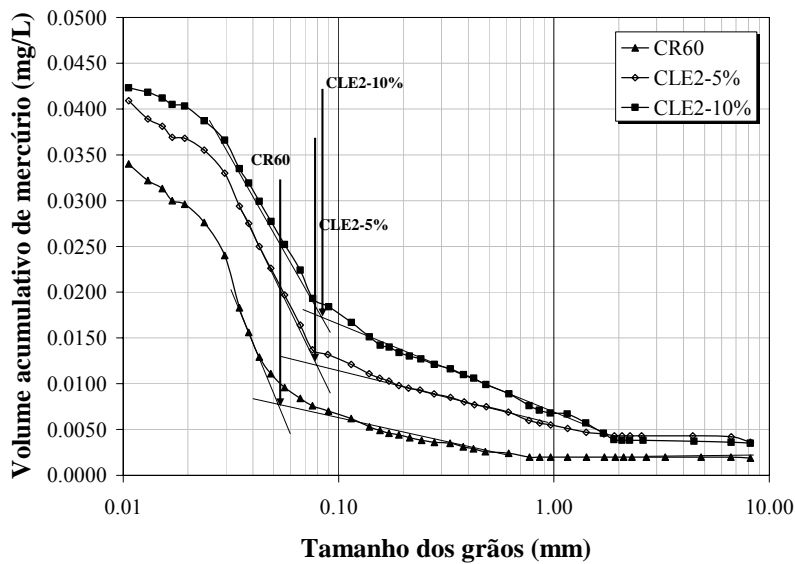
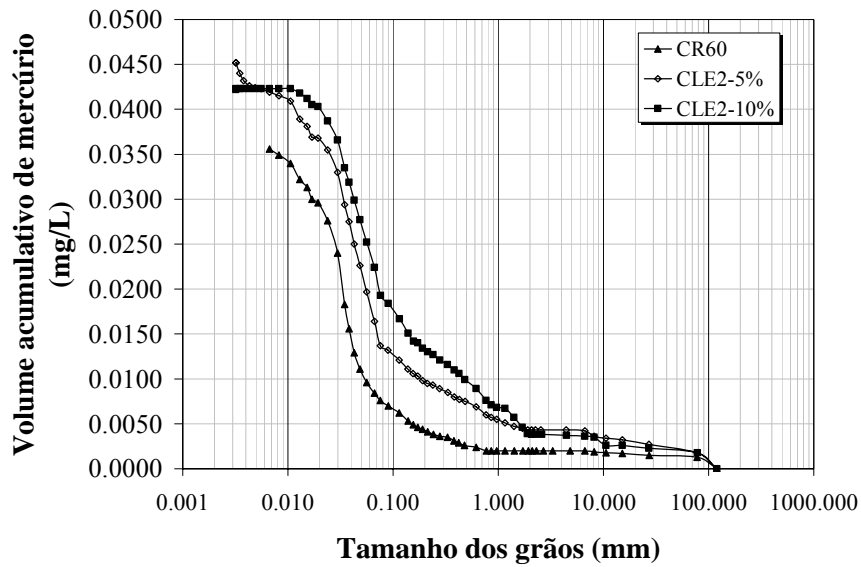


Figura 6.24: Influência da CLE2 na distribuição de poros das misturas, aos 28 dias.

Os valores de diâmetro crítico obtidos para as misturas CR60, CLE2-5% e CLE2-10% foram $0,06\mu\text{m}$, $0,08\mu\text{m}$ e $0,085\mu\text{m}$, respectivamente. Na Figura 6.25 encontra-se a porosimetria por intrusão e mercúrio realizada nas misturas com BL, além da referência.

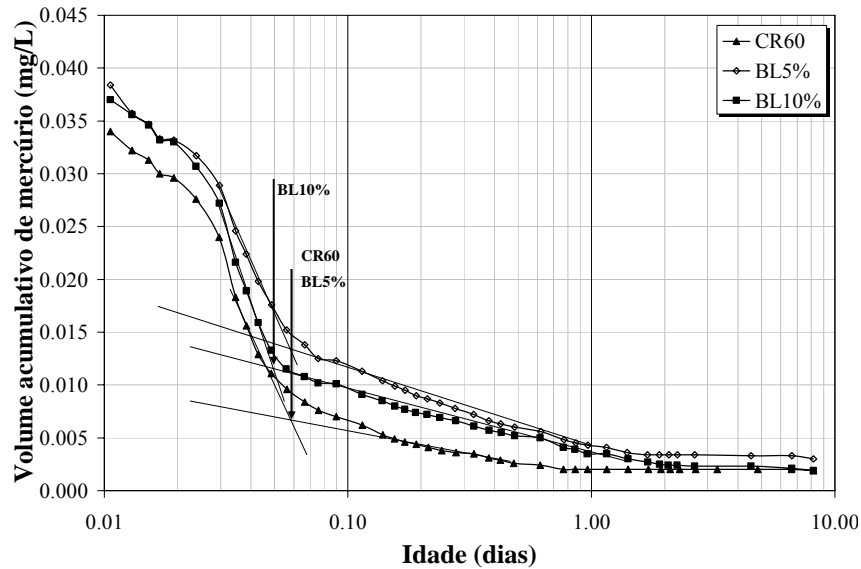
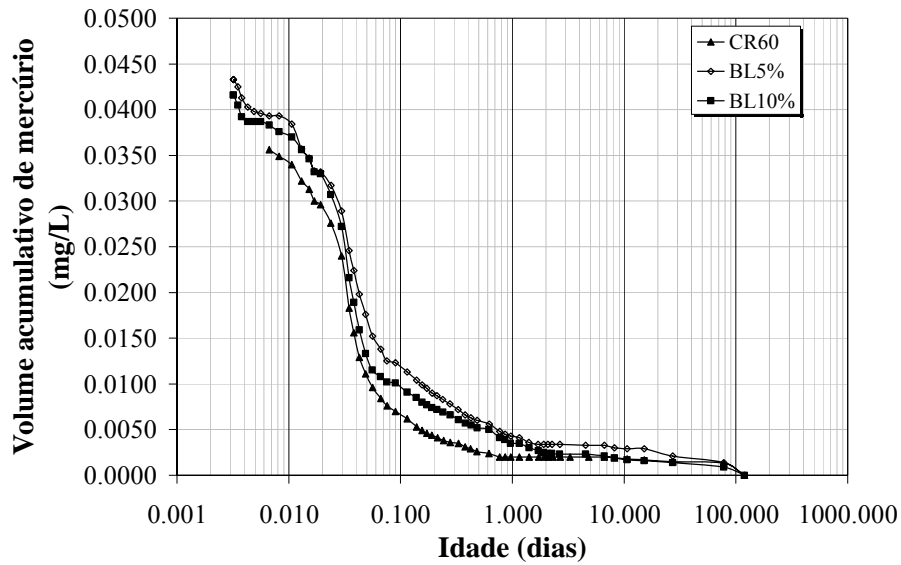


Figura 6.25: Influência da BL na distribuição de poros das misturas, aos 28 dias.

Os valores de “dc” obtidos para as misturas CR60, BL5% e BL10% foram de, respectivamente, 0,06 μ m, 0,06 μ m e 0,05 μ m.

Na Tabela 6.14 encontram-se a distribuição do tamanho de poros das misturas de referência, com MC, CLE2 e BL. Como dito anteriormente, problemas foram detectados nos dados de porosimetria das misturas contendo CLE2. Mesmo assim, será feita uma análise dos resultados de modo a não comprometer os demais dados obtidos.

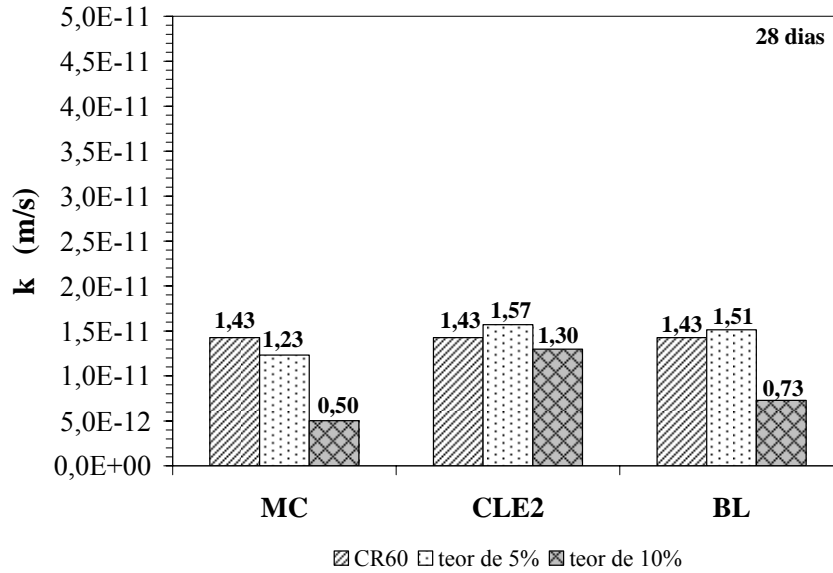
Tabela 6.14: Distribuição do tamanho de poros das misturas de referência, MC, CLE2 e BL.

Misturas	Volume de mercúrio (%)			
	Pequenos capilares ($\phi < 0,01\mu\text{m}$)	Médios capilares ($0,01 < \phi < 0,05\mu\text{m}$)	Grandes capilares ($0,05 < \phi < 10\mu\text{m}$)	$> 10,0\mu\text{m}$
CR60	9,83	63,48	21,91	4,78
MC5%	21,48	52,66	21,71	4,16
MC10%	21,25	50,11	25,28	3,36
CLE2-5%	13,72	42,48	36,73	7,08
CLE2-10%	1,19	39,29	53,33	6,19
BL5%	17,55	47,58	28,18	6,70
BL10%	14,56	57,52	24,11	3,82

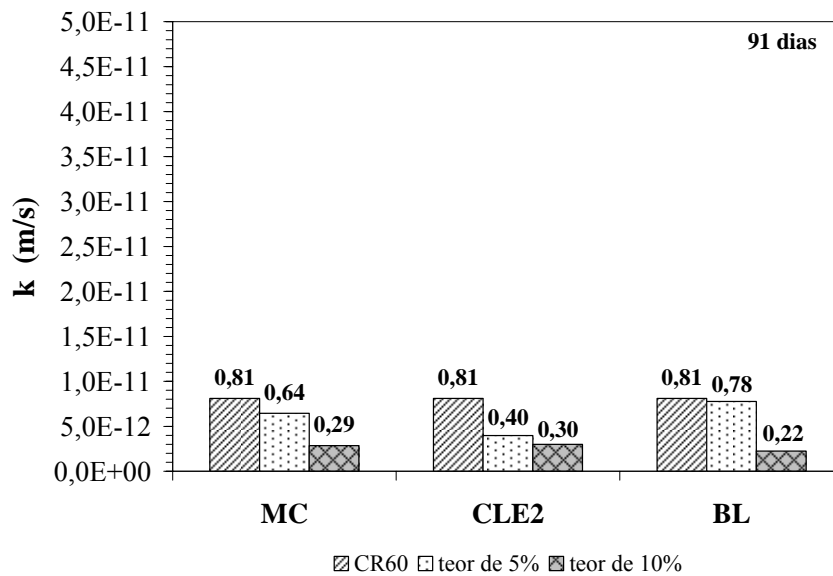
Analisando inicialmente o “dc” verifica-se que para o teor de 5% as misturas MC, CLE2 e BL apresentaram valores de, respectivamente, $0,049\mu\text{m}$, $0,08\mu\text{m}$ e $0,06\mu\text{m}$, enquanto a mistura de referência apresentou diâmetro de $0,06\mu\text{m}$. Para o teor de 10%, o diâmetro crítico da MC reduziu para $0,045\mu\text{m}$, o da CLE2 aumentou para $0,085\mu\text{m}$ e o da BL decresceu para $0,05\mu\text{m}$. Através deste comportamento, pode-se dizer que a presença do aditivo mineral refinou a estrutura de poros, reduzindo, provavelmente, a conectividade entre os poros e dificultando a percolação de água pelos interstícios do material. Pela distribuição de poros, apresentado na Tabela 6.14, este comportamento fica evidente, devido ao aumento na quantidade de pequenos capilares das misturas com aditivo mineral em relação à referência. Exceção para a mistura CLE2-10%.

6.1.5.8 PERMEABILIDADE A GÁS

A Figura 6.26 mostra os resultados de permeabilidade a gás, obtidos para todas as misturas, nas idades de 28 e 91 dias.



(a) 28 dias



(b) 91 dias

(b) 91 dias

Figura 6.26: Influência dos aditivos minerais na permeabilidade a gás das misturas, aos 28 e 91 dias.

Aos 28 dias, incorporando 5% de aditivo mineral, apenas a mistura com MC apresentou redução de 14% comparada a CR60. As demais tiveram acréscimos de 9,8% para a CLE2 e 5,6% para a BL. Adicionando 10%, todas as misturas foram inferiores, sendo esta redução mais expressiva para a MC (65%), seguida da BL e da CLE2.

Na idade de 91 dias, todas as misturas apresentaram redução da permeabilidade à medida que o teor de substituição de cimento por aditivo mineral aumentou. Para o teor de 5%, a CLE2 apresentou melhor comportamento, decréscimo de 50,6% em relação à referência. Substituindo para 10% a BL teve maior percentual de redução, 72,8%.

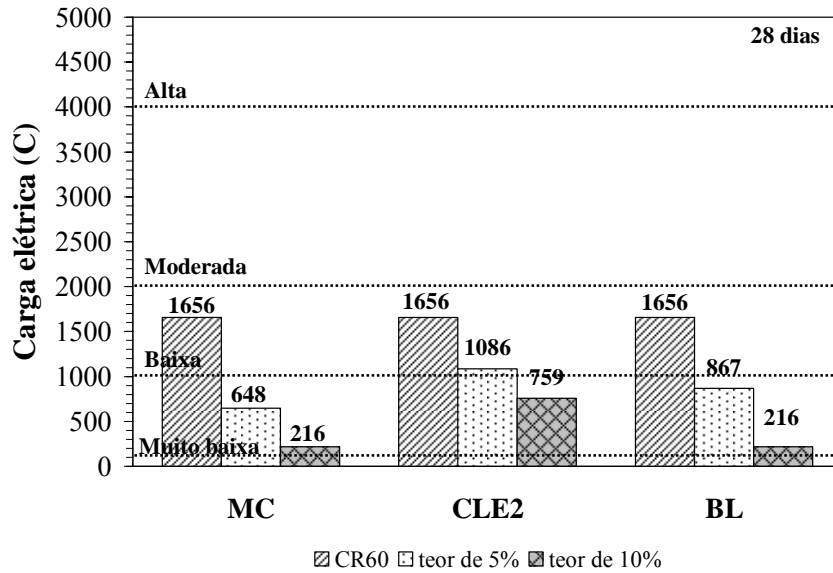
Estatisticamente, todas as misturas com aditivo mineral foram consideradas significativamente diferentes da referência.

Analisando o teor de substituição, a presença de 5% ou de 10% diferiu entre si, para todos os aditivos minerais. Com relação ao tipo de aditivo, ao nível de 5% de substituição, apenas as misturas CLE2 e BL foram consideradas iguais entre si nas duas idades. Utilizando 10%, a diferença passou a ser significativa para todos.

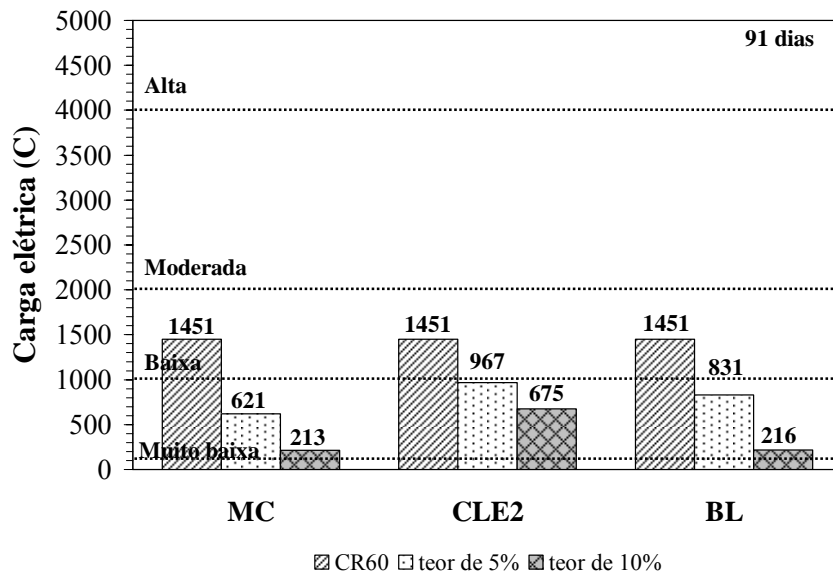
Através dos baixos valores de permeabilidade obtidos, percebe-se que a presença dos aditivos minerais reduziu a conectividade entre os poros, dificultando a passagem de gás pela microestrutura do material.

6.1.5.9 PENETRAÇÃO ACELERADA POR ÍONS CLORETO

Na Figura 6.27 estão apresentados os valores de carga elétrica obtidos para as misturas de referência e com aditivos minerais, aos 28 e 91 dias.



(a) 28 dias



(b) 91 dias

Figura 6.27: Influência dos aditivos minerais no ensaio de penetração acelerada por íons cloreto das misturas, aos 28 e 91 dias.

Verifica-se que à medida que o teor de substituição de cimento por aditivo mineral aumentou, ocorre uma redução expressiva da carga elétrica dessas misturas em relação à referência, para as duas idades avaliadas.

Aos 28 dias, os decréscimos na carga elétrica foram de 61% e 87% para as misturas MC5% e MC10%, 48% e 87% para as misturas BL5% e BL10% e 34% e 54% para as misturas CLE2-5% e CLE2-10%, respectivamente. Este comportamento classificou as misturas da seguinte forma: MC5%, MC10%, BL5%, BL10% e CLE2-10% como de *muito baixa* penetração aos íons cloro e a mistura CR60 e CLE2-5% como de *baixa* penetração iônica. Para a idade de 91 dias, as reduções continuaram expressivas, porém, a única diferença apresentada com relação à classificação, quando comparada aos 28 dias, foi para a mistura CLE2-5% que passou a ser considerada como de *muito baixa* penetração aos íons cloro. No que diz respeito à idade, houve redução da carga elétrica para todas as misturas, exceto para a mistura BL10%, que apresentou o mesmo comportamento. As maiores reduções foram obtidas para as misturas CR60, CLE2-5% e CLE2-10%, sendo estas de 12%, 11% e 11%, respectivamente. A MC do presente estudo seguiu o mesmo comportamento apresentado por GRUBER *et al.* (2001) e POON *et al.* (2006) *apud* SIDDIQUE (2008), ou seja, a penetração de cloretos foi menor com o aumento do teor de MC.

Analisando conjuntamente os resultados de absorvidade, índice de vazios, absorção de água, penetração acelerada por íons cloro e permeabilidade, pode-se dizer que a incorporação dos aditivos minerais às misturas propiciou efeito benéfico ao material. O refinamento na estrutura de poros proporcionado pelo aumento no volume dos pequenos capilares conduziu a redução desses parâmetros. Porém, verificou-se que os melhores resultados das referidas propriedades foram apresentados para as misturas com 10% de BL e 10% de MC, não descartando as demais misturas que também, apresentaram comportamentos superiores ao concreto de referência. Tal fato pode vir a servir como indicativo de maior durabilidade destes concretos.

6.1.5.10 RETRAÇÃO AUTÓGENA

METACAULINITA

A Figura 6.28 mostra as curvas de retração autógena das misturas de referência e com metacaulinita medida até 112 dias. A Figura 6.29 mostra as mesmas curvas, porém em escala logarítmica.

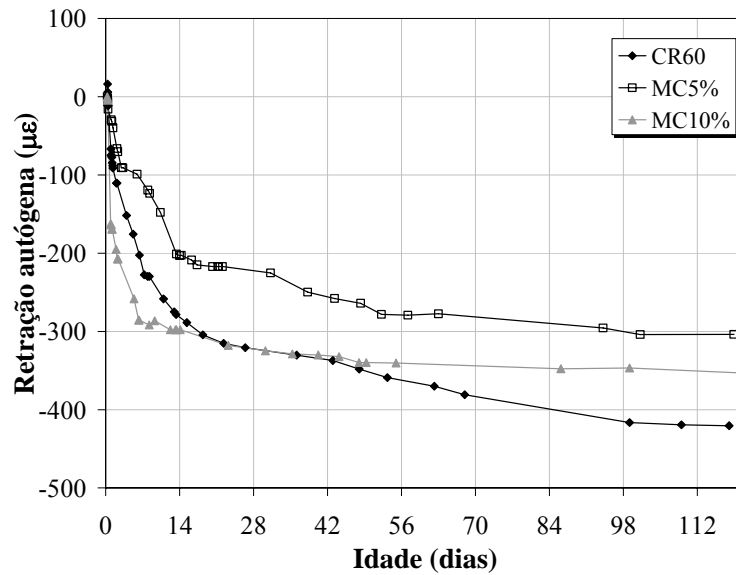


Figura 6.28: Influência da MC na retração autógena do CR60.

As Figura 6.28 e 6.29 mostram que a incorporação de metacaulinita à mistura de referência proporcionou a redução da retração autógena para os dois teores de substituição.

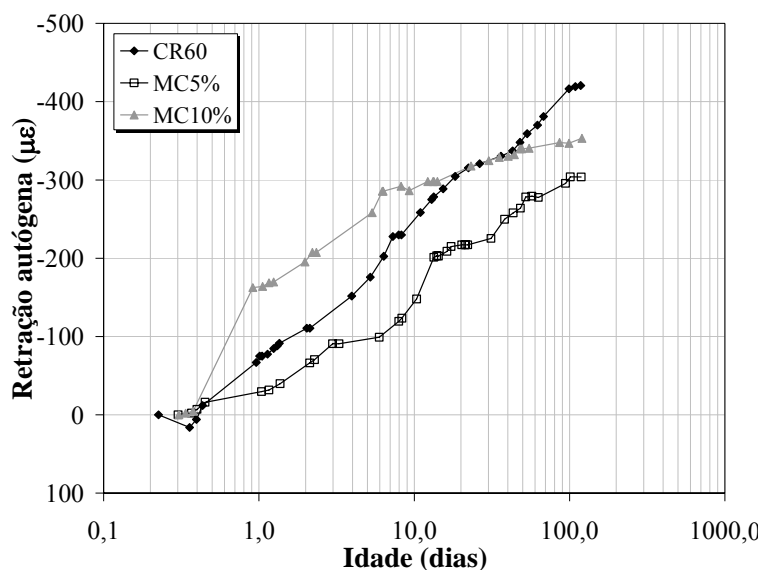


Figura 6.29: Influência da MC na retração autóloga do CR60 em escala logarítmica.

Diferentes resultados foram observados na literatura sobre a influência da MC na retração autóloga. BROOKS *et al.* (2001) encontraram que a substituição parcial de 10% e 15% de cimento Portland por MC, reduziu este parâmetro em concretos, à medida que o teor aumentou comparado à referência. Exceção para a mistura com 5% de substituição que apresentou valor ligeiramente maior. GLEIZE *et al.* (2007) obteve o mesmo comportamento, em pastas, até 20% de substituição. Analisando o comportamento da retração, separadamente, BROOKS *et al.* (2001), em concretos e KINUTHIA *apud* BROOKS *et al.* (2001) em pastas, nas primeiras 24 horas, verificaram que as misturas com MC foram inferiores à referência. Para idades maiores o comportamento foi contrário.

Os possíveis mecanismos encontrados para esses acréscimos foram: efeito de nucleação, reação pozolânica e refinamento de poros. Os decréscimos foram associados ao efeito de diluição do cimento pela MC, ou seja, quanto menor o teor de cimento, menor a retração (GLEIZE *et al.*, 2007). Uma outra possibilidade de redução pode ser em função da natureza do grão. No caso da MC, a sua partícula tem como característica adsorver em sua superfície, significativas quantidades de água. Dentro deste contexto, pode-se dizer que existe a possibilidade de que tanto a natureza do grão, quanto à cinética da reação, quanto o efeito de diluição contribuam, de alguma forma, para a retração

autógena das misturas com MC serem inferiores à referência.

No presente estudo, a mistura MC10% mostrou comportamento superior à referência até a idade de 20 dias. Tal fato foi atribuído ao aumento na cinética das reações de hidratação, onde aos 28 dias, verificou-se que 96,8% da retração já tinha ocorrido quando comparada aos 112 dias, enquanto para as misturas CR60 e MC5% estes valores foram de 76,6% e 71,0%, respectivamente. A presença da metacaulinita proporcionou aceleração nas reações de hidratação, além da reação pozolânica com o hidróxido de cálcio, contribuindo para o maior refinamento na estrutura de poros e ganho mais rápido da resistência à compressão nas primeiras idades. Como apresentado no item 6.1.4.3, a mistura CR60 até os 7 dias apresentou taxa de crescimento de 44,8%, enquanto as misturas com 5% e 10% apresentaram valores de, respectivamente, 81,4% e 80,0%. Apesar da mistura MC5% demonstrar um percentual maior, ressalva deve ser feita para a idade de 1 dia, onde a MC10% já apresentava valor de resistência à compressão 8% maior que a MC5% e igual a CR60. Para idades avançadas, o teor de 10%, passou a ser inferior à referência a partir de 28 dias, alcançando decréscimo de 18,1%, em 112 dias. Este comportamento pode estar associado à redução na cinética de reação de hidratação e que pode ser justificado com o comportamento da resistência à compressão, onde após 28 dias a taxa de crescimento passa a ser similar à referência. Por conseguinte, a longas idades, a ação preponderante passou a ser, provavelmente, a natureza do grão.

A mistura MC5%, na idade de 1 dia, apresentou o menor valor de retração autógena comparado à CR60 e MC10%. BROOKS *et al.* (2001) associou este fato ao efeito de diluição, onde a substituição de cimento Portland por MC e a presença do superplastificante retardaram o início das reações de hidratação. Para idades maiores, o teor de 5% permaneceu inferior à CR60, sendo esta de 25,7%, aos 112 dias, comportamento associado à natureza do grão.

Na Tabela 6.15 estão apresentados os valores de retração autógena no tempo para as misturas CR60, MC5% e MC10%.

Tabela 6.15: Valores de retração autógena no tempo para as misturas CR60, MC5% e MC10%.

Misturas	Retração autógena ($\mu\epsilon$)					
	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	56 dias	112 dias
CR60	-75	-130	-219	-322	-381	-420
MC5%	-16	-91	-109	-222	-279	-312
MC10%	-164	-222	-288	-323	-333	-344

Em ordem decrescente de magnitude, a explicação para que $CR60 > 10\% \text{ de MC} > 5\% \text{ de MC}$ pode ser atribuída à ação desses mecanismos (efeito de nucleação, diluição, refinamento de poros e natureza do grão). A preponderância de um ou de outro, varia conforme a mistura e com a idade analisada. O fato de 10% de MC apresentar menor retração que CR60 pode estar associado ao efeito de diluição preponderar sobre os demais. Porém, isto não significa que a cinética da reação, ou a natureza do grão não estejam agindo no sistema, estão sim, só que em menor intensidade. Caso exista a possibilidade deste fenômeno estar mesmo acontecendo, então seria viável que 5% de substituição possuísse uma retração maior que 10%. Isto talvez possa ser explicado pela natureza do grão que, ao adsorver água em sua superfície, passou a atuar como “cura interna”. Ou seja, liberam água para o sistema de modo a reduzir a tensão capilar entre os grãos. Em paralelo, a cinética de reação na MC10% é superior à MC5% e este promove um refinamento maior na estrutura de poros e, por conseguinte, intensifica o fenômeno da auto-dessecação. Esta ação pode vir a preponderar sobre o processo de “cura interna”, aumentando a retração na mistura com 10% de MC.

Mais estudos dever ser realizados para a completa elucidação dos mecanismos mencionados.

CINZA DE LODO DE ESGOTO

Na Figura 6.30 encontram-se as curvas de retração autógena das misturas de referência e CLE2. Na Figura 6.31 estas mesmas curvas são apresentadas, porém em escala logarítmica.

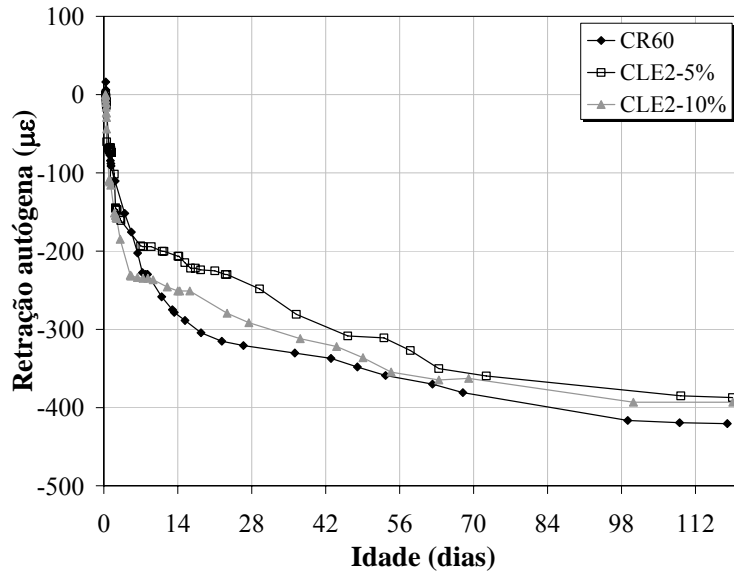


Figura 6.30: Influência da CLE2 na retração autóloga.

Até a idade de 7 dias, verificou-se o aumento da retração autóloga quando comparada à referência, sendo esta diferença de 17,9%. Este fato pode ser atribuído ao aumento na aceleração das reações de hidratação que conduzem ao efeito de nucleação e conseqüente refinamento na estrutura de poros. Tais fatores contribuíram, provavelmente, para o aumento da retração autóloga.

Tabela 6.16: Valores de retração autóloga no tempo para as misturas CR60, CLE2-5% e CLE2-10%.

Misturas	Retração autóloga (µε)					
	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	56 dias	112 dias
CR60	-75	-130	-219	-322	-381	-420
CLE2-5%	-69	-159	-193	-230	-320	-385
CLE2-10%	-110	-228	-235	-293	-356	-393

A partir dos 9 dias, a mistura CLE2-10% passa a ter retração inferior à referência, permanecendo assim até a idade de 112 dias (Ver Figura 6.31). A mistura MC5% apresenta este mesmo comportamento em praticamente todas as idades analisadas. O comportamento inferior à referência, pode estar associado ao efeito de diluição e à natureza do grão da CLE. Segundo MONZÓ *et al.* (1996) e MONZÓ *et al.* (2003), a CLE possui elevada absorção de água, servindo como “reservatório” de água.

Provavelmente, tal fato contribui para a redução da tensão capilar entre estes grãos reduzindo a retração em relação à referência. O ganho de resistência à compressão para as misturas com CLE2, ocasionado pelo refinamento de poros proporcionaria, neste período, maior retração autógena às misturas comparada à referência. Mesmo assim, preponderou, provavelmente, o efeito de diluição e a natureza do grão.

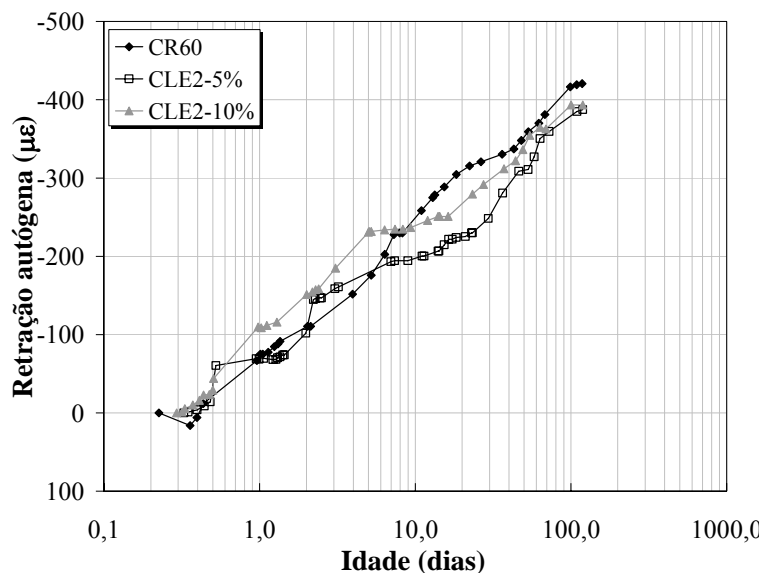


Figura 6.31: Influência da CLE2 na retração autógena: escala logarítmica.

Entre as misturas, verifica-se que a diferença deste parâmetro reduz no tempo chegando a, apenas, 2% aos 112 dias. O mesmo aconteceu para a resistência à compressão, após a idade de 7 dias.

BLENDAS

Na Figura 6.32 estão apresentadas as curvas de retração autógena referentes às misturas de referência e com BL. Na Figura 6.33 estas mesmas curvas são apresentadas, porém em escala logarítmica.

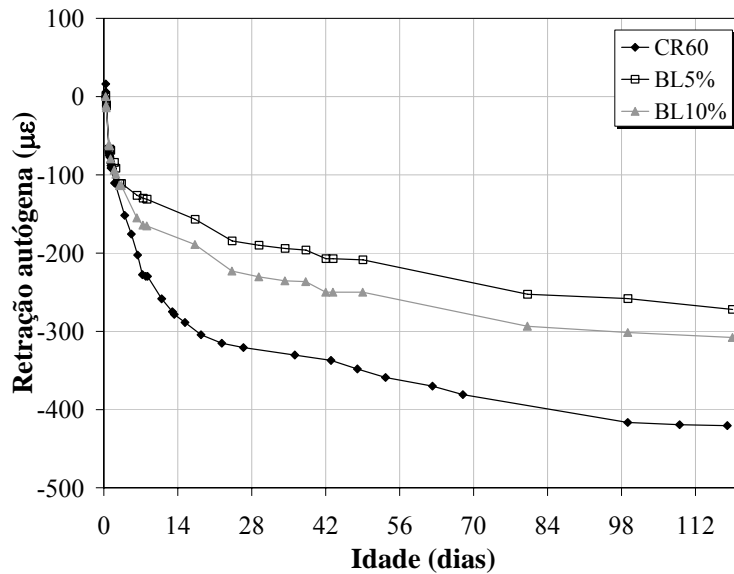


Figura 6.32: Influência da BL na retração autógena.

Através dos valores apresentados na Tabela 6.17 fica evidente que a incorporação da BL reduz a retração autógena no tempo, comparada à referência. Este comportamento pode estar associado ao efeito de diluição do cimento pela BL. Porém, isto não significa que a cinética da reação, ou a natureza do grão não estejam agindo no sistema, estão sim, só que em menor intensidade.

Entre os teores, nota-se que a mistura BL5% propiciou uma menor retração autógena quando comparado à BL10%. Este comportamento pode ser associado ao fato de 10% de BL conduzir ao maior refinamento da estrutura de poros, aumentando a tensão capilar e, por conseguinte este parâmetro. Fato este confirmado pelos elevados valores de resistência à compressão no tempo. Além disso, 5% de BL possui um efeito reativo menor que BL10%, podendo o efeito da natureza do grão proponderar sobre os demais, ocasionando a redução da retração.

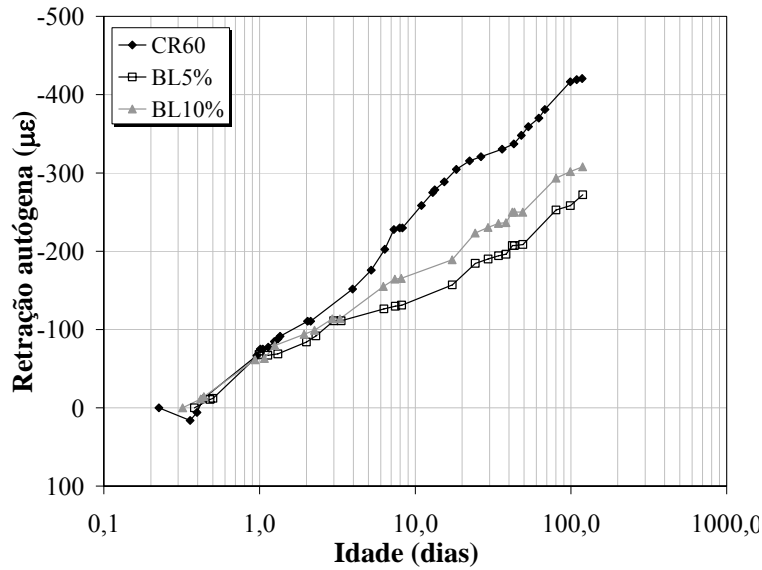


Figura 6.33: Influência da BL na retração autóloga: escala logarítmica.

Na Tabela 6.17 encontram-se os valores de retração autóloga para as misturas CR60, BL5% e BL10%.

Tabela 6.17: Valores de retração autóloga no tempo para as misturas CR60, BL5% e BL10%.

Misturas	Retração autóloga (µε)					
	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	56 dias	112 dias
CR60	-75	-130	-219	-322	-381	-420
BL5%	-68	-111	-130	-189	-219	-267
BL10%	-72	-125	-166	-257	-290	-338

Com relação aos valores obtidos até a idade de 112 dias, observa-se que a maior intensidade do fenômeno ocorreu até os 28 dias, onde 76,6% da retração já havia acontecido para a mistura CR60. As misturas BL5% e BL10% apresentaram percentual de 70,8% e 76,0%, respectivamente.

6.1.5.11 RETRAÇÃO POR SECAGEM

METACAULINITA

Na Figura 6.34 estão apresentadas as curvas de retração por secagem para as misturas de referência e com metacaulinita. Na Figura 6.35 encontram-se os gráficos de retração por secagem *versus* perda de massa de água das misturas.

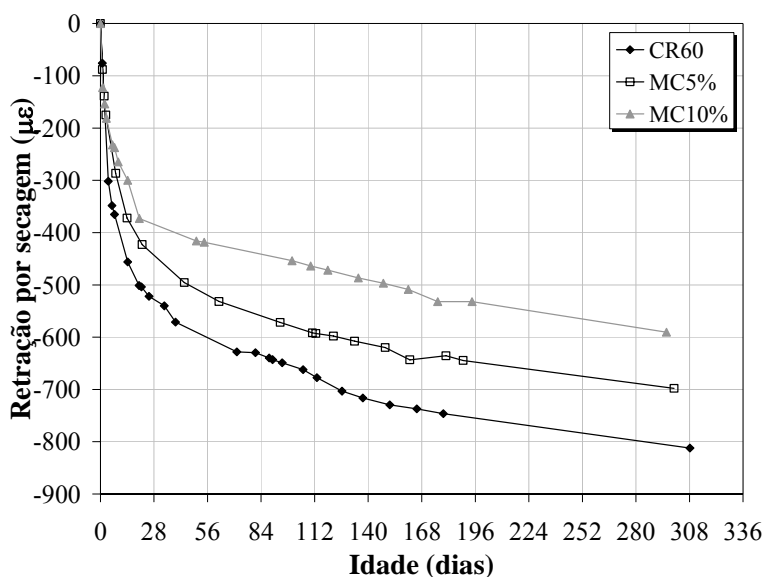


Figura 6.34: Influência da MC na retração por secagem.

A partir dos resultados obtidos acima, verifica-se que à medida que MC foi incorporada à mistura de referência, a retração por secagem a reduziu. Este fato está associado ao refinamento na estrutura de poros das misturas com MC, dificultando a saída de água existente no interior da matriz para o meio externo. Este comportamento condiz com os valores encontrados para distribuição de poros e ensaios de permeabilidade e absorvidade das misturas.

A partir da Figura 6.35 percebe-se que a maior perda de massa foi obtida para a mistura com maior retração (CR60), sendo esta de 0,90%. Em seguida vieram as misturas MC5% e MC10%, com valores de perda de massa de água de, respectivamente, 0,83% e 0,8%.

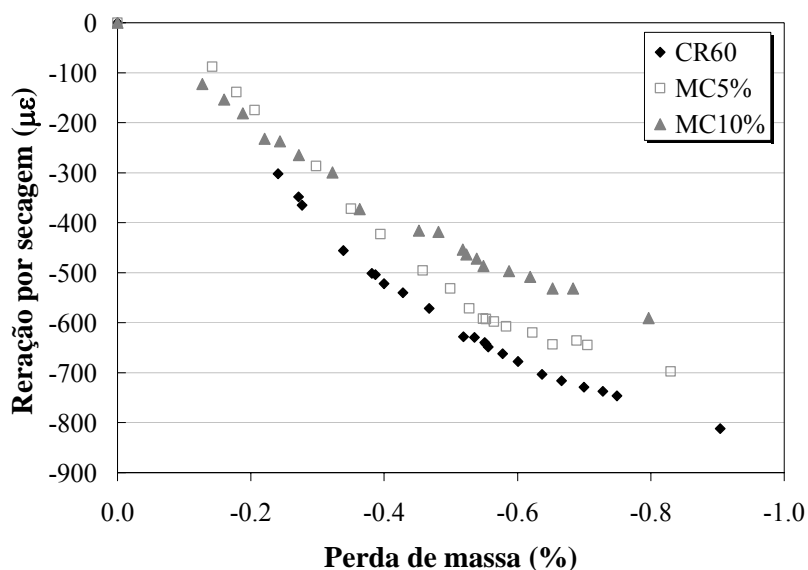


Figura 6.35: Gráfico de retração por secagem em relação à perda de massa das misturas.

Na Tabela 6.18 estão apresentados os valores de retração por secagem para as misturas CR60, MC5% e MC10%.

Tabela 6.18: Valores de retração por secagem no tempo para as misturas CR60, MC5% e MC10%.

Misturas	Retração por secagem ($\mu\epsilon$)						
	1 dia	7 dias	28 dias	56 dias	112 dias	147 dias	295-300 dias
CR60	-76	-365	-529	-601	-675	-725	-812
MC5%	-88	-265	-443	-488	-593	-619	-698
MC10%	-123	-237	-385	-421	-466	-496	-591

Através dos dados apresentados na Tabela 6.18 verifica-se que a mistura de referência apresentou aos 300 dias, retração de $-812\mu\epsilon$. A incorporação de 5% de MC proporcionou a redução deste parâmetro, sendo esta de $698\mu\epsilon$ na idade de 300 dias. Quando 10% de MC foi utilizado, esta redução foi mais expressiva, passando a ser de $591\mu\epsilon$, cerca de 27,2%. Além disso, pode-se observar que, até os 28 dias, em torno de 65% da retração por secagem já havia acontecido para as três misturas, indicando a intensidade do fenômeno nas primeiras idades.

CINZA DE LODO DE ESGOTO

Na Figura 6.36 encontra-se as curvas de retração por secagem das misturas de referência e com CLE2 no tempo.

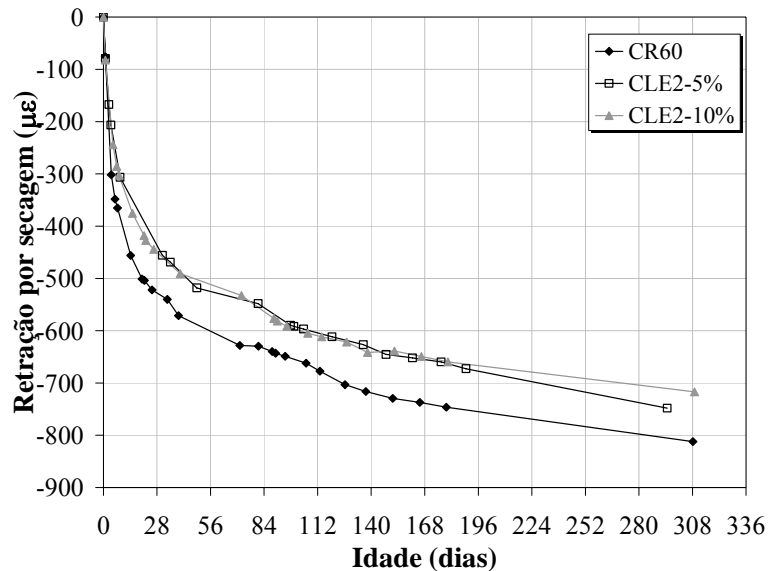


Figura 6.36: Influência da CLE2 na retração por secagem.

Analisando o comportamento das curvas ilustradas acima, observa-se que as misturas contendo CLE2 apresentaram retração por secagem inferior à referência. Este fato pode ser atribuído ao refinamento na microestrutura do material, dificultando a saída da água para o meio externo. A igualdade nos valores de retração para as misturas com cinza, condiz com os dados obtidos para a absorvidade das misturas.

Através da Figura 6.37 pode-se dizer que seguindo o comportamento obtido para a retração, a mistura CR60 perdeu cerca de 0,90% de massa de água, contra 0,86% para CLE2-5% e 0,90% para CLE2-10%.

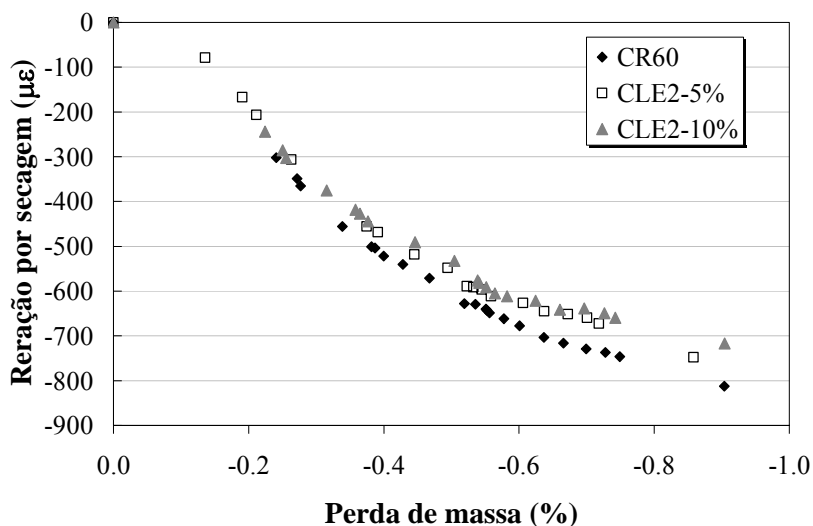


Figura 6.37: Gráfico de retração por secagem em relação à perda de massa das misturas de referência e com CLE2.

Na Tabela 6.19 encontra-se os valores de retração por secagem das misturas de referência e com CLE2.

Tabela 6.19: Valores de retração por secagem no tempo para as misturas CR60, CLE2-5% e CLE2-10%.

Misturas	Retração por secagem (µε)						
	1 dia	7 dias	28 dias	56 dias	112 dias	147 dias	295-305 dias
CR60	-76	-365	-529	-601	-675	-725	-812
CLE2-5%	-79	-302	-326	-541	-604	-628	-748
CLE2-10%	-82	-286	-485	-512	-607	-641	-717

Com relação à referência, observa-se que a retração por secagem, aos 112 dias reduziu em, respectivamente, 7,9% e 11,7% para as misturas CLE2-5% e CLE2-10%. Entre si, não houve diferenças expressivas entre 5% e 10% de cinza, exceção para a idade de 28 dias, onde a diferença chegou a 32,8%.

BLENDA

Na Figura 6.38 estão apresentadas as curvas de retração por secagem no tempo das misturas de referência e com BL.

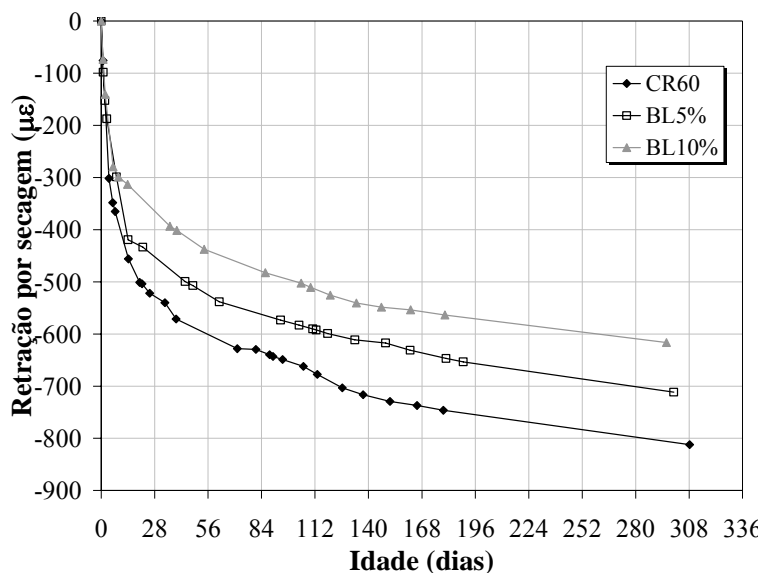


Figura 6.38: Influência da BL na retração por secagem.

O mesmo comportamento apresentado pela MC e pela CLE2 foi também observado para a BL. Ou seja, a mistura CR60 apresentou maior retração que a mistura com 5% de BL e esta, por conseguinte foi maior que 10% de BL. Este comportamento pode se explicar pela ação físico-química do aditivo mineral que, contribuiu para o refinamento na estrutura de poros, conduzindo a possibilidade da maior perda de água acontecer pelo fenômeno da auto-dessecação, do que pela difusão para o meio externo (BROOKS *et al.*, 2001). Conseqüentemente, quanto maior o teor de BL, maior será esta ação e menor será a perda de água para o meio.

Na Figura 6.39 encontra-se o gráfico de perda de massa de água em função da retração por secagem de cada mistura.

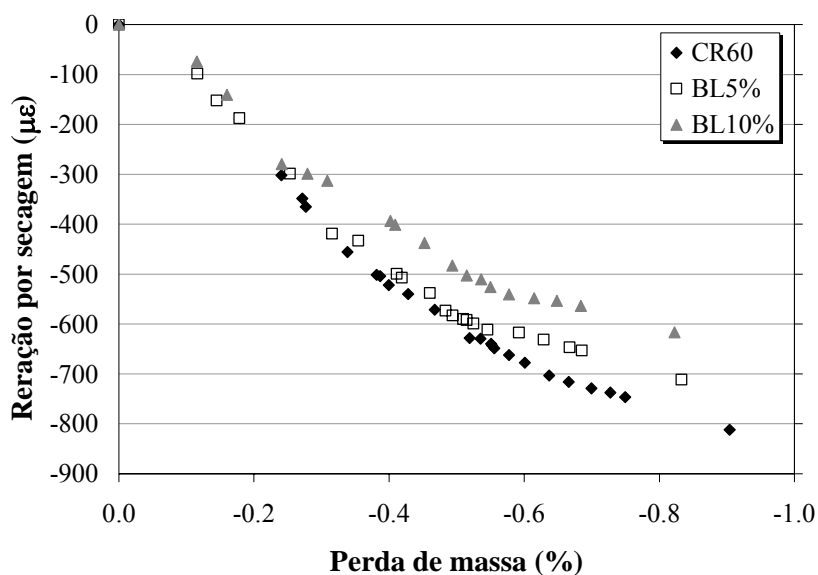


Figura 6.39: Perda de massa da BL no tempo no ensaio de retração por secagem.

A mistura CR60 perdeu 0,9% de massa de água, enquanto BL5% e BL10% reduziram este parâmetro em, respectivamente, 0,83% e 0,82%. Na Tabela 6.20 estão apresentados os valores de retração por secagem para as misturas de referência e com BL.

Tabela 6.20: Valores de retração por secagem no tempo para as misturas CR60, BL5% e BL10%.

Misturas	Retração por secagem ($\mu\epsilon$)						
	1 dia	7 dias	28 dias	56 dias	112 dias	147 dias	295- 300 dias
CR60	-76	-365	-529	-601	-675	-725	-812
BL5%	-98	-209	-481	-520	-591	-612	-712
BL10%	-74	-293	-342	-480	-522	-549	-616

Através da Tabela 6.20, nota-se que na idade de 1 dia, a mistura com 5% de BL apresentou uma retração de $-98\mu\epsilon$, significando um acréscimo de 28% em relação à referência ($-78\mu\epsilon$). As misturas CR60 e BL10% podem ser ditas iguais para esta idade. A partir do 7º dia, a retração passou a ser inferior à referência e permaneceu assim até 300 dias. Nesta idade, a redução deste parâmetro para as duas misturas BL5% e BL10%, em relação à CR60, foi de 12,3% e 24,1%, respectivamente.

6.1.5.12 ENSAIOS AMBIENTAIS

AMOSTRAS NO ESTADO MONOLÍTICO

Na Tabela 6.21 estão apresentados os resultados da análise química realizada no extrato proveniente do ensaio de solubilização realizado em amostras no estado íntegro.

Tabela 6.21: Resultados do ensaio de solubilização em amostras no estado íntegro.

Parâmetros	Concentração (mg/L)				NBR 10004 (ABNT, 2004)
	CR60	MC10%	CLE2-10%	BL10%	
Mercúrio	< 0,00005	< 0,00005	< 0,00005	< 0,00005	0,001
Prata	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,05
Alumínio	0,758	1,0	0,727	1,2	0,2
Arsênio	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01
Bário	0,020	< 0,01	0,012	< 0,01	0,7
Cádmio	0,005	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,005
Chumbo	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01
Cobre	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	2,0
Cromo	0,042	0,045	0,048	0,059	0,05
Ferro	< 0,01	0,013	< 0,01	< 0,01	0,3
Manganês	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,1
Selênio	< 0,008	< 0,008	< 0,008	< 0,008	0,01
Sódio	8,6	18,9	26,4	23,6	200
Zinco	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	5,0
Nitrato (N)	< 2,0	< 0,1	< 0,2	< 0,2	10,0
Cloreto	4,3	4,5	6,5	4,4	250
Sulfato	11,8	18,5	34,4	27,7	250
Fluoreto	< 0,2	< 0,1	< 0,2	< 0,2	1,5
pH final	11,56	10,76	11,28	11,25	-

Analisando os resultados verifica-se que o parâmetro alumínio solubilizou para todas as misturas em concentração acima da máxima permitida pela NBR 10004 (ABNT, 2004), inclusive a mistura de referência (CR60). Tal fato pode ser atribuído, provavelmente, ao fato de grãos de cimento não hidratados, presentes no concreto, liberarem o alumínio quando em contato com a água.

Dentro deste contexto, pode-se dizer que o comportamento apresentado pelas misturas

com aditivo mineral está associado, também, à contribuição da mistura de referência, não apenas à presença do aditivo. GEYER (2001) e GEYER *et al.* (1998) encontraram comportamentos similares quando incorporaram a cinza de lodo de esgoto em concretos. Em contrapartida, no estudo realizado por FONTES (2003) o referido metal não solubilizou para o meio externo.

Para a mistura BL10% além do alumínio, o cromo também apresentou concentração acima da norma. Como o concreto de referência, a MC 10% e a CLE2-10% solubilizaram para este parâmetro, porém em concentrações inferiores ao limite máximo da norma, a presença do cromo na mistura BL10% pode estar associada à ação conjunta do cimento, MC e CLE2.

De um modo geral, a matriz cimentícia apresentou excelente comportamento no que diz respeito ao encapsulamento dos metais pesados. A análise no solubilizado dessas cinzas apresentou desprendimento de vários metais tal como alumínio, cromo, ferro, manganês, selênio e sulfato. E verificou-se que apenas a BL10% solubilizou para um metal que é considerado nocivo.

CICLOS DE MOLHAGEM E SECAGEM

Os resultados referentes aos ensaios de solubilização realizados nas amostras submetidas aos ciclos de molhagem e secagem estão mostrados na Tabela 6.22 .

Tabela 6.22: Resultados do ensaio de solubilização em amostras submetidas à situação de molhagem e secagem.

Parâmetros	Concentração (mg/L)				NBR 10004 (ABNT, 2004)
	CR60	MC10%	CLE2-10%	BL10%	
Mercúrio	<0,00005	<0,00005	< 0,00005	< 0,00005	0,001
Prata	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,05
Alumínio	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,2
Arsênio	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01
Bário	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,7
Cádmio	< 0,001	<0,001	< 0,001	< 0,001	0,005
Chumbo	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01
Cobre	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	2,0
Cromo	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,05
Ferro	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,3
Manganês	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,1
Selênio	< 0,008	< 0,008	< 0,008	< 0,008	0,01
Sódio	10,0	34,8	8,3	8,0	200
Zinco	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	5,0
Nitrato (N)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	10,0
Cloreto	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	250
Sulfato	< 1,0	1,4	< 1,0	< 1,0	250
Fluoreto	< 0,1	0,1	< 0,1	< 0,1	1,5
pH final	8,82	9,93	9,20	8,82	-

Verificou-se que após os 25 ciclos de secagem e molhagem, o alumínio ficou abaixo do limite de detecção do aparelho. Provavelmente, este comportamento pode ser atribuído à existência de uma fração solúvel no interior da matriz cimentícia e que pode ser considerada finita. Quando a amostra foi colocada em contato com a água, propiciou a sua solubilização. Tal fato pode ter acontecido logo nos primeiros ciclos. Com isso, pode-se dizer que no estado monolítico, a utilização destes aditivos minerais no concreto não oferece risco de contaminação do meio ambiente.

AMOSTRAS NO ESTADO DEMOLIDO

Na Tabela 6.23 encontram-se os resultados referentes ao ensaio de solubilização realizado nas amostras no estado demolido.

Tabela 6.23: Resultados do ensaio de solubilização em amostras no estado demolido.

Parâmetros	Concentração (mg/L)				NBR 10004 (ABNT, 2004)
	CR60	MC10%	CLE2-10%	BL10%	
Mercúrio	<0,00005	<0,00005	< 0,00005	< 0,00005	0,001
Prata	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,05
Alumínio	0,882	1,7	0,803	2,0	0,2
Arsênio	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01
Bário	0,263	0,235	0,418	0,021	0,7
Cádmio	0,004	<0,001	< 0,001	< 0,001	0,005
Chumbo	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01
Cobre	< 0,005	< 0,005	0,006	0,020	2,0
Cromo	0,105	0,056	0,068	0,240	0,05
Ferro	< 0,01	< 0,01	0,026	0,042	0,3
Manganês	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,1
Selênio	< 0,008	< 0,008	< 0,008	< 0,008	0,01
Sódio	114	124	107	90,6	200
Zinco	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	5,0
Nitrato (N)	< 2,0	< 0,1	< 0,1	< 0,5	10,0
Cloreto	< 20	18,9	19,8	36,2	250
Sulfato	26,8	10,2	20,7	129	250
Fluoreto	< 1,0	< 0,1	< 0,1	< 0,5	1,5
pH final	12,53	12,27	12,39	11,78	-

Observa-se que as amostras no estado demolido solubilizaram para os mesmos metais das amostras no estado íntegro, porém em concentrações maiores. Tal comportamento já era esperado, visto que as amostras no estado demolido ficam mais expostas à liberação dos seus constituintes.

Como esta condição simula o término de vida útil da estrutura, pode-se dizer que os materiais apresentaram excelente comportamento, pois conseguiram imobilizar os demais metais pesados em sua matriz cimentícia, após fragmentação do material. Além disso, provavelmente esta massa de alumínio e cromo irá solubilizar para o meio

externo durante um determinado período, devido ao comportamento apresentado pelo material no estado íntegro.

AMOSTRAS QUEIMADAS A 1000°C

Na Tabela 6.24 encontram-se os resultados da análise química realizada no solubilizado das amostras queimadas a 1000°C.

Tabela 6.24: Resultados do ensaio de solubilização em amostras queimadas a 1000°C.

Parâmetros	Concentração (mg/L)				NBR 10004 (ABNT, 2004)
	CR60	MC10%	CLE2-10%	BL10%	
Mercúrio	<0,00005	<0,00005	< 0,00005	< 0,00005	0,001
Prata	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,05
Alumínio	26,2	110	40,5	5,2	0,2
Arsênio	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01
Bário	0,055	0,264	0,093	0,616	0,7
Cádmio	0,004	0,004	0,004	0,004	0,005
Chumbo	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01
Cobre	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	2,0
Cromo	1,3	0,613	0,934	< 0,01	0,05
Ferro	< 0,01	0,020	< 0,01	0,031	0,3
Manganês	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,1
Selênio	< 0,008	< 0,008	< 0,008	< 0,008	0,01
Sódio	99,3	52,6	58,9	33,7	200
Zinco	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	5,0
Nitrato (N)	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 1,0	10,0
Cloreto	< 5,0	8,5	6,0	< 10,0	250
Sulfato	460	61,9	247	< 10,0	250
Fluoreto	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 1,0	1,5
pH final	12,32	11,19	10,91	11,03	-

Após as amostras serem queimadas a 1000°C, o concreto de referência solubilizou para o alumínio, cromo e sulfato. Este comportamento poderia acontecer visto que, no estado demolido estes parâmetros também solubilizaram e esta condição a que o material foi exposto, é mais agressiva que a anterior. O mesmo vale para 10% de MC, CLE2 e BL que solubilizaram para o alumínio e, com exceção da BL10%, solubilizaram também, para o cromo. Vale ressaltar que o comportamento apresentado pela BL não era

esperado, visto que o cromo ficou acima do limite da norma no estado íntegro e demolido.

Mesmo assim, apesar de ser uma situação de extrema agressividade, apenas o alumínio e o cromo, já anteriormente solubilizados (estado demolido e íntegro), se desprenderam para o meio externo. Os demais metais pesados permaneceram encapsulados no interior do material.

De um modo geral, pode-se dizer que as matrizes cimentícias demonstraram comportamento satisfatório com relação à imobilização dos metais pesados presentes na composição dos aditivos minerais. Mesmo quando submetidas a situações de extrema agressividade (elevadas temperaturas e estado demolido).

6.1.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS CONCRETOS CONTENDO MC, CLE2 E BL

Com base nos ensaios de caracterização das MC, CLE2 e BL e nas análises dos resultados obtidos para concretos produzidos com as referidas cinzas pode-se dizer que:

A CLE2 e a BL, após ensaios de lixiviação e solubilização foram classificadas como resíduo classe II-A: não inerte, sendo necessário, portanto, uma disposição adequada e segura dessas cinzas de modo a impedir que os metais pesados presentes em suas composições sejam desprendidos para o meio ambiente. Por não ser considerada um resíduo, a MC não necessitou de classificação. Porém, verificou-se que a mesma solubilizou para o alumínio, ferro e cromo, ressaltando que a presença do cromo foi associada a uma possível contaminação da jazida onde o material foi coletado.

CONCRETO NO ESTADO FRESCO

Quando os aditivos minerais foram incorporados aos concretos, verificou-se a redução do abatimento, sendo necessária a utilização de SP para corrigir o mesmo para $150\text{mm} \pm 10\text{mm}$, valor este previamente definido durante a dosagem dos concretos. Após a correção do abatimento com SP, as misturas ficaram dentro da faixa estabelecida, exceção para a MC10% que apresentou abatimento de 170mm. Porém, o seu comportamento foi atribuído ao elevado teor de ar aprisionado proporcionando uma maior fluidez à mistura.

PROPRIEDADES MECÂNICAS

Aos 28 dias, a resistência à compressão prevista durante a dosagem (60MPa) para o concreto de referência foi alcançada ($R_c = 59,5\text{MPa}$). Ao incorporar aditivo mineral à mistura, nota-se que acréscimos deste parâmetro foram obtidos para os dois teores de substituição, comparados a CR60.

Com relação à evolução de crescimento da resistência à compressão, verificou-se que na idade de 1 dia, as misturas MC10% e CLE2-5% apresentaram valores estaticamente iguais à CR60. As demais misturas diferiram significativamente, sendo o pior comportamento obtido para a BL10%. Aos 3 dias, todas as misturas superaram a referência, comportamento este que se manteve até a idade de 365 dias.

As taxas de crescimento de resistência à compressão das misturas com aditivo mineral continuaram superiores à referência até os 28 dias. Dois mecanismos foram associados a este ganho rápido de resistência à compressão: (1) ação física e (2) ação química. A ação física foi associada à finura dos aditivos minerais que atuam como pontos de nucleação, acelerando as reações de hidratação do cimento. A ação química produz mais produtos hidratados através das reações pozolânicas.

A resistência à tração por compressão diametral das misturas contendo aditivo mineral apresentou acréscimos deste parâmetro, quando comparadas à referência. Estatisticamente, somente a mistura CLE2-10% foi considerada igual à referência.

Dentro deste contexto, observa-se que a resistência à tração por compressão diametral apresentou o mesmo comportamento da resistência à compressão, sendo o acréscimo de R_{tcd} associado ao efeito físico-químico proporcionado por cada aditivo mineral. Portanto, pode-se dizer que a presença do aditivo mineral à mistura de referência melhorou o seu desempenho mecânico.

O módulo de elasticidade não foi modificado expressivamente com a incorporação de aditivos minerais, nos teores de 5% e 10%, em relação à referência. Aos 28 dias, 5% e 10% de aditivos minerais não influenciou significativamente no módulo, comparado à referência. Aos 91 dias, apenas as misturas com 10% de MC e BL apresentaram diferenças estatísticas em relação à referência.

A deformação de pico para as misturas contendo aditivo mineral foram superiores à referência, aos 28 dias. As misturas MC5% e MC10% apresentaram os menores aumentos e este fato foi associado à ruptura brusca dos corpos-de-prova antes de atingirem a deformação de pico. Aos 91 dias, este mesmo tipo de comportamento foi observado nas misturas MC10%, CLE2-5% e BL10%. A mistura BL5% foi dita igual à referência.

COMPARATIVO ENTRE RESULTADOS EXPERIMENTAIS E TEÓRICOS

Pode-se dizer que houve uma boa correlação entre os resultados previstos pelo programa computacional BetonlabPro 2[®] e os resultados experimentais obtidos no presente estudo.

PROPRIEDADES FÍSICAS E DE DURABILIDADE

A incorporação de 5% e 10% de MC, em substituição parcial ao cimento Portland, diminuiu a absorção de água e índice de vazios sendo este comportamento considerado significativo em relação à referência. O mesmo foi observado para BL e CLE2 onde ambas apresentaram reduções significativas. Estatisticamente, 5% de MC foi considerado significativamente diferente de 10% de MC. O mesmo vale para a BL. Em contrapartida, utilizar 5% ou 10% de CLE2, não influenciou nestas duas propriedades.

Para a massa específica, apesar dos incrementos das misturas com 5% de aditivo mineral (MC, CLE2 e BL) ser de apenas 2%, este foi considerado significativo em relação à referência. Para as misturas com 10% os acréscimos foram inferiores a 1%. Porém, somente a mistura MC10% foi considerada igual a CR60. Nesta propriedade, utilizar 5% ou 10% não foi significativo para a BL, para as demais sim.

A presença de aditivos minerais às misturas reduziu o ganho de massa de água no tempo em relação à mistura de referência, refletindo em seus valores de absorvidade. A MC, CLE2 e BL, nos teores de 5% e 10% reduziram a absorvidade das misturas, nos dois estágios quando comparada à referência.

Os “dc’s” obtidos para o teor de 5% das misturas MC, CLE2 e BL foram de, respectivamente, 0,049 μ m, 0,08 μ m e 0,06 μ m, enquanto a mistura de referência apresentou diâmetro de 0,06 μ m. Para o teor de 10%, o diâmetro crítico da MC reduziu para 0,045 μ m, o da CLE2 aumentou para 0,085 μ m e o da BL decresceu para 0,05 μ m. Através destes resultados pode-se dizer que a presença do aditivo mineral refinou a estrutura de poros, reduzindo provavelmente, a conectividade entre os poros e dificultando a percolação de água pelos interstícios do material. A distribuição de poros tornou este comportamento evidente, devido ao aumento na quantidade de pequenos capilares das misturas com aditivo mineral em relação à referência. Exceção para a mistura com CLE2, devido à possível quebra dos poros durante a realização do ensaio.

Desta forma, pode-se dizer que a incorporação dos aditivos minerais às misturas propiciou efeito benéfico ao material. Através das reduções na absorvidade, porosidade total, absorção de água e estrutura de poros contribuiu para acréscimos nas propriedades mecânicas, em relação à referência. Além disso, o comportamento obtido

serve como um indicativo de maior durabilidade destes materiais, devido ao aumento na dificuldade dos agentes agressivos ingressarem para o interior do material.

A retração autógena apresentou, em ordem de magnitude, maiores valores deste parâmetro para a mistura CR60, seguida das misturas com 10% de substituição e por fim, o teor de 5%, independente do aditivo mineral utilizado. Entre os teores, o fato das misturas com 10% apresentarem maior valor de retração foi associado à maior cinética das reações de hidratação, propiciadas pela ação físico-química do material. Tal fato aumentou o refinamento na estrutura porosa do material, aumentando a retração autógena quando comparada ao teor de 5%.

A retração por secagem apresentou redução à medida que o teor de substituição de cimento Portland por aditivo mineral aumentou. O fato da mistura com CR60 apresentar maior retração que a mistura com 5% de aditivo mineral e esta, por conseguinte, ser maior que 10%, foi explicada pela ação físico-química do aditivo mineral. Este efeito acelera a hidratação, intensificando a formação de produtos hidratados, além de refinar a estrutura de poros, dificultando a saída de água para o meio externo. Observou-se também que tal comportamento propiciou menor perda de massa de água à medida que o teor de substituição aumentou, sendo esta perda inferior à referência.

ANÁLISE AMBIENTAL

Todas as amostras no estado íntegro solubilizaram para o alumínio e apenas a BL10% solubilizou também para o cromo. Porém, quando amostras foram submetidas ao ensaio de solubilização, após passarem por ciclos de molhagem e secagem, verificou-se que os referidos metais não mais se desprenderam para o meio externo. Isto pode ser um indicativo de que existe uma fração solúvel presente no material e esta é finita.

As amostras no estado demolido e queimado a 1000°C solubilizaram para o alumínio e cromo, porém em concentrações maiores que no estado íntegro. Este fato foi associado à condição agressiva a que o material foi exposto. Mesmo assim, os demais metais pesados ficaram imobilizados no interior da matriz cimentícia.

Pode-se dizer que a incorporação destes aditivos minerais ao concreto, do ponto de vista ambiental, se comportou de modo satisfatório, não oferecendo riscos nem ao meio

ambiente, nem à população.

6.2 ARGAMASSAS

6.2.1 CONSISTÊNCIA

Na Figura 6.40 estão ilustrados o espalhamento e a indicação dos valores obtidos para as argamassas de referência e com CVRSU.

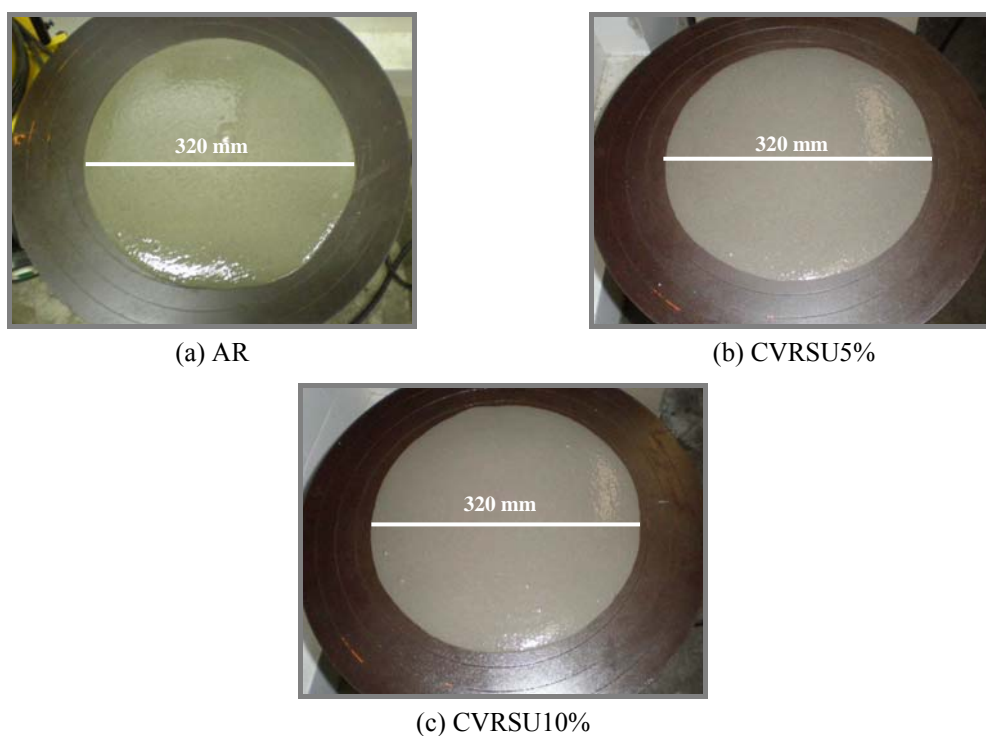


Figura 6.40: Espalhamento das argamassas.

Verificou-se que tanto a argamassa de referência AR quanto as misturas com CVRSU apresentaram espalhamento de 320 mm, não havendo exsudação da água durante a execução deste procedimento. Portanto, não foi necessária a utilização de SP.

6.2.2 GRÁFICO TENSÃO X DEFORMAÇÃO

Na Figura 6.41 encontra-se as curvas típicas de tensão x deformação das misturas de referência e com CVRSU, aos 28 e 91 dias. Observação deve ser feita com relação à idade de 91 dias onde os gráficos foram deslocados para efeito de comparação. Todas as deformações iniciam-se do zero.

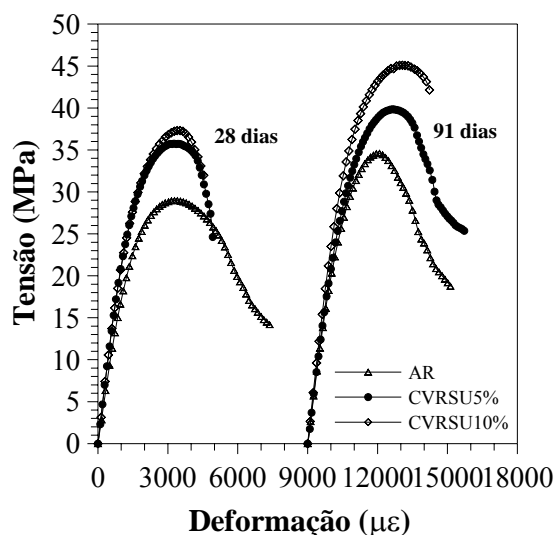


Figura 6.41: Curvas típicas de tensão x deformação das misturas, aos 28 e 91 dias.

As médias dos resultados de resistência à compressão axial, módulo de elasticidade e deformação axial de pico, com seus respectivos coeficientes de variação, nas idades de 28 e 91 dias, para todas as misturas, estão apresentadas na Tabela 6.25.

Tabela 6.25: Propriedades mecânicas das argamassas, aos 28 e 91 dias.

Misturas	Resistência à compressão (MPa) – C.V. (%)		Módulo de elasticidade (GPa) – C.V. (%)		Deformação de pico x 10 ³ (με) – C.V. (%)	
	28 dias	91 dias	28 dias	91 dias	28 dias	91 dias
AR	28,73 - 2,57	33,13 - 4,02	19,17 - 1,59	20,50 - 5,91	2,97 - 8,98	3,14 - 3,27
CVRSU5%	34,93 - 3,14	40,17 - 1,15	23,07 - 0,25	23,23 - 3,29	3,22 - 10,05	3,43 - 8,15
CVRSU10%	37,67 - 3,68	44,77 - 2,76	23,45 - 2,11	25,20 - 2,81	3,64 - 8,12	3,60 - 10,64

Analisando a Tabela 6.25 e a Figura 6.41 nota-se que a presença da CVRSU proporcionou o aumento do ramo linear elástico da curva tensão x deformação, ocasionado pelo incremento na resistência à compressão das misturas com cinza.

6.2.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os resultados de resistência à compressão no tempo, com seus respectivos coeficientes de variação, encontram-se na Tabela 6.26, enquanto na Figura 6.42 estão apresentados as curvas de evolução da resistência à compressão com a idade, para todas as misturas.

Tabela 6.26: Resistência à compressão das argamassas nas idades de 1, 3, 7, 28 e 91 dias – C.V. (%).

Misturas	Resistência à compressão (MPa) – C.V. (%)					
	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias	365 dias
AR	9,61 – 3,01	19,34 – 2,57	23,53 – 7,35	28,73 – 2,57	33,13 – 4,02	37,65 – 2,78
CVRSU5%	11,29 – 5,49	24,96 – 5,59	30,80 – 5,18	34,93 – 3,14	40,17 – 1,15	45,92 – 0,68
CVRSU10%	11,71 – 4,52	24,24 – 5,31	30,56 – 0,96	37,67 – 3,68	44,77 – 2,76	50,91 – 0,42

Os resultados médios de resistência à compressão das argamassas com 5% e 10% de CVRSU foram significativamente maiores que a argamassa de referência, para todas as idades. Para a mistura CVRSU5% estes acréscimos foram de 17%, 29%, 31%, 27%, 21% e 22% nas idades de 1, 3, 7, 28, 91 e 365 dias, respectivamente e de 22%, 25%, 30%, 34% e 35% e 36% para a mistura CVRSU10%, em relação à mistura AR. Este comportamento pode estar associado ao efeito de nucleação que, nas idades iniciais (até os 7 dias de cura), acelera as reações de hidratação, contribuindo para um rápido crescimento da resistência à compressão.

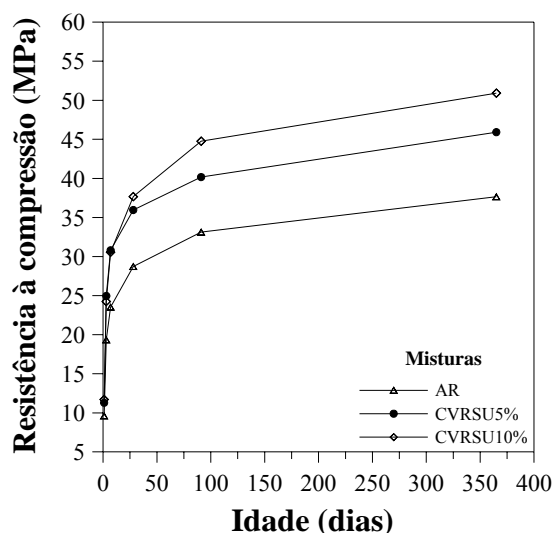


Figura 6.42: Evolução da resistência à compressão com a idade.

Entre as misturas com CVRSU, estatisticamente, elas foram consideradas significativamente iguais entre si para as idades de 1, 3, 7 e 28 dias. O mesmo não aconteceu para a idade de 91 e 365 dias, devido ao incremento de, aproximadamente,

10% na resistência a compressão da mistura CVRSU10% em relação à mistura CVRSU5%.

6.2.3.1 MÓDULO DE ELASTICIDADE

Através da Figura 6.43, verifica-se o aumento no módulo de elasticidade de 20% para a mistura CVRSU5% e 22% para a mistura CVRSU10%, com relação à mistura AR, aos 28 dias. Aos 91 dias, esses acréscimos foram de 13% e 23%, respectivamente.

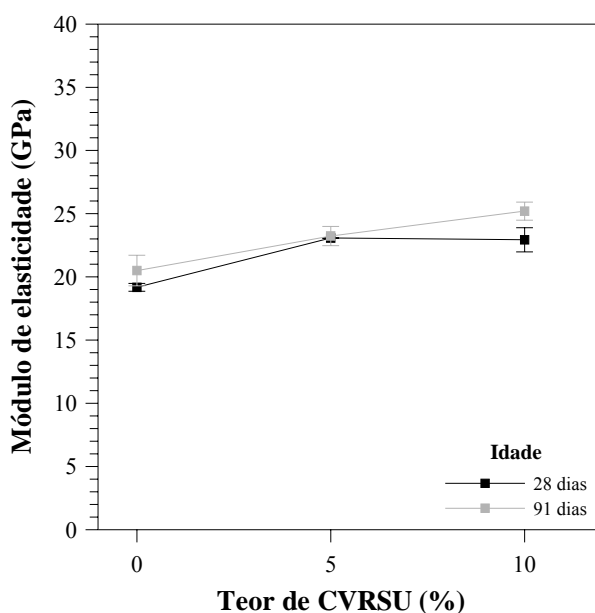


Figura 6.43: Influência da CVRSU no módulo de elasticidade das argamassas com a idade.

Estatisticamente, estes resultados foram considerados significativamente diferentes da mistura AR. Ou seja, a presença da cinza proporcionou significativa influência no módulo de elasticidade. Entre si, as misturas CVRSU5% e CVRSU10% foram consideradas iguais.

Com relação à idade, as misturas AR, CVRSU5% e CVRSU10% apresentaram, respectivamente, acréscimos de 7%, 1% e 23% entre os valores de módulo de elasticidade obtidos aos 28 e 91 dias. A ANOVA indicou que esses aumentos não foram significativos para as misturas de referência e com 5% de cinza, podendo-se dizer que os módulos de elasticidade, aos 28 e 91 dias são iguais, para cada mistura. Em contrapartida, o módulo de elasticidade da mistura CVRSU10% entre as referidas

idades, foi considerado significativamente diferente entre si.

6.2.3.2 DEFORMAÇÃO DE PICO

A Figura 6.44 apresenta o comportamento das argamassas de referência e com CVRSU na deformação de pico, com a idade.

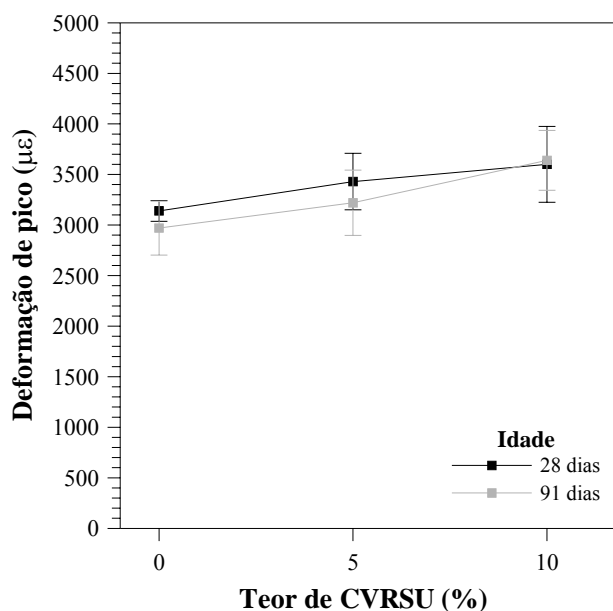


Figura 6.44: Influência da CVRSU na deformação de pico das argamassas com a idade.

Verifica-se que a substituição de 5% e 10% de CVRSU proporcionou o aumento da deformação de pico com relação à mistura de referência em, respectivamente, 8% e 23%, aos 28 dias e 9% e 16%, aos 91 dias. Com relação à variação da deformação de pico com a idade, houve um incremento de 6% para as misturas AR e CVRSU5% da idade de 28 dias aos 91 dias. A mistura CVRSU10% apresentou redução de 1% de 28 para 91 dias.

Através da análise de variância (ANOVA), pode-se dizer que as misturas de referência e com 5% e 10% de CVRSU são significativamente iguais entre si, aos 28 e 91 dias. Entre as idades, as deformações de pico obtidas aos 28 dias são estatisticamente iguais às deformações de pico aos 91 dias, para cada mistura.

6.2.4 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Na Figura 6.45 apresenta-se a influência da CVRSU na resistência à tração por compressão diametral (Rtcd), aos 28 dias da mistura de referência.

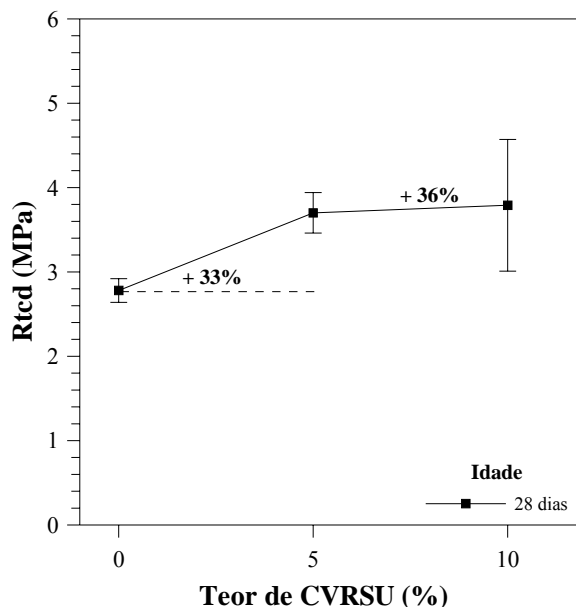


Figura 6.45: Influência da CVRSU na Rtcd das argamassas, aos 28 dias.

A partir da Figura 6.45 verifica-se que a presença de 5% e 10% de CVRSU aumentou em 33% e 36%, respectivamente, a resistência à tração das misturas, sendo estes aumentos considerados significativos em relação à mistura de referência. Entre as misturas CVRSU5% e CVRSU10% suas médias foram consideradas iguais.

Na Tabela 6.27 estão apresentados os resultados referentes a Rtcd, com seus respectivos coeficientes de variação e a relação Rtcd/Rc, na idade de 28 dias. Observa-se que a Rtcd apresenta o mesmo comportamento de subida da Rc. Ou seja, a substituição de 5% e 10% de cimento por CVRSU manteve a relação Rtcd e Rc em 1/10.

Tabela 6.27: Resultados de Rc, Rtcd e Rtcd/Rc, aos 28 dias.

Misturas	Resistências (MPa) – C.V. (%)		
	Rc	Rtcd	Rtcd/Rc
AR	28,73 - 2,57	2,78 – 5,04	0,10
CVRSU5%	34,93 - 3,14	3,70 – 6,40	0,11
CVRSU10%	37,97 - 3,68	3,79 – 13,88	0,10

6.2.5 ENSAIO DE ABSORÇÃO POR IMERSÃO E POR CAPILARIDADE

Na Tabela 6.28 encontram-se os resultados referentes aos ensaios de absorção de água, índice de vazios, massa específica e absortividade das misturas AR, CVRSU5% e CVRSU10% e na Figura 6.46 estão apresentados as curvas de ganho de massa em função da raiz quadrada do tempo para as argamassas de referência e com CVRSU.

Tabela 6.28: Absorção de água, índice de vazios e massa específica das misturas.

Misturas	Absorção de água por imersão – C.V. (%)	Índice de vazios – C.V. (%)	Massa específica (g/cm^3) – C.V. (%)	Absortividade ($\text{g/cm}^2 \cdot \text{t}^{1/2}$)	
				Estágio 1	Estágio 2
AR	8,11 – 0,22	15,12 – 0,16	1,86 – 0,06	0,1328	0,0775
CVRSU5%	6,62 – 0,81	13,29 – 0,62	2,01 – 0,20	0,0883	0,0521
CVRSU10%	5,73 – 5,30	11,87 – 4,21	2,07 – 1,09	0,0822	0,0417

Os valores de absortividade obtidos mostram que a CVRSU proporcionou a redução deste parâmetro, tanto no estágio 1, quanto no estágio 2. A mistura CVRSU5% e CVRSU10% apresentaram reduções de, respectivamente, 34% e 38% no estágio 1 e 33% e 46% no estágio 2 em relação à mistura AR. Este comportamento ocorreu porque, provavelmente, a cinza atuou no preenchimento dos poros maiores, reduzindo a sua dimensão e a conectividade entre eles. Isto dificultou a percolação de água no meio poroso. Analisando a mudança de estágio, verificou-se também o decréscimo significativo do estágio 1 para o estágio 2.

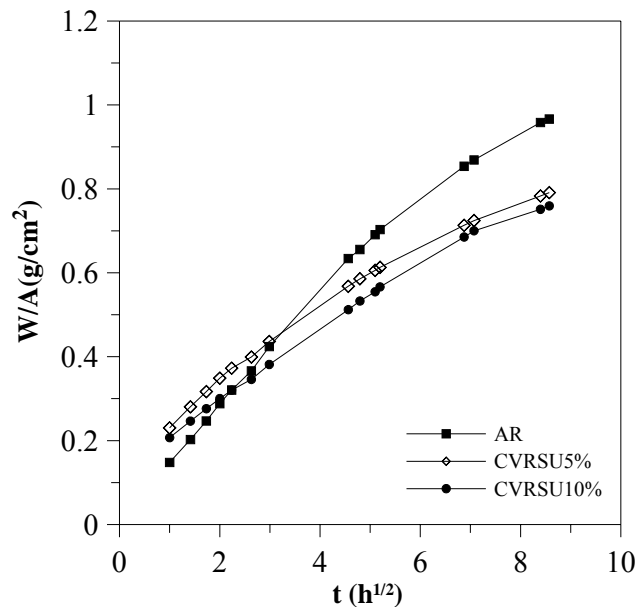


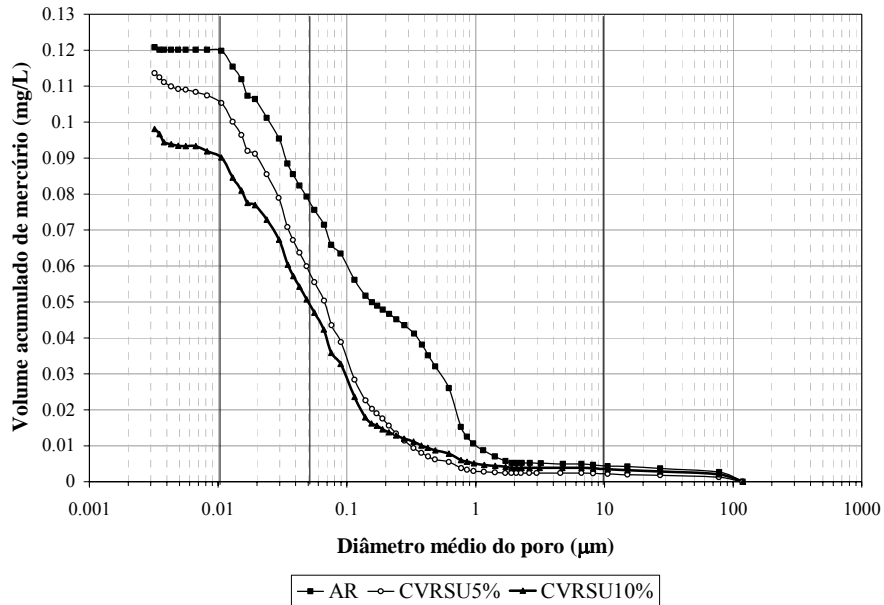
Figura 6.46: Ganho acumulativo de água em função da raiz quadrada do tempo para as misturas AR, CVRSU5% e CVRSU10%.

Com relação à absorção de água por imersão e índice de vazios, pode-se dizer que a inclusão de 5% e 10% de CVRSU influenciou significativamente esses parâmetros. As misturas CVRSU5% e CVRSU10% apresentaram reduções de, respectivamente 18% e 29% para o ensaio de absorção de água e de 11% e 21%, para o índice de vazios, em relação à mistura AR. A redução deste parâmetro está associada ao aumento da resistência à compressão das misturas com CVRSU, sendo este comportamento promovido pela densificação da estrutura do material. Quanto à massa específica, pequenos acréscimos puderam ser observados com o aumento do teor de CVRSU, comparado à mistura de referência, em virtude da redução da porosidade total.

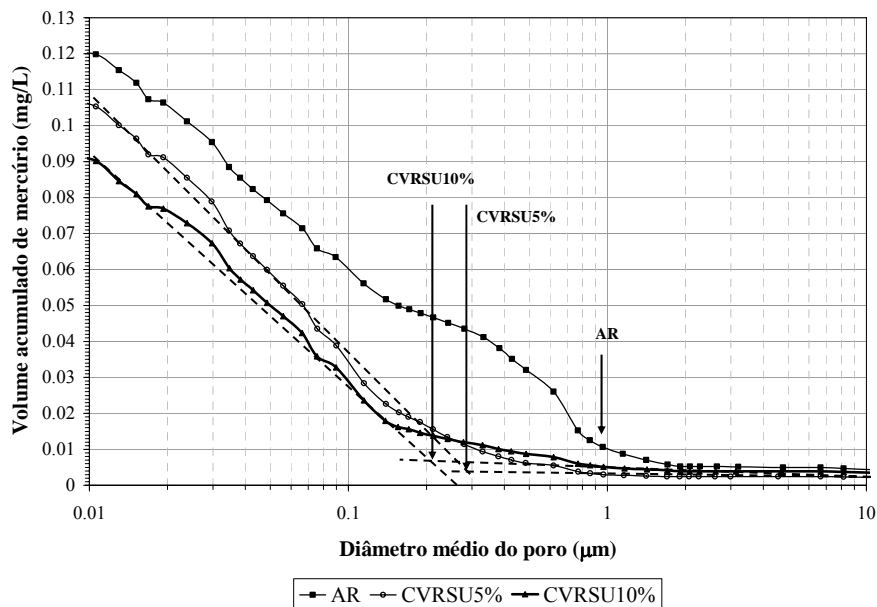
Estatisticamente, a incorporação de CVRSU nas misturas promoveu alterações na absorção de água, índice de vazios e massa específica, sendo as misturas AR, CVRSU5% e CVRSU10% consideradas significativamente diferentes entre si, para cada parâmetro.

6.2.5.1 POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO

Na Figura 6.47 estão apresentadas as curvas (diâmetro médio dos poros x volume acumulado de mercúrio) referentes às misturas de referência, com 5% e 10% de CVRSU.



(a) Porosimetria por intrusão de mercúrio: AR e CVRSU



(b) Ampliação da Figura 6.47 (a)

Figura 6.47: Influência da CVRSU na distribuição de poros das misturas AR, CVRSU5% e CVRSU10%, aos 28 dias.

Uma das características do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio é a existência de um diâmetro, designado como diâmetro “crítico” (dc), a partir do qual a intrusão de mercúrio passa a ser considerada significativa. De acordo com LIU *et al.* (1995), a depender do comportamento da curva, em função dos dados experimentais, o “dc” pode ser determinado facilmente. Porém, em muitos casos o diâmetro pode aparecer entre dois dados experimentais. Nesta situação, tangentes devem ser traçadas a partir do menor e maior diâmetro em que a intrusão não é considerada significativa e isto foi feito no presente estudo.

Os diâmetros obtidos foram de 0,96 μ m, 0,28 μ m e 0,21 μ m para as misturas AR, CVRSU5% e CVRSU10%, respectivamente. Esses resultados e os apresentados na Tabela 6.29 demonstram o refinamento na estrutura de poros propiciado pela CVRSU. A redução do “dc” foi de 71,0% para a mistura com 5% de CVRSU e de 78,0% para a mistura com 10% de CVRSU, em relação à referência. Enquanto a distribuição do volume de mercúrio demonstrou que a substituição de 5% e 10% de cimento por CVRSU proporcionou a redução nos grandes capilares, contribuindo para o aumento nos médios e pequenos capilares. Esse comportamento tornou a microestrutura das misturas com cinza mais refinada, refletindo no seu desempenho físico-mecânico em relação à referência.

Tabela 6.29: Distribuição do tamanho de poros das misturas AR, CVRSU5% e CVRSU10%.

Misturas	Volume de mercúrio (%)			
	Pequenos capilares	Médios capilares	Grandes capilares	> 10 μ m
AR	3,9	33,0	59,6	3,50
CVRSU5%	11,9	39,2	47,2	1,76
CVRSU10%	13,8	38,4	44,4	3,36

6.2.6 PERMEABILIDADE A GÁS

Os resultados de permeabilidade a gás das misturas AR, CVRSU5% e CVRSU10%, aos 28 e 91 dias, estão apresentados na Figura 6.48.

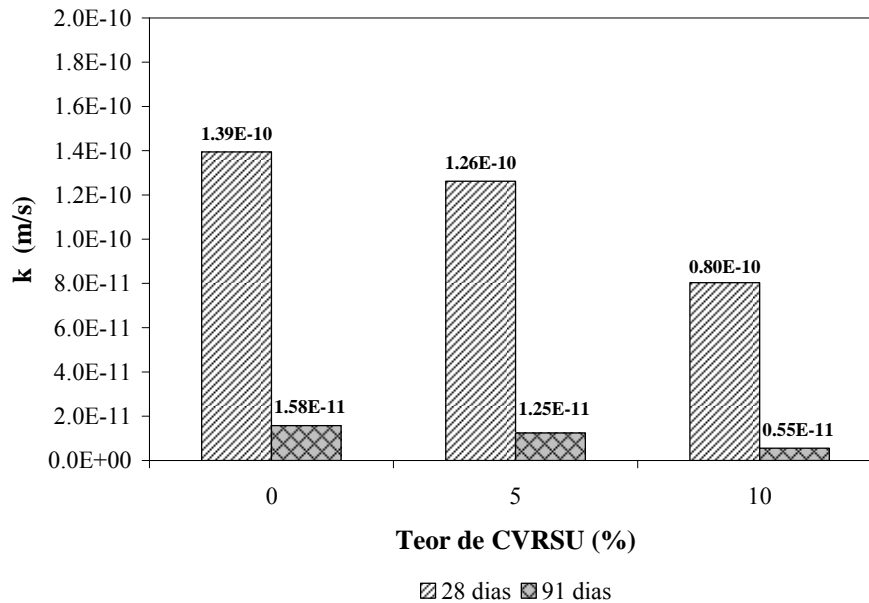


Figura 6.48: Influência da CVRSU na permeabilidade a gás das misturas, aos 28 e 91 dias.

As misturas com 5% e 10% de CVRSU reduziram ligeiramente a permeabilidade a gás, aos 28 e 91 dias, comparada à mistura de referência, demonstrando a redução da conectividade entre os poros ocasionada pela presença da cinza. Com base nos resultados estatísticos, pode-se dizer que somente a mistura CVRSU10% foi considerada significativamente diferente da mistura AR, aos 28 e 91 dias. Em contrapartida, a presença da cinza não influenciou a mistura CVRSU5% quando compara à mistura AR.

Com relação à idade, os valores deste parâmetro foram considerados significativamente diferentes entre si, visto que a ordem de grandeza reduziu de 10^{-11} para 10^{-10} .

Com base nos resultados obtidos para todas as propriedades físicas e de durabilidade analisadas observou-se que a inclusão da CVRSU nas misturas ocasionou o refinamento na estrutura de poros devido ao aumento no volume dos pequenos e médios capilares. Este comportamento pode contribuir para dificultar a entrada de agentes agressivos no interior do material, aumentando a sua durabilidade, além de beneficiar seu desempenho mecânico.

6.2.7 ENSAIOS AMBIENTAIS

6.2.7.1 AMOSTRAS NO ESTADO ÍNTEGRO

Na Tabela 6.30 estão apresentados os resultados referentes ao ensaio de solubilização realizado em amostras no estado íntegro.

Tabela 6.30: Resultados do ensaio de solubilização em amostras no estado íntegro.

Parâmetros	Concentração (mg/L)		NBR 10004 (ABNT, 2004)
	AR	CVRSU10%	
Mercúrio	<0,00005	< 0,00005	0,001
Prata	< 0,005	< 0,005	0,05
Alumínio	0,847	1,1	0,2
Arsênio	< 0,01	< 0,01	0,01
Bário	0,026	< 0,01	0,7
Cádmio	< 0,001	< 0,001	0,005
Chumbo	< 0,01	< 0,01	0,01
Cobre	< 0,005	< 0,005	2,0
Cromo	0,017	0,030	0,05
Ferro	< 0,001	0,013	0,3
Manganês	< 0,01	< 0,01	0,1
Selênio	< 0,008	< 0,008	0,01
Sódio	6,5	30,0	200
Zinco	< 0,01	< 0,01	5,0
Nitrato (N)	< 0,2	< 0,2	10,0
Cloreto	6,5	9,1	250
Sulfato	3,9	6,0	250
Fluoreto	< 0,2	< 0,2	1,5
pH final	11,44	11,39	-

A partir dos resultados obtidos verifica-se que a mistura de referência e com 10% de CVRSU conseguiram reter em suas matrizes cimentícias o ferro, solubilizado pela cinza. Além disso, os metais pesados presentes em sua composição, não se desprenderam para o meio externo quando incorporados à argamassa.

Verifica-se que a argamassa apresentou o mesmo comportamento dos concretos, ou

seja, as duas misturas apresentaram concentração acima da máxima permitida pela NBR 10004 (ABNT, 2004) para o alumínio. Ou seja, a quantidade encontrada na mistura com CVRSIU não é proveniente apenas da cinza, mas também do cimento.

CICLOS DE MOLHAGEM E SECAGEM

Os resultados do ensaio de solubilização realizado nas amostras submetidas aos ciclos de molhagem e secagem encontram-se apresentados na Tabela 6.31.

Tabela 6.31: Resultados do ensaio de solubilização em amostras submetidas a situação de molhagem-secagem.

Parâmetros	Concentração (mg/L)		NBR 10004 (ABNT, 2004)
	AR	CVRSU10%	
Mercúrio	<0,00005	< 0,00005	0,001
Prata	< 0,005	< 0,005	0,05
Alumínio	< 0,01	< 0,01	0,2
Arsênio	< 0,01	< 0,01	0,01
Bário	< 0,01	0,172	0,7
Cádmio	< 0,001	< 0,001	0,005
Chumbo	< 0,01	< 0,01	0,01
Cobre	< 0,005	0,234	2,0
Cromo	< 0,01	< 0,01	0,05
Ferro	0,012	0,056	0,3
Manganês	< 0,01	0,166	0,1
Selênio	< 0,008	< 0,008	0,01
Sódio	34,7	12,2	200
Zinco	< 0,01	0,239	5,0
Nitrato (N)	< 0,1	< 0,1	10,0
Cloreto	1,1	1,7	250
Sulfato	2,0	9,8	250
Fluoreto	0,1	6,4	1,5
pH final	9,53	5,56	-

Verificou-se que após os 25 ciclos, o alumínio ficou abaixo do limite de detecção do equipamento para as duas misturas, sendo este um indicativo da existência de uma possível fração solúvel. Porém, o mesmo não aconteceu para a mistura com 10% de

CVRSU, com relação ao manganês e fluoreto que apresentaram concentrações acima do limite da norma. Verifica-se também que outros metais tal como, bário, cobre e zinco, apresentaram também, um comportamento mais solúvel que a cinza. Este comportamento pode estar associado ao baixo valor do pH final da mistura CVRSU10%, visto que em ambientes ácidos (pH = 5,56) os metais se desprendem facilmente. Mesmo assim, dentre todos os metais “perigosos” encontrados na composição da CVRSU, apenas o manganês solubilizou para o meio externo. Com relação ao fluoreto a sua presença não é considerada nociva.

6.2.7.2 AMOSTRAS NO ESTADO DEMOLIDO

Na Tabela 6.32 encontram-se os resultados do ensaio de solubilização realizado em amostras no estado demolido.

Tabela 6.32: Resultados do ensaio de solubilização em amostras no estado demolido.

Parâmetros	Concentração (mg/L)		NBR 10004 (ABNT, 2004)
	AR	CVRSU10%	
Mercúrio	<0,00005	< 0,00005	0,001
Prata	< 0,005	< 0,005	0,05
Alumínio	0,882	1,0	0,2
Arsênio	< 0,01	< 0,01	0,01
Bário	0,026	< 0,01	0,7
Cádmio	0,004	< 0,001	0,005
Chumbo	< 0,01	< 0,01	0,01
Cobre	< 0,005	< 0,005	2,0
Cromo	0,020	0,030	0,05
Ferro	0,059	0,049	0,3
Manganês	< 0,01	< 0,01	0,1
Selênio	< 0,008	< 0,008	0,01
Sódio	61,6	103	200
Zinco	< 0,01	< 0,01	5,0
Nitrato (N)	< 2,0	< 0,1	10,0
Cloreto	37,7	32,7	250
Sulfato	< 20,0	18,7	250
Fluoreto	< 2,0	< 0,1	1,5
pH final	12,62	12,29	-

A amostra no estado demolido apresentou o mesmo comportamento que a amostra no estado íntegro. Ou seja, apenas o alumínio apresentou valores acima do máximo permitido por norma para as duas misturas analisadas. Porém, observa-se que devido à amostra se encontrar fragmentada houve o aumento na concentração de alguns parâmetros analisados dentre eles, sódio, cloreto e sulfato. Pode-se dizer, portanto, que mesmo exposta a uma condição mais agressiva, os metais pesados presentes na argamassa com CVRSU permaneceram “encapsulados” na matriz cimentícia.

Para as argamassas não foi realizado o ensaio de solubilização em amostras queimadas a 1000°C visto que, o referido material quando exposto a esta condição fragmentou ao ser retirado do forno, não sendo possível retirar uma amostra representativa do material.

6.2.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE AS ARGAMASSAS COM CVRSU

Após caracterização da CVRSU e das argamassas contendo o referido resíduo pode-se concluir que:

A CVRSU apesar de possuir em sua composição química metais que são considerados perigosos, após ensaios de lixiviação e solubilização, a cinza apresentou concentrações acima do limite máximo por norma apenas para o alumínio e ferro. A CVRSU foi classificada como resíduo classe II A - não inerte.

Quando incorporada às argamassas a CVRSU não alterou a consistência das misturas em relação à mistura de referência. Todas as misturas apresentaram espalhamento de 320mm.

PROPIEDADES MECÂNICAS

Melhor desempenho mecânico das argamassas foi observado com a substituição de 5% e 10% de cimento Portland por CVRSU, sendo os seus resultados médios significativamente maiores que a argamassa de referência, para todas as idades avaliadas. Este rápido acréscimo de resistência até os 7 dias foi atribuído à ação da CVRSU como agente nucleador que, por conseguinte, propiciou refinamento na estrutura de poros. As misturas com CVRSU foram consideradas significativamente iguais entre si para as idades de 1, 3, 7 e 28 dias. O mesmo não aconteceu para a idade de 91 e 365 dias, devido ao incremento de, aproximadamente, 10% na resistência a compressão da mistura CVRSU10% em relação à mistura CVRSU5%.

Para o módulo de elasticidade verificou-se que as misturas CVRSU5% e CVRSU10%, foram superiores à referência, sendo estatisticamente diferentes, aos 28 dias e 91 dias. Esse comportamento foi proporcionado pelo aumento do ramo linear elástico da curva tensão x deformação, ocasionado pelo incremento na resistência à compressão das misturas com cinza. Estatisticamente, aos 28 e 91 dias, as misturas com 5% e 10% de CVRSU foram consideradas significativamente diferentes comparadas à mistura AR. Entre si, as misturas CVRSU5% e CVRSU10% foram consideradas iguais nas duas idades. Com relação à idade, a ANOVA indicou que esses aumentos não foram significativos para as misturas de referência e com 5% de cinza, podendo-se dizer que os módulos de elasticidade, aos 28 e 91 dias, são iguais para cada mistura. Em

contrapartida, o módulo de elasticidade da mistura CVRSU10% entre as referidas idades foi considerado significativamente diferente entre si.

Com relação à deformação de pico, a substituição de 5% e 10% de CVRSU proporcionou o seu aumento comparado à mistura de referência, não sendo este significativo para as duas idades (28 e 91 dias). Entre as idades, as deformações de pico obtidas, aos 28 dias, foram estatisticamente iguais às deformações de pico aos 91 dias, para cada mistura.

A resistência à tração por compressão diametral apresentou aumentos significativos, em relação à referência. Entre as misturas CVRSU5% e CVRSU10% suas médias foram consideradas iguais. Observou-se também que a substituição de 5% e 10% de cimento por CVRSU manteve a relação R_{tcd} e R_c em 1/10.

PROPRIEDADES FÍSICAS E DE DURABILIDADE

Com relação às propriedades de durabilidade, a CVRSU proporcionou uma redução na absorvidade das misturas tanto no estágio 1, quanto no estágio 2 comparada à referência. A incorporação de CVRSU nas misturas promoveu alterações na absorção de água, índice de vazios e massa específica, sendo as misturas AR, CVRSU5% e CVRSU10% consideradas significativamente diferentes entre si, para cada parâmetro. Este comportamento ocorreu porque, provavelmente, a cinza atuou no preenchimento dos poros maiores, reduzindo a sua dimensão e a conectividade entre eles. Isto dificultou a percolação de água no meio poroso.

A porosimetria por intrusão de mercúrio apresentou diâmetros críticos de 1,41 μ m, 0,43 μ m e 0,14 μ m para as misturas AR, CVRSU5% e CVRSU10%, respectivamente. Esses resultados demonstraram o refinamento na estrutura de poros propiciado pela CVRSU. A distribuição do volume de poros mostrou que a substituição de 5% e 10% de cimento por CVRSU proporcionou a redução no volume dos grandes capilares, contribuindo para o aumento no volume dos médios e pequenos capilares. Esse comportamento tornou a microestrutura das misturas com cinza mais refinada, refletindo no seu desempenho físico-mecânico em relação à referência.

Com relação à permeabilidade, as misturas com 5% e 10% de CVRSU reduziram ligeiramente este parâmetro, aos 28 e 91 dias, comparada à mistura de referência,

demonstrando a redução da conectividade entre os poros ocasionada pela presença da cinza. Os resultados estatísticos indicaram que a mistura CVRSU10% foi considerada significativamente diferente da mistura AR, aos 28 e 91 dias. Em contrapartida, a presença da cinza não influenciou a mistura CVRSU5% quando compara à mistura AR.

Com relação à idade, os valores deste parâmetro foram considerados significativamente diferentes entre si, visto que a ordem de grandeza reduziu de 10^{-11} para 10^{-10} .

ANÁLISE AMBIENTAL

As misturas de referência e CVRSU10% no estado íntegro e demolido apresentaram o mesmo comportamento, ou seja, conseguiram reter em suas matrizes cimentícias o elemento químico ferro, antes solubilizado pela cinza. Além disso, os metais pesados presentes em sua composição não se desprenderam para o meio externo, quando incorporados à argamassa.

Pode-se verificar também, que as argamassas apresentaram o mesmo comportamento que os concretos, ou seja, as duas misturas apresentaram concentração acima da máxima permitida pela NBR 10004 (ABNT, 2004) para o alumínio. Porém, após a amostra ser submetida ao ensaio de solubilização, após passar por ciclo de molhagem e secagem, verificou-se que o referido metal ficou abaixo do limite de detecção do aparelho. Isto é um indicativo da possível existência de uma fração solúvel deste metal na matriz cimentícia.

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES FUTURAS

7.1 CONCLUSÕES DA PESQUISA

Ao final do trabalho, pode-se dizer que a incorporação de cinzas de lodo de esgoto e de resíduo sólido urbano mostrou-se uma alternativa viável do ponto de vista técnico e ambiental. A utilização dessas cinzas e da blenda em argamassas e concretos de alto desempenho proporcionou melhor desempenho físico-mecânico e de durabilidade do material comparado à referência. Do ponto de vista ambiental, os materiais apresentaram comportamento satisfatório no que diz respeito à imobilização dos metais pesados no interior da matriz cimentícia.

A produção de uma mistura binária através da junção de um material com baixa reatividade a outro de elevada atividade pozolânica conduziu a resultados aceitáveis. O elevado índice de atividade pozolânica do material, proporcionado pela sua granulometria e teor de amorfos, contribuíram no desempenho dos concretos de alto desempenho.

O emprego de duas cinzas de lodo de esgoto, provenientes da mesma estação de tratamento de esgoto, porém coletadas em épocas diferentes, demonstrou que apesar dos compostos químicos serem similares, suas concentrações apresentaram diferenças. Este fato promoveu uma diversidade no ensaio de solubilização, mostrando que a heterogeneidade do material influenciou diretamente nos resultados obtidos para as duas cinzas. Mesmo assim, ambas foram classificadas como resíduo classe II-A: não inerte. Com relação à cinza do resíduo sólido urbano e à blenda, estas também foram classificadas na mesma categoria (classe II-A: não inerte).

Apesar da metacaulinita não necessitar de classificação ambiental, para efeito comparativo devido ao uso deste material na blenda, ensaios de lixiviação e solubilização foram realizados. Os resultados demonstraram a solubilização do aditivo mineral para o ferro, alumínio e cromo. A presença do cromo foi associada a uma

possível contaminação da jazida onde o material foi coletado, face ao seu aparecimento na composição química da argila caulínica.

O uso das cinzas de lodo de esgoto em concretos propiciou melhorias nas propriedades físicas e de durabilidade do material comparado à referência. A redução do volume dos médios capilares e o aumento nos pequenos capilares promoveram um refinamento na estrutura porosa das matrizes cimentícias, possibilitando uma maior durabilidade do material. Além disso, verificou-se também a redução do diâmetro crítico com a incorporação das cinzas. Porém, com relação às propriedades mecânicas tem comportamento superior à referência foi observado, apenas, para as misturas contendo CLE2. A CLE1 apresentou redução deste parâmetro nos dois teores de substituição, sendo estatisticamente igual à referência, somente, para o teor de 5%. Este comportamento foi atribuído à obtenção de uma CLE2 com características melhores que a CLE1: maior teor de finos e de amorfos, além de um maior índice de atividade pozolânica, que contribuíram, provavelmente, para uma melhor ação físico-química do material.

Os concretos de alto desempenho produzidos com metacaulinita e blenda também desenvolveram propriedades físico-mecânicas e de durabilidade melhores que a mistura de referência. A inclusão da metacaulinita, material de elevada atividade pozolânica, contribuiu para a formação de mais produtos hidratados ao sistema cimentício, além do efeito físico de nucleação proporcionado pela sua finura. A CLE2, por não ser um material de elevada reatividade (baixos IAP e teor de amorfos) quando comparada com a metacaulinita, contribuiu, provavelmente, na aceleração das reações de hidratação devido à sua ação física de nucleação. A atuação da blenda ocorreu através da sinergia entre estes dois materiais. Modificações na estrutura porosa foram ocasionadas em função da ação físico-química deste material no interior da matriz cimentícia. Isto foi refletido em todas as propriedades analisadas, podendo-se dizer que o desempenho da blenda foi tão bom quanto o da metacaulinita, sendo os resultados obtidos similares.

Com relação ao comportamento ambiental, de um modo geral, os concretos apresentaram excelente comportamento com relação à imobilização dos metais pesados presentes na composição dos aditivos minerais. As análises realizadas em amostras de concreto no estado íntegro indicaram o desprendimento, acima do limite da norma, do alumínio, para todas as misturas ensaiadas (CR60, MC10%, CLE2-10% e BL10%).

Além deste parâmetro, o cromo também solubilizou para a mistura BL10%.O comportamento do alumínio foi associado não apenas à presença dos aditivos minerais, mas também à mistura de referência, visto que a mesma solubilizou para o referido metal. Quanto ao cromo, apesar das três misturas (CR60, MC10% e CLE2-10%) não terem apresentado valores acima do limite, elas solubilizaram para este metal. Isto significa que o comportamento apresentado pela blenda pode ter tido a influência dessas três misturas.

Para avaliar se o desprendimento desses metais acontece continuamente para o meio externo, ou se é devido à presença de uma fração solúvel no material, amostras foram submetidas a ciclos de molhagem e secagem, simulando novo ensaio de solubilização. A análise no solubilizado mostrou os parâmetros abaixo do limite de detecção do aparelho. Indicando que, provavelmente, a presença do alumínio e cromo foi em função de uma possível fração solúvel desses metais no interior da matriz cimentícia. Ao serem expostas a situações de extrema agressividade, queimado a 1000°C e estado demolido, os concretos solubilizaram também para o cromo e alumínio. Este comportamento veio a reforçar a existência de uma possível fração solúvel. Os demais metais pesados ficaram encapsulados no interior dos concretos.

O estudo realizado em argamassa contendo cinza volante do resíduo sólido urbano apresentou resultados mecânicos, físicos e de durabilidade superiores à referência. A presença da cinza, provavelmente, promoveu o acréscimo destes parâmetros através da ação física de refinamento dos poros. A distribuição de poros mostrou a redução dos grandes capilares, proporcionando o acréscimo no volume dos médios e pequenos capilares. Além disso, houve a redução do diâmetro crítico das misturas com cinza quando comparadas à referência.

A análise ambiental destes materiais indicou a solubilização dos mesmos (AR e CVRSU10%) para o alumínio, tanto no estado íntegro quanto no estado demolido. Utilizando o mesmo procedimento que o concreto, verificou-se que a concentração deste metal pode ter sido em função da existência de uma fração solúvel no material, visto que após novo ensaio de solubilização a sua concentração ficou abaixo do limite da norma.

Com relação à blenda, o material produzido em laboratório atendeu a todas as

expectativas quando empregado em concreto, visto que o mesmo apresentou comportamento similar ao de um material que é considerado de elevada reatividade (metacaulinita). Dentro deste contexto, pode-se dizer que mais uma vertente se inicia para o aproveitamento de resíduos não-inertes em matrizes cimentícias. Apesar de já existirem estudos com misturas binárias na produção de “bio-cimento”, tijolos e agregados.

Porém, não se deve deixar de mencionar que no sentido amplo desta pesquisa, mais investigações precisam ser realizadas nestes materiais, principalmente com relação à parte de durabilidade e análise ambiental, para que no futuro esses resíduos possam ser aproveitados de forma adequada e segura.

7.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

A partir do estudo realizado, sugere-se para futuras pesquisas estudar a reatividade destes aditivos minerais (ação química) através de análises térmicas diferenciais e termogravimétricas em pastas cimentícias, de modo a verificar a perda de água combinada e o consumo de hidróxido de cálcio com a idade;

Avaliar a influência de teores de substituições maiores nas propriedades físico-mecânicas e de durabilidade dos concretos, bem como investigar o mecanismo de ação destes aditivos minerais no comportamento térmico;

Estudar o comportamento dos aditivos minerais na retração autógena, por secagem e fluência, a nível microscópico de forma a avaliar a ação da natureza dos grãos nestes mecanismos. Além de fazer o estudo com aquisição da umidade interna.

Sugere-se também um estudo com ênfase maior no comportamento ambiental em matrizes cimentícias, para verificar a formação de novas fases, utilizando outras técnicas tal como ressonância magnética.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, J. E. de. *Avaliação dos ensaios de durabilidade do concreto armado a partir de estruturas duráveis*. Dissertação de M.Sc., UFMG, Minas Gerais, BH, Brasil, 2006.

AÏTICIN, P. *Concreto de alto desempenho*. São Paulo. Ed. PINI, 1ª ed., 2000.

ALIGIZAKI, K. K., *Pore structure of cement-based materials: testing, interpretation and requirements*. Series Modern concrete technology, v. 12. New York. Ed. British Library. 2006.

AL SAYED, M.H., MADANY, I.M., BUALI, A.R.M., “Use of Sewage Sludge Ash in Asphaltic Paving Mixes in Hot Regions”, *Construction and Building Materials*, v. 9, n. 1, pp. 19-23, 1994.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE PART 1 - ACI 201.2R-01, *Guide to Durable Concrete*. U.S.A., 2002.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE PART 4 - ACI 363.R-01, *State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete*. U.S.A., 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM C 157, *Length change of hardened hydraulic-cement mortar and concrete*. U.S.A., 1991.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM C 490, *Use of apparatus for the determination of length change of hardened cement paste, mortar, and concrete*. U.S.A., 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM C 469, *Test for static modulus os elasticity and poisson’s ratio of concrete in compression*. U.S.A., 1994.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM C 618, *Coal fly ash and raw or calcined natural pozzolanfor use as a mineral admixture in concrete*. U.S.A., 2001.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM C 1012, *Length*

change of hydraulic-cement mortars exposed to a sulfate solution. U.S.A., 1995.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM C 1202, *Electrical Indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration*. U.S.A., 1997.

ANDRADE, C. "Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements", *Cement and Concrete Research*, v. 23, pp. 724-742, 1993.

ANDREOLI, C.V., BONNET, B.R.P., LARA, A.I., WOLTER, F.R., "Proposição de plano de monitoramento da reciclagem agrícola do lodo de esgoto no estado do Paraná", In.: *19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, pp. 232-244, Foz do Iguaçu, 1997.

ANDREOLI, C.V. VON SPERLING, M.; FERNANDES, F., *Lodo de esgotos: tratamento e disposição final*. 1ª ed. Belo Horizonte, DESA/UFMG e SANEPAR, 2001.

ARIKAN, M., SOBOLEV, K., ERTÜN, T., YEGINOBALI, A., TURKER, P., "Properties of blended cements with thermally activated kaolin", *Construction and Building Materials*, v. 23, pp. 62-70, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR NM18: *Cimento Portland – Análise química – Determinação de perda ao fogo*, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR NM30: *Agregado miúdo – Determinação da absorção de água*, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR NM52: *Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente*, Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR NM47: *Concreto – Determinação do teor de ar em concreto fresco – Método pressométrico*, Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR NM53: *Agregado graúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente e absorção de água*, Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR NM67: *Concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR NM248: *Agregados – Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 5738: *Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova*. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 5752: *Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – índice de atividade pozolânica com cimento*. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 6457: *Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 6508: *Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica*. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 7181: *Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 9778: *Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água por imersão, Índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro, 2005.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 10004: *Resíduos Sólidos – Classificação*. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 10005: *Lixiviação de Resíduos – Procedimento*. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 10006:

Solubilização de Resíduos – Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 12653 *Materiais Pozolânicos - Especificação*, Rio de Janeiro, 1992.

AUBERT, J. E., HUSSON, B., VAQUIER, A., “Use of municipal solid waste incineration fly ash in concrete”, *Cement and Concrete Research*, v. 34, pp. 957-963, 2004.

AUBERT, J. E., HUSSON, B., VAQUIER, A., “Utilization of municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash in blended cement Part 1: Processing and characterization of MSWI fly ash”, *Journal of Hazardous Materials*, v. B136, pp. 624-631, 2006.

AUBERT, J. E., HUSSON, B., VAQUIER, A., “Utilization of municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash in blended cement Part 2: Mechanical strength of mortars and environmental impact”, *Journal of Hazardous Materials*, v. 146, pp. 12-19, 2007.

BARATA, M. S. *Concreto de alto desempenho no estado do Pará: Estudo da viabilidade técnica e econômica de produção de concreto de alto desempenho com os materiais disponíveis em Belém e através do emprego de adições de sílica ativa e metacaulim*. Dissertação de M.Sc., UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil, 1998.

BHALTAR, V.K.C.B.L.M. *Retração autógena e evolução de propriedades mecânicas de pastas pozolânicas*. Dissertação de M.Sc., COPPR/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.

BEAUDOIN, J. J., MARCHAND, J. *Handbook of analytical techniques in concrete science and technology – principles, techniques and applications*. Capítulo 14, pp. 584-594. New Jersey, Ed. Noyes Publications, 1999.

BERTOLINI, L., CARSANA, M., CASSAGO, D., CURZIO, A. Q., COLLEPARDI, M., “MSWI ashes as mineral additions in concrete”, *Cement and Concrete Research*, v. 34, pp. 1899-1906, 2004.

BIDONE, F.R.A., *Metodologia e técnicas para minimização, reutilização e reciclagem de resíduo sólido urbano*, 1999.

BROOKS, J. J., JOHARI, M. A. M. “Effect of metakaolin on creep and shrinkage of

concrete”. *Cement & Concrete Composites*, v. 23, pp. 495-502, 2001.

BROSCH, C.D., “Fabricação de agregado leve a partir do lodo de esgoto”, In: *Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária*, pp. 103-107, Rio de Janeiro, 1975.

CABRERA, J.G., LYNSDALE, C.J., “A new gas permeameter for measuring the permeability of mortar and concrete”, *Magazine of concrete research*, v. 40, (Sep), 1988.

CECCATO, D. M., *Avaliação da escória granulada de fundição (EGF) como substituição de parte do cimento em concreto – propriedades mecânicas*. Dissertação de M. Sc., UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil, 2003.

CHEESEMAN, C. R., VIRDI, G. S., “Properties and microstructure of lightweight aggregate produced from sintered sewage sludge ash”, *Resources, Conservation and Recycling*, v. 45 (Mar), pp. 18-30, 2005.

COLLIVIGNARELLI, C., SORLINI, S., “Reuse of municipal solid wastes incineration fly ashes in concrete mixture”, *Waste Management*, v. 22, (Jun), pp. 909-912, 2002.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, *Resolução CONAMA N° 357 – Qualidade da Água*, 2005.

CORDEIRO, G. C., *Concreto de alto desempenho com metacaulinita*. Tese de M.Sc, UENF, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil, 2001.

CORDEIRO, G. C., *Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concretos*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006.

CORDEIRO, G.C., TOLEDO FILHO, R.D., TAVARES, L.M., FAIRBAIRN, E.M.R., “Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars”, *Cement and Concrete Research*, v. 30, pp. 410-418, 2008.

CURCIO, F., DEANGELIS, B.A., PAGLIOLICO, S., “Metakaolin as a pozzolanic microfiller for high-performance mortars”, *Cement and Concrete Research*, v. 28, n. 6, pp. 803-809, 1998.

CYR, M., COUNTAND, M., CLASTRES, P., “Technological and environmental

behavior of sewage sludge ash (SSA) in cement-based materials”, *Cement and Concrete Research*, v. 37, pp. 1278-1289, 2007.

DE LARRAD, F. *Concrete mixture proportioning*. London, E & FN SPON, 1999.

FARIAS, F. S., *Índice da qualidade de Aterros de Resíduos Urbanos*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2002.

FERNANDES, F., *Uso e manejo do lodo de esgotos na agricultura*, 1ª ed. Paraná, Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR), 1999.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE ENGENHARIA DO MEIO AMBIENTE - FEEMA, *Manual do meio ambiente-métodos*, v. 2, Rio de Janeiro, Dicomt, 1983.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE ENGENHARIA DO MEIO AMBIENTE - FEEMA – NT 202-R10, *Critérios e padrões para lançamento de efluentes líquidos*, Rio de Janeiro, 1986.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE ENGENHARIA DO MEIO AMBIENTE - FEEMA – DZ-1311.R-4, *Diretriz da destinação de resíduos sólidos*, Rio de Janeiro, 1994.

FONTES, C. M. A., *Potencialidades da cinza de lodo de estações de tratamento de esgotos como material suplementar para a produção de concretos com cimento Portland*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2003.

FONTES, C. M. A., BARBOSA, M. C., TOLEDO FILHO, R. D., GONÇALVES, J.P., “Potentiality of sewage sludge ash as mineral additive in cement mortar and high performance concrete”, In: *Conference on the use of recycled materials in buildings and structures*, RILEM, Barcelona, November, 8-11th, 2004a.

FONTES, C. M. A., BARBOSA, M. C., TOLEDO FILHO, R. D., “Aproveitamento da cinza de lodo de esgotos como aditivo mineral para a produção de concretos de baixo impacto ambiental”, In: *Inter American Conference on Non-Convencional Materials and Technologies in the Eco-Construction and Infrastructure*, IAC-NOCMAT, João Pessoa, November, 13-16th, 2004b.

FORMAGINI, S., *Dosagem Científica e caracterização mecânica de concretos de altíssimo desempenho*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.

FRÍAS, M., CABRERA, J., “Pore size distribution and degree of hydration of metakaolin – cement pastes”, *Cement and Concrete Research*, v. 30, pp. 561-569, 2000.

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE - FNS, *Manual de Saneamento*, 3ª ed. Brasília, 1999.

GAO, X., WANG, W., YE, T., FENG, W., LAN, Y., “Utilization of washed MSWI fly ash as partial cement substitute with the addition of dithiocarbamic chelate”, *Journal of Environmental Management*, v. 88, pp. 293-299, 2008.

GEIKER, M. GRIBE, H., LUPING, T. *et al.* “Laboratory test methods”. *Performance criteria for concrete durability – Rilem Report 12*. Chapter 9. London. Ed. E & FN SPON, 1995.

GEYER, A.L.B., *Contribuição ao estudo da disposição final e aproveitamento da cinza de lodo de estações de tratamento de esgotos sanitários como adição ao concreto*. Tese de D.Sc., UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil, 2001.

GLEIZE, P.J.P., CYR, M., ESCADEILLAS, G., “Effects of metakaolin on autogenous shrinkage of cement pastes”, *Cement & Concrete Composites*, v. 29, pp. 80-87, 2007.

GOLDMAN, A., BENTUR, A., “The influence of microfillers on enhancement of concrete strength”, *Cement and Concrete Research*, v. 23, pp. 962-972, 1992.

GONÇALVES, J.P., *Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos*, Tese de M.Sc., UFRG, Porto Alegre, RS, Brasil, 2000.

GONÇALVES, J.P., *Desenvolvimento e caracterização de concretos de baixo impacto ambiental contendo argila calcinada e areia artificial*, Tese de D.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.

GRIPP, W. G., *Aspectos técnicos e ambientais da incineração de resíduos sólidos urbanos – Considerações sobre a proposta para São Paulo*. Dissertação de M.Sc., UFSCAR, São Carlos, SP, Brasil, 1998.

GRUBER, K.A., RAMLOCHAN, T., BODDY, A., HOOTON, R.D., THOMAS, M.D.A., “Increasing concrete durability with high-reactivity metakaolin”, *Cement & Concrete Composites*, v. 23, pp. 479-484, 2001.

HALL, C., “Water absorption of mortars and concretes: a review”. *Magazine of concrete in Research*, v.41, n. 147, pp. 51-61, 1989.

HE, C., OSBAECK, B. MAKOVICKY, E., “Pozzolanic reactions of six principal clay minerals: activation, reactivity assessments and technological effects”, *Cement and Concrete Research*, v. 25, n. 8, pp. 1691-1702, 1995.

HUANG, W., CHU, S., “A study on the cementlike properties of municipal waste incineration ashes”, *Cement and Concrete Research*, v. 33, n. 11, pp. 1795-1799, 2003.

ILLSTON J.M. E POMEROY, C.D., “Recommendations for a standard creep test”, *Concrete*, December, 1975.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS (IESA), *Suggested methods for determining tensile strength of rock materials*. V.3, march, 1977.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE, *Pesquisa nacional de saneamento básico*. Rio de Janeiro, 2000.

ISAIA, G. C., GASTALDINI, A.L.G., MORAES, R. “Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete”, *Cement and Concrete Research*, v. 25, pp. 69-76, 2003.

KHANBILVARDI, R., AFSHARI, S., “Sludge Ash as Fine Aggregate for Concrete Mix”, *Journal of Environmental Engineering*, v. 121, n. 9 (Sep), pp. 633-638, 1995.

KHATIB, J.M., CLAY, R.M., “Absorption characteristics of metakaolin concrete”, *Cement and Concrete Research*, v. 34, n. 1, pp. 19-29, 2004.

KHATIB, J.M., WILD, S., “Pore size distribution of metakaolin paste”, *Cement and Concrete Research*, v. 26, n. 10, pp. 1545-1553, 1996.

LAWRENCE, P., CYR, M., RINGOT, E. “Mineral admixtures in mortars effect of inert materials on short-term hydration”, *Cement and Concrete Research*, v. 33, pp. 1939-1947, 2003.

LIMA, P. R.L. *Análise teórica e experimental de compósitos reforçados com fibras de sisal*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.

LIU, Z., WINSLOW, D., “Sub-distributions of pore size: A new approach to correlate pore structure with permeability”, *Cement and Concrete Research*, v. 25, pp. 769-778, 1995.

MANGIALARDI, T., PAOLINI, A.E., POLENTINI, A., SIRINI, P. “Optimization of the solidification/stabilization process of MSW fly ash in cementitious matrices”, *Journal Hazardous Materials*. v. 70, pp.53-70, 1999.

MANGIALARDI, T., “Sintering of MSW fly ash for reuse as a concrete aggregate”, *Journal Hazardous Materials*. B87 (May), pp. 225-239, 2001.

MASUERO, A. B., *Estabilização das escórias de aciaria elétrica com vistas a sua utilização como substituição ao cimento*. Tese de D.Sc., UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil, 2001.

MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J.M. *Concreto – Estruturas, Propriedades e materiais*. 3ª ed. São Paulo, IBRACON, 2008.

MONTEIRO, J. H. P. e outros, *Manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos*. Rio de Janeiro, IBAM, 2001.

MONTGOMERY, D.C., *Design and analysis of experiments*, 4th ed, USA, 1997.

MONZÓ, J., PAYÁ, J., BORRACHERO, M.V., CÓRCOLES, A., “Use of sewage Sledge Ash (SSA)-Cement Admixtures in Mortars”, *Cement and Concrete Research*, v. 26, n. 9, pp. 1389-1398, 1996.

MONZÓ, J., PAYÁ, J., BORRACHERO, M.V., GIRBÉS, I., “Reuse of sewage sludge ashes (SSA) in cement mixtures: the effect of SSA on the workability of cement mortars”, *Waste Management*, v.23, pp. 373-381, 2003.

MORALES, G., AGOPYAN, V., “Caracterização do agregado leve obtido a partir do lodo de esgoto da cidade de Londrina”, *Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP*, BT/PCC/64, pp. 1-20, 1992.

MOURA, W. A., *Utilização de escória de cobre como adição e como agregado para concreto*. Tese de D.Sc., UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil, 2000.

MULDER, E., “Pre-treatment of MSWI fly ash for useful application”, *Waste*

Manegement, v. 16, pp. 181-184, 1996.

MÜLLER, P.S.G., PASSAMANI, F.R.F., GONÇALVES, R.F., “Características físico-químicas e microbiológicas de lodos de lagoas facultativas e anaeróbias em operação no Espírito Santo”, In: *20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, pp. 422-430, Rio de Janeiro, 1999.

NEIVA, M.R., “Reciclagem agrícola dos biossólidos da ETE CETREL – uma experiência ambientalmente correta”, In: *20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, pp. 422-430, Rio de Janeiro, 1999.

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

NORMA MERCOSUR – NM 23:2000 *Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica*. 2000.

OKJELLEN, K., LAGERBLAD, B., “Influence of natural minerals in the filler fraction on hydration and properties of mortars”, *Swedish Cement and Concrete Research Institute*, Report 3:95, Stockholm, 1995.

PAN, S.C., TSENG, D.H., LEE, C., “Influence of the fineness of sewage sludge ash on the mortar properties”, *Cement and Concrete Research*, v. 33, n. 11 (Nov), pp. 1749-1754, 2003.

PEREIRA, V. G. A. *Avaliação do coeficiente de difusão de cloretos em concretos: influência do tipo de cimento, da relação A/C, da temperatura e do tempo de cura*. Dissertação de M.Sc., UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil, 2001.

POLETTINI, A., POMI, R., TESTA, F., “Properties of Portland cement – stabilized MSWI fly ash”, *Journal Hazardous Materials*, v. B88 (Jun), pp. 123-138, 2001.

QUINA, M. J., ALMEIDA, M. A., SANTOS, R., CORREIA, A. S., QUINTA-FERREIRA, R. M., Recycling incineration wastes for producing synthetic aggregates.

RAMACHANDRAN, V. S., BEAUDOIN, J. J. *Handbook of analytical techniques in concrete science and technology – principles, techniques and applications*. New Jersey, Ed. Noyes Publications, 2001.

RÉMOND, S., PIMIENTA, P., BENTZ, D. P., “Effects of the incorporation of

Municipal solid waste incineration fly ash in cement pastes and mortars I. Experimental study”, *Cement and Concrete Research*, v. 32, pp. 303-311, 2002.

SABIR, B.B., WILD, S., BAI, J., “Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review”, *Cement & Concrete Composites*, v. 23, pp. 441-454, 2001.

SAKAI, S., “Municipal solid waste management in Japan”, *Waste management*, v. 16, pp. 395-405, 1996.

SALVADOR, S. “Pozzolanic properties of flash-calcined kaolinite: a comparative study with soak-calcined products”, *Cement and Concrete Research*, v. 25, n.1, pp. 102-112, 1995.

SANTOS, A. D., *Estudos das possibilidades de reciclagem dos resíduos de tratamento de esgoto da região metropolitana de São Paulo*. Dissertação de M. SC., USP, São Paulo, SP, Brasil, 2003.

SÃO MATHEUS, M. S. C., *Aterros de resíduos sólidos urbanos: estudo de caso do aterro metropolitano centro de Salvador-Ba*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.

SENADO FEDERAL. *Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e desenvolvimento- Agenda 21*. 3ª ed, Brasília, 2000.

SHVARZMAN, A., KOVLER, K., GRADER, G.S., SHTER, G.E., “The effect of dehydroxylation/amorphization degree on pozzolanic activity of kaolinite”, *Cement and Concrete Research*, v. 33, pp. 405-416, 2003.

SIDDIQUE, R., *Waste materials and by-products in concrete*, Berlin, Ed. Springer, 1ª ed., 2008.

SIKALIDIS, C. A., ZABANIOTOU, A. A., FAMELLOS, S. P. Utilisatio of municipal solid wastes for mortar production. Resources, conservation and recycling. Vol. 36, (Mar), pp. 155-167, 2002.

SILVA, A.S.M., *Dosagem de concretos pelos métodos de empacotamento compressível e Aïtcin-Faury Modificado*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.

SILVA, E. F., *Variações dimensionais em concretos de alto desempenho contendo aditivo redutor de retração*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.

SOUZA, L.M.S *Desenvolvimento de cinzas de bagaço de cana de açúcar para emprego em concretos duráveis de baixa emissão de CO₂ e consumo energético*. Projeto de Graduação. Escola Politécnica, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.

SOUZA, P. S. L., *Verificação da influência do uso de metacaulim de alta reatividade nas propriedades mecânicas do concreto de alta resistência*. Tese de D.Sc., UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil, 2003.

SOUZA SANTOS, P. *Ciência e tecnologia das argilas*. V. 2, 1ª ed., São Paulo: Editora Edgard Blücher, 446 p, 1975.

TAY, J.H, “Potential Use of Sludge Ash as Construction Material”, *Elsevier Science Publishers B.V.*, v. 13 (May), pp. 53-58, 1986.

TAY, J.H, “Sludge Ash as Filler for Portland Cement Concrete”, *Journal of Environmental Engineering*, v. 113, n. 2 (Apr), pp. 345-351, 1987.

TAY, J.H. & SHOW, K.Y., “Municipal Wastewater Sludge as Cementitious and Blended Cement Materials”, *Cement and Concrete Composites*, v. 16 (Sep), pp. 39-48, 1994.

TAY, J.H, SHOW, K.Y., HONG, S.Y., “Potential Reuse of Wastewater Sludge for Innovative Applications in Construction Industry”, *Bulletin of the College of Engineering, N.T.U.*, n. 86 (Oct), pp. 103-112, 2002.

TAYLOR H. F. W., *Cement chemistry*, 2ª edição, London, Thomas Telford Services Ltd, 1997.

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

TOLEDO FILHO, R.D., GONÇALVES, J.P., AMERICANO, B.B., FAIRBAIRN, E.M.R. “Potential for use of crushed waste calcined-clay brick as a supplementary

cementitious material in Brazil”, *Cement and Concrete Research*, v. 37, n. 9, pp. 1357-1365, 2007.

VEHLOW, J., Municipal solid waste management in Germany. *Waste management*, Vol. 16, pp. 367-374, 1996.

VOLSCHAN JUNIOR, I., *Um modelo de programação linear para sistemas de destinação final do lodo de estações de tratamento de esgotos*, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1999.

WILD, S., KHATIB, J.M., JONES, A., “Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete”, *Cement and Concrete Research*, v. 26, n. 10, pp. 1537-1544, 1996.

WILD, S., KHATIB, J.M., “Portlandite consumption in metakaolin cement pastes and mortars”, *Cement and Concrete Research*, v. 27, n. 1, pp. 137-146, 1997.

WILES, C. C., “Municipal solid waste combustion ash: State-of-the-knowledge”, *Journal of Hazardous Materials*, v. 47 (Jul), pp. 325-344, 1996.

YANG, C.C., WENG, T.L. “Using charge passed to determine the chloride diffusion coefficient in mortar from accelerated chloride migration test”. *Construction and Building Materials*, v.17, pp. 231-238, 2003.

YANG, C.C. “On the relationship between pore structure and chloride diffusivity from accelerated chloride migration test in cement-based materials”. *Cement and Concrete Research*, v. 36, pp. 1304-1311, 2006.

YOUNG, J. F., MINDESS, S., GRAY, R. J., BENTUR, A. *The science and technology of civil engineering materials*, 1ª Ed. New Jersey: Prentice Hall, 384 p, 1998.

ZHANG, M.H., MALHOTRA, M.V., “Characteristics of a thermally activated aluminosilicate pozzolanic material and its use in concrete”, *Cement and Concrete Research*, v. 25, n. 8, pp. 1713-1725, 1995.

ANEXOS

ANEXO A: ETAPAS DO PROGRAMA BETONLABPRO 2[®]

Para utilizar o programa BetonlabPro[®], inicialmente foi montado um banco de dados com todos os constituintes utilizados no concreto de referência (CR60). A seguir, nas Figuras A.1, A.2 e A.3 será mostrado as etapas e as características dos materiais necessárias para a formação desse banco de dados.

Propriétés du ciment

Général | Composition | Propriétés | Squelette | Coupure 1

Nom: Cimento

Date: 6/8/2008 5:09:06 PM

Commentaires: Complest SP430 CIIIF-32

Coût (Euro/t): 10

Buttons: Enregistrer, Annuler, Outils

(a) Informações sobre o cimento

Propriétés du ciment

Général | Composition | Propriétés | Squelette | Coupure 1

Constituants

% Clinker (K): 50

% Cendre volante (V): 0

% Filler calcaire (L): 10

% Pouzzolane naturelle (Z): 0

% Laitier (S): 0

% Fumée de silice (D): 0

% Divers: 0

Composition de Bogue

% C3S: 70.01

% C2S: 7.13

% C3A: 4.53

% C4AF: 9.49

% Divers: 8.84

% Alcalins: 0.7

Buttons: Enregistrer, Annuler, Outils

(b) Composição química

Propriétés du ciment

Général | Composition | Propriétés | Squelette | Coupure 1

Classe vraie à 1 jour: []

Classe vraie à 2 jours: []

Classe vraie à 3 jours: 22

Classe vraie à 7 jours: 28

Classe vraie à 28 jours: 35

Classe vraie à 90 jours: []

Classe vraie à 360 jours: []

Masse volumique (kg/m3): 3060

Capacité thermique (kJ/K/Kg): 0.76

Dosage de saturation (%): 0.9

Retrait endogène

Kc (MPa): []

Buttons: Enregistrer, Annuler, Outils

(c) Resistência à compressão, massa específica e ponto de saturação

Propriétés du ciment

Général | Composition | Propriétés | Squelette | Coupure 1

Diamètre	Passant %	β	β^*
0.2 μ	0	0.4725	0.5237
0.25 μ	0.1	0.4725	0.5237
0.315 μ	0.3	0.4725	0.5237
0.4 μ	0.5	0.4725	0.5237
0.5 μ	1.2	0.4725	0.5237
0.63 μ	1.7	0.4725	0.5237
0.8 μ	2.4	0.4725	0.5237
1 μ	3.2	0.4725	0.5237
1.25 μ	4	0.4725	0.5237
1.6 μ	4.9	0.4725	0.5237
2 μ	5.9	0.4725	0.5237
2.5 μ	7.2	0.4725	0.5237
3.15 μ	9.3	0.4725	0.5237
4 μ	12.5	0.4725	0.5237

Buttons: Enregistrer, Annuler, Outils

Capacités propres virtuelles constantes par coupure

(d) Granulometria

Propriétés du ciment

Général | Composition | Propriétés | Squelette | Coupure 1

Coupure: 0.2 μ / 2 mm

Sans adjuvant

Compacité expérimentale: 0.56

Indice de serrage: 6.7

Confinement: Aucun

A saturation

Compacité expérimentale: 0.61

Indice de serrage: 6.7

Confinement: Aucun

Buttons: Enregistrer, Annuler, Outils

(e) Compacidade experimental

Propriétés du superplastifiant

Général

Nom: CONPLAST SP43

Date: 6/8/2008 4:17:00 PM

Commentaires:

Coût (Euro/kg):

Concentration solide (%): 42

Masse volumique (kg/l): 1.218

Buttons: Enregistrer, Annuler

(f) Teor de sólidos e densidade do superplastificante

Figura A.1: Características do cimento Portland CP II F-32 e do superplastificante.

Propriétés du sable

Général | Propriétés | Squelette | Coupure 1 | Coupure 2

Nom: Areia lavada de Rio

Date: 6/8/2008 6:03:53 PM

Commentaires: Rio Guandu

Coût (Euro/t): 10

Buttons: Enregistrer, Annuler, Outils

(a) Informações sobre a areia

Propriétés du sable

Général | Propriétés | Squelette | Coupure 1 | Coupure 2

Coef. d'adhérence p: 1.278E

Coef. platond q (MPa⁻¹): 0.00619

Coef de traction Kt (MPa^{-0.43}):

Module élastique (GPa):

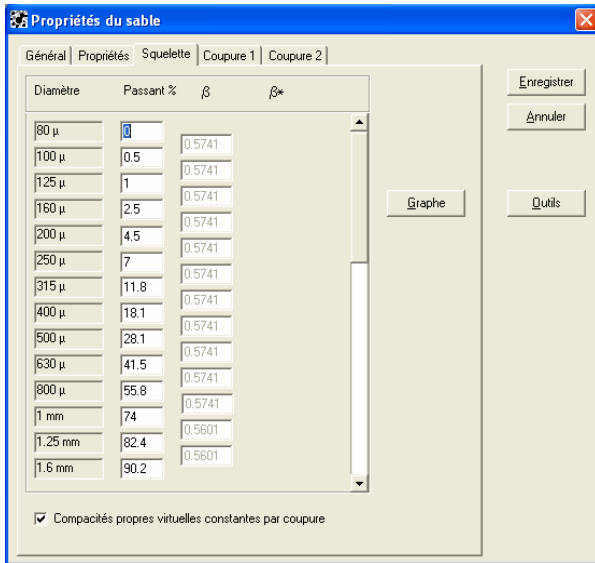
Masse volumique (kg/m³): 2640

Absorption d'eau (%): 1.23

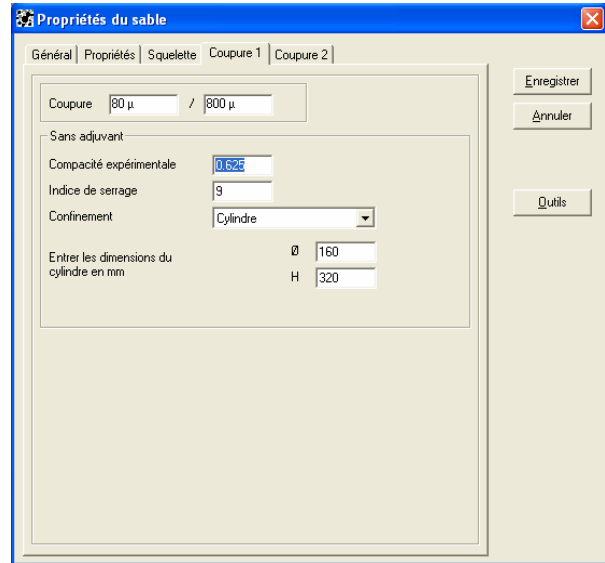
Capacité thermique (kJ/K/Kg):

Buttons: Enregistrer, Annuler, Outils

(b) Massa específica, absorção de água e coeficientes “p” e “q”

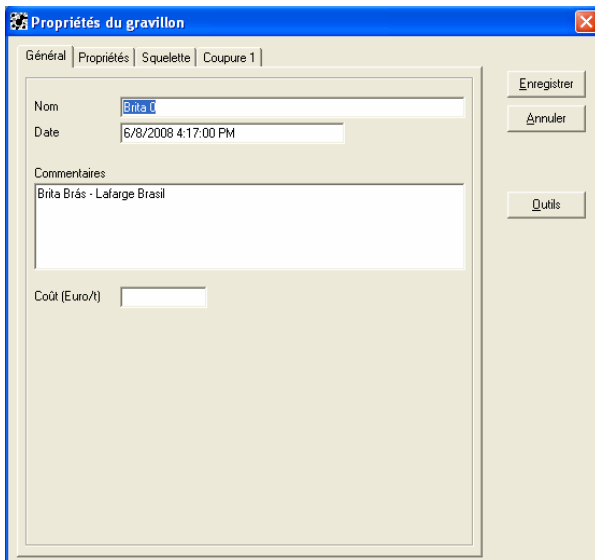


(c) Granulometria

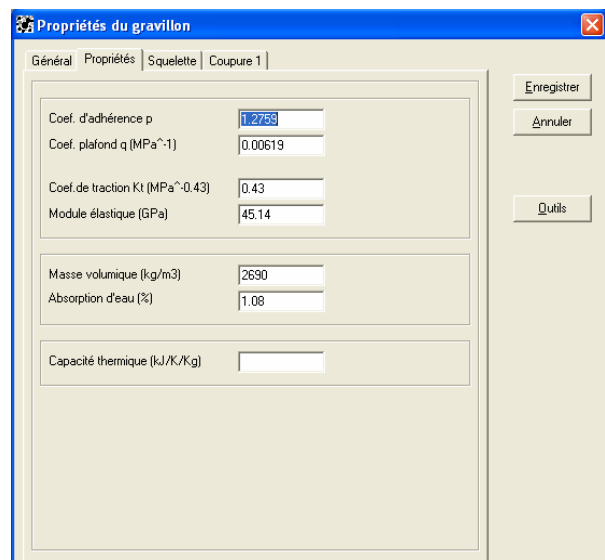


(d) Compacidade experimental

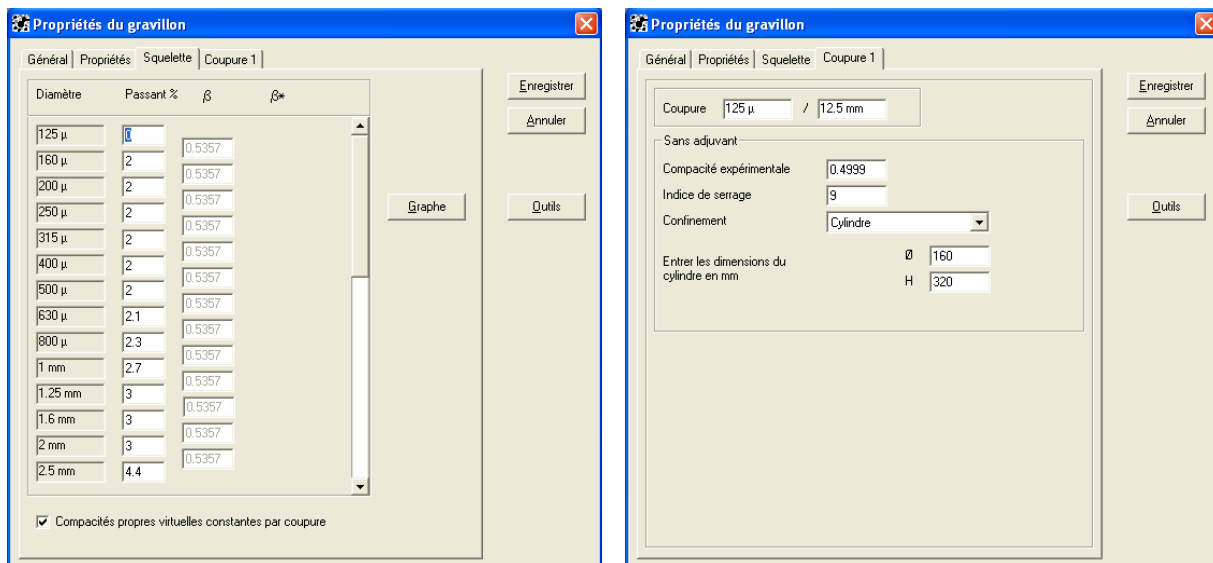
Figura A.2: Montagem do banco de dados da areia.



(a) Informações sobre a brita



(b) Massa específica, absorção de água e coeficientes "p" e "q"



(c) Granulometria

(d) Compacidade experimental

Figura A.3: Montagem do banco de dados da brita.

A etapa seguinte foi à obtenção dos parâmetros “p” e “q”. O parâmetro “p” é designado como coeficiente de aderência (pasta e agregado) e seu valor varia de acordo com as características dos agregados. O parâmetro “q” varia conforme a limitação que o agregado impõe à resistência à compressão dos concretos. Estes parâmetros foram obtidos através do programa, mediante a produção de dois concretos com intervalos de resistências à compressão expressivos entre eles. Quanto maior for essa diferença, melhor será a calibração do modelo. No presente estudo foi produzido um concreto de resistência convencional (25MPa) e um de alto desempenho (50MPa), sendo estes moldados com os mesmos constituintes utilizados no programa experimental. O consumo de cada material por m³ e as resistências à compressão de cada concreto foi adicionado ao programa, onde foram obtidos os parâmetros “p” e “q” (Ver Figura A.4Figura A.).

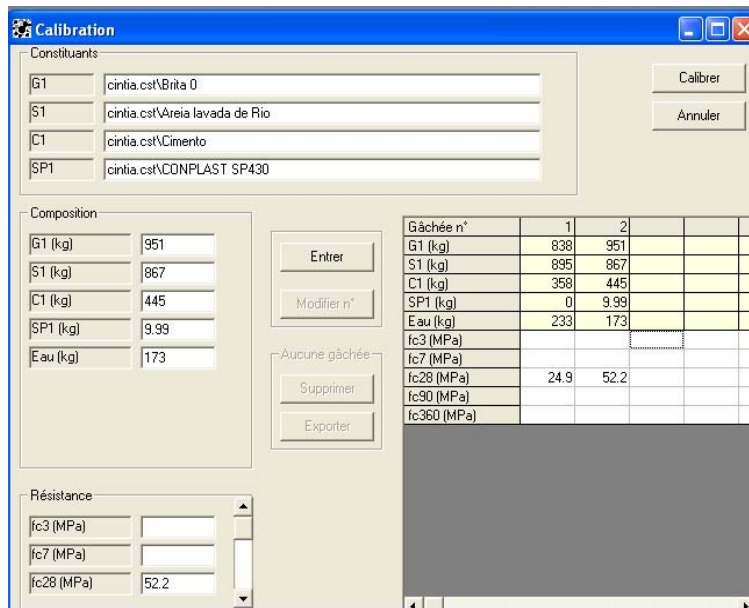


Figura A.4: Calibração de “p” e “q”.

Após a obtenção de “p” e “q” foi feita a simulação para a obtenção das propriedades do concreto de referência. Para isso, foi informado ao programa, o consumo de cimento, a quantidade de água utilizada, incluindo a água do superplastificante, o ponto de saturação e a relação entre agregado graúdo e miúdo do concreto CR60 (Ver Figura A.5).

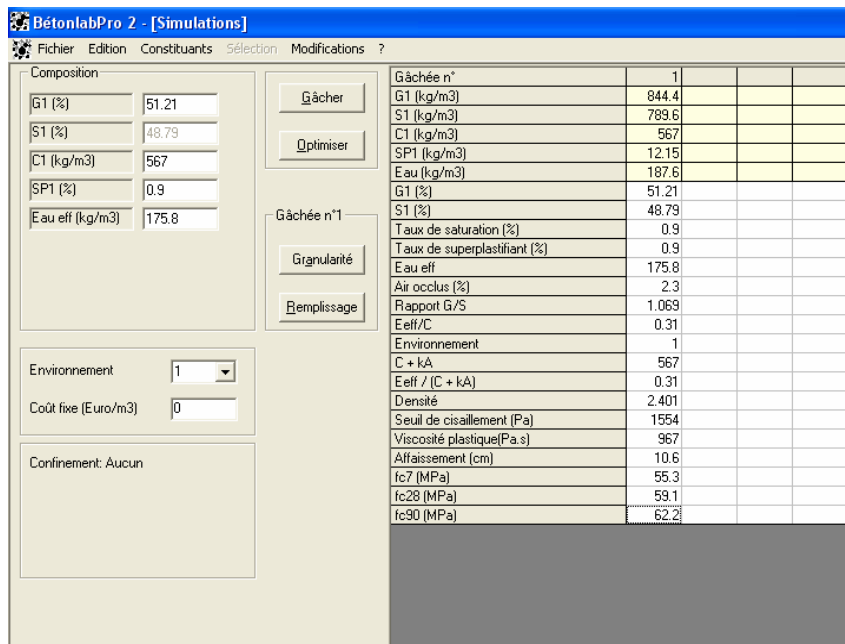


Figura A.5: Propriedades obtidas para o concreto CR60.

ANEXO B: ATAQUE POR SULFATOS

Neste anexo serão apresentados os resultados preliminares das amostras de referência e com CLE1, nos teores de 5% e 10%, em substituição parcial ao cimento Portland, submetidas ao ataque por sulfatos.

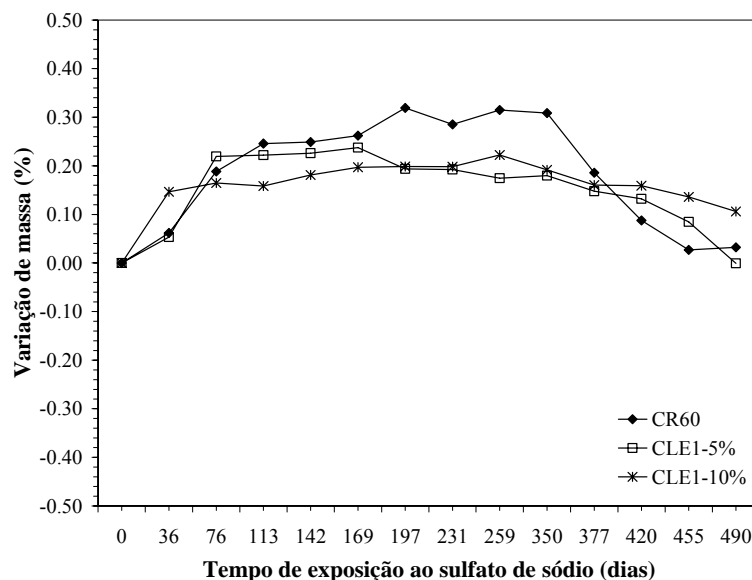


Figura B.1: Média da variação de massa das misturas CR60, CLE1-5% e CLE1-10% expostas ao sulfato de sódio.

Avaliando a perda de massa das misturas, verifica-se que, após 490 dias submetidas à solução de sulfato de sódio, as misturas ganharam massa até, aproximadamente, 260 dias. Após esse período, as mesmas começaram a perder massa, sinal do início do processo de desintegração e, aos 490 dias, apresentaram valores de massa praticamente igual à massa do início do ensaio. Os acréscimos máximos de massa obtidos foram de 0,32%, aos 197 dias para a mistura CR60, 0,24% para a mistura CLE1-5%, aos 169 dias e 0,22%, aos 259 dias, para a mistura CLE1-10%.

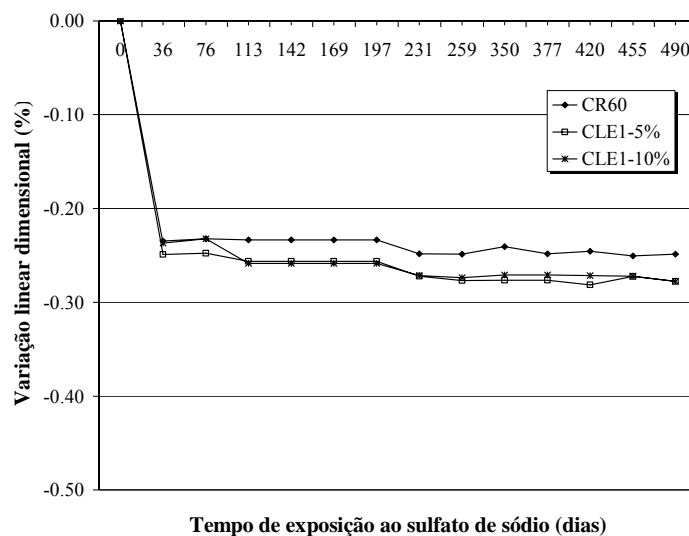


Figura B.2: Média da variação linear dimensional no tempo das misturas CR60, CLE1-5% e CLE1-10% expostas ao sulfato de sódio.

Os concretos de referência, CLE1-5% e CLE1-10% retraíram ao serem expostos à solução de sulfato de sódio. Estas reduções foram de, respectivamente, 0,23%, 0,24% e 0,25%, aos 36 dias, onde ocorreu a 1ª troca de solução. A partir deste período, as misturas não apresentaram variações expressivas até os 490 dias.

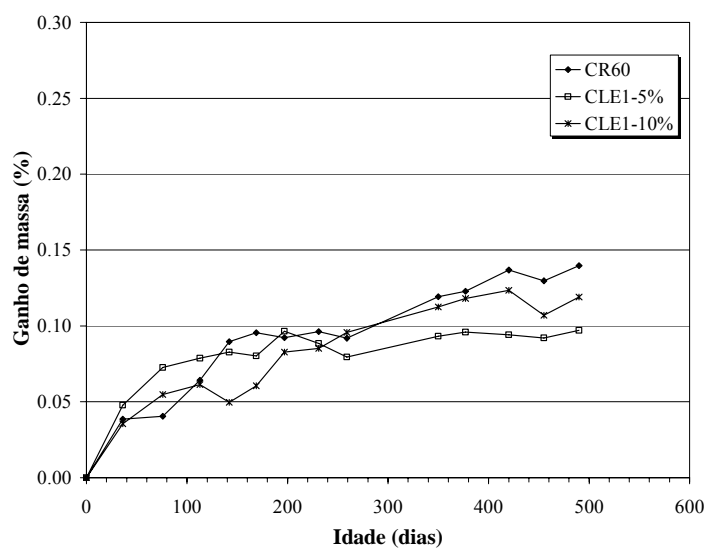


Figura B.3: Variação do ganho de massa no tempo das misturas expostas ao ataque por sulfato de sódio.

Com relação à variação de massa dessas amostras, verifica-se que há um ganho contínuo de massa até os 490 dias. Sendo estes acréscimos de 0,14% para CR60, 0,12% para CLE1-5% e 0,12% para a CLE1-10%. Isto é um indicativo de que as misturas até a referida idade, ainda não entraram em processo de deterioração.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)